

# コンクリート構造物のサステナビリティ設計の 提案とその適用に関する研究

柴 田 敏 雄

# コンクリート構造物のサステナビリティ設計の 提案とその適用に関する研究

2018 年 3 月

柴 田 敏 雄

# 目 次

第 1 章 序論-----	1
1. 1. インフラへのサステナビリティの考え導入の必要性-----	1
1. 2. 本論文の内容-----	6
Part1 : コンクリート技術・設計法の発展とサステナビリティの動向-----	9
第 2 章 コンクリート構造物の設計法の変遷-----	10
2. 1. 概 要-----	10
2. 2. 経験則から許容応力度法による設計へ-----	10
2. 3. 限界状態設計法と信頼性設計法の登場-----	12
2. 4. 性能設計法への移行-----	15
2. 5. 次世代の設計体系-----	16
2. 6. まとめ-----	20
第 3 章 サステナビリティのルーツとそれに基づく規格・規準などの動向-----	22
3. 1. 概 要-----	22
3. 2. 規格・規準類におけるサステナビリティへの取組み-----	22
3. 2. 1. ISO サステナビリティ関連規格-----	23
3. 2. 1. fib Model Code-----	28
3. 2. 3. ACI Building Code-----	29
3. 2. 4. 土木学会-----	30
3. 2. 5. 建築学会-----	31
3. 3. 環境評価ツールの開発-----	31
3. 3. 1. 建築物の環境影響評価ツール-----	31
3. 3. 2. 土木構造物の環境影響評価ツール-----	36
3. 4. 国土交通省・環境行動計画-----	39
3. 5. まとめ-----	43
第 4 章 結論 (Part1)-----	48
Part2 : コンクリート構造物のサステナビリティ設計の提案とその適用-----	50
第 5 章 サステナビリティ設計の提案-----	51

5.1. 概説-----	51
5.2. 建 0000 設分野へのサステナビリティ思考の導入-----	51
5.3. 新しい設計体系の必要性-----	55
5.4. Strucrural Sastainability のとらえ方-----	56
5.5. サステナビリティ設計の提案-----	57
5.5.1. 現在の設計法-----	57
5.5.2. サステナビリティ設計の枠組み-----	58
5.5.3. サステナビリティ要素の相互関係に関する数値計算例-----	62
5.6. まとめ-----	65
 第 6 章 サステナビリティ設計の PC 高架橋への適用-----	67
6.1. 概要-----	67
6.2. 対象橋梁と基本情報-----	67
6.3. サステナビリティ設計の適用-----	68
6.3.1. 評価指標の抽出-----	68
6.3.2. 要求性能の設定-----	71
6.3.3. 技術的検討-----	73
6.3.4. 保持性能の算定及び照査-----	76
6.4. 総合評価-----	84
6.5. まとめ-----	86
 第 7 章 サステイナビリティ設計のバタフライウェブ橋への適用-----	88
7.1. 概要-----	88
7.2. バタフライウェブ橋の開発の背景-----	88
7.3. バタフライウェブ橋の概要-----	89
7.3.1. バタフライウェブ構造の概念-----	89
7.3.2. 数値解析と実験による検証-----	90
7.3.3. 設計手法の構築-----	92
7.3.4. 工場におけるパネルの製作方法-----	92
7.3.5. 架設方法の開発-----	93
7.3.6. 高強度繊維補強コンクリートの開発-----	94
7.4. バタフライウェブ橋の実橋への適用-----	94
7.5. サステナビリティ設計の適用-----	98
7.5.1. 評価指標の抽出-----	98
7.5.2. 要求性能の設定-----	100

7.5.3. 技術的検討-----	100
7.5.4. 保持性能の算定及び照査-----	102
7.5.5. 総合評価-----	110
7.6. まとめ-----	111
第 8 章 サステナビリティ設計による技術革新-----	113
8.1. 技術革新の方向性-----	113
8.2. サステナビリティ設計を踏まえた技術開発アプローチ-----	114
8.3. 技術革新の事例に基づく課題の抽出-----	116
8.3.1. 橋脚の急速施工技術開発の経緯-----	116
8.3.2. ハーフプレキャスト部材を適用した橋脚の急速施工-----	117
8.3.3. 急速施工による省人化効果-----	119
8.3.4. 技術開発の効果-----	119
8.3.5. サステナビリティの観点による課題の抽出-----	119
8.4. まとめ-----	121
第 9 章 結論 (Part2) と今後の課題-----	123
9.1. 結論 (Part2)-----	123
9.2. 今後の課題-----	124
謝辞-----	126

# 第1章 序論

## 1.1. インフラへのサステナビリティの考え導入の必要性<sup>1, 1)</sup>

近年、サステナビリティ(sustainability)という言葉が世間でも聞かれるようになってきた。直訳すると「持続可能性」であるが、多くの人はサステナビリティ＝地球温暖化などの環境問題、ととらえ、その本質的な意味は必ずしも理解されていないと思われる。

サステナビリティの本質を理解するために、東日本大震災について考えてみる。

構造物の設計における「安全性」や「使用性」に関する検討は、一定条件の下で相当程度合理的になされていると思われる。設計断面力・変形は、通常、作用外力を想定することで求めることができる。しかし、それらは、あくまで想定した作用に対する解に過ぎない。また、設計断面耐力や設計応答値も、用いる材料のばらつきや断面寸法の想定の下での結果に過ぎない。想定した作用外力が十分でなければ、構造物は破壊や崩壊に至る。したがって、我々は、地震被害を受けるたびに、想定する作用外力や構造詳細等を見直して安全性を高める対応を繰り返し行ってきた。東日本大震災は M9.0 の地震であった。この事実は、地球内部の動きを我々が適切に想定することには限界があることを示している。何故なら、構造物設計において作用外力を際限なく大きくすることは経済的にも環境負荷の観点からも現実的でないからである。

この地震で起きた様々な事象を社会、経済、環境のそれぞれの側面から整理してみる。<sup>1, 2)</sup>

### ①社会的側面

- ・二万人近くの人命が奪われた。
- ・多くの人々が住居を失い、あるいは放棄せざるを得なくなった
- ・多くの人々が放射線汚染地域から避難を余儀なくされた。
- ・多くのインフラや建物が使用できなくなった。

### ②経済的側面

- ・多くの人々が仕事を失い、サプライチェーンが崩壊した。
- ・地域の経済活動が崩壊し、自動車・電機部品供給がストップした。
- ・地域の復興、放射能汚染の除去に巨額の資金が必要となった。
- ・復興工事の早期大量発注により建設業界は潤った。

### ③環境的側面

- ・地殻変動で自然環境が変化した。
- ・膨大ながれきが発生した。
- ・防潮堤建設により、海岸線の美観が損なわれた。

- ・復興に膨大な資源とエネルギーが必要になった。
- ・広範囲にわたり、放射能汚染が生じた。

このように東日本大震災は、地域を崩壊させ、日本国にも深刻な影響を及ぼし、現在も様々な問題を引きづっている。地震発生から 7 年近くたった今も、海岸や河川堤防の復旧、住居を失った人々のための高台移転事業、復興道路をはじめとするインフラ整備は続けられており、被害がいかに大きかったかを物語っている。原子力発電所の損傷による放射能汚染は、周辺環境を負の遺産としてしまっただけでなく、多くの住民が長期にわたる避難生活を余儀なくされる。そして、現時点においても今後 30 年以上を要するであろうといわれる廃炉作業に、電力会社・ゼネコン・重工メーカーなどが多大な時間とマンパワーを割いて取り組んでいる。これは極めて大きな社会問題である。

このように、我々は東日本大震災から、インフラ・建築物が作用外力に対してどのような抵抗力を有しているかを表す安全性の余裕度が、地震に対する地域のサステナビリティに直結することを学んだ。原子力発電所について言えば、建屋の耐震設計は機能したが、周辺の電源設備が津波で破壊されて冷却水を送ることができなかったと説明されている。しかし、耐震設計の有効性は永遠に検証することはできないと思われる。それは、耐震性が水蒸気爆発の影響と区別できないからである。原子力建屋は、原子炉のメルtdownを想定していず、したがって水蒸気爆発が起きた場合の建屋の堅牢性の設計など望むべくもなかった。このように考えると、人類が工学的に想定していることには相当危うい側面を抱えていることに気付く。我々の耐震設計は機能しているとの主張の根拠は定かでない。たかだか 100 年にも満たない期間で積み上げられてきた工学には当然限界があるとする謙虚さを持つ必要がある。それが「新しい」工学を構築するための出発点である。

以上のように、東日本大震災は地域や日本のサステナビリティを揺るがす大災害であったわけで、この事実は、社会が持続可能であるためには、地震荷重に対して社会を構築しているインフラや建物が強靱である必要性を示している。「安心」な社会とは、社会のサステナビリティが確保されている社会である。つまり、我々が構築する社会は、社会、経済、環境の 3 つの要素がバランスする社会であるべきと考える。言い換えれば、サステナビリティは社会的側面、経済的側面、環境的側面の 3 つの要素から成り立つと定義できる。

ここで、地球温暖化について整理してみる。地球誕生以来、大気はそのほとんどが CO<sub>2</sub> で覆われていたが、炭素が様々な形で地中に固定されていく緩やかな炭素循環が起こっていた。炭素が生物体に固定される量と呼吸・分解によって大気に放出される量は釣り合っていたが、250 年前に起こった産業革命以降の化石燃料の大量消費、森林の

減少などにもない、二酸化炭素が大気中に残留することで温室効果を引起し、結果として気温を上昇させた、これが地球温暖化の原因と言われている。地球が誕生したのが 46 億年前、ホモサピエンスが現れたのが約 20 万年前であることを考えれば、この現象は地球の歴史の中ではつい最近のことと言える。太陽系で究極の温暖効果状態にあるのは金星で、その表面温度は 450℃、CO<sub>2</sub> 濃度は 95%を超えると言われている。地球の CO<sub>2</sub> 濃度は産業革命から 120ppm 程度増加したものの現在 400ppm 程度、平均気温が 15℃程度で絶妙な状態を保っている。しかしながら、気候候変動に関する政府間パネル(IPCC)<sup>1.3)</sup>の 5 次報告書によると、1973 年に CO<sub>2</sub> 排出量が 160 億トン(人口 39 億人)であったものが、2013 年には 329 億トン(人口 71 億人)とこの 40 年間で倍増しており、「温暖化は明白であり、観測された多くのデータはかつてなかったもの」と報告されている。(ただし、2016 年からは世界の経済成長率が 3.1%の状態、CO<sub>2</sub> 排出量は横ばいとなっており、再生可能エネルギーの増加、燃費のいい車の利用などが要因としている)。同報告書では、今世紀中の表面気温の上昇を 2℃に抑えるには、2100 年の CO<sub>2</sub> 等価排出量を 450ppm 以下に、2050 年までに排出量を 2010 年比で 40~70%に削減し、2100 年までに排出レベルを実質的にゼロとする、すなわち、人間生活からの温暖化ガス排出量を植林などの人為的な吸収量でバランスさせる必要があるとしている。2015 年に COP21 で採択されたパリ協定ではこの考えを踏襲しているが、気温上昇を 2℃に抑えるには、今後総量で現在の年間排出量の 30 年分に当たる 1 兆トンに抑える必要があり、将来の人口増加を考えると、極めて高いハードルと言わざるを得ない。

一方、アメリカ海洋大気局(NOAA)の 2017 年報告書<sup>1.4)</sup>によると、1981 年から 2010 年の平均に対して地表温度は 0.5℃程度、海面温度は 0.4℃程度それぞれ上昇し、海面高さも 1993 年に比べ 82mm 上昇している。また、イギリスの BP の Energy Book<sup>1.5)</sup>によれば、2035 年までに GDP は 2 倍、石炭は急減して再生可能エネルギーは急増、CO<sub>2</sub> 増加量は急減速するが一層の施策が必要としている。このような状況を受け、世界主要国の中央銀行総裁などを参加メンバーしたタスクフォースが結成され、2017 年 6 月に「気候変動関連の財務情報開示」に関する最終報告書<sup>1.6)</sup>を発表した。本報告書では、気候変動が事業収支や資産に与える影響について企業は株主や顧客に対して開示すべきとしており、対象には金融機関に加え、素材、建設分野も含まれている。このように、今や気候変動に関して企業も知らない顔をして済まされる時代ではなくなってきた。

建設産業と温暖化ガスとの関係について整理してみる。建設産業で用いられる構造躯体の主要材料は、一般住宅で用いられる木材を除けば、コンクリートと鋼である。2015 年のセメント生産量は約 46 億トン<sup>1.7)</sup>で、セメント製造において排出される CO<sub>2</sub> は約 30 億トンになる。粗鋼の 2015 年の生産量は 16 億トン<sup>1.8)</sup>、建設産業での使用率を 70%と仮定すると製造に伴い排出される CO<sub>2</sub> 量は約 20 億トンとなり、セメントと鋼を合わせた素材製造過程で 50 億トンとなる。過去の建設プロジェクトの調査例<sup>1.9)</sup>か



ら素材製造と施工過程および輸送で発生する排出ガスの比を 7:3 と仮定すると、建設産業にかかわるものは 70 億トンとなり、2016 年の CO<sub>2</sub> 総排出量 330 億トン<sup>1.10)</sup>の 21% になる。これに建物の運用にかかわる部分を 20%と想定すると、少なく見ても総排出量の 40%以上となる 130 億トンが建設産業にかかわるものとなる。現在、セメントおよび粗鋼の約 8 割はアジアで生産されている。アジア諸国の経済成長は著しく、各国競ってインフラの整備を進めており、この先数十年は建設需要は増大すると見込まれる。建設計画の建設業の CO<sub>2</sub> 排出量の伸びを少なめに見積もって 40%と仮定すると 130 億トンとなり、総排出量の 56%に相当する。建設産業の温暖化ガス低減に対する責任は極めて重い。

コンクリートが地球で最も多く構造物に使用されるようになった理由は、主要材料が、地球に潤沢に存在する岩石と水、そしてこれも比較的賦存量が多い石灰石と粘土質を原料とするセメントからなることである。また、セメント製造のエネルギーは化石燃料の中で最も埋蔵量が多い石炭が用いられている。こうした建設材料製造に必要な資源環境が豊富に存在したことが、コンクリートの使用量を著しく増大させた。

人類は、食料確保における狩猟・採取から牧畜・農業への転換を実現できたことにより、人口を著しく増加させた。人口増加は、生産活動を高め、一層のインフラ整備が必要となり、インフラ整備は社会経済活動を効率化させ、そのことが資源消費をさらに増大させた。人類は、こうした「発展」を加速させてきた。地球人口のマジョリティを占める発展途上国では未だこうしたサイクルの初期段階にあると言っても過言ではない。一方、人類は、加速度的な資源消費の増加は人類の存続を脅かす負の影響が極めて大きいことに気が付き始めている。「持続可能な発展<sup>1.11)</sup>」が必要であり、将来世代にわたってニーズが満たされる状況を確保することの重要性を認識せざるを得ない状況に陥ったと言える。その結果、あらゆることにおいてサステナビリティ（持続可能性）を評価軸とする機運が高まった。

しかしながら、すべての産業の中で、最も資源・エネルギーを消費する建設関連分野では、このサステナビリティの考えは、まだ一般的には広まっていない。土木・建築構造物の建設は相当な歴史があるが、構造物の力学的な理論を用いた設計が実践されるようになったのは、それほど古くはなく、高々 1 世紀程度である。許容応力度設計法から、限界状態設計法、そして性能設計法へと設計概念は変化してきた。こうした変化は、材料の進化や、実験設備の高度化、そして計算技術の発展によるところが大きく、現在では、一般的なコンクリートであれば、相当複雑な構造物もその安全性について一応の確認はなされ、経時的な変化についてもある程度の把握が可能となった。ところが、地球人口は 70 億人を突破し、資源消費量の激増に加えて、先に述べたように化石燃料消費による地球温暖化が現実の問題となってきた。地球温暖化による気候変動

は、気温上昇だけでなく、局部的な集中豪雨などの発生を増大させおり、これらによる被害は甚大である。更に、地殻・マントルからなるプレートの移動に起因する地震の強さの不確実性を改めて痛感するようになってきた。これまで、東日本大震災のように数百キロ四方のプレートが破壊される地震現象はほとんど想定されていなかった。

東日本大震災がサステナビリティの本質を理解するうえで、我々に大きな教訓を与えたことは先に述べたが、構造設計に対しても、いくつかの課題を提起した。一つ目は、堅牢なインフラ・住宅・建物をもたなければ、地域社会のサステナビリティは確保できない、ということである。二つ目は、長期にわたる復興事業、高台移転の遅れによる住民帰還率の低下などから、強いばかりでなく早期に機能が回復できる強靱なインフラの必要性である。近年、「レジリエンス」という言葉が多用されている<sup>1, 12)</sup>。これは、もともと作用に対して復元することを意味するが、転じて、何が起ころうが人的被害も含む社会的被害を最小化して、地域社会・経済を迅速に回復させようという考え方であり、「しなやかさ」や「強靱さ」を表す用語となっている。しかし、レジリエンスをどのような考え方、技術、及び仕組みで実現するかに注力しない「強靱化論」は意味がない。勿論、絶対安全はない。建設行為や建設物の利用が地球温暖化に影響していることを考えれば、その原因を踏まえた設計体系でなければならない。建設コストとその便益のバランスにも配慮すべきである。三つ目が地震などの外力に対してどの程度の冗長性を見込むか、という問題である。地震作用は構造物の安全性に大きく影響するため、構造物の設計上の安全度の余裕に応じて構造物の損傷は大きく異なるだけでなく、建設コストに直接影響する。地震作用によるインフラ・建築物の破壊は、大量のがれき等を発生させるだけでなく、復興に新たな資源・エネルギー消費を余儀なくされることは言うまでもない。また、冗長性の増大は、コストアップだけでなく、資源やエネルギーの使用量の増加に伴い、環境負荷の増大も引き起こす。逆に冗長性を低減させると、環境負荷は低減されるが、想定を超える作用に対する安全性は低下する。地震などの外力に対して、どの程度の安全性の余裕度を設ければいいのか、大きな問題を投げかけられたわけである。より合理的にインフラ・建築物の建設を行うためには、従来の思考範囲を超える要求性能を考慮した新たな設計の枠組みを創る必要がある、換言すれば多様で豊かな地球環境が存続することを最も重要な価値基準とした、構造物の設計体系を構築することが求められる時代となった。

近年、構造物の長寿命化が大きな社会的課題となっているが、長寿命化の本質についての客観的な議論が少ない。実際、鋼であろうとコンクリートであろうと、我々は実際の構造物でその建設後 50 年、100 年の間に何が起こるかについての十分な経験がない。加えて、長寿命化の意味も漠然としており設計体系の中でも具体的な位置づけがなされておらず、更新のための明確な「判断基準」もない先進各国は、自ら適切に管理

できないほど大量のインフラを整備してきて、その持続性に新たな問題を抱えた。日本では、1960 年から半世紀以上に亘って、総額約 2500 兆円の建設投資を行ってきた。発展途上国は、これから先進国が経験してきた同じ道を歩む。また、地球規模で資源・エネルギーの枯渇や地球温暖化が深刻になっている中で、最も資源・エネルギーを消費する業界が、そうした要素を組み込んだ構造物の設計・維持体系を持たないことは、深刻な問題である。

人類と地球の持続可能性を評価、実現する総合指標が「サステナビリティ」である。これを構造物の設計に明示的に組み込むことが重要であり、本論文では、その体系を「サステナビリティ設計」と称する。

## 1.2. 本論文の内容

過去に我々が積み上げてきた設計・技術体系を、上述した視点を踏まえて検討し、今後、豊かな地球の保持と人類の健全な社会経済活動を実現する上で最も重要と思われる概念「サステナビリティ」を基軸とし、社会的側面、経済的側面、環境的側面を総合的に取り扱うコンクリート構造物の新たな設計の枠組み<sup>1.1)</sup>として、「サステナビリティ設計」を提案し、その feasibility を論じることを本論文の目的とした。

本論文は、大きく Part1、Part2 の二部構成とした。

Part1 は第 2 章から第 4 章で構成し、コンクリート技術・設計法の発展とサステナビリティの動向を調査しサステナビリティ設計の必要性を検証する。

第 2 章では、コンクリート構造物の設計法が許容応力度設計法から限界状態設計法へ、仕様規定型から性能照査型へ変遷してきた経緯を整理する。さまざまな視点で性能設計法の体系化が図られ、一定の進展が認められる状況にあるが、社会的側面、経済的側面、環境的側面を包括的に評価するサステナビリティの考え方を扱ったものにはなっていないことを明らかにする。

第 3 章では、国内外において、現在、主にコンクリートに関するサステナビリティ的な思考がどの程度まで、規格、基準類に取り込まれているか、環境設計についてどこまで言及されているかについて、包括的に調査する。

第 4 章では、第 2 章から第 3 章での考察を受け、「サステナビリティ設計」の必要性について取りまとめる。

Part2 では Part1 の考察結果を受け、サステナビリティ設計の枠組みを提案し、具体的なケーススタディを実施して、その適用性を検証する。

第 5 章では建設分野での近未来の設計法として「サステナビリティ設計」を提案し、具体的な設計フローならびに単純梁での数値計算例を示して、その実用性を検証

する。

第 6 章では山岳地域で建設されたプレストレストコンクリート高架橋のプロジェクトに対して、サステナビリティ設計の適用性について検討する。サステナビリティ設計で考慮すべき評価指標を抽出、それらについての要求性能を設定し、それらを満足すると思われる構造物諸元を仮定して保有性能を算定、要求性能が確保されるかどうかを照査する。さらに、一般的な工法との比較においてサステナビリティ要素間の関係について総合的な評価を行い、サステナビリティ設計の有効性を明らかにする。

第 7 章では、新しい構造形式と施工法の開発によって実現したバタフライウェブ橋について、具体的な施工事例を取り上げてサステナビリティ設計を適用し、「革新的」橋梁技術の優位性を定量的に評価することを試みる。

第 8 章では、第 6 章、第 7 章で述べた 2 ケースのサステナビリティ評価に加え、橋脚の急速施工技術を革新的な技術開発の成功事例として取り上げ、サステナビリティ設計と技術革新の関連について検証した。構造形式や施工法の革新を図ることで、安全度の余裕度を増加させても、コストや環境負荷を標準的なもの以下に抑えることが可能であること、言い換えれば、サステナビリティ思考が技術革新を呼び起こすということを示す。

第 9 章では Part2 での結論とともに、サステナビリティ設計適用における今後の課題を示し、将来のコンクリート・建設分野のあるべき姿を考察する。

## ◎参考文献

- 1.1) K Sakai・T Shibata・A Kasuga・H Nakamura : Sustainability design of concrete structures、, Structural Concrete journal of the fib、, Volume 17 No.6, pp1114-1125、, 2016
- 1.2) 堺孝司：「講座」コンクリート関連産業におけるサステナビリティ①コンクリート関連産業にサステナビリティ思考を、コンクリート工学、Vol.55 , No.6, 2017.6
- 1.3) IPCC : Climate Change 2014, Synthesis Report
- 1.4) <http://www.noaa.gov/>
- 1.5) <https://www.bp.com/>
- 1.6) <https://sustainablejapan.jp/2017/06/29/tcfd-final-report/27274>
- 1.7) CEMBUREAU : Activity Report 2015
- 1.8) 日本鉄鋼連盟：【改訂版】worldsteel 銑鉄・粗鋼年間生産量・時系列表 2006～2015 年(PDF)
- 1.9) 堺孝司・小嶋克宏・草薙悟志・入谷祥王：交通渋滞交差点における鉄筋コンクリート地下道建設による環境便益評価に関する研究、土木学会論文集 G、Vol163, No. 1, pp40～50, 2007
- 1.10) 日本エネルギー経済研究所軽量分析ユニット(編集)：エネルギー経済統計要覧

2016, 2016. 3

1.11) The World Commission on Environment and Development: Our Common Future, Oxford University Press, 1987

1.12) 清水美香: 東日本大震災の教訓「レジリエンス」と災害マネジメントおよび公共政策の連関性、国際公共政策研究 16(2), 105-120, 2012-03

## Part1

# コンクリート技術・設計法の発展とサステイナビリティの動向

## 第 2 章 コンクリート構造物の設計法の変遷

### 2. 1. 概要

経験則から始まったコンクリート構造物の設計は許容応力度法として体系化され、長い間、幅広く実務に用いられた。その後、実験や解析技術の進化により、より厳密でかつ経済性を意識した設計法として限界状態設計法あるいは信頼性設計法が登場し、同時に仕様規定型の設計から性能設計型へ移行していく過程にある。性能設計への移行に伴い、これまで重要視していた安全性、使用性に対する評価だけでなく、環境に対する評価、耐久性ひいてはライフサイクルコストを総合的に評価した設計法が求められる状況になっている。本章では、堺らが執筆した「コンクリート構造物のサステナビリティ設計」<sup>2.1)</sup>の「第二章コンクリート構造物設計法の発展と系譜」を参照して、上述の設計法の変遷を整理するとともに、環境、耐久性ならびにライフサイクルコストなど安全性や使用性以外の要求性能に対して、現在の設計法や指針類がどこまで対応しているかを明らかにし、サステナビリティの観点から次世代の設計体系のあるべき姿を論ずる。

### 2. 2. 経験則から許容応力度法による設計へ

人類史上、コンクリートあるいはそれに類するものが初めて適用されたのはエジプトのピラミッドではないかと言われている。ピラミッドは主に石材を積み上げて構築されており、コンクリートが使用されたといっても、天然ポゾランを用いたモルタルを石材の目地にて使用されたに過ぎず、配合設計や構造解析を実施したうえで使用したとは考えられない。これ以降、さまざまな構造物が建設されてきたが、コンクリートが用いられた構造物の設計や施工は、主に技術者の経験や先人からの伝承に基づいたもので、理論的あるいは科学的に合理的な方法で構造体の性能が確認されてこなかったと推察される。ローマ時代、中世から近代へとコンクリートの技術が発展を遂げてきたことは紛れもない事実であるが、力学的根拠を持ってコンクリート構造が扱われるようになってからせいぜい 100 年程度と想定される。

我が国でのコンクリートの最初の適用であるとされているのは横須賀製鉄所第 1 号ドライドックであり、主に石材を積み上げたもので、背後あるいは目地にコンクリート(モルタル)が用いられている。当時我が国には大規模な構造物を設計する知識はまったくといいほどなかったため、フランス人技師 F.L. VERNY の知識に頼ったものと言われている<sup>2.2)</sup>。詳細は不明であるが、おそらく彼の経験と簡単な実験・検証等に基づく設計であったと推測されている。

時代の経過とともに、土木工学が体系化されて種々の取組みがなされた結果、20 世紀冒頭から設計法の制定が世界中で着手された。土木分野における理論に基づく系統だった最初の設計手法は、許容応力度設計法(allowable stress design)であったと考えられる。これは、構造物に発生する応力度が、その構造物を構成している材料の許容応力度を超えないように仕様・諸元を決定する設計手法である。

我が国においては、1912 年刊行の「鋼鉄道橋設計示方書」で鋼鉄道構造物の、1926 年に内務省が制定した「道路構造に関する細則案」で道路構造物の、また、1931 年刊行の「鉄筋コンクリート標準示方書」<sup>2,3)</sup>において鋼およびコンクリートの許容応力度が規定され、土木構造物の公的な設計基準として初めて現在にも通用する設計の基本的な考え方が示されるに至った。

土木学会として初めて制定された鉄筋コンクリート標準示方書(昭和 6 年版)では、「土木工学の発達に伴いコンクリートおよび鉄筋コンクリートを適用すべき機会が益々多からんとするに當り之が標準示方書を要望すること甚切なるものあり・・(漢字は現在の字体に変換)」との序文にあるように、コンクリートの品質、材料、配合、練混ぜ、打込み、養生等の材料および施工に関すること、応力の計算など設計に関すること、および試験方法に関する標準を示している。設計に関しては、曲げ応力あるいは曲げ応力と軸応力の合成応力の計算において、コンクリートの引張力を無視し、縦変形は断面の中立軸の距離に比例すると仮定してよい、との記述がある。いわゆる「平面保持の仮定」で現在でも鉄筋コンクリートの設計の基本となっている。また、計算に必要な鉄筋およびコンクリートの弾性係数が定められている。許容応力度の設定については、許容軸応力度は  $\sigma_{28}/4$  ( $\leq 50\text{kg/cm}^2$ )、許容曲げ応力度は  $\sigma_{28}/3$  ( $\leq 65\text{kg/cm}^2$ )、許容せん断応力度は  $4.5 \text{ kg/cm}^2$ 、許容付着応力度は  $5.5 \text{ kg/cm}^2$ 、および許容支圧応力度は  $\sigma_{28}/3.5$  ( $\leq 55\text{kg/cm}^2$ )と規定されている。また、鉄筋の許容応力度は圧縮と引張で同じ値の  $1200 \text{ kg/cm}^2$ である。さらに、これらの許容応力度は、地震の影響を考慮する場合には 1.5 倍まで割り増すことを認めている。これは、「大きな地震はそうたびたび起こるものではなく、まれに起こる地震に対しても同様の安全度を有するように構造物を設計することは経済上許されないことが多く、また普通の荷重に対するのと同じ許容応力度を使用すると断面が大きくなり、死荷重が増すことで一層地震の影響が大きくなることが起こり得るためである」、と解説で示されている。つまり、短い時間しか作用しない外力によって生じる応力の制限を緩和しても圧縮強度に比してまだ余裕があることを考慮し、経済的な観点から許容応力度を割り増している。

1949 年制定の標準示方書から、無筋コンクリートと鉄筋コンクリートがわかれて掲載された。また、許容応力度の設定の見直しが行われた。許容圧縮応力度に対する安全率 4 は、実験経過や各国の示方書を参照し、かつコンクリートの圧縮強度についての規定も考えて十分安全な値として選んだものであるとされている。また、鉄筋コンク



リートの設計に関しては、実験結果および過去の経験をもとに、構造物が受ける荷重、気象作用、温度変化、地耐力、地震力等に対応できるように、用いる材料、現場の施工技術の良否の程度等を考えて、許容応力度のほか鉄筋の間隔、かぶり等を定めることとしている。1956年の改訂では、許容応力度の値が大きくなった。鉄筋の許容応力度は、材質に応じて  $1400\text{kg/cm}^2$  または  $1600\text{kg/cm}^2$  と規定された。

建築物では1950年に建築基準法が制定された際に、許容応力度法による設計法が制度化された。また、米国では、最初に米国コンクリート学会 ACI の規格である ACI 318 Standard Building Regulations for the Use of Reinforced Concrete が 1910 年に発刊され、許容応力度の計算と実験により定まったルールに基づいた要求事項が規定されている。

### 2.3. 限界状態設計法と信頼性設計法の登場

構造物を設計するという行為は、荷重や環境等の物理的作用、化学的作用に対して構造物が要求される性能を満足していることを客観的かつ定量的に確認すること、と言える。この観点からすると、許容応力度設計法においては、部材の断面に発生する応力の制限値が、どのような性能を確保するためのものであるか明確となっていない。すなわち、許容応力度設計法は、単に構造物の安全性を一定水準以上に保つのに有効であるものと言えられる。

許容応力度設計法の適用にあたっては、新たな問題が起きたり新しい現象が見られると、許容応力度自体を修正したり、あるいは割増し係数により修正することで都度見直しが行われてきた。一方、各種載荷試験が開発され、構造物の挙動がより詳細に把握されてきたことや、数値解析手法の発展により弾性域の力学特性のみならず材料の塑性域での挙動も次第に明らかとなり、材料や構造の非線形性を設計に反映できるようになってきた。非線形性を考慮してより合理的な設計が可能となるということは、経済的に構造物を建造するという社会的要請にも合致しており、新たな設計体系の検討がなされてきた。

許容応力度設計法の上述の欠点を克服し、非線形性も取り入れた設計の新たな枠組みとして限界状態設計法(limit state design)が登場した。限界状態設計法とは、構造物が保持していると期待される性能を所要の状態(その状態に達すると不都合さが急激に増加する状態=限界状態)において照査する方法で、この限界状態に到達しないことを客観的かつ定量的に評価する設計法である。限界状態設計法は特にコンクリート構造物で多くの利点が期待されたため、1989年制定のコンクリート標準示方書で初めて従来の許容応力度設計法に代わる方法として規定され、現在も変わっていない。

米国や欧州の規格でも限界状態設計法が採用されてきた。米国の ACI318 において初

めて限界状態設計の考え方が登場したのは 1963 年改訂版で、1971 年に許容応力度による方法は完全に削除され、現在に至っている。ヨーロッパでは終局強度法が採用され、耐力と外力による応力との比較で照査する方法が導入された。1978 年制定の CEB-FIP Model Code for Concrete Structures に初めて部分係数法による限界状態設計法の記述が見受けられる。その後、米国では 1973 年 AASTHO に荷重係数設計法、その後に荷重抵抗設計法 (LRFD) が導入された。カナダのオンタリオ州では 1979 年 OHBD に、イギリスでは 1982 年 BS5400 に、ドイツでは 1986 年 DIN18800 に限界状態設計法が導入された。これらの世界情勢を踏まえ、日本でも限界状態設計法の検討が学会や各種協会で行われ、検討結果を踏まえて本格的に導入され各設計基準に採用されてきた。

許容応力度設計法は、材料強度の降伏点に対して何がしかの安全率を考慮し許容応力度を定めており、限界状態設計法の 1 つの状態であるとも言える。つまり、許容応力度という 1 つの項目だけを照査しておけば、終局状態に対する安全性と使用状態に対する使用性の両方ともを満たすものと考えてきたわけである。一方、経済設計に対する社会的要請が高まっている現在、材料を高強度化したり、あるいは新しい材料を使用するなど、それぞれの目的に合った材料の改良、開発が行われている。そのため、構造物の安全性と使用性を 1 つの項目である許容応力度だけで評価することには無理が生じてきた。限界状態設計法は、このような不都合さを克服することができる設計法と言える。

ここで、安全性照査に対して許容応力度設計法と限界状態設計法の意味を比較し、改めて両設計法の特徴を論じる。両設計法の安全性の照査フローの比較を図-2.1. に示す。前述したように、許容応力度設計法では材料強度を安全率で除して許容応力度 ( $\sigma a$ ) を定め、次式に示す材料に生じる作用応力度 ( $\sigma$ ) がこれを超えないことを照査する方法であり、安全性のマージン (安全率) はすべて許容応力度の設定に集約されている。

$$\sigma \leq \sigma a \quad (2.1)$$

つまり、安全性のマージン (安全率) はすべて許容応力度の設定に集約されている。

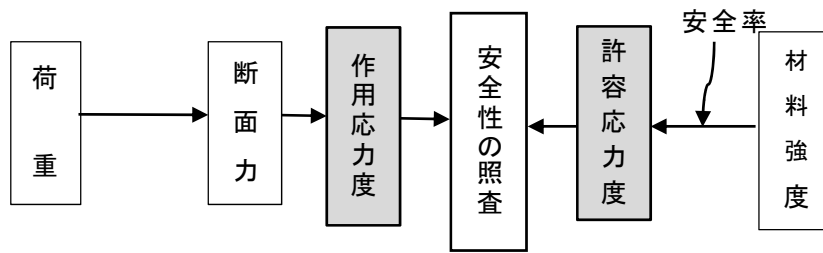
一方、限界状態設計法は、次式に示すように断面力と断面耐力とを直接比較し、断面力が断面耐力を超えないことを照査する方法である。

$$\gamma_i S_d \leq R_d \quad (2.2)$$

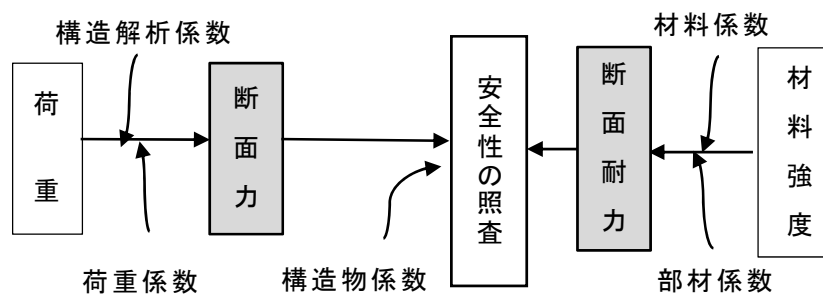
ここで、 $S_d$  : 設計断面力、 $R_d$  : 設計断面力、 $\gamma_i$  : 構造物係数

この際、種々の設計パラメータの信頼度に応じた個別の部分安全係数を設定できることが特徴である。土木学会コンクリート標準示方書では、作用荷重から断面力を求める際に荷重のばらつきを考慮する荷重係数、構造解析の精度を考慮する構造解析係数、さらに材料強度から断面耐力を求める際に材料強度のばらつきを考慮する材料係数、断面耐力算定式の精度を考慮する部材係数が規定されている。さらに、最終的な安

全性の余裕度を考慮するために、構造物係数が規定され、5つの部分安全係数が導入されている。



(a) 許容応力度設計法



(b) 限界状態設計法

図-2.1 許容応力度設計法と限界状態設計法の安全性照査フロー

次に信頼性設計法について述べる。信頼性設計法は、材料、外力のばらつきを考慮して統計関数に置換え、性能関数(抵抗力-外力)から破壊確率を計算する設計手法である。この手法において、直接的に破壊確率を計算せず、複数の部分安全係数で代用するのが現在の限界状態設計法の元になっている。信頼性設計法は合理的な設計法として以前から研究が進められてきたが、計算の理念がなかなか技術者に理解されてこなかったこと、確率関数の計算の煩雑さなどで実際の設計にはあまり採用されてこなかった経緯があるが、性能設計法への転換に伴い、最近では用いられるようになってきた。

信頼性設計法とは、「安全性、使用性、耐久性等の機能(性能)を支障なく遂行する度合い(=信頼性)がある合理的な水準以上に保てるように、確率統計理論を何らかの形で取り入れて行う設計」である。信頼性理論は土木構造物の理論としてすでに1920年代には現れ、1950年代になると制御工学、品質管理工学などの分野でその必要性から研究開発され、体系化されていった。その後、構造物の設計理論へとフィードバックされ、今日の信頼性設計法に至っている。

信頼性設計における構造物の設計の基本式は、次式で表される。

$$g(x, t) = 0 \quad (2.3)$$

ここで、 $g$ :設計関数、 $x$ :基本パラメータ、 $t$ :時間

構造物や部材の破壊などの不具合が起きる確率を  $P_f$  として求めることができれば、

$P_f$ が目標値  $P_{fs}$ を下回るようにすることで、所要の安全率を有する設計ができることになる。目的関数は式 (2.4) となり、

$$P_f \leq P_{fs} \quad (2.4)$$

次式から、 $\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$  で表される信頼性指標  $\beta$  を定めて行う設計が信頼性設計法ということになる (図-2.2)。

$$P_f = P[g(x < 0)] \quad (2.5)$$

ここで、 $\Phi^{-1}$  は正規分布の逆関数で、各設計パラメータの確率分布が求められれば、有用な設計法となり得るものである。しかし、それは現段階では難しいので、あらかじめ確率分布形を仮定して得られたパラメータごとの安全係数、つまり部分安全係数に置き換えて設計に用いているのが現状である。

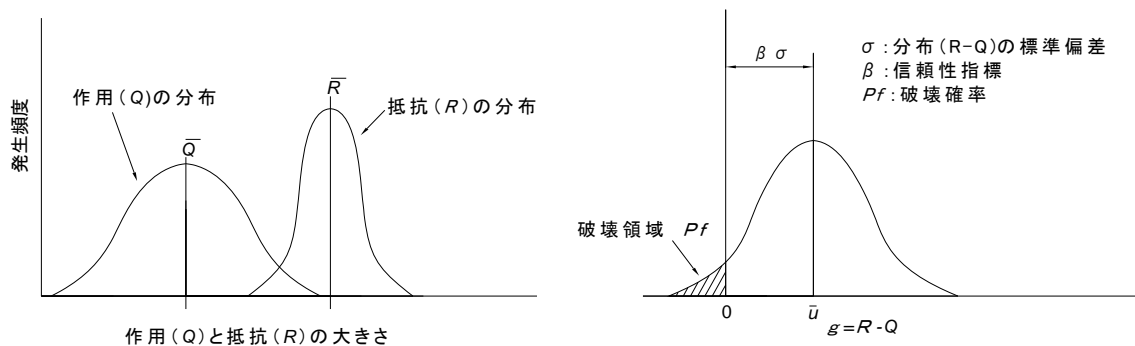


図-2.2. 確率的アプローチと信頼性指標  $\beta$

## 2.4. 性能設計法への移行

これまでの設計基準は、設計計算式、材料、規格値などが決められた条件において、遵守義務のある法律的な背景の下、結果の妥当性がチェックされる方法、すなわち仕様設計法で行われてきた。仕様設計法は、発注側の国、地方公共団体、今は多くが民営化している公団が制定し、大量に急速に施設を整備する場合には非常に有効であった。しかし、新しい考え方で生み出された施設や新材料の採用には相応しい設計法とは言えず、多様なユーザーからの要望に応えることができない。また、民間での技術開発の成果を仕様設計法に反映させることは容易でない。こうしたことから、より合理的な施設の整備や、そのために必要な構造設計法が求められるようになってきた。このような背景により、性能設計法への転換の機運が高まった。国際標準化機構 (ISO) での国際規格の制定作業の進展に伴い、1986 年に発刊された ISO2394 にみられるように、構造物の建設目的、要求性能を明示し信頼性理論を基本とした限界状態設計法での性能設計法が前節で述べたように採用されるようになってきた。

一方、性能設計法とは、「構造物の設計において、設計目的 (構造物に必要とする性

能)を明確にしたうえで、材料、構造形式・寸法等の仮定した構造諸元がその必要性能を満足することを直接的に確認する(性能照査する)形式の設計体系」と言える。これは、設計基準(規定)の形式によって分類した場合の用語である。これに対して、「仕様規定型設計法(あるいは仕様設計法)」で、基準等で定められた仕様基準を満足することを確認する形式の設計体系であり、必要とする性能を満足することの確認は、間接的なものとなっている。

通常の限界状態設計法では、その限界状態を規定して、その規定を満足するように設計を行う。この限界状態を性能とみなせば、限界状態設計法と性能設計両者に大きな違いはないことになる。ただし、性能という言葉には限界状態以外の条件も含まれるため、性能設計の方がより広い概念を含んでいる。このように、「要求される性能」を「その性能が損なわれることになる好ましくない状態である限界状態」に置き換えて対応させることができれば、両者の設計で意図することは同じである。こうした意味において、限界状態設計法は性能設計法の一つであり、性能を設定するという概念そのものが性能設計法と言える。

## 2.5. 次世代の設計体系

### ①性能設計法採用の流れ

性能設計法においては、規定した性能を満足すれば、今までにない新たな考え方に基づく斬新な構造物を設計することができる。この点では、設計の自由度は大きくなり、技術イノベーションを促進する可能性に満ちた設計法と言える。ただし、実際の設計においては、必要な性能をどのように設定し、その性能を保証するためにどのような手順・方法が必要であるか、性能を満足するのみではなく設計の合理性あるいは最適性をどう担保するか等、種々の要件を満足しなければならないことは言うまでもない。

設計の目的は「施工および供用期間中に、その構造物が果たすべき機能を全うさせること」である。ところが、構造物を設計するという行為は、一般的に様々な不確定要因を持った状態で行われる。したがって、ある要因が不利な方向に働いたとしても、機能を全うしなくなることがほとんど起こらないように通常の使用状態では機能に十分余裕があるように設計されるバイアスが働く。しかし、この余裕を多く見込みすぎると不経済な設計となる。すなわち、設計には機能に対して余裕を見込むという点と経済性に配慮するという点とのトレードオフにある要求に対してバランスを図らなければならないという難題を常に背負っている。

構造物の性能の一つである耐久性に関する設計法について整理してみる。耐久性照査の一つの試みとして、1995年に土木学会コンクリート委員会が「コンクリート構造物の耐久設計指針(案)」<sup>2.4)</sup>を制定した。これは、コンクリート構造物を構成する各部

材において、耐久指数  $T_p$  が環境指数  $S_p$  以上であることを照査し、所要の耐久性を確保しようとするものである。ここに、環境指数  $S_p$  は環境条件の厳しさを考慮して与えられるポイントの総和である。一方、耐久指数  $T_p$  は設計作業・部材の形状・補強材の種類・補強材の詳細・設計図等に応じて与えられるポイントの総和である。これら 2 つの指数の大小関係で、構造物や部材に所要の耐久性があるかどうかを判断する。つまり、耐久性の良否に影響すると思われる各種要因にその重みに応じてポイントを設定している。現在は、材料品質の特性値に応じて耐久性を直接照査する体系となっているが、耐久性が問題となり始めた時期において、このようなポイント制による耐久性のみなし照査が提案されたものの、ポイントの数値的な意味が明確でなく、その後の展開は成されなかった。

その後、土木学会が 1999 年に刊行した耐久性照査型のコンクリート標準示方書[施工編]において性能設計が世界で最初に具現化された。この示方書は、耐久性はコンクリートレベルではなく、構造物レベルで扱うべきものととらえているのが特徴で、コンクリート構造物の所要の性能が種々の劣化作用によって損なわれないための照査方法を規定した。たとえば、構造物の所要の性能がコンクリートの中性化あるいは塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食によって損なわれないことを照査する手法が示されている。中性化に対しては、鋼材に腐食が生じないレベルに抑えることとし、具体的には中性化深さの設計値の鋼材腐食発生限界深さに対する比に構造物係数を乗じた値が 1.0 以下であることを照査するとしている。また、塩化物イオンの侵入に対して、供用期間中に鋼材に腐食を発生させないレベルに抑えることとして、鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値の鋼材腐食発生限界濃度に対する比に構造物係数を乗じた値が 1.0 以下であることを照査することとしている。

各国・地域において設計法が進化してきたことは前述したとおりであるが、程度の相違はあれ、ほとんどの設計基準において性能設計法が採用される流れである。

## ②国際規格 ISO の動向

設計基準において規定すべきことを規定した国際規格として、ISO 19338 Performance and assessment requirements for design standards on structural concrete (構造物用コンクリートの設計標準のための性能および評価要求項)<sup>2, 5)</sup>がある。ISO/TC71 (国際標準化機構第 71 専門委員会:コンクリート、鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート)が 2007 年に制定し、その後 2014 年に改定されている。各国・地域の規格であるコンクリート構造物の設計基準が備えるべき性能や評価(照査)要求事項を示すものであり、ここでは、一般的な要求事項としての設計コンセプトや構造的一体性(Structural integrity)、設計供用年数、品質保証の方法等の規定が求められることをまず示し、要求性能とそれに対応する限界状態として安全・終局限

界状態、使用限界状態、復元限界状態、耐久性限界状態、耐火限界状態、疲労限界状態が取り上げられ、荷重や環境作用の規定とともに、部分安全係数法による照査が示されている。ただし、具体的な照査方法や耐力照査の前提となる構造細目の内容までは明記していない。つまり、仮に各設計規準の耐力算定式の精度が大きく異なるような場合には、同一形状の構造物であっても安全性の照査結果が異なるといった問題が生じることも起こり得る。

設計基準の最上位の概念を示すものとして ISO 2394 General Principles on reliability for structures（構造物の信頼性に関する一般原則）<sup>2.6)</sup> が1986年に ISO/TC98（構造物の設計の基本）によって制定され、2015年に第3版として改定されている。なお、2002年に国土交通省が「土木・建築にかかる設計の基本」<sup>2.7)</sup>をとりまとめたが、この ISO の考え方が大きく反映されたものであり、以降、国土交通省が所掌する設計基準において従うべきものとされている。

ISO 2394 では、構造物の設計に際して、局部的な破壊が構造システム全体に対して致命的な影響を及ぼすことなど、原因に対して不釣り合いに大きな被害を招くことないようにする（構造ロバスト性の確保：structural integrity requirement）といった概念を基本的要求事項で示している。2015年改定版では、要求条件が拡張され、「社会的機能を支え社会の持続的発展を高めるよう設計・維持管理され、そして解体されなければならないこと」が原則とされた。そして、ライフサイクルに配慮するとともに、社会とのかかわりや地球環境を強く意識してサステナビリティへの言及もなされた。リスクやロバストネス(Robustness)の概念が導入され、使用性、安全性、ロバストネスを適切な水準のリスクあるいは信頼性でもって満足されるべきものであると記されている。ここで定義されるロバストネスは、構造物の総合的な安全性の余裕度にかかわるものであると考えられるが、具体的な手法が提示されていないため、実施設計に適用させるのは必ずしも容易ではない。

### ③設計法とライフサイクルコスト

ライフサイクルコストに関しては、現在の設計では、構造物のライフサイクル（設計供用年数）を通じて最も経済的にその要求性能が確保できるように行うことを原則としているが、これは建前論であり、実際そうしたライフコストミニマムの設計が常になされているとは言い難い。また、性能設計に基づく構造物の設計および維持管理の検討は、経済的側面だけでなく、本来ライフサイクルにおける構造物の劣化等による環境負荷や社会への影響も考慮して行われなくてはならない。したがって、構造物の目標とする性能レベルは、安全性の余裕度とその余裕度を得るために費やすコストや環境負荷、および種々の社会的側面とのバランスから、条件に応じて適切に設定されるべきである。

#### ④設計法と環境評価

環境評価と設計法の関連について考えてみると、近年、環境評価を設計に取り入れた基準として ISO13315-4<sup>2,8)</sup>がある。2016 年に発刊された ISO13315-4 では、コンクリート構造物の環境設計を実施するための一般的な設計枠組みと基本原則を示した。コンクリートに係る環境影響を算定する際の合理的な共通ルールを与え、環境的側面を従来の設計体系に関連付けて導入、展開している。詳細は 3 章で述べるが、設計されたコンクリート構造が保有する環境性能が、クライアントの環境性能要件を満足するか照査することで、環境設計を実施することを規定している。

また、海外の基準においては、fib Model Code2010<sup>2,9)</sup>において、初めてサステナビリティの概念が登場した。そこでは、サステナビリティに関する要求性能として、環境への影響(impact on the environment, which is defined as the influence on the environment of the activities, from the design to disposal)と社会への影響(impact on society, which is defined as the influence on society of the activities from the design to disposal)の 2 点に言及されている。

上述した fib model code 2010 から 10 年後の発刊を目指して、現在、第 10 常置委員会(Commission 10)にて fib model code 2020 を策定中である。

#### ⑤次世代の設計体系に求められること

従来の構造物建設においては、経済性が非常に重要であった。一方、資源・エネルギー問題、地球温暖化などについては、従来の設計体系では観念的な取扱いしかなされず、これらを直接的に評価するようなレベルには達していない。しかし、地球温暖化等、これまでの人類の営みに起因する副作用が顕在化してきた現在においては、社会や地球の持続可能性を具体的に考えなければいけない状況になってきた。安全性という要求性能を考えると、これまでは先述のように、経済性重視の観点から、いわゆる安全率をできるだけ 1.0 に近づけるような成果が求められ、安全性の余裕度については十分な検討や議論がなされてこなかった。しかし、昨今世間を揺るがしているいわゆる想定外の事象が発生した場合に、安全性の余裕度の小さな構造物が、どのような状況に陥るのか明らかである。

したがって、今後は、維持管理も含めて、こうした新たな問題に対して、具体的に設計体系の中で扱わなければいけない事態に至っていると言いえる。このような状況への対応策の一つに、確率論を用いた信頼性設計法がある。しかし、確率論は、理想的で美しい体系であるが、すべての設計変数の確率分布を定める必要があり、残念ながらそれを可能とするまでのデータの蓄積がないのが現状である。また、確率論的アプローチの代表である部分安全係数法は、部分安全係数が確率的な考察を経て与えられているものの、設計のプロセスはきわめて確定論的なものに近い。



2017 年度に、道路橋示方書が改訂された。これまでの許容応力度設計法による仕様規定型から、性能規定型への大改訂となった。改定内容としては、設計供用期間を 100 年とすること、橋の性能として①耐荷性能、②耐久性能および③その他使用目的との適合性を達成するために必要な 3 つの性能を明確とし、それぞれに対する設計法を示したことが特筆すべき点である。耐荷性能の照査にあたっては、信頼性確保の手段として、不確実性への影響に対して「部分係数」が導入されたとともに、設計法が限界状態設計法(3 つの限界状態)となっている。この設計のスタイルは、昨今の国際標準となっている。なお、耐久性については疲労の照査や塩害についての鋼材応力度の照査、その他性能については、たわみの照査や落橋防止装置の応力照査など安全に対するフェールセーフなどの項目が対象となっているが、部分係数は適用されない。ここで導入される部分係数は、上述した通り確率論的な考察はされているものの、ある幅での定数として設計者が決めることとなる。

これまで述べたように、性能設計の体系が世に示されてから、耐久性、環境、ライフサイクルを踏まえた経済性など色々な視点から設計法の体系化が図られ、一定の進展が認められる状況にある。しかしながら、安全性を含む社会的側面、環境的側面、経済的側面の 3 つの側面から持続可能性を評価するサステナビリティの考え方を包括的に扱ったものではなく、これを達成する次世代の設計体系の構築が求められていると考える。

## 2.6. まとめ

- 1) 許容応力度設計法、限界状態設計法、信頼性設計法採用の流れとその概要について整理した。
- 2) 国内外の設計法の動向を整理した。仕様規定設計から性能設計への流れは国内外とも同様である。国内においても道路橋示方書が許容応力度設計法による仕様規定型から性能規定型へ大改訂された。設計供用期間を 100 年とし、①耐荷性能、②耐久性能および③その他使用目的との適合性を達成するために必要な 3 つの性能を明確としており、耐荷性能の照査にあたっては「部分係数」が導入され設計法は限界状態設計法となっている。この設計のスタイルは、昨今の国際標準となっている。このように、さまざまな視点で性能設計法の体系化が図られ、一定の進展が認められる状況にあるが、社会的側面の安全性の余裕度を確保しつつ、経済的側面、環境的側面も評価するサステナビリティの考え方を包括的に扱ったものではない。
- 3) 構造物の目標とする性能レベルは、安全性の余裕度とその余裕度を得るために費やす初期コスト、維持管理費や環境負荷、および種々の社会的側面とのバランスから、条件に応じて適切に設定されるべきである。昨今の想定外の事象や地球温暖化の進展を鑑みると、これを実現できる設計体系の構築が望まれる。

◎参考文献

- 2.1) 堺孝司、横田弘、コンクリート構造物のサステナビリティ設計、技法堂出版、2017
- 2.2) 徳川幕府の大いなる遺産・横須賀造船所. 横須賀の文化遺産を考える会、2004
- 2.3) 土木學會コンクリート調査會:昭和六年土木學會鐵筋コンクリート標準示方書、1931
- 2.4) 土木学会:コンクリート構造物の耐久設計指針(案)、コンクリートライブラリー82、1995
- 2.5) ISO 19338 : Performance and assessment requirements for design standards on structural concrete, 2014
- 2.6) ISO 2394 : General principles on reliability for structures, 2015
- 2.7) 国土交通省 : 土木・建築にかかる設計の本, 2002
- 2.8) ISO 13315-4:2017, Environmental management for concrete and concrete structures- Part 4: Environmental design of concrete structures
- 2.9) International Federation for Structural Concrete : fib Model Code for Concrete Structures 2010, 2013

## 第3章 サステナビリティのルーツとそれに基づく規格・規準などの動向

### 3.1. 概要

「サステナビリティ」(sustainability)とは、「持続可能性」または「持続することができる」という意味である。サステナビリティへの取り組みというとき、何を“持続する”のかというと、その対象は広く社会と地球環境全般を指し、もともとは、自然と共生する持続可能な社会システムを目指す環境保護思想のキーワードであった。国連の「環境と開発に関する世界委員会(The World Commission on Environment and Development)」が、1987年に公表した最終報告書<sup>3.1)</sup>(いわゆる Brundtland Report)に Sustainable Development(持続可能な発展)という理念を謳ったことから広く認知されるようになった。つまり、人類は加速度的な資源消費の増加は人類の存続を脅かす負の影響が極めて大きいことに気付き、持続可能な発展が必要であり、将来世代にわたってニーズが満たされる状況を確保することの重要性をはっきりと認識するに至った。その結果、あらゆることにおいてサステナビリティ(持続可能性)を評価軸とすることが必要となってきた。同報告書では、economic and social developmentのゴールはサステナビリティの観点から定めるべきと述べているが、サステナビリティ自体の明確な定義はされていない。ただし、サステナビリティは経済・社会システムと位置づけ、経済とエコロジーは統合されなければならないと述べられており、サステナビリティは社会、経済、環境の3つの要素から構成されると理解でき、正にサステナビリティのルーツと考えられている。更に、同報告書では、温室効果ガスの排出による温暖化に対しても、海面上昇による経済への影響を示唆しており、現在社会が抱える深刻な状況を30年前に的確に示した極めて優れた報告書と言える。

このサステナビリティの始まりから30年が経過しているが、その間、環境に配慮した設計法や基準類の制定など国内外で様々な取り組みがなされてきた。近年では、幸いにも、コンクリート構造物の環境設計についていくつかの重要かつ萌芽的な仕事が報告されている<sup>3.2), 3.3), 3.4), 3.5)</sup>。

本章では、主にコンクリートに関して、現在の環境に関する規準、規格類を国内外、土木、建築を問わず包括的に調査して整理する。環境に配慮した設計がどこまで実践されているか、更に社会・経済まで含んだサステナビリティ的な思考がどの程度まで基準類に取り込まれているかを明らかにして、現状の問題点を明確にすることを目的とする。

### 3.2. 規格・規準類におけるサステナビリティへの取り組み

### 3.2.1. ISO サステナビリティ関連規格

#### 3.2.1.1. ISO/TC207

1992 年の地球サミット前に創設された「持続可能な開発のための経済人会議（BCSD）」が国際標準化機構（ISO）に対して、環境についての国際規格の作成に取り組むよう要請を行った。これを受け、ISO/TC207 は、環境マネジメントシステムに関する国際規格 ISO 14000 ファミリーを策定し、1996 年から発行が開始された。ISO/TC207 の組織は、TC (Technical Committee: 専門委員会) の下に CAG (Chair's Advisory Group)、6 つの SC (Sub-Committee: 分科委員会) をもつ構造となっている。SC1 が制定・運用している規格を表-3.1. に示す。

表-3.1. ISO14000 シリーズ (SC1)

規格	内容	改訂	JIS
ISO 14001	環境マネジメントシステム—要求事項及び利用の手引	2015	JIS Q 14001
ISO 14004	環境マネジメントシステム—実施の一般指針	2016	JIS Q 14004
ISO 14005	環境マネジメントシステム—環境パフォーマンス評価の利用を含む、環境マネジメントシステムの段階的実施の指針	2010	JIS Q 14005
ISO 14006	環境マネジメントシステム—エコデザインの導入のための指針	2011	JIS Q 14006

ISO 14000 ファミリーが支援する環境マネジメントシステム (EMS: Environmental Management Systems) が満たさなければならない事項を定めた規格が ISO 14001<sup>3.6)</sup> である。企業、各種団体などの活動・製品およびサービスによって生じる環境への影響を持続的に改善するためのシステムを構築し、そのシステムを継続的に改善していく PDCA サイクルを構築することが要求されている。この中で、環境への負荷の低減、有益な環境影響の増大、組織の経営改善および環境経営が期待されている。ただし、環境パフォーマンスの評価に関する具体的な取決めはなく、自主的にできる範囲で評価を行うことになる。関連規格である ISO 14004<sup>3.7)</sup> は、ISO 14001 の適用にあたって組織がいかに環境マネジメントシステムを構築するか広義で詳細な事項が示された手引きであるが、拘束力はない。日本国内ではこれらに対応して、それぞれ日本工業規格 JIS Q 14001<sup>3.8)</sup>、JIS Q 14004<sup>3.9)</sup> が制定され、規格群中の他の規格も JIS 化が行われている。

#### 3.2.1.2. ISO/TC59/SC17

ISO/TC207 が開発した一般的な製品およびサービスを対象とした規格 ISO14000 シリーズは、建設分野に直接適用することは難しい。そのため、ISO/TC59/SC17 では、建設分野に適した環境マネジメントに関連する規格を開発し整備している<sup>3.10) 3.11)</sup>。2007 年には ISO21930<sup>3.12)</sup> を制定し建築製品として環境ラベルタイプⅢ (ISO14025<sup>3.13)</sup>) に適合する仕様と要件を規定した。環境ラベルタイプⅢとは、製品のライフサイクル全体

の定量的環境情報を公開する規格であり、消費者や使用者自らが環境に配慮した製品を選択し購入することができるシステムである。環境ラベルタイプⅢでは、第三者認証機関による審査制度を導入しており、高い客観性や透明性のある製品を提供する規格として期待されている。

ISO21930の制定後、建築物のサステナビリティの一般原則としてISO15392<sup>3.14)</sup>が、建築物の環境性能評価の枠組みとしてISO21931-1<sup>3.15)</sup>が、持続可能性の評価指標の開発のための枠組みと建築物のための主要な評価指標を示したISO 21929-1が、それぞれ2008年、2010年および2011年に制定された。建築物の計画、設計、建設および維持管理といった供用期間全体におけるライフサイクルアセスメントの導入が期待されたが、製品種別の具体的な定義、ライフサイクルアセスメントの目標値と具体的な範囲、インベントリーデータの基礎情報などが未整備であったため実務で展開するには至らなかった。

その後、ISO13315規格シリーズが2012年以降に制定されたのを皮切りに、ISO/TC59/SC17においても建築製品の特定品目だけではなく、土木事業を含めた建設業界全体に適用できる規格の整備に傾注した。2013年には、ISO / TR 21932<sup>3.16)</sup>を制定し建築物および土木事業における持続可能性の一般原則の適用に関するガイダンスを提供し、用語の見直しを行うとともに、ライフサイクルのすべての段階で持続可能性の考え方を検討し組込むことを提案した。

2017年には、ISO21930を改訂し、建築物および土木事業を対象とした評価指標とインベントリーデータ、ライフサイクル影響評価(LCIA)の結果を計算するためのルールを規定した。また、同年にはISO16745-1<sup>3.17)</sup>を制定し、建築物の運用中のエネルギー使用量と温室効果ガス排出量の計算方法を策定した。しかしながら、建設工事全般の持続可能性評価方法や枠組みの原則(ISO / DIS 21931-2<sup>3.18)</sup>)や持続可能な構造物のベンチマーク開発のための方法論的原則(ISO / NP 21678<sup>3.19)</sup>)などについては現在も審議中の段階にあり、ISO13315-4<sup>3.20)</sup>に規定するような環境性能設計の枠組みや定量的な評価手法を構築するまでには至っていない状況である。

### 3.2.1.3. ISO/TC71/SC8

ISO/TC71(コンクリート、鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート)の分科会としてSC8(コンクリートおよびコンクリート構造物の環境マネジメント)が2007年に設置され、コンクリート関連産業のための環境規格の開発を行っている。これは、ISO14000シリーズに基づいてコンクリート分野の環境負荷評価を行うことは容易ではないとの判断から、コンクリート関連産業の人々が誤解なく適切に環境負荷評価できるように、ISO13315規格シリーズとして日本が主導して活動を始めたものである。環境負荷を低減し、環境便益を生み出すためには、建設プロジェクトでもたらされた環

境影響評価を適切に見積もり管理することが不可欠である。特に、コンクリート構造物による環境負荷の評価は、設計段階から実施され、従来の構造設計と耐久性設計と一体となって考慮されなければならない。そのためには、環境設計の標準化が必要不可欠であり、コンクリート関連産業によるコンクリート関連産業のための環境ルールを構築する規格として表-3.2.に示すように ISO13315 シリーズは定められた。

表-3.2. ISO13315 規格シリーズの現状

	Contents	Status
Part1	General principles	発刊済(2012)
Part2	System boundary and inventory data	発刊済(2014)
Part3	Constituents and concrete production	原案検討中
Part4	Environmental design of concrete structures	発刊済(2016)
Part5	Execution of concrete structures	原案検討中
Part6	Use of concrete structures	CD として検討中
Part7	End of life phase including recycling of concrete Structures	未着手
Part8	Labels and declaration	DIS として検討中

ISO13315-1<sup>3.21)</sup>は 2012 年に発刊され、コンクリートおよびコンクリート構造に対する環境配慮の基本原則を規定した。ISO13315-2<sup>3.22)</sup>は、2014 年に発刊され、ライフサイクルアセスメント（以下、LCA）を実行するために必要なシステム境界およびインベントリデータを示した。その後、ISO13315-4 と ISO13315-8<sup>3.23)</sup>が審議に入り、2016 年に ISO13315-4 が先行して発刊された。ISO13315-4 では、コンクリート構造の環境設計を実施するための一般的な設計枠組みと基本原則を示し、コンクリートに係る環境影響を算定する際の合理的な共通ルールを与え、環境的側面を従来の設計体系に関連付けて導入、展開した。具体的には、図-3.1.に示すコンクリート構造の設計全体における環境設計を体系付けた。図-3.1 に示すとおり、環境設計にはクライアントによる環境性能要件の設定、設計、環境性能の算定、照査および文書化が規定されており、各ステップにおいて環境設計を行う具体的手法が以下の通り詳述されている。

#### 1) クライアントによる環境性能要件の設定

社会的、経済的側面を考慮したクライアントが指定する環境性能要件を設定する。LCC や歴史的背景などで設定されるプロジェクトごとの特定の環境性能要件を定める。環境性能要件は、インパクトカテゴリーからクライアントが指定する環境レベルを設定する。インパクトカテゴリーには、地球温暖化ガスや土壤汚染物質、廃棄物量および資源のリサイクル化率など関連法令や規則および顧客満足度に直接的に関連するように定量的な数値を示す必要がある。一方、景観や周辺環境との調和といった定性的な指標について言及する場合は、必要に応じてインパクトカテゴリーの指標を選択できる。

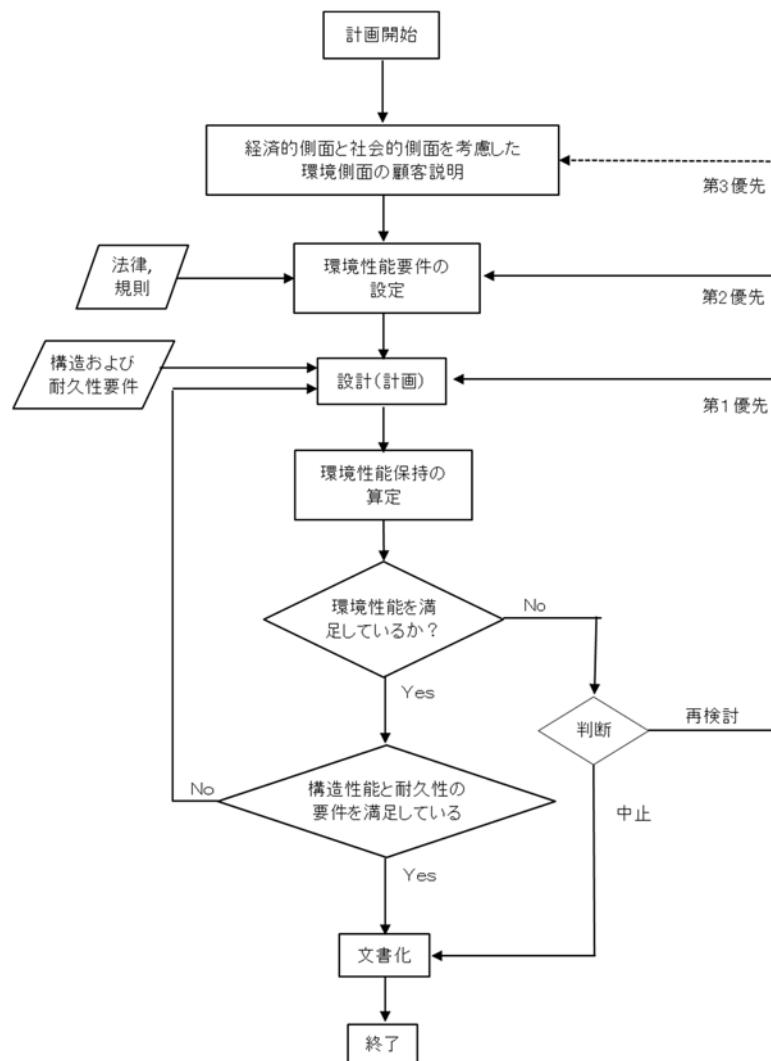


図-3.1. コンクリート構造物の環境設計フロー 3.20)

## 2) 設計

設計では、クライアントの環境性能要件として設定された環境側面を反映するため、プロジェクトで使用するコンクリート構造物の材料や混合率の詳細を算定する。その際、導入技術によって環境負荷を低減するといった間接的な影響についても配慮する必要がある。

## 3) 環境性能の算定

コンクリート構造物の環境性能を検証するため、適切なインベントリーデータを選択し推定する。LCAはISO 14040シリーズに準拠し、システム境界およびインベントリーデータはISO 13315-2に従って決定されるものとする。インベントリーデータが存在しない場合、過去測定され分析されたデータを使用しても良いとしている。また、社会科学的観点から定性的なデータを取扱う場合は、定量的に数値化するか適切な方法で推定に使用する。

#### 4) 照査

設計されたコンクリート構造が保有する環境性能が、クライアントの環境性能要件を満足するか照査する。照査により、クライアントの環境性能要件を満たすことが明らかにされた場合は、これらを文書化し環境設計を終了する。クライアントの環境性能要件を満たさない場合、「設計」ステップに戻り、コンクリート構造物の構造詳細や構成要素を見直す。しかし、再設計のトライアルにおいても環境性能要件を満足しない場合は、ディスカッションを通じてクライアントの環境性能要件を再考するステップに立返り見直す。なお、これらの環境設計フローに基づき環境性能を見直した結果、クライアントの環境性能要件を満足するのは不可能であると判断された場合、プロジェクト自体を中止できる。

#### 5) 文書化

プロジェクトの環境設計に関するすべての情報は、検証結果に関係なく記録され、保存されなければならない。プロジェクトが実行された場合、記録はコンクリート構造物の耐用期間にわたって所有者および設計者が保管するものとする。また、プロジェクトの環境設計に関する情報は、同種プロジェクトの計画に活用することが望ましい。

### 3.2.1.4. JIS の動向

JIS の動向について、現状を整理する。ISO/TC71/SC8 が 2007 年に承認され、その後 ISO13315 規格シリーズが 2012 年より制定され、コンクリート業界における環境影響を定量的に評価する世界共通のルールとして基準化され始めた。一方、日本国内では 2003 年に日本土木学会コンクリート委員会内に「環境側面検討部会」が設置され、「環境性能」の導入と要求性能を照査する体系を導入する状況であった。しかし、一部の理解が得られず、2005 年に「コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)」<sup>3, 24)</sup>として刊行された。実は ISO13315 規格の原案は「コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)」であり、結果的に逆輸入といった形で ISO13315 が JIS 化された。こうして基準化された JIS Q 13315-1<sup>3, 25)</sup>および JIS Q 13315-2<sup>3, 26)</sup>は、それぞれが ISO13315-1 と ISO1315-2 をもとに技術的内容や構成を変更することなく導入され、コンクリート及びコンクリート構造物に関する環境マネジメントの枠組みと基本原則として規定された。

過去、環境影響を算定する際の合理的な共通ルールが存在しなかったため、個々のプロジェクトの評価や判断が異なる方法によって比較されていた。しかし、ISO13315 規格シリーズが JIS 化されることにより、日本国内のコンクリート関連業界は、その事業活動による環境影響を定量的かつ透明性を有した評価とすることができるようになった。2003 年からおよそ 14 年という歳月を経て、初めて日本国内のコンクリート・建設産業に適した基準が制定された。



### 3.2.2. fib Model Code

#### 3.2.2.1. fib Model Code 2010

fib (federation international of beton) は、2013 年に fib Model Code 2010<sup>3, 27)</sup> を発刊した。この基準の特徴は、設計枠組として確率論を組み込んだ性能設計とし、要求性能は、安全性、使用性、及びサステナビリティの 3 つを基本としていることである。耐久性は、使用性の中で扱われることを明確にしている。これは、耐久性は使用性を確保するためのものであり、耐久性は安全性や使用性と同列に扱うべきものではなく、あくまで前提条件であることを初めて示したと言える。

表-3.3 に fib Model Code 2010 の目次の抜粋を示す。

表-3.3. 目次の抜粋 (fib Model Code 2010)

1	範囲	
2	専門用語	
3	基本原則	使用性、構造安全性、耐用年数、および信頼性に対する要求性能(性能標準、限界状態、ロバトネス、供用期間など)
		サステナビリティに関する要求性能(環境、社会)
		ライフサイクル・マネジメント
4	構造設計の原則	設計法(限界状態設計法)
5	材料	コンクリート、鉄筋、PC 鋼線、緊張システム、非鉄材料、繊維補強コンクリートなど
6.	界面特性	鉄筋の付着特性など
7.	設計	構造解析、静的荷重、温度荷重に対する安全性検証
		RC・PC 構造の使用性検証、ロバトネス・サステナビリティに対する検証など
8～	施工、維持、解体	

fib Model Code 2010 では、構造物設計基準の歴史で初めてサステナビリティを組み込んだ。サステナビリティ要素としては、環境側面と社会的側面を考慮し、経済的側面は扱わない構造となっている。サステナビリティに関する要求性能は、法律や、オーナーや仕様書作成者等の利害関係者の特別な意図、あるいは国際的な合意等に基づく意思決定者によって決定される。

環境に対する要求性能は、人間の健康、社会的資産、生物多様性、一次生産力に対する負荷をベースにして、大気・水・土壌汚染、有害物質、オゾン層破壊、地球温暖化、富栄養化、光化学スモッグ、土地利用、廃棄物排出、資源消費等が考えられる。これらの要求性能を得るために、材料選定、構造設計、施工法、利用法、維持管理法、解体・廃棄リサイクル法、エネルギー・資源消費、CO<sub>2</sub>・水汚染・土壌汚染・空気汚染、騒音・

振動、化学物質等の限界値を想定することになる。

社会的要求性能は多様である。この基準では一例として景観をあげ、要求性能としては構造物の美観、構造物と環境の調和などが考えられ、そのために適切な形状や各種構造諸元や色・テクスチャー・材料等を選択することになる。こうした要求性能を踏まえて諸事を仮定し、実際の性能が要求性能を満足するかどうかを照査することになる。要求性能と保持性能の照査の構造は、力学的な問題であれ、環境の問題であれ、すべて同じである。

fib Model Code 2010 は、サステナビリティを要求性能の一つとして位置付けて、サステナビリティの3つの要素（社会、経済、及び環境側面）についての包括的な扱いがなされていない。構造物の設計で最も重要なことは「安全性」の確保であることは論を待たない。社会のサステナビリティにおける社会的側面の一つの重要要素が安全性である。つまり、安全性はサステナビリティ設計における社会的側面の一検討要素である。このような観点から言えば、fib Model Code 2010 における設計の枠組みは不十分であり、今後サステナビリティ設計体系に再編することが求められる。当然ではあるが、安全性に関する個別の設計技術は何ら変わることはない。

### 3.2.2.2. fib Model Code 2020

上述した fib model code 2010 から10年後の発刊を目指して、現在、第10常置委員会(Commission 10)にて fib model code 2020<sup>3,28)</sup>を策定中である。現時点で、model code 2020 が目指すものは以下のとおりである。サステナビリティの包括的な取り扱いを謳っており、その実現が期待される。

- ・新設と既設構造物の両方を適用範囲とする一体化されたコード
- ・材料と構造に対する世界中の最新の知識を集約
- ・世界中の異なる地域の技術者集団の要請にこたえるもの
- ・一体化されたライフサイクルコストの概念
- ・社会性、環境性、経済性の3本柱よりなるサステナビリティの包括的な取扱い
- ・人間と環境を配慮した構造安全性、耐久性、使用性、他の社会的要請（美観、社会受容性、維持管理性など）

### 3.2.3. ACI Building Code

ACI (American Concrete Institute: アメリカコンクリート学会) は、多くのドキュメントを発刊しているが、最も重要なドキュメントの一つが ACI Building Code<sup>3,29)</sup>である。この基準の318-14版(2014年)の第4章において、構造系の要求として強度、使用性、及び耐久性に加えて、サステナビリティを初めて導入し、サステナビリティを要求性能として設定することを認めた。

しかし、2つの前提条件を置いた。その一つは、サステナビリティを要求性能として設定できるのは、然るべき資格を有する専門家に限定すること、もう一つは、強度、使用性、及び耐久性がサステナビリティに優先することである。前者における有資格者とは、資格制度 LEED<sup>3, 30)</sup>等を想定していると思われるが、具体的な記述はない。また、サステナビリティに関する具体的評価指標については何も述べられていない。LEED には様々な評価指標があるのでそれらを用いることができるが、コンクリートに関するものは極めて少ない。後者の条件は、取り立てて言う必要はないが、誤解を避けるために敢えて記述したものと思われる。このように、ACI が、コンクリート構造物の設計で、従来の設計の枠組みを拡張して、詳細はないものの、とにかくサステナビリティを考慮できるように重要基準を改定したことの意味は極めて大きい。しかし、fib Model Code 2010 におけるサステナビリティの枠組みと同様に、社会、経済及び環境側面の3つの要素についての包括的な扱いがなされていないことが問題である。

#### 3.2.4. 土木学会

土木学会では、コンクリート構造物を環境の観点から具体的に評価できるシステムの存在が社会基盤整備の意義を高めることに繋がるという背景に基づき、2005年11月に「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）」<sup>3, 24)</sup>を策定した。同指針（試案）は、コンクリート標準示方書の体系である性能照査型規定を「環境」にも拡張適用することを意図したものであり、コンクリート構造物の設計、施工、供用、維持管理、解体・廃棄や解体後の再利用を行う際の環境に対する一般を示したものである。コンクリート構造物の環境性の検討は、コンクリート構造物が環境に負荷を及ぼす影響の程度である環境性能を設定、評価し、要求される環境性能を満足していることを照査、検査することであり、同指針にはそれら一連の手法が明記されている。

同指針の付録資料には、環境側面への建設分野の取り組み状況、環境側面の関連法規類、およびコンクリート関連材料の環境負荷の現状、ならびに具体的な構造物における大気排出物量評価に関するケーススタディが整理されている。これらのケーススタディでは、ダム、RC ラーメン高架橋、PC 橋上部工、道路橋脚の建設を事例として、材料、施工方法、構造形式などに着目し、CO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、ばいじんの排出量に対する影響度合いについて、統合化手法（LIME ver. 2）による統合環境負荷量を用いて総合評価を行っている。なお、同指針で示された考え方は、その後の国際学会刊行物や ISO 規格にも反映されている。

一方、日本国内では「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）」はコンクリート標準示方書の改訂においては2007版では引用されたものの、一部の理解が得られず、2012版では姿を消すこととなった。

### 3.2.5. 建築学会

日本建築学会では、建築関連 5 団体の共同声明である「地球環境・建築憲章」（2000 年 6 月）の達成に向けて環境配慮への取組みを行っている。2004 年 4 月に「環境配慮型鉄筋コンクリート工事研究小委員会」が設置され、コンクリートの製造および鉄筋コンクリート造建築物の施工に特化した形で 4 年の検討が進められ、その活動成果として、2008 年 9 月に「鉄筋コンクリート造建築物の環境配慮施工指針（案）・同解説」<sup>3.31)</sup>を制定した。同指針（案）では、主に現場施工を中心とした鉄筋コンクリート工事に関わる環境配慮事項を示したものであり、鉄筋コンクリート造建築物の設計図書、鉄筋コンクリート工事計画書などに環境への配慮事項を盛り込む際に使用されることが想定されている。また、同指針では、鉄筋コンクリート造構造物そのものおよびその工事における環境影響の大きさに鑑み、関係者の理解が得られやすくすることを意図して、省資源型、省エネルギー型、環境負荷物低減型、長寿命型といった 4 つの型を提案し、環境配慮の目標となるように位置付けている。意図する環境配慮型の目標が達成できるように、材料選定、調合・部材設計、製造、施工等の仕様を定めることを基本方針としている。材料選定に関しては、セメント、骨材、練混ぜ水、混和材料等の各材料について環境配慮の型に対応した具体的な選定方法が示されている。調合・部材設計に関しては、設計図書に反映すべき環境配慮として、材料・調合、コンクリート強度、かぶり厚さ、およびプレキャスト工法の採用が示されている。製造に関しては、レディーミクストコンクリート工場の選定から受入れまでにおける環境配慮事項について示されている。施工に関しては、コンクリート工事・鉄筋工事・型枠工事における環境配慮事項について示されている。

同指針の付録には、5 つの環境配慮事例が紹介されており、各事例では、環境配慮によって環境負荷がどの程度低減されるかが定量的に算出されている。事例の 1 つでは、超高層鉄筋コンクリート造集合住宅にプレキャスト部材を適用した場合の環境負荷と在来工法（現場打ち）を用いた場合の環境負荷とを比較しており、プレキャスト部材の方が使用資材量や搬入・搬出車両が減少し、CO<sub>2</sub> 排出量を低減できることを定量的に確認できる。

### 3.3. 環境評価ツールの開発

国内外において、設計基準・規格類とは別に独立して取り扱われる形で、環境評価ツールが開発運用されている。ここでは、建築物、土木構造物に対して開発されている代表的な環境評価ツールについて調査する。

#### 3.3.1. 建築物の環境影響評価ツール

建築分野においては、様々な建築物の環境影響負荷の評価ツールが開発され、広く用いられている。ここでは現在よく使われていると思われる代表的な評価ツールであ

る LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)、BREEAM<sup>3.32)</sup> (Budding Research Establishment Environmental Assessment Method) 、CASBEE <sup>3.33)</sup> (Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency)の概要を示す。

### 3.3.1.1. LEED

LEED は、1993 年発足の米国グリーンビルディング協会(U.S.Green Building Council (USGBC))が開発し運用するエネルギー・環境設計評価システムで、グリーンビルディングの認証制度である。LEED の公式ウェブサイトによれば、“LEED グリーン建築物認証プログラムは、より良い環境・健康のための戦略を実施するプロジェクトを認証する一連の格付け制度を通して、持続可能なグリーン建築物の選択と開発実践を奨励・加速させる”ことを目指している。

LEED には、新しい建築物、既存の建築物、および運用・メンテナンスに関する評価システムがある。たとえば、LEED の New Construction / LEED v4 によれば、必須条件に加えて、評価項目およびそれぞれのポイントは以下のようなものである。

- ① 統合プロセス(1)
- ② 場所・交通(32)
- ③ 持続可能なサイト(4)
- ④ 水効率(11)
- ⑤ エネルギー・空気(33)
- ⑥ マテリアル・資源(13)
- ⑦ 室内環境質(16)
- ⑧ 革新(6)
- ⑨ 地域優先度(4)

この内、マテリアル・資源に関しては、再生利用可能物の収集・保管や建設・解体廃棄物管理プランの必須事項に加えて、以下のような項目とポイント(最大 13 ポイント)が与えられている。

- ① 建築物ライフサイクル負荷低減(5)
- ② 建築製品公表・最適化ー環境製品宣言(2)
- ③ 建築製品公表・最適化ー原料調達(2)
- ④ 建築製品公表・最適化ーマテリアル含有物(2)
- ⑤ 建設・解体廃棄物管理(2)

各項目の総得点により、有資格(40-49)、銀(50-59)、ゴールド(60-79)、プラチナ(80以上)の格付けが行われる。

LEED の認証を受けたグリーンビルに関しては、経済効果としてエネルギー削減、生

産性向上、稼働率向上、訴訟リスク低減などを実証したレポートが多く提出されている。また、LEED によるレーティングの高いビルが、市場価格にも反映されているという事例が多く聞かれるようになってきている。たとえば、McGraw-hill 2006 Smart Market Report においては、コストダウン比率が平均-8%~-9%、ビルディングの価格上昇率が平均 7.5%、ROI 改善率が平均 6.6%、テナント稼働の改善率が平均 3.5%、賃料上昇率平均 3%、それぞれ予測されているとの集計結果が紹介されている。2008 年 6 月から始まった米国の不動産鑑定協会 Appraisal Institute のグリーンビル鑑定評価セミナー” An Introduction to Valuing Green Buildings”においても、こうした経済効果を鑑定結果に反映させようとする考え方が紹介されている。

近年、米国では、州や市のレベルでも環境問題への対応が進んでいる。市からの補助金や融資を受けて新築あるいは改築を行う建物は、LEED の基準に従うことが求められるようになってきており、シアトル市などでは、市の施設は LEED のシルバーレベルをクリアすることが求められている。LEED 認証システムは強制されるものではないが、米国ではマーケットにおける環境保護への取り組みに対する評価基準の一つとなっている。

### 3.3.1.2. BREEAM

BREEAM は、英国の建築研究所(BRE: Building Research Establishment)が運用する建築物の評価システム(Environmental Assessment Method)のことである。1990 年に開発された世界初の建物の環境性能評価ツールであり、1996 年に誕生した米国の LEED より歴史は古い。イギリス国内で約 11 万棟以上のビルが、BREEAM の認証を取得しており、認証審査を待つ住宅およびビルは 75 万棟(登録件数)を超えている(2008 年時点)。イギリス国内では、BREEAM を高く評価することにより、不動産の転売、テナントの誘致、テナント料の設定などにおいて有利になるケースがあり、BREEAM の積極的な利用が進みつつある。BREEAM は、2005 年に東京で開催された World Sustainable Building Conference で世界のサステイナブルな取り組みを促進させ、他のプログラムに影響を与えたことが高く評価されベストプログラム賞を受賞した。

BREAM の公式ウェブサイトによれば、このツールは、顧客、建築物開発業者、設計者等に以下のことを提供することを目的に開発された。

- ① 低環境負荷建築物の市場認証
- ② 環境を実際に建築物へ組み込むことの自信
- ③ 環境負荷を最小化する革新的解決策を見つけるための刺激
- ④ 法律より高い基準
- ⑤ 運用コストを下げ、労働・生活環境を良くするツール
- ⑥ 会社や組織の環境目標に向けた進歩を示す標準

BREEAM の評価対象は、新しい建築物建設から建築物の使用・改修までを含み、評価領域はマネジメント、健康・安心、エネルギー、輸送、水、材料、廃棄物、土地利用と生態、汚染の 9 つである。

これらに関して細目があり、例えば、エネルギーでは、CO<sub>2</sub> 排出や低カーボン技術等の項目がある。各項目について取得可能なクレジットに対する達成クレジットの割合に、あらかじめ定められている重みを考慮して、スコア(%)を算出する。達成したスコアに応じて、不可 (<30)、可 (≥30)、良 (≥45)、優良 (≥55)、優秀 (≥70)、卓越 (≥85) の格付けを行う。

BRE は、英国以外の国・地域の建物の評価を対象とした BREEAM International という評価システムを開発している。海外の個別案件だけでなく、BRE の協力を得ながら特定の国・地域を対象にした評価システムの作成が可能である。BREEAM の認証を取得した英国以外の代表的な建物にはルクセンブルクにある欧州投資銀行、ブタペストのオフィスビル The Quadrum Northeast Campus などがある。

### 3.3.1.3. CASBEE

「CASBEE」(建築環境総合性能評価システム)は、建築物の環境性能で評価し格付けする手法である。省エネルギーや環境負荷の少ない資機材の使用といった環境配慮はもとより、室内の快適性や景観への配慮なども含めた建物の品質を総合的に評価するシステムである。基本ツールとしては、企画(PD)、新築(NC)、既存(EB)、改修(RN)がある。CASBEE は、2001 年 4 月に国土交通省住宅局の支援のもと産官学共同プロジェクトとして、建築物の総合的環境評価研究委員会を設立し、以降継続的に開発とメンテナンスを行っている。

CASBEE では、敷地境界等によって定義される「仮想境界」で区分された内外 2 つの

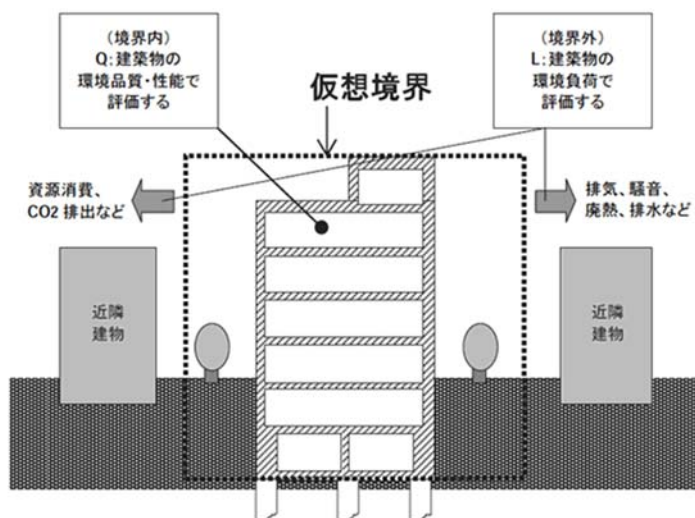


図-3.2. <仮想閉空間の概念に基づく「Q 建築物の環境品質」と「L 建築物の環境負荷」の評価分野の区分> <sup>3.33)</sup>

空間それぞれに関係する2つの要因、すなわち「仮想閉空間を越えてその外部（公的環境）に達する環境影響の負の側面=L（Load）、建築物の環境負荷」と「仮想閉空間内における建物ユーザーの生活アメニティの向上=Q（Quality）、建築物の環境品質」を同時に考慮し、建築物における総合的な環境性能評価のしくみを提案している（図-3.2）。

CASBEE で評価対象として選んだ4つの主要分野は、エネルギー消費、資源循環、地域環境、室内環境である。この4分野は、必ずしも同じ概念の評価項目を表現するものではなく、同列に扱うことが難しいため、評価項目の中身を整理して再構成している。その結果、評価項目はBEEの分子側Q（建築物の環境品質・性能）と分母側L（建築物の外部環境負荷）に分類された。そして、QはQ1：室内環境、Q2：サービス性能、Q3：室外環境（敷地内）の3項目に分けて評価し、Lは、L1：エネルギー、L2：資源・マテリアル、L3：敷地外環境の3項目で評価する（図-3.3）。

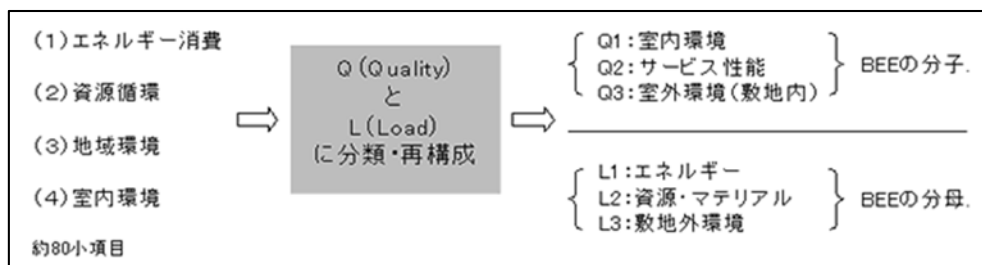


図-3.3. 評価項目のQ(建築物の環境品質)とL(建築物の環境負荷)による分類・再構成 <sup>3.33)</sup>

環境性能効率BEE（Built Environment Efficiency）とは、Q（建築物の環境品質）を分子として、L（建築物の環境負荷）を分母とする次式で算出される指標である。

$$BEE = Q / L \quad (3.1)$$

BEEを用いることにより、建築物の環境性能評価の結果をより簡潔・明確に示すことが可能になった。Qの値が横軸のLに対して縦軸にQがプロットされる時、グラフ上にBEE値の評価結果は原点(0,0)と結んだ直線の傾きとして表示される。Qの値が高く、Lの値が低いほど傾きが大きくなり、よりサステナブルな性向の建築物と評価できる。この手法では、傾きに従って分割される領域に基づいて、建築物の環境評価結果をランキングすることが可能になる。グラフ上では建築物の評価結果をBEE値が増加するにつれて、Cランク（劣っている）からB-ランク、B+ランク、Aランク、Sランク（大変優れている）としてランキングされる。

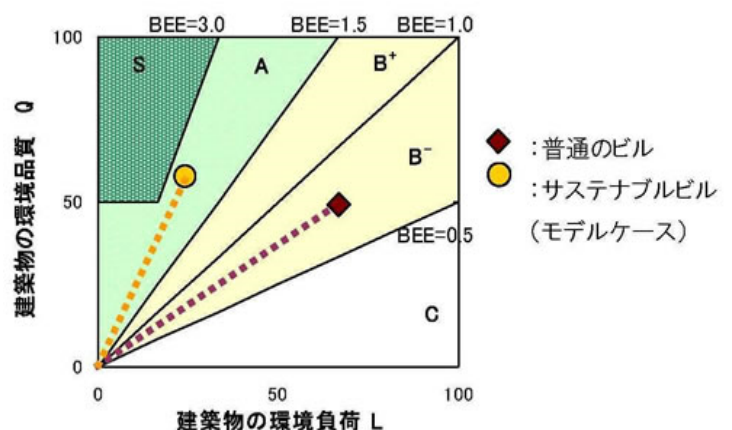


図-3.4. BEEに基づく環境ラベリング <sup>3.33)</sup>



### 3.3.2. 土木構造物の環境影響評価ツール

土木構造物を対象とした代表的な評価ツールとして、ENVISION<sup>3.34)</sup>や CEEQUAL<sup>3.35)</sup>について紹介する。何れも一般化しているとは言えず、それらの評価項目は建築物の場合と類似している。異なるのは、土木構造物の建設は自然改変が大きいので、それらにかかわるものを考慮しなければならない。

#### 3.3.2.1. ENVISION(米)

Envision システムは、ハーバード大学大学院デザイン学部の Zofnass Program<sup>3.36)</sup>と Institute for Sustainable Infrastructure (以下 ISI) との共同研究で開発された持続可能なインフラストラクチャー評価システムである。Zofnass Program は、インフラストラクチャーの持続可能性を数値化する方法やプロセスやツールを開発し、プロジェクトやシステムに対する持続可能なソリューションを知識的に体系付けて拡大することを目指している。2008 年に創設された比較的新しい研究チームで、ハーバード大学の教員と学生で構成されており、諮問委員会を通じて各業界専門家の協力によって Zofnass 評価システムが開発された。ISI は、米国公共工事協会 (APWA)、米国土木学会 (ASCE)、および米国工学会 (ACEC) によって設立された非営利教育研究機関で、社会がより持続可能なインフラプロジェクトを構築することを支援する団体である。両者は、共同研究の成果として Envision システムを開発した。Envision システムは、「生活の質(QL)」、「リーダーシップ(LD)」、「自然界(RA)」、「資源配分(NW)」および「気候変動(CR)」による災害リスクの 5 つのカテゴリーで持続可能なインフラストラクチャーを評価することを目的としている。

Envision システムでは、インフラストラクチャーの持続可能性評価システムに関する一連のリソースとツールを無償提供しており、プロジェクトの計画、設計、建設、維持管理を支援するとともに、そのプロジェクトから収集された情報のクリアリングハウスとして機能することを目指している。さらに、すべてのプロジェクトにおいて社会、環境および経済的側面を評価するための包括的なシステムを構築することを目指しており、プロジェクトの各段階で発注者、設計者、社会・環境団体、建設会社、関係省庁および政策立案者などが意思決定を行うための幅広い基準を整備することを念頭においている。それらの基準は、プロジェクトが社会や環境に及ぼす影響、材料やプロセスに関する技術的な要求性能、およびプロジェクトのライフサイクル全体にわたる重要な選択肢に対処しようとしている。

Envision システムは、インフラストラクチャーの比較的新しい持続可能性評価システムであり、現在進行中の研究でシステムとリソースを改善し続けているが、建築物の LEED 評価システムと目的や構造が類似している。一方で、Envision システムは持続可能なインフラプロジェクトを構想し、定量的で透明性のある枠組みを構築すること

を最終成果として捉えているため、様々な「ブラックボックス」を含む他評価システムとは異なる。また、プロジェクトの持続可能性を評価するためのイベントを開催し、プロジェクトの自己評価やサードパーティプロジェクトを用いたシステムの検証を行い公開している。Envision システムのユーザーは、専門的なトレーニングが利用できるとともに資格試験により Envision Sustainability Professional (ENV SP) を取得することができる。

昨今、Envision システムはプロジェクトの持続可能性を評価するための国家標準として広く受け入れられつつあり、欧米以外で初めて持続可能性の検証を目指す欧州初のインフラプロジェクトとしてトルコのイスタンブールの新空港プロジェクトが選定された。イスタンブール新空港は、2 基のターミナルと 6 つの滑走路を整備し、年間利用旅客数を約 2 億人で想定しており、350 以上の目的地まで運行する世界航空拠点の 1 つに名を連ねる。このプロジェクトの一環として Envision システムは採用されており、特に環境、生物多様性、地盤改良、地元雇用、サプライチェーンネットワークおよびステークホルダーに関連するインフラストラクチャーの持続可能性評価指標に着目した。イスタンブール新空港の建設と運営を目的として 2013 年に設立された iGA では、高いリサイクルと雨水利用能力を備えた最先端の技術を導入した「グリーン」空港を建設することを目標としており、今後 25 年間の空港運営のなかで専門資格を有する労働力を雇用し、プロジェクトの持続可能性を証明することを目指している。2015 年にイスタンブール新空港プロジェクトの環境社会影響評価調査を完了させ、Envision システムに基づいたプロジェクトの持続可能性評価システムの検証を開始した。

ISI では、Envision システムへの関心が欧州および世界的に拡大することを大望しており、イスタンブール新空港のような大規模かつ重要なプロジェクトの持続可能性を見直し改善することが、今後さらなる発展を促進する模範的なインフラストラクチャーを建設する鍵となると述べている。

### 3.3.2.2. CEEQUAL (英)

CEEQUAL は、土木インフラ、造園および公共領域のプロジェクトや契約の評価に使用されている英国発祥の持続可能性評価ツールである。意思決定支援ツールとは異なり、厳密なエビデンスベースの評価基準と外部検証を独自に使用し評価結果を提供するシステムである。

CEEQUAL は、英国の土木技術研究所（以下、ICE）のチームが開発した持続可能性評価団体で、英国政府と ICE の研究開発援助基金からの資金援助を受け設立され、関連する政府機関、土木コンサルタント、建設会社および CECA（Civil Engineering Contractors Association）等の業界株主によって運営されている。英国における建設業界全体の幅広い支持にもとづき 2003 年 9 月に CEEQUAL の持続可能性評価ツールは試

行され、最初の 8 つのプロジェクトが 2004 年 6 月に ICE で公開された。その後、プロジェクトの持続可能性評価マニュアルが出版され、CEEQUAL は、土木インフラ、造園および公共領域のプロジェクトにおける環境および持続可能性を評価するツールとして認められた。それ以来、CEEQUAL は英国の建設業界のスキームとなっており、現在、大手の土木工事の顧客、設計者および建設会社に普及している。

2008 年 6 月には、英国政府の報告書「持続可能な建設のための戦略」によってプロジェクトを推進するための先導的な評価ツールとして CEEQUAL が広く認識された。同年の秋には CEEQUAL で評価されたプロジェクトの総建設価値は 60 億ポンドに達し、現在では 250 億ポンドを上回るほどに成長を遂げている。

2012 年には、プロジェクト戦略部門が CEEQUAL に追加され、プロジェクトや契約の財務成果に大きな影響を与える可能性のあるエネルギー、資材および廃棄物を考慮して間接的な経済への影響を評価するようになった。また、プロジェクトや契約の経済的、社会的および環境的な影響や便益をカバーする評価システムとして持続可能な生活社会を支援することを評価した。2015 年 11 月には、CEEQUAL は Building Research Establishment (BRE Global Ltd) によって買収され、建築業界の持続可能性評価ツール BREEAM とともに運用されている。この買収行為は、BREEAM と CEEQUAL という成功した 2 つの持続可能性評価ツールを統合し、英国および世界のインフラプロジェクトのための新たな基準と評価ツールを確立させる意図があった。

ここで、CEEQUAL の持続可能性評価ツールの仕組みについて述べる。CEEQUAL は、環境や社会的側面に関する項目で水、エネルギー、土地の使用、生態系、景観、近隣周辺への影響、廃棄物の最小化などに対する 200 の設問で構成されており、プロジェクトごとにスコアリングベースの自己評価によって採点が行われる。その後、CEEQUAL によって訓練された審査員からプロジェクト評価の査定を受け、自己評価のエビデンスとともにスコアリングシートが完成させられる。採点の割合に応じて CEEQUAL が与える作品賞のレベルが異なり、クライアント、設計者および建設会社がそれぞれ評価される仕組みとなっている。この制度の継続的発展のため、すべての土木インフラ、造園および公共領域のプロジェクトに利用可能な CEEQUAL ツールを 2012 年に開発し、現在もアップグレードを行っている。CEEQUAL は、プロジェクトが近隣住民へ及ぼす影響や一般的コミュニティの関係などから経済的、環境的および社会的側面を評価するツールを提供するとしており、CEEQUAL の定期的なアップグレードにより様々な側面をカバーしていると主張している。また土木事業は、コミュニティや地域社会に質の高い生活サービスを提供することを目的として、環境に影響を与えつつインフラを人々に提供することであると主張している。多くの土木事業プロジェクトは、上下水道施設や都市交通施設の整備、土壌汚染や水害などのリスク緩和が目的であり、環境品質の改善により人々を幸福にすることが本質であると論じている。さらに、歩行者の保護や

公園機能の多様化に伴う公共スペースの強化などインフラストラクチャーの持続可能な社会を形成するため、効果的な保守や革新的な改善策を図ることが不可欠であるとも述べている。一方で、土木事業は生活環境に悪影響を及ぼすプロジェクトであると社会の一部では依然として認識されており、環境への影響を最小化しつつ生活サービスのパフォーマンスを最大化するという社会的要請が課題として残っている。しかし、土木事業によって環境や社会に損害を与える評価方法については厳格な基準より作成されたものではなく、土木事業や建設業界全体を評価しなくなる危険性があるとも言及している。したがって、CEEQUAL による持続可能性評価ツールでは、これらの社会問題に対して土木インフラ、造園および公共領域のプロジェクトによる環境および社会的影響を改善することを目指しており、クライアント、設計者、建設会社に以下示すインセンティブを提供することで定量的な評価を実現しようとしている。

- ・ライフサイクルコストや廃棄物量の最小化、資源利用の効率化（資材、水、エネルギー）、気候変動への対応、プロジェクトのクレーム管理や環境事故の削減などを促進する最先端技術の採用によるプロジェクトや契約の大幅な改善。
- ・環境や持続可能性へ配慮し企業の社会的責任を示すことが良い PR となり、企業価値を向上させる。
- ・CEEQUAL によりプロジェクトコストを削減できる。廃棄物量を最小限に抑え、プロジェクト総費用の 3.3% の削減した事例が報告されている。
- ・サステナビリティに対する公約を立証し、顧客や建設業界、またはステークホルダーと一般社会の人々に企業責任を一般に周知することができる。
- ・CEEQUAL を使用することで、プロジェクト全体が高い要求性能を目標とするため、優れた技術革新を促す原動力となる。
- ・企業のハイパフォーマンスは賞賛され、チーム精神を強化することとなる。

### 3.4. 国土交通省・環境行動計画

国土交通省・社会資本整備審議会環境部会・交通政策審議会交通体系分科会環境部会合同会議は、H29 年 3 月、「環境行動計画」<sup>3.37)</sup>を一部改定した。改定案では、新たな章「環境施策における国土交通省の長期的な役割」を設けている。その趣旨は、COP21 で採択された「パリ協定」<sup>3.38)</sup>が「長期の温室効果ガス低排出発展戦略の作成・提出」を求め、G7 伊勢志摩首脳宣言で「2020 年に十分に先立って今世紀半ばの温室効果ガス低排出型発展のための長期戦略を策定」することにしたことを踏まえて、国土・地域づくり、インフラ、交通等を所管している国土交通省が、社会・生活の基盤自体を低炭素な構造とすることやこれに対する投資のための役割を担うために、緩和策を中心とした視点や主要な取組について整理し、行動することにある。ここでは、改定案の内容について紹介し、サステナビリティの観点から意見を述べる。

## ① 環境政策における国土交通省の基本となる視点

改訂案では、緩和策については不確定要素があるが、柔軟に対応することで、温室効果ガスの大幅削減・脱炭素に向けた取り組みを進めるとし、平成 26 年版における以下の 5 つの視点を基本とすることを述べている。

- (1) 環境と経済・社会の統合的向上、グリーンイノベーション貢献
- (2) 技術力を活かした国際交渉や国際環境協力に取り組む
- (3) 面的な広がりを視野に入れた環境保全施策の展開
- (4) 人や企業の行動の転換、参画・協働の推進
- (5) 長期的視野からの継続的な施策展開を重視

これらを、地域や地方自治体が目指す「持続可能な社会」のあり方にも留意しながら取り組みを進めるとするが、「持続可能な社会」の構造について記述されていないので、環境施策の位置づけが明確でない。したがって、「環境と経済・社会の統合的向上」の本質的意味がわかりにくいものとなっている。

「環境と経済・社会の統合的向上、グリーンイノベーション貢献」については、経済を持続的に発展させるためには、企業が環境保全のための行動に積極的に取り組む必要があり、企業による環境に配慮した選択を促す施策（省エネ法<sup>3.39)</sup>に基づく規制、環境性能の評価・表示、税制・補助等のインセンティブ付与：環境対応車の開発・普及、省エネ性能の高い低炭素建築物等）や、環境分野の技術革新による経済発展を目指すグリーンイノベーションを推進することになるとの視点と読み取りたい。

災害大国日本においては、社会の安全・安心を如何に合理的に確保し、そのコストや環境負荷を含めた社会の持続可能性を実現するかが重要であり、グリーンイノベーションはそのための駆動力である。「持続可能な社会」を、社会の安全・安心、合理的なコスト、及び環境負荷低減のバランスと捉えることを明確にし、インフラ・建築物の設計・施工体系を再編するとともに、建設関連分野におけるグリーンイノベーションを推進する様々なシステムを構築することが重要と考える。

## ② 国土交通省の長期的な取組み

今般の改定においては、長期的な観点から特に重要な取組として新たに以下の 6 つをあげており、いずれも重要なものと考えている。

- (1) 都市の低炭素化に資する「コンパクト＋ネットワーク」の推進
- (2) 自動車における取組
- (3) 住宅・建築物における取組
- (4) 賢い環境行動への転換を促す取組
- (5) ライフサイクル全体を通じた排出量の削減
- (6) ポリシーミックスの推進による一層の環境・経済・社会の統合性向上

なお、上記以外の気候変動適応策、自然共生社会の実現、循環型社会形成に対する理解については特段の新たな視点はないと言える。

以下、上記の内、建設部門に直接関わる事項について検証する。

### ③都市の低炭素化に資する「コンパクト＋ネットワーク」の推進

これは、都市のコンパクト化と公共交通網の再構築、都市のエネルギーシステムの効率化を通じた低炭素型都市づくりの推進を意図している。この一例として、都市の低炭素化の促進に関する法律（エコまち法<sup>3.40)</sup>）に基づく「低炭素まちづくり計画」の支援を上げている。エコまち法の低炭素建築物認定基準には、躯体に高炉セメントやフライアッシュセメントの利用が認められている。こうした推進策により、最近、混合セメントの建築基礎部への適応が見られるようになってきた。また、J-Credit 制度<sup>3.41)</sup>も創られた。

しかし、低炭素コンクリートには、JIS 化された既存のセメントとは異なる結合材を用いた多様な高性能コンクリートも開発されているが、JIS という枠組みで制限されるとこれらを有効に利用できない。グリーンイノベーションを真に推進するためには、こうした制約を緩和するなど、都市づくりの基礎となる建築素材の低炭素化を柔軟に考える枠組みが望まれる。また、都市には多くの古いインフラや建築物が存在している。既存構造物は、その寿命を延伸するか、更新するかの判断がいずれ必要となる。その場合、社会・経済・環境からなるサステナビリティ評価基準が必須となる。都市のサステナビリティを実現する上で、低炭素はその一要素に過ぎず、安全性の余裕度やコストを含めた総合的な視点が欠かせない。

### ④住宅・建築物における取組

住宅・建築物の「運用」エネルギー消費量は、全体の 3 分の 1 を占めており、地球温暖化対策において重要な役割を担うことから、新設・既存の住宅・建築物の省エネ性能・環境性能の評価・表示制度の充実・普及やゼロエネルギー住宅等の推進を図っている。こうした施策は極めて重要であり、現在そうした方向へ大きく動き出している。住宅・建築物の運用エネルギーは極限まで低減されることが予想され、相対的に建設時のエネルギー消費低減及び低炭素素材利用の重要性が増してくる。

現在、建築物の基礎を除く躯体にフライアッシュセメントや高炉セメントが用いられることはほとんどない。これは、コンクリートの中性化が鉄筋腐食に影響するためである。しかし、これも、JIS セメントを利用することから起こる問題であり、これをクリアする素材の開発を推進することも重要と考える。

なお、インフラ建設は多くが官公庁によってなされる。現在、高炉セメントを用いることが多いが、CO<sub>2</sub>削減のような環境性能だけでなく、コンクリートとしての種々

の特性向上のために、JIS を超えるコンクリートの利用も柔軟に考慮されるべきである。JIS は、最低要件を示したものである。

#### ⑤賢い環境行動への転換を促す取組

環境教育等により、各主体の環境に配慮した行動を促し、市場の拡大・創出に努めることが記述されている。これを、様々な分野において実施すべき取組と位置付けているが、具体的展望が見えない。これまでどのような環境教育がなされ、具体的にどのような成果があったのかを検証すべきと考える。

環境汚染等は法律の遵守で対応できるが、低炭素については一部を除いて建設技術者の関心は低いと言わざるを得ない。現在、建設分野には様々な資格があるが、環境やサステナビリティに関する資格はほとんどない。こうしたことを学習していない技術者が「賢い環境行動へ転換する」ことは至難の業である。産官学を対象とした環境に関わる資格制度など、環境教育を推進するシステムを導入すべきと考える。

#### ⑥ライフサイクル全体を通じた排出量の削減

（素材）製造・建設、輸送、使用・廃棄に至るまでのライフサイクル全体を通じた温室効果ガス排出量の削減を進めるとするが、同時にこれは様々な分野において実施すべき取組と位置付けており、国土交通省として所掌するインフラ・建築物を対象にした「ライフサイクル全体を通じた排出量の削減」をどう進めるかについての記述がない。

ISO では、TC71/SC8(コンクリート及びコンクリート構造物の環境マネジメント)が、ISO 13315 シリーズを策定しており、ISO 13315-1(一般原則)及び ISO 13315-2 (システム境界及びインベントリデータ)が、経済産業省と国土交通省所管で JIS 化される。ISO 13315-4 (環境設計) も近々発刊される。今後、構成材料と製造、施工、利用、解体廃棄、ラベル・宣言に関する規格も開発される。この規格シリーズは、コンクリートを対象としているが、鋼構造、複合構造に関しても応用できる。ライフサイクル全体を通じた CO<sub>2</sub> 排出量の削減のためには、各段階における CO<sub>2</sub> 排出量を合理的に算定するための共通ルールが必要であり、それらの開発支援や適用推進を図ることが重要と考える。

なお、ライフサイクル全体を考えるには、3つの要素からなるサステナビリティ思考が極めて重要となり、CO<sub>2</sub> 排出量とコスト及び安全性の余裕度のバランスに対する配慮も明確にしておくべきである。

#### ⑦ポリシーミックスの推進による一層の環境・経済・社会の統合的向上

緩和策（低炭素化）と適応策を両輪として、国土・地域づくり、インフラ、交通など

に関する各種施策と環境政策との調和、各省庁との連携を可能な限り進め、環境・経済・社会のより一層の統合的向上や各政策の効率性・効果の向上を目指す、としている。しかしながら、「統合的向上」の意味するところが不明確である。

また、この環境計画の改定版の最後は、「国土交通省の取組は低炭素社会、自然共生社会、循環型社会の構築に複合的に貢献できる（例えば下水道資源の有効利用は低炭素社会及び循環型社会の構築に貢献し、また、都市緑化等の推進は低炭素社会及び自然共生社会の構築に貢献する。）という認識の下、これらの統合的達成に努め、持続可能な社会の実現に貢献する」と締めくくられている。低炭素、自然共生、循環型社会の統合的達成とあるが、近年の課題となっている国土強靱化や生産性向上との関係が明確になっていない。

公共事業の究極のミッションは、合理的なコストで安全・安心な低環境負荷社会を構築することである。つまり、社会的側面、経済的側面、及び環境的側面からなるサステナビリティ要素を踏まえた持続可能な社会を実現することであり、こう言った視点を持つことが最も重要と考える。

### 3.5. まとめ

国内外において、現在、主にコンクリートに関するサステナビリティ的な思考がどの程度まで、規格、基準類に取り込まれているか、環境設計についてどこまで言及されているかについて調査して結果、以下の知見を得た。

- ・ サステナビリティのルーツは、国連の「環境と開発に関する世界委員会」が 1987 年に公表した最終報告書に Sustainable Development（持続可能な発展）という理念を謳ったことであると考えられる。
- ・ ISO/TC207 が策定、運用している環境マネジメントシステム EMS(Environmental Management Systems)に関する国際規格 ISO 14000 ファミリーは、EMS が満たさなければならない事項を定めた規格である。環境への負荷の低減、有益な環境影響の増大、組織の経営改善および環境経営が期待したものだが、環境パフォーマンスの評価に関する具体的な取決めはない。
- ・ ISO/TC59/SC17 では、建設分野に適した環境マネジメントに関連する規格を開発し整備している。建築物および土木事業を対象とした評価指標とインベントリデータ、ライフサイクル影響評価（LCIA）の結果を計算するためのルールを規定しているが、建設工事全般の持続可能性評価方法や枠組みの原則や持続可能な構造物のベンチマーク開発のための方法論的原則などについては現在も審議中の段階にあり、環境性能設計の枠組みや定量的な評価手法を構築するまでには至っていない。
- ・ ISO/TC71/SC8 では、コンクリート関連産業の人々が適切に環境負荷評価できるよ



うに ISO13315 規格シリーズを策定しており、ISO13315-4 ではコンクリート構造の設計全体における環境設計を体系付けている。ISO13315 規格の原案は「コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)」であり、結果的に逆輸入といった形で ISO13315 が JIS 化された。環境影響を算定する際の合理的な共通ルールが存在しなかったため、個々のプロジェクトの評価や判断が異なる方法によって比較されていたが、初めて日本国内のコンクリート・建設産業に適した基準が制定された。

- fib Model Code 2010 では、構造物設計基準の歴史で初めてサステナビリティを組み込んだ。サステナビリティ要素としては、環境側面と社会的側面を考慮し、経済的側面は扱わない構造となっている。また、サステナビリティを要求性能の一つとして位置付けて、サステナビリティの3つの要素(社会、経済、及び環境側面)についての包括的な扱いがなされておらず設計の枠組みとしては不十分である。現在、第10常置委員会(Commission 10)にて fib model code 2020 を策定中であるが、社会性、環境性、経済性の3本柱よりなるサステナビリティの包括的な取り扱いを謳っており、その実現が期待される。
- ACI Building Code の 318-14 版において、構造系の要求として強度、使用性、及び耐久性に加えてサステナビリティを初めて導入、すなわち、サステナビリティを要求性能として設定することを認めた。しかし、要求性能として設定できるのは然るべき資格を有する専門家に限定すること、強度・使用性及び耐久性がサステナビリティに優先すること、の二つを条件としており、サステナビリティの枠組みとしては不十分である。
- 土木学会では、性能照査型規定を「環境」にも拡張適用することを意図し、2005 年に「コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)」を策定した。コンクリート構造物の環境性能を設定、評価し、要求される環境性能を満足していることを照査、検査する一連の手法が明記されている。同指針で示された考え方は、その後の国際学会刊行物や ISO 規格にも反映されたが、日本国内では「コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)」はコンクリート標準示方書の改訂においては 2007 版では引用されたものの、一部の理解が得られず、2012 版では姿を消すこととなった。
- 日本建築学会では、2008 年 9 月に「鉄筋コンクリート造建築物の環境配慮施工指針(案)・同解説」を制定した。主に現場施工を中心とした鉄筋コンクリート工事に関わる環境配慮事項を示したものであり、鉄筋コンクリート造建築物の設計図書、鉄筋コンクリート工事計画書などに環境への配慮事項を盛り込む際に使用されることが想定されている。また、省資源型、省エネルギー型、環境負荷物低減型、長寿命型といった4つの型を提案し、環境配慮の目標となるように位置付けている。
- 建築分野においては、様々な建築物の環境影響負荷の評価ツールが開発され、広く用いられている。代表的な評価ツールである LEED、BREEAM、CASBEE について調査

整理したが、いずれも点数付けがブラックボックスになっている部分が多く、定量的な評価がなされているとは言い難い。

- ・ 土木構造物を対象とした代表的な評価ツールとして、ENVISION と CEEQUAL があるが、評価項目は建築物の評価ツールと類似しており、何れも一般化しているとは言えない。今後、公共性を有する土木構造物の環境影響評価ツールの開発が行われると思われるが、基本的にはサステナビリティの枠組みの中で必要な事項の定量的な評価を基本として、それらのバランスを考慮した判断をすべきである。現状からは、むしろ建築分野の環境影響評価ツールの開発・発展と異なる道筋が望ましい。
- ・ 国土交通省は、COP21 のパリ協定、G7 伊勢志摩首脳宣言を受けて、大幅な温室効果ガス削減の前倒し実施にむけ「環境行動計画」の改訂版が発表された。「国土交通省の長期的な役割」として6つの取組みが示し、環境に対する前向きな姿勢を示したことは評価される。しかしながら、各種施策と環境施策の調和、といった一般論にとどめられ、国の持続可能性に関わる環境・経済・社会的側面を合理的に評価する方策についての言及がないことは、サステナビリティの観点からは不十分と言える。

#### ◎参考文献

- 3.1) The World Commission on Environment and Development: Our Common Future、Oxford University Press、1987
- 3.2) fib Bulletin 28: Environmental design、2004
- 3.3) 土木学会:コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)、2006
- 3.4) fib Bulletin 47: Environmental design of concrete structures: General principles、2008
- 3.5) Koji Sakai and Takafumi Noguchi: The sustainable use of concrete、CRC PRESS、2013
- 3.6) ISO 14001:2015, Environmental management systems-Requirements with guidance for use
- 3.7) ISO 14004:2016, Environmental management systems-General guidelines on implementation
- 3.8) JIS Q 14001:2015 環境マネジメントシステム-要求事項及び利用の手引
- 3.9) JIS Q 14004:2016 環境マネジメントシステム-実施の一般指針
- 3.10) ISO 21929-1:2011, Sustainability in building construction-Sustainability indicators-Part 1: Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings
- 3.11) ISO/TS 21929-2:2015, Sustainability in building construction- Sustainability

- indicators-Part 2: Framework for the development of indicators for civil engineering works
- 3.12) ISO 21930:2007, Sustainability in building construction-Environmental declaration of building products
- 3.13) ISO 14025:2006, Environmental labels and declarations-TypeⅢ environmental declarations-Principles and procedures
- 3.14) ISO 15392:2008, Sustainability in building construction-General principles
- 3.15) ISO 21931-1:2010, Sustainability in building construction-Framework for methods of assessment of the environmental performance of construction works-Part 1: Buildings
- 3.16) ISO/TR 21932:2013, Sustainability in buildings and civil engineering works-A review of terminology
- 3.17) ISO 16745-1:2017, Sustainability in buildings and civil engineering works-Carbon metric of an existing building during use stage-Part 1: Calculation, reporting and communication
- 3.18) ISO/DIS 21931-2, Sustainability in buildings and civil engineering works-Framework for methods of assessment of the sustainability performance of construction works-Part 2: Civil engineering works
- 3.19) ISO/WD 21678, Sustainability in buildings and civil engineering works-Methodological principles for the development of benchmarks for sustainable buildings
- 3.20) ISO 13315-4:2017, Environmental management for concrete and concrete structures-Part 4: Environmental design of concrete structures
- 3.21) ISO 13315-1:2012, Environmental management for concrete and concrete structures-Part 1: General principles
- 3.22) ISO 13315-2:2014, Environmental management for concrete and concrete structures-Part 2: System boundary and inventory data
- 3.23) ISO 13315-8, Environmental management for concrete and concrete structures-Part 8: Environmental labels and declarations
- 3.24) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)、コンクリートライブラリー 125、2005
- 3.25) JIS Q 13315-1:2017, コンクリート及びコンクリート構造物に関する環境マネジメント—第1部：一般原則
- 3.26) JIS Q 13315-2:2017, コンクリート及びコンクリート構造物に関する環境マネジメント—第2部：システム境界及びインベントリデータ

- 3.27) fib: fib Model Code for Concrete Structures 2010
- 3.28) fib: fib Model Code 2020  
<http://www.fib-international.org/rss-feed/fibmodelcode-2020>
- 3.29) ACI: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary、318-14, 2014
- 3.30) LEED: <https://new.usgbc.org/leed>
- 3.31) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の環境配慮施工指針 (案)・同解説、2008
- 3.32) BREEAM: <https://www.breeam.com/>
- 3.33) CASBEE: <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/>
- 3.34) ENVISION: <https://sustainableinfrastructure.org/envision/>
- 3.35) CEEQUAL: <http://www.ceequal.com/>
- 3.36) Zofnass Program: <http://research.gsd.harvard.edu/zofnass/>
- 3.37) 国土交通省: [http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei\\_environment\\_fr\\_000101.html](http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_fr_000101.html)
- 3.38) United Nations Framework Convention on Climate Change: The Paris Agreement、2015
- 3.39) 経済産業省 資源エネルギー庁: 省エネ法  
[http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/saving/summary/](http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/summary/)
- 3.40) 国土交通省: 都市の低炭素化の促進に関する法律 (エコまち法)  
[http://www.mlit.go.jp/toshi/city\\_plan/eco-machi.html](http://www.mlit.go.jp/toshi/city_plan/eco-machi.html)
- 3.41) 経済産業省/環境省/農林水産省: J-クレジット制度  
<https://japancredit.go.jp/>

## 第4章 結論(Part1)

### ① コンクリート構造物の設計法の変遷(第2章)

- ・ コンクリート構造物の設計法が、経験則を基にした許容応力度法から始まり、限界状態設計法へと移行し、仕様規定法から性能設計法に発展してきたを経緯を、時代の変革と社会的要請の関係から整理した。
- ・ 現在の性能設計の内容は、安全性・使用性といった古典的な範囲に限定されており、サステナビリティの観点からは、経済性、環境といったそれ以外の性能を考慮できる設計体系とはなっていないことを明確にした。
- ・ コンクリート構造物の安全性に対する余裕度について、経済性や環境などの他の性能との関連性を包括的に取り扱うニーズが生まれてきており、昨今の想定外の事象や地球温暖化の進展に対応できる設計体系の構築が望まれることを明らかにした。

### ② サステナビリティのルーツとそれらに基づく規格・規準などの動向(第3章)

- ・ サステナビリティのルーツは「持続可能な発展」に遡る。地球温暖化や異常気象などによる環境問題へ関心の高まり、あるいは対応を余儀なくされてきたことから、環境評価や環境設計に関する取り組みは活発化し、世界各国で規準、規格、環境評価ツールが策定されてきた。
- ・ 現状の環境評価に関する各規準・規格は、安全性・使用性、経済性、環境的側面を包括的に評価できる仕組みになっておらず、環境評価ツールもブラックボックスな点数付けとなっており、環境的側面を定量的に評価できる設計の枠組みが必要である。
- ・ COP21 のパリ協定、G7 伊勢志摩首脳宣言を受けて、国土交通省は温室効果ガス削減の前倒し実施にむけ「環境行動計画」の改訂版を発表、将来の方向性を示した。環境に対する前向きな姿勢を示したことは評価されるが、一般論にとどめられ、国の持続可能性に関わる環境・経済・社会的側面を合理的に評価する方策についての言及がないことは、サステナビリティの観点からは不十分と言える。

以上、Part1 では、コンクリート構造物の設計法の変遷、各国の規格・基準類を調査して、現状を把握した。その結果、サステナビリティに関する機運は高まっているものの、地球温暖化や省資源化などの環境問題、本格的な維持管理時代に向けた設計での経済性配慮、想定外の事象に対する安全性・使用性に対する考え方を含む社会的側面を包括的に扱えるコンクリート構造物の設計・評価方法は現状、存在しないことが明らかとなった。

PART2 では、この現状を踏まえ、社会的側面、経済的側面、環境的側面の3つの要素を包括的かつ定量的に評価できる設計の枠組みとして、サステイナビリティ設計を提案し、具体的なプロジェクトを例にとってその適用性について検証する。

## Part2

# コンクリート構造物のサステナビリティ設計 の提案とその適用

## 第5章 サステナビリティ設計の提案

### 5.1. 概説

本章では、Part1の結果を受け、地球温暖化や省資源化などの環境的側面、本格的な維持管理時代に向けた設計での経済的側面、想定外の事象に対する安全性・使用性に対する考え方を含む社会的側面の3つの要素を包括的かつ定量的に評価できる新たな設計の枠組みを提案する。さらに、単純梁の数値計算例を用いて、その適用性について検証する。

### 5.2. 建設分野へのサステナビリティ思考の導入

#### 5.2.1. 概要

サステナビリティを測る側面は多様であるため、一つの指標でサステナビリティを評価するのは容易ではない。サステナビリティの評価は、社会的側面、経済的側面、そして環境的側面に分けて行われる<sup>5.1)</sup>。当然、これらの間には複雑な相互関係があるので、一意的な「正解」はない。そうではあっても、このような思考は、問題の本質を明瞭にする上で大変有意義である。これらの要素を社会科学的に総合化する方法も考えられるので、必要に応じて多様な扱いも可能である。重要なことは、これら3つの側面を適切に整理し、必要と思われるものを抽出して詳細な検討対象とすることである。

#### 5.2.2. 社会的側面

構造物の建設は、人間の生活・活動などの社会的ニーズに基づいてなされる。ニーズとして求められるのは機能である。機能を持続させるためには安全性・使用性（耐久性）が確保されている必要がある。しかし、絶対安全はありえないので、予想を超える作用に対して、構造物の変状の回復性（レジリエンス）をどう設定するかが課題となる。これは、設計する際の余裕度の設定によって大きく左右される。また、社会的ニーズの変化や安全性の低下により、構造物の機能を縮小したり、機能を停止させたり、あるいは解体することが選択される。以上のことから、安全性・使用性（耐久性）は社会的側面としてとらえることとした。なお、耐久性は安全性・使用性の前提条件としての検討となるため、たとえば、耐用年数も一つの指標となりうる。

社会には、人口問題、経済問題、食糧問題、都市問題等、様々な問題が存在する。建設分野は、これらの問題のほとんどに直接あるいは間接に関連する。これらの多様な問題解決の手段として建設行為が行われていると言える。安全性・使用性（耐久性）以外の社会的側面としては、アクセス、建設工期、周辺環境への負荷（住民問題）、美観（周辺環境との調和）、健康・快適性（労働安全性）などがあげられる。



問題解決のための計画段階から、設計・施工・供用における様々な社会的側面を考慮して、必要な検討事項を整理し、それらを必要な機能に収斂させることになる。社会的ニーズと、それらを具現化するための構造物の機能が明らかになれば、機能を確保するための設計が行われる。設計では、使用する技術・システムや情報の信頼性に応じて安全性に対する余裕度を考える必要がある。当然ながら、安全性の余裕度は、建設費用や環境負荷に大きく影響する。

### 5.2.3. 経済的側面

構造物の建設には費用が発生する。構造物としての所要の機能を付与するに必要な費用が確保されて初めて、その建設は可能となる。多くの場合、所要の機能を有する構造物の標準的な費用を概算して、それが手当できる予算との関係で問題なければプロジェクトは先へ進む。もし予算が不足すれば、費用を縮小する工夫が必要となる。機能を縮小する可能性もある。機能縮小が許容されなければ、構造形式や使用材料及び施工法の工夫・イノベーションで費用低減を図る。その場合、構造物の安全性や使用性が低下する選択肢はない。逆に、重要度に応じた安全性の余裕度の増加要求等から標準的な建設費用を超える場合もある。建設時に低コストであればいいとする考え方は、サステナビリティの観点から必ずしも適切ではない。総合的な評価を欠く設計思考を排除する上での重要な視点である。

現実社会を見れば、例えば建築物では、投資とそこから得られる利潤が判断基準になる。費用を最小化し、短期的な利益を考えた構造物を建設しがちであることは不思議でない。投資を回収できれば用済みとして、低建設コスト構造物を解体し、新たな建設投資で目先の利益を考えたりする。しかし、資源・エネルギー浪費の観点から、そのような思考をライフサイクルコストとして合理性があるとは言えない。こうした不合理性の抑制には、短期的な視点での資源・エネルギー投入にはペナルティーとして付加的な課税措置を施す方法も考えられる。

インフラ建設は、通常、国や地方自治体が主導する。その理由は、インフラ建設は、民間投資による回収で賄うには一般に費用が大き過ぎるからである。インフラ整備は社会全体の責務として税金で行い、民間の経済活動を支え、結果として発生する利益を税金として回収する、とする考え方が基礎となる。インフラは税金で建設するのであるから、無駄のないことが重要であり、それを監視するための公的な組織もある。構造物の設計・施工に「無駄」が見つければ、指摘され改善命令を受ける。そのため、役所は最新の注意を払って税金を無駄に使ったと言われまいと条件反射的に「低コスト」を最も重要なことと認識する。各行政機関には技術に関する示方書や基準が存在していて、それに従ってさえいれば指摘を受けることがない。逆に言えば、それ以外の工夫や判断には大きなリスクが伴う。こうしたシステムが、大きなミスを抑制する

ことに寄与していることから、建設分野を過度に保守的にしていると推測される。インフラは、大量生産品でないから、コストパフォーマンスに絶対解がないことも問題を複雑にしている。

現在、古いインフラの維持に大きな問題が起きていることを鑑みれば、災害に見舞われるインフラ先進国においては、安全性の「余裕度」を高めるための「コスト増加」も合理的に扱い得る設計体系を持つ時期に来ていると考える。

発展途上国のインフラ整備はこれから膨大な資金を投じて行われる。先進諸国がそうであったように、その結果として大きな問題を抱えているように、これら発展途上国の今後のインフラ整備で同様な問題を発生させては、地球の資源・エネルギーはもたない。低品質で量を稼ぐか、高品質で量を抑えるかは、発展途上国にとっては極めて悩ましい課題である。低品質は、最終的にコストも資源・エネルギーも浪費することに繋がる。ことは、一国の問題ではなく、地球に住む人類全体のコストの問題となる。

#### 5.2.4. 環境的側面

構造物の建設では、直接的には自然改変、資源・エネルギーの消費、及び汚染等の各種環境影響が、間接的には構造物利用によって発生する様々な環境負荷が発生する。しかし、後者については、構造物計画時に考慮されるべきもので、必要な環境負荷低減要求は構造物の設計要件として設定され、設計で適切に反映される。直接的な自然改変は、構造物が土地を利用する以上避けられないが、一定の緩和策は可能である。汚染や施工時の環境影響などは、法的な規制があるが、規制より厳しい対応もしようと思えばできる。

構造物の建設には多くの資源とエネルギーを消費する。建築物の場合、その運用時のエネルギーも非常に大きい。現在人類が直面している最大の問題は資源・エネルギーの利用に伴う環境負荷である。地球は高々半径が 6000km 余りの球体である。その事実からも地球の資源・エネルギーが有限であることを理解することは容易であるが、加えて、地球人口が 70 億を超え、さらに数十億人増加することが予測されている。複雑な自律生体システムを有する地球を利用して生存している人類が持続可能でないことは自明である。

人類は、経済活動の拡大で地球の気候まで変えつつある。資源の野放図な利用拡大は、その価格を上昇させ、健全な経済活動を阻害する。結果として格差拡大等による社会的な安定の喪失という悪循環に陥る。こうした負の連鎖を断ち切る唯一の方法は、資源・エネルギーの使用量を削減して、より高質な社会経済活動を推進することである。建設産業も例外でない。建設産業の使命は、社会経済活動の効率化のための基盤整備であるが、それが一層資源・エネルギーを消費する社会構造を作ることによって繋がつている。こうした状況を「経済成長」と呼び、多く生産して多く消費する経済システムを

望ましい姿として何の疑いもなく是認してきたのが、これまでの人類の歴史であった。この考え方は、資源・エネルギーが無限であり、それらの消費が地球気候に影響しないことが前提でなければ成立しない。化石エネルギーについては、BP 統計によれば、石油・天然ガスは 50 年程度、石炭やウランも 100 年程度とされる。これらが 2 倍、3 倍になっても化石エネルギーが有限であるという事実は覆らない。発展途上国の消費増大及び地球人口の増大を考えれば、その危機的な状況を理解するのは容易である。

建設分野における CO<sub>2</sub> 排出量は、信頼できるデータはないが、建築物の運用を含めて 40～50%を占めている可能性がある。その半分程度は運用によるものと考えられる。また、建設分野で用いられる資源は、他の産業と比して圧倒的に多い。建設資材の主なものは、コンクリート、鉄、そして木材である。世界で、コンクリートは 250 億トンを超え、鉄は総生産量約 15 億トンの半分以上が建設関連であると考えられる。木材は 35 億 m<sup>3</sup>程度の消費であるが、建設分野での利用割合は不明である。建設産業はこうした事実をあまり認識していない。それは、資源・エネルギーについてサステナビリティを考える必要がなかったためである。ひたすら、広範囲に社会経済基盤を整備して経済的発展に寄与するという思想が「正しい」として理解してきたからである。この考えは、基本的に今後も一定の有効性を保持するであろうことは疑いない。

しかし、今後建設分野で用いられる基礎資材量を考えると、資源・エネルギーの無限思想を保持することは不可能なように思われる。例えば、粗鋼消費量について見ると、先進国人口 12.4 億人が 9 億トン程度の粗鋼を消費していると仮定すれば、先進国の 1 人当たりの粗鋼消費量は  $9 \text{ 億トン} \div 12.4 \text{ 億人} = 0.72 \text{ 億トン/人}$  となる。70 億人となると、約 50 億トンの消費である。90 億人になれば、65 億トンである。粗鋼の CO<sub>2</sub> 排出原単位を 1.8CO<sub>2</sub>-ton/ton と仮定すれば、70 億人及び 90 億人の場合で、CO<sub>2</sub> 排出量はそれぞれ 90 億トン及び 117 億トンとなる。また、セメントに関しては、日本で 1 人当たりクリンカーで年間 0.5 トン消費しているとし、それを 70 億人及び 90 億人に適用すると、それぞれ 35 億トン及び 45 億トンであり、セメントの原単位を 0.8CO<sub>2</sub>-ton/ton と仮定すると、人口 70 億人と 90 億人の場合のセメントからの CO<sub>2</sub> 排出量はそれぞれ 28 億トン及び 36 億トンとなる。日本を基準としているので、これは世界ではかなり少なめの予測である。結局、鉄とセメントを合わせると、CO<sub>2</sub> 排出量は、現状人口で約 100 億トン、90 億人で 153 億トンとなる。現在の総 CO<sub>2</sub> 排出量は 320 億トン程度と考えられ、鉄とセメントという素材だけによる CO<sub>2</sub> 排出量が如何に膨大なものになるかを示している。これらの試算は、鉄とセメントの製造のための原材料が持続的に取得できることを前提としている。また、これら素材を利用する建設行為や、建築物の運用にも膨大な CO<sub>2</sub> を発生することになる。加えて、鉄鉱石、石灰石、及び石炭の賦存量は、今後数百年の消費に耐え得るほど多くはないであろう。

このように、建設分野が負う資源・エネルギーによる環境負荷は極めて大きなもの

である。もし、今後コンクリート・建設分野がこうした事実を目をつぶるとすれば、この産業のサステナビリティだけでなく、社会のサステナビリティが失われることを意味する。

### 5.3. 新しい設計体系の必要性

右肩上がりの経済発展を支えてきた建設関連産業は、最も資源・エネルギーを消費しているにもかかわらず、インフラを利用する他産業が「環境」をビジネス展開の要として事業展開を図っていることに総じて無関心のように見える。建設関連分野においても、これまで材料開発など様々な側面から環境への配慮は成されてきたものの、上述のような印象を与える原因は、長い間に構築されてきた、資源・エネルギー問題を深刻に考える必要がなかった環境での工学思考にある。

当然、構造物の安全性に関する技術の進歩は著しい。コンピューターの性能の著しい向上と解析技術の発展は、構造物の地震時挙動を相当正確に予測できるようになっている。しかし、それですらも、限定された条件下での挙動であり、実際には未だ不十分で不確実性がある。こうした問題が100%解決されることは不可能である。何故なら、人間は、地球内部の動きを制御できないだけでなく、地震動が複雑な岩盤・地質構造によって地表にどう伝わるかなどは、ほとんど永遠に把握できない領域と言っても過言ではないからである。したがって、直面する問題を適切に扱うためには、これまでの「伝統的な」工学の延長線上でものを考えても限界があることを認識し、現在の設計思想の基本枠組みを再構築することが必要である。再構築のための基本哲学は、「人類にとって最も重要なことは、人類の生存基盤である地球環境をいい状態で保持すること」である。地球が人類に提供してくれる自然資本を将来に亘って持続的に使うことができるような社会経済システムを構築することが最も重要である。つまり、人類と地球のサステナビリティを基本にしてすべてを考えることが求められる。

一方、未だに環境は経済と同じで建設技術者の仕事の対象ではないとする考え方が少なからずあるのも事実である。これは、構造物の設計では作用力が与条件として設定できるが、環境要件は設定できないとする考え方による。しかし、先述のように、建設産業が今後こうした考え方で活動を進めることはできないことは明らかである。資源・エネルギーの枯渇や地球温暖化問題を考える必要がなかった時代に積み上げられた「伝統的な」工学思想やシステムが破綻しかけていることを認識して、「新しい」設計体系を構築して、技術やシステムの革新を促進することが最も重要である。問題を認識した現世代がそうした方向に向けて行動を起こす必要がある。

人類と地球の持続可能性を評価、実現する総合指標が「サステナビリティ」である。これを構造物の設計に明示的に組み込むことが重要であり、本論文では、その体系

を「サステイナビリティ設計」と称する。

## 5.4. Structural sustainability のとらえ方

サステイナビリティ思考を土木構造物に適用する場合、社会的側面である安全性や使用性に加えて、経済性や環境性を明確に認識して、それらを定量的に評価して、ライフサイクルにおけるバランスを考慮して適切な判断を行うことが必要である。

これまで、構造物の安全性については、最も重要なこととしていて、その設計法はほぼ確立されていると言える。しかし、安全性の余裕度に関する多様な意味についてはあまり関心が持たれなかった。それは、安全性の余裕度はコストに直結すると考えられていたことから、見かけ上の低コストを最大の価値とする思考が支配的であったためである。Performance-based design 思考の根底には、構造物の挙動をできるだけ詳細に把握して経済性を追求する側面もあった。ところが、最近、地震やハリケーン等による自然災害が頻発し、レジリエンスやロバストネスが注目されるようになってきた。自然災害の程度が増大している根幹に、構造物の経済設計がある可能性が高い。

このことは、構造設計法や数値解析法及び技術の進化が、結果として安全性の余裕度を低下させている可能性や、設計上の想定を超える事象が頻発していることに起因して、一部の建設関連技術者が構造物設計に新たな考え方が必要であると感じ始めていることを意味する。つまり、安全性の余裕度についての検討がなされていないことの妥当性に疑念が生まれている。日本では、1995年に兵庫県南部地震、2011年に東日本大震災、そして2016年に熊本地震と大地震が頻繁に発生し、極めて深刻な社会的、経済的、及び環境的被害を被った。多くの住民は住居を失い、社会・経済活動を困難にし、復興に膨大なコストと資源・エネルギー消費を余儀なくされる。

このように、構造物等に一旦大きな被害が発生すると、社会のサステイナビリティを瞬時に失う。つまり、社会のサステイナビリティは、インフラや建築物の「強さ」に依存している。インフラや建築物の設計上の余裕度が大きければ、実質的な被害を受けることが少なくなるし、多少の被害は被災後使用を可能にする。こうした状況を、社会のレジリエンスの確保と言い換えることができる。今後、インフラや建築物の建設、あるいは既存構造物の維持のためには、こうした視点が極めて重要となる。

一般に、構造物の安全性に対する余裕度を増大させるとコストや環境負荷が増加する。しかし、ライフサイクルで考えれば、余裕度増に伴うコストや環境負荷増の程度により、余裕度増を容認できる可能性があるし、設計時のそうした配慮が結果としてコストや環境負荷を低減することになることは、日本で起きた最近の地震被害を見れば、容易に理解できる。上記の議論は、現状の技術で構造物の余裕度を増加させることを前提とした。しかし、こうしたメカニズムを明確に認識した技術革新は、構造物の安全

性の余裕度を増加させても、コストや環境負荷を増大させない、あるいは低下させることも可能にする。

次の展開は、安全性の余裕度を上げて、コストや環境負荷を増大させないことや、あるいはそれらを低減させる構造形式及びその施工法の開発である。また、特に重要な構造物では、安全性の余裕度を上げてコストや環境負荷の増加を認めることも考えられる。その場合、サステナビリティ評価を実施してその本質的意味を明確にしておく必要があることは言うまでもない。

従来、材料の開発では、高強度化あるいは高耐久化や低カーボンなど単眼思考が主であった。その原因は、構造への展開を余り意識していないことによると思われる。材料分野と構造分野の研究者がそれぞれの分野内での思考をしがちであることの問題は古くから指摘されてきた。如何なる材料も、最終的には構造に適用されなければ意味がない。構造技術者は、材料が有する特性を「合理的」に利用して、構造としてのサステナビリティを実現する必要がある。そのためには、構造としての挙動をできるだけ正確に把握した上で、構造的な余裕度増によるコストや環境負荷への影響を明確にして、それらの間のバランスを考えて最終的な判断をする必要がある。したがって、サステナビリティ要素の総合評価の観点における構造物の性能を「Structural Sustainability」と定義することができる。今後、こうした考え方で様々な技術革新を起こし、構造物を造ることが、社会のサステナビリティを確実にすると思われる。

## 5.5. サステナビリティ設計の提案

### 5.5.1. 現在の設計法

構造物建設の必要性が提起されると、そのフィージビリティが検討される。この段階の最大の課題は必要な資金調達が可能か否かである。一般的には、建設コストの概算を基に予算要求して、認められれば一つのプロジェクトが走り出すことになる。建設コストの概算は既往の経験に基づくのが一般的であり、経験のないものは、走り始めてからコスト増となることも珍しくない。あるいは、意図的にそのようにする場合もある。換言すれば、プロジェクトのフィージビリティ検討時におけるコストの算定にはかなりの不確実性を含む。最終的には、そうした情報に基づき、責任者の判断により構造物の建設プロジェクトがスタートする。

構造物建設の最初のステップは計画で、次に設計である。構造物の現行の設計は、「安全性」や「使用性」に対する要求性能を設定して、設計した断面および構造が要求性能を満足するかどうかを照査することによって行われる。例えば、断面耐力や変形は、それぞれ以下の照査式により、設計の妥当性が判断される(式(5.1)、式(5.2))。

$$\gamma_i Sd \leq Rd \quad (5.1)$$

ここで、 $Sd$  は設計断面力または設計限界値、 $Rd$  は設計断面耐力または設計応答値、及び  $\gamma_i$  は構造物係数

$$\gamma_i \delta d \leq \delta a \quad (5.2)$$

ここで、 $\delta d$  は変形設計応答値、 $\delta a$  は変形設計限界値、及び  $\gamma_i$  は構造物係数

構造物係数の導入は、土木学会コンクリート標準示方書[設計編]<sup>5.2)</sup>で伝統的に用いられてきているが、一般に 1.0 とされている。因みに 1.0 以上の値に関する議論はほとんどなされていない。

この他に検討すべき事項として、耐久性や復旧性（レジリエンス）あるいは堅牢性（ロバストネス）もあるが、耐久性は安全性や使用性に関わる一要素であり、復旧性や堅牢性は安全性の余裕度や力学的破壊メカニズム等に関わるものである。耐久性は、構造部材に必要な安全性や使用性を得るためのサブ設計として扱うことができる。上記構造物係数  $\gamma_i$  は、設計限界値や設計応答値の不確実性を照査段階で考慮するために導入されているが、実質的にはこの係数の意味はあいまいでことは否めない。本来であれば、設計限界値や設計応答値算定レベルにおいてあらゆる不確実性を考慮すれば済むことである。実際、fib Model Code 2010<sup>5.3)</sup> では、最終照査式に如何なる安全係数も付与していない。

#### 5.5.2. サステナビリティ設計の枠組み<sup>5.4)</sup>

サステナビリティにおける社会的側面の範疇に属する、構造物の安全に対する余裕度はこれまで経験で決めてきたが、サステナビリティの他の側面である経済や環境との関連性についてはほとんど考慮されていない。構造物の安全性の増加は、一般にコストや環境負荷を増大させる。したがって、発注者は経済性を最も重要視するから、できるだけ安全性の余裕度を小さくしがちである。

ところが、予想できない外力に対する、真の経済性や環境性を考慮すれば、従来と全く異なる景色が見えてくる。例えば、安全性の余裕度を 1 割増やしても、あるいは耐久性の余裕度を上げて、初期コスト増加は小さい場合もあるし、革新的な技術の導入によって安全度も上がり、コストも低減する可能性もある。環境的側面についても然りである。つまり、構造物のサステナビリティ設計では、こうした可能性を指向する「新しい」考え方を導入しなければならない。このような考え方を実務レベルに持つていくためには当然多くの障害があると思われる。しかし、基本哲学に基づいて目指すべき方向性が定まれば、あとは時間が問題を解決する。

構造物のサステナビリティ設計は、社会的側面としての安全性・使用性、経済的側面としてのコスト、そして資源・エネルギー等の環境的側面を包括的に考える体系とする。その際、人間と地域・地球が持続的であることを最も重要なことと位置付け、そ

のために社会、経済、環境を総合的に評価できるよう、評価指標を適切に選択できる体系とする。構造物の建設コストや環境負荷は、構造物の構造形式や用いる材料等が決まらなければ定まらないので、設計手順としては、各種情報に基づいて要求性能を合理的に設定し、必要な力学的及び環境作用を想定し、用いる構造形式や材料並びに施工法を選択することがスタートとなる。

図-5.1. にサステナビリティ設計のフローを示し、以下にその手順を詳述する。

まず初めに、構造物建設プロジェクト実施にあたり、社会的側面、経済的側面、環境的側面の 3 つの側面から以下に示す基本情報を収集・整理する(①)。社会的側面としては、安全性・使用性(耐久性)、建設工期、アクセス、適応性、健康・快適性、周辺環境への負荷(交通規制など)、維持管理、材料・サービスの調達、利害関係者関与、雇用創出、人口の変化、文化的遺産、法的制約などがあり、これらに関する基本情報を収

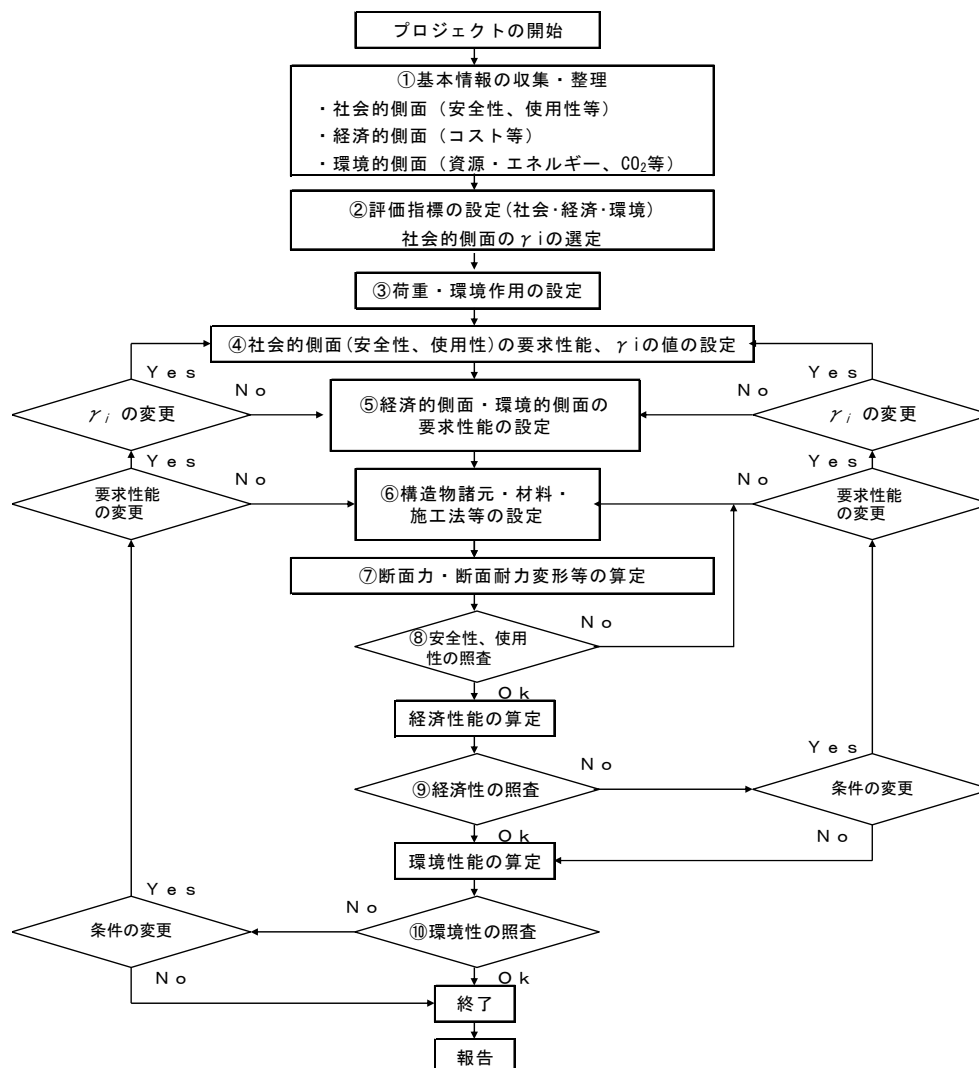


図-5.1. サステナビリティ設計のフロー



集整理する。経済的側面については、初期建設コスト、ランニングコスト、財産価値、直接便益、間接的経済効果、外部コストなどが上げられ、同様に情報収集する。環境的側面については、エネルギー・資源消費（再生エネルギーや副産物利用等も含む）、温暖化ガス排出量、汚染、騒音・振動、水資源、廃棄物管理、土地利用、景観・エコシステム、法的制約等があり、これについても情報を収集整理する。社会、経済、環境側面を複合的に扱うための指標も導入可能である。例えば、安全性増加当たりのエネルギー・資源消費量やコストの増加、コンクリート強度当たりのCO<sub>2</sub>排出量等が考えられる。

収集整理した情報の中から、当該プロジェクトで対象とすべき「評価指標」を3つの側面に対して、それぞれ抽出する(②)。この際、当該プロジェクトにおいて、選定された社会的側面ののうち、設計者が与条件から重要と考える安全性・使用性に対する余裕度 $\gamma_i$ を選定する。 $\gamma_i$ は、経済的側面・環境的側面に影響し、サステナビリティの総合評価に関わるので、「サステナビリティ係数」と称する。安全性・使用性に対する余裕度を $\gamma_i$ とした理由は、3つの要素の指標の中で、サステナビリティの観点から最も重視すべき指標との判断からである。なお、 $\gamma_i$ は複数選定しても構わない。

また、評価の対象期間は3つの側面のすべての指標について、建設時～供用時とする。たとえば、経済的側面のコストについてはライフサイクルコストを、環境的側面のCO<sub>2</sub>排出量については建設時のみならず供用時も含めたLCC-CO<sub>2</sub>排出量が対象となる。

次に、構造物に作用する荷重・環境作用を設定する(③)。

次のステップとして、社会的側面に関する「要求性能」として、 $\gamma_i$ の値およびその他の社会的側面の要求性能を設定する(④)。なお、 $\gamma_i$ の値は設計者が任意に設定できるものとし、制限値は設けない。耐久性能については、安全性能や使用性能の前提条件としての検討となる。

次に、他の二つの側面である経済的側面及び環境的側面に関する「要求性能」を設定する(⑤)。経済性能については、標準コスト(あるいは予算コスト)を踏まえた設定とし、最終的には安全性や環境性との関係で判断する。環境性能については、標準的なエネルギー・資源消費量やCO<sub>2</sub>等から設定とし、最終的には安全性やコストとの関係やライフサイクル性能等から判断する。法的制約以下の騒音・振動負荷も基本的に同じである。環境影響としては、負荷だけではなく、向上効果の要求も適切に考える。複合評価を実施する場合は、採用した評価指標の数値目標を設定する。

次に、④及び⑤で設定された要求性能を踏まえて、構造物の構造形式・部材断面寸法・配筋及び材料・コンクリート配合・施工法等を設定あるいは選択し(⑥)、断面力、断面耐力、変形等を算定する(⑦)。

安全性、使用性の照査を実施し(⑧)、要求性能を満足すれば、経済性能の算定と照査を実施する(⑨)。経済要求性能を満足すれば、環境性能の算定へ進む。経済性能が要求を満足しない場合、条件を変更するかどうかの判断を行う。経済要求性能を満足しな

くてもよいとする場合は、環境性能の算定へ進む。条件を変更する場合は、⑥、⑤、④へ戻る選択肢がある。

最後に、環境性能の算定と照査を実施する(⑩)。環境要求性能を満足すれば、終了する。環境性能が要求を満足しない場合、条件を変更するかどうかの判断する。環境要求性能を満足しなくてもよいとする場合、環境性能の算定へ進む。条件を変更する場合は、⑥、⑤、④へ戻る選択肢がある。

各評価指標の算定結果を総合的に判断して、必要があれば $\gamma_i$ を変更して最初からの手順を繰り返して、最適化を図る。

設計のアウトプットとして、検討内容における以下の項目を報告する。

- ・サステナビリティ係数、その他社会的側面の評価指標の値
- ・経済的側面の評価指標の値(コストなど)、標準コストからの増減(コスト増大を許容する理由、等)
- ・環境的側面の評価指標の値(エネルギー・資源使用量、環境負荷(CO<sub>2</sub>等))、標準的な環境負荷からの増減、増大を許容する理由、等)

なお、要求性能の設定においては、可能なものは絶対値で設定する。ただし、現状の設計法や標準的な施工法に対して、新たな方法を検討し、その特徴を理解するために使用する場合などは、想定される標準的なコストや環境負荷量などを目安として設定するという設定の仕方もある。

### 5.5.3. サステナビリティ要素の相互関係に関する数値計算例

#### 5.5.3.1. 数値計算の前提条件

サステナビリティ要素である、安全性能、環境性能、及び経済性能に関する相互関係を明らかにするために、図-5.2 に示す鉄筋コンクリート（RC）単純梁を対象とした数値計算例を示す。荷重は梁スパン中央に集中荷重 200kN を作用させた。

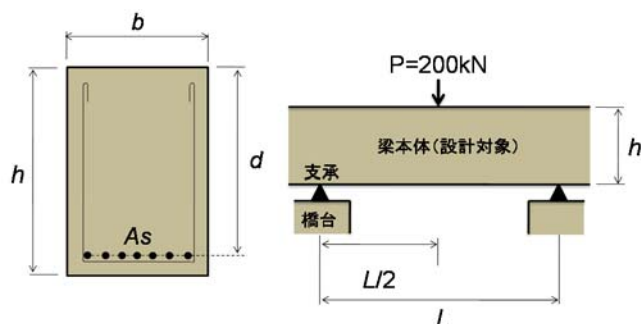


図-5.2. 検討対象 RC 梁

表-5.1. RC 梁の諸元

Cases	$C_0(\text{kg/m}^3)$	L (m)	d (m)	b (m)	h (m)
1	0	10	0.56	0.45	0.6
2	4.5	10	h- $c_{\min}$	0.45	0.6

環境条件として、Case1 は塩化物イオンが飛来しない通常の屋外の環境状況を想定し、コンクリート表面塩化物イオン濃度  $C_0$  を  $0\text{kg/m}^3$  とした。一方、Case2 は鋼材の腐食が生じやすい環境を想定し、 $C_0$  を  $4.5\text{ kg/m}^3$  とした。また、供用年数は全ての場合において 50 年とし、この期間鉄筋腐食が生じないようにかぶりを式 (5.3) により算出し、梁の有効高さを決定した。ただし、Case1 のかぶりは、コンクリート標準示方書〔設計編〕<sup>5, 2)</sup> で定められた最小かぶり 40mm とした。表-5.1. に各 RC 梁の諸元を示す。

$$C_d = C_0 \left[ 1 - \text{erf} \left( \frac{c}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right] \quad (5.3)$$

ここで、 $C_d$  は塩化物イオン濃度、 $c$  はかぶり、 $D_d$  は見かけの拡散係数の設計用値、 $t$  は時間、 $\text{erf}$  は誤差関数

この式において、設計耐用期間である 50 年以内において  $C_d$  が腐食発生限界塩化物イオン濃度に達しないようにかぶり  $c$  の値を求めることになる。

設計曲げ断面耐力 ( $M_{ud}$ ) は、コンクリート標準示方書〔設計編〕に基づいて式 (5.4) により求める。

$$M_{ud} = A_s f_{yd} d \left( 1 - \frac{p}{1.7} \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \right) / \gamma_b \quad (5.4)$$

ここで、 $A_s$  は引張鋼材の断面積、 $f_{yd}$  は引張鋼材の設計降伏強度、 $d$  は有効高さ、 $p$  は引張鋼材比、 $f_{cd}$  はコンクリートの設計圧縮強度、 $\gamma_b$  は部材係数 (=1.1)

なお、せん断についての検討から、せん断補強筋は不要となったので、せん断補強筋は配置しないことにした。曲げによる断面破壊に関する安全性の照査は次式となる。

$$\gamma_i S_d \leq R_d \quad (5.5)$$

ここで、 $S_d$  は設計断面力、 $R_d$  は設計断面耐力、及び  $\gamma_i$  はサステイナビリティ係数

式 (5.5) に用いられる  $\gamma_i$  を増加させれば、それに応じて断面耐力を増加させることになり、断面破壊に対する安全性の余裕度が増すことを意味する。

表-5.2. に、数値計算で用いるコンクリートの配合を示す。これは、実際に使用されているレディミクストコンクリートの配合である。セメントは普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種の 2 種類とし、それぞれにおいてコンクリートの圧縮強度の特性値、すなわちレディミクストコンクリートの呼び強度を 30 と 40 の 2 種類に設定し、対応する W/C の配合表記をそれぞれ 50 及び 40 とする。

表-5.2. コンクリートの配合

配合名	セメントの種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	W/C	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	Ad
OPC50	普通ポルトランドセメント	30	0.48	157	328	783	1071	0.82
OPC40	普通ポルトランドセメント	40	0.395	162	411	688	1081	1.03
BB50	高炉セメントB種	30	0.47	156	332	764	1076	0.83
BB40	高炉セメントB種	40	0.385	161	419	672	1081	1.05

環境的側面としての CO<sub>2</sub> 排出量について、インベントリ分析を行い評価した。インベントリ分析では、土木学会指針<sup>5.5)</sup>に基づくデータを使用した。表-5.3. に使用した構成材料の CO<sub>2</sub> 排出量原単位を示す。また、表-5.4. 及び表-5.5. は、それぞれ数値計算で用いたレディミクストコンクリート及び鉄筋の単価を示す。

表-5.3. 構成材料の CO<sub>2</sub> 排出量原単位

材料	CO <sub>2</sub> (kg-CO <sub>2</sub> /t)
普通ポルトランドセメント	766.6
高炉セメントB種	458.7
フライアッシュA種	624
粗骨材	2.9
細骨材	3.7
化学混和剤(リグニン系)	123
電気炉鋼	767.4

表-5.4. レディミクストコンクリートの単価

配合名	単価 (円/m <sup>3</sup> )
OPC50	13300
OPC40	14750
BB50	13500
BB40	15150

表-5.5. 鉄筋の単価

規格	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	単価 (円/kg)
SD345	345	65

### 5.5.3.2 数値計算結果

#### a) Case1-OPC50 の場合

Case1 の OPC50 の場合において、サステイナビリティ係数を 1.0～1.5 の範囲で変化させたときの CO<sub>2</sub> 排出量およびコストの変化率を図-5.3. 及び図-5.4. に示す。

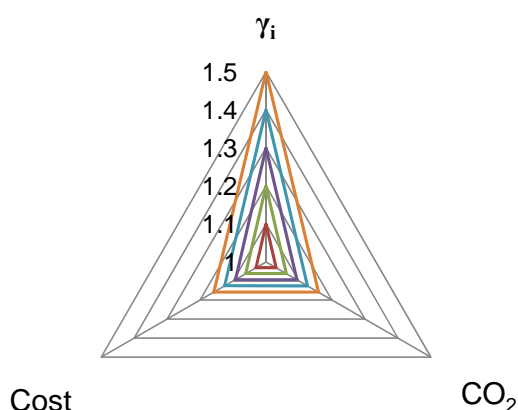


図-5.3.  $\gamma_i$ -コスト- $\text{CO}_2$  関係  
(Case1-OPC50)

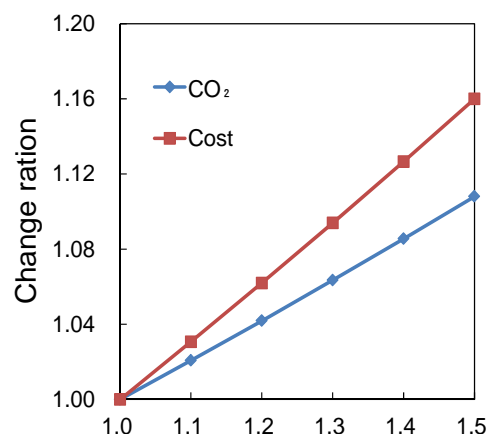


図-5.4.  $\gamma_i$ -コスト/ $\text{CO}_2$  関係  
(Case1-OPC50)

図-5.3. は、サステナビリティ係数すなわち断面破壊に対する安全性の余裕度を増加させた場合、他の2つの評価指標 ( $\text{CO}_2$  排出量、コスト) がどの程度の感度で増加するかを三角形で表したものである。図-5.4. はサステナビリティ係数を増加させた場合、コストは同じ程度の比率で増加するか否かを表したものである。サステナビリティ係数が1.1の場合、 $\text{CO}_2$  排出量は約2.1%、コストは約3.1%増加し、サステナビリティ係数が1.5の場合、 $\text{CO}_2$  排出量は約10.8%増加し、コストは約16.0%増加した。二つのグラフから、断面破壊に対する安全性の余裕度を増加させても、 $\text{CO}_2$  排出量ならびにコストは、その比率ほど増加しないことがわかる。

b) Case1-BB50 の場合

Case1-1 の BB50 の場合において、サステナビリティ係数を1.1にとれば  $\text{CO}_2$  排出量は約3.0%、コストは約3.0%増加し、サステナビリティ係数を1.5にとれば  $\text{CO}_2$  排出量は約5.9%増加し、コストは約15.8%増加した。

c) Case2-OPC40 の場合

Case2 の OPC40 の場合において、サステナビリティ係数を1.1にとれば  $\text{CO}_2$  排出

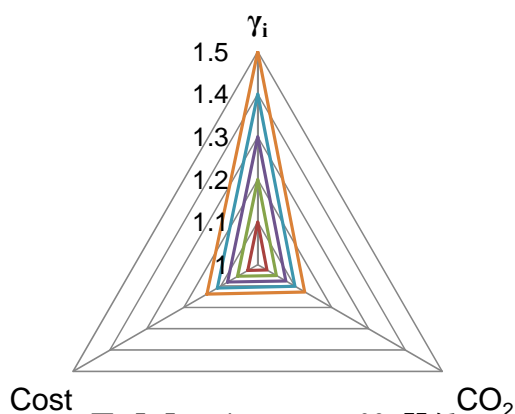


図-5.5.  $\gamma_i$ -コスト- $\text{CO}_2$  関係  
(Case2-BB40)

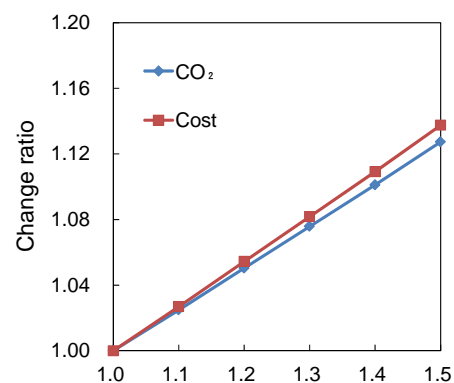


図-5.6.  $\gamma_i$ -コスト/ $\text{CO}_2$  関係  
(Case2-BB40)

量は約 1.7%、コストは約 2.8%増加し、サステナビリティ係数を 1.5 にとれば CO<sub>2</sub> 排出量は約 8.8%増加し、コストは約 14.3%増加した。

#### d) Case2-BB40 の場合

Case2 の BB40 の場合において、サステナビリティ係数を 1.0～1.5 の範囲で変化させたときの CO<sub>2</sub> 排出量およびコストの変化率を図-5.5. 及び図-5.6. に示す。

サステナビリティ係数が 1.1 の場合、CO<sub>2</sub> 排出量は約 2.5%、コストは約 2.7%増加し、サステナビリティ係数が 1.5 の場合、CO<sub>2</sub> 排出量は約 12.8%増加し、コストは約 13.8%増加した。

### 5.5.3.3 数値計算結果の評価

数値計算結果から、サステナビリティ係数を 1.1～1.5 に増加させると、CO<sub>2</sub> 排出量が 1.7～15.9%増加し、コストが 2.7～16.0%増加する結果となった。すなわち、今回のケースでは、安全性の余裕度を増加させても、CO<sub>2</sub> 排出量とコストは、その増加比率ほど増えなかった。当然ながら、標準の状態( $\gamma_1=1.0$ )の設定条件、あるいはその他の与条件次第で結果は変わるため、数値の比率自体に意味があるものではない。

実際にサステナビリティ係数をどう設定するかは、構造物に求められる条件によって異なる。しかし、安全性の余裕度を増すことで、サステナビリティの他の要素であるコストや環境側面に影響することは明らかで、要求性能の設定にはこうした関係を考慮した総合的な判断が必要になる。その観点から、提案した手法は、サステナビリティ要素の相互関係を把握し、総合的な判断を実現するうえで有効なツールとなりうる。

なお、本数値計算では問題を単純化しているが、実際には施工法や構造形式、あるいは用いる材料等が結果に大きく影響する。実際には、サステナビリティを構成する 3 つの側面に関する要素を適切に抽出して、それらについての定量的な評価をすることが最低要件となる。また、設定した要求性能を満足するために、様々な選択肢の検討による最適解の追及や、場合によっては技術開発を実施することも考えられる。

## 5.6. まとめ

- 1) 建設分野にサステナビリティ思考を導入することの意義を明確にし、社会的側面、経済的側面、環境的側面のそれぞれにおいて考慮すべき事項を整理し、サステナビリティ設計で検討すべき項目を明らかにした。

材料が有する特性を「合理的」に利用して、構造としてのサステナビリティを実現するためには、構造としての挙動をできるだけ正確に把握した上で、構造的な余裕度増によるコストや環境負荷への影響を明確にして、それらの間のバランスを考えて最終的な

判断をする必要がある。このようにサステナビリティ要素の総合評価の観点における構造物の性能を「**Structural Sustainability**」と定義することができる。今後、こうした考え方で様々な技術革新を起こし、構造物を造ることが、社会のサステナビリティを実現できると考える。

- 2) 安全性や使用性だけでなく、資源・エネルギーの枯渇や地球温暖化問題を具体的に評価できる「新しい」設計体系の必要性を明らかにし、人類と地球の持続可能性を評価、実現する総合指標である「サステナビリティ」を構造物の設計に明示的に組み込んだ「サステナビリティ設計」を提案した。

構造物のサステナビリティ設計は、まず第一に、社会的側面の安全性・使用性に対する余裕度をサステナビリティ係数( $\gamma_i$ )として定義し、その他の社会的側面、経済的側面、及び環境的側面、あるいは複合側面に関する要求性能を設定し、それらが満足される構造形式・材料・施工等を総合的な判断により決定する。

- 3) 上述の設計フローに従い、RC 単純梁に集中荷重を作用させたモデルでケーススタディを行った。数値計算結果から、サステナビリティ係数すなわち安全性に対する余裕を増加させても、コストならびに CO<sub>2</sub> 排出量は必ずしもその比率で増加しない事例を示した。安全性の余裕度を増すことで、サステナビリティの他の要素であるコストや環境側面に影響することは明らかで、要求性能の設定にはこうした関係を考慮した総合的な判断が必要になる。その観点から、提案した設計は、サステナビリティ要素の相互関係を把握し、総合的な判断を実現するうえで有効なツールとなりうることを示した。
- 4) 以上のことから、現行の設計法をサステナビリティの観点から再編して、より合理的かつ多様な考え方を設計に組み込めることが可能であることを明らかにした。

#### ◎参考文献

- 5.1) K Sakai・T Shibata・A Kasuga・H Nakamura : Sustainability design of concrete structures、Structural Concrete journal of the fib,,Volume 17 No.6、 pp1114-1125, 2016
- 5.2) 土木学会 : コンクリート標準示方書[設計編]2012
- 5.3) fib: fib Model Code for Concrete Structures 2010
- 5.4) 堺孝司、横田弘、コンクリート構造物のサステナビリティ設計、技法堂出版、2017
- 5.5) 土木学会、コンクリートライブラリー125 コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)、2005

## 第6章 サステナビリティ設計のPC高架橋への適用

### 6.1. 概要

本章では、過去に山岳地域で建設されたプレストレストコンクリート高架橋(PC 高架橋)のプロジェクトをバックキャストして、サステナビリティ設計の適用性を検討する<sup>6.1)</sup>。具体的には、図-5.1. に示したサステナビリティ設計のフローに基づき、サステナビリティ設計で考慮すべき評価指標の抽出を行い、それらについての要求性能を設定し、それらを満足すると思われる構造物諸元を仮定して保有性能を算定、要求性能が確保されるかどうかを照査した。さらに、標準的な工法との比較においてサステナビリティ要素間の関係について総合的な評価を行い、サステナビリティ設計の有効性を検討した。この事例では、従来工法に様々な設計上の工夫を実施し、適切な施工法を組み合わせることで、サステイナブルな構造物の構築が可能になることを明確にする。

### 6.2. 対象橋梁と基本情報

対象高架橋は、第二東名高速道路の一部として、丘陵地にプレストレストコンクリート製の高架橋として建設されたものである<sup>6.6)</sup>。図-6.1. に高架橋一般図を、図-6.2 に高架橋全景写真(完成後)を示す。

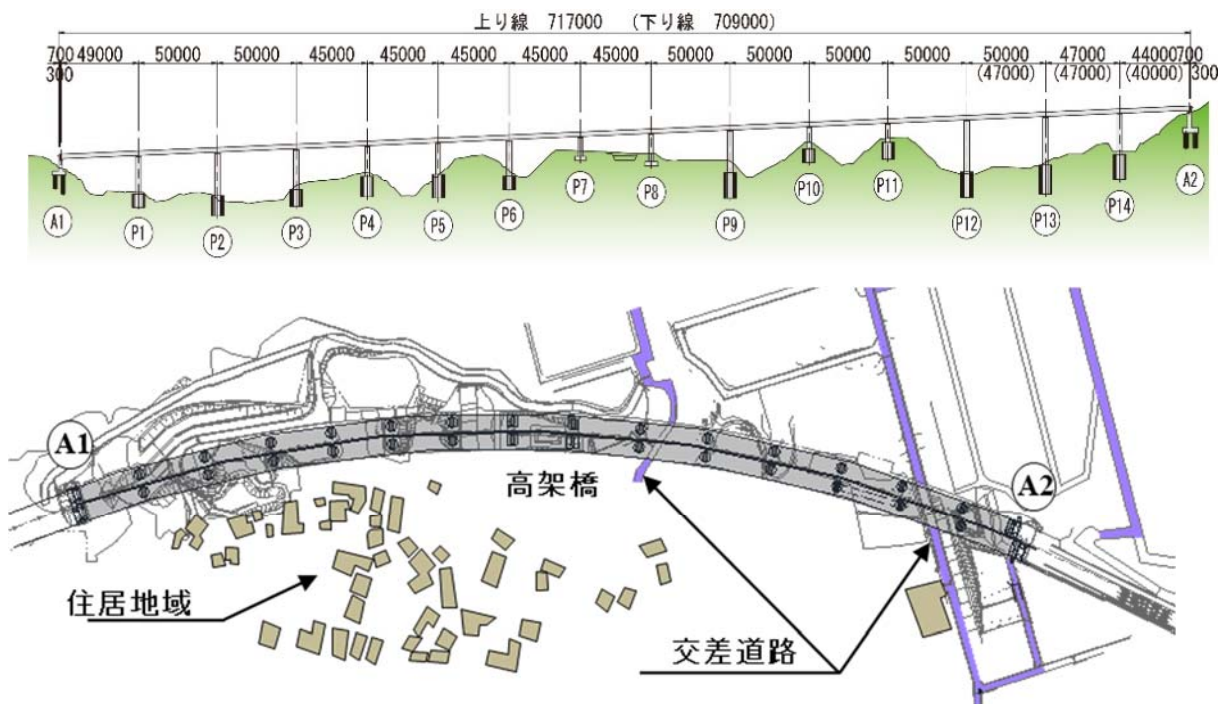


図-6.1. 高架橋一般図





図-6. 2. 高架橋全景写真

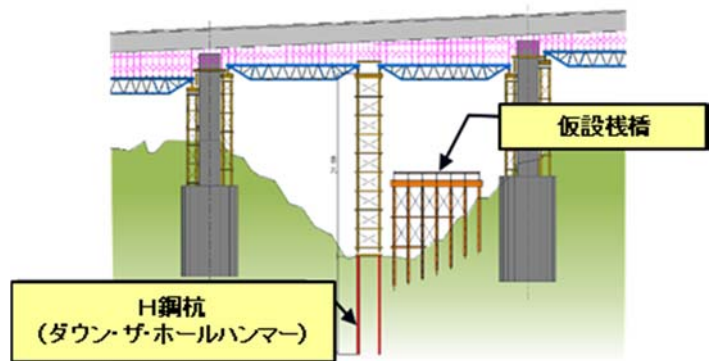


図-6. 3. 場所打ち支保工施工 (GM)

既に下部工は完成しており、上部工の標準工法（以下、「GM(General Method)」と称する）は支保工による場所打ちコンクリートで計画されていた(図-6. 3.)。

支保工・工事用道路設置には大きな地形改変を伴うとともに、交差する生活道路の一部通行止めも計画では不可欠であった。また、周辺に閑静な住宅街があり、騒音に対する配慮が必要となることなど、環境負荷低減が大きな課題となる立地条件であった。さらに、当該地域では、近い将来に東海地震の発生が懸念されており、耐震性の十分な確保が極めて重要となっていた。

その他の環境的側面としては、高速道路建設工事が周辺で最盛期を迎えていたことから、CO<sub>2</sub>などの温暖化ガス削減や廃棄物の抑制が重要な課題となっていた。また、構造形式や施工方法の変更は可能であったが、建設コストについては標準工法に比べて増加することは認められない状況にあった。

## 6. 3. サステナビリティ設計の適用

### 6. 3. 1. 評価指標の抽出

高架橋におけるコンクリート構造物のサステナビリティ設計において考えられる評価指標をすべて洗い出した。この中から、6. 2. で整理した本プロジェクトにおける基本情報を考慮し、社会的側面、経済的側面および環境的側面における評価指標を抽出した<sup>6. 2)</sup>。

#### 6. 3. 1. 1. 社会的側面

##### (1) 安全性の余裕度 $\gamma_i$

高速道路の社会的重要性と東海地震に対する安全性向上の観点から、橋脚基部の曲げモーメントに対する安全性の余裕度をサステナビリティ係数  $\gamma_i$  として設定した。

なお、本章の目的は、あくまで 5 章で提案したサステナビリティの設計の枠組みの適用性を確認するものであり、単純化のため、一つの部位・荷重ケースを抽出して検

証することとした。実際の設計に供するためには、 $\gamma_i$ として安全性、使用性のうち、なにを選定すべきか、また安全性を選定した場合に、どの部材のどの断面力に着目すべきか、また複数の $\gamma_i$ を選定する必要性はないか、などの検証が必要である。

#### (2) 美観および周辺環境との調和

景観・調和は、評価者のアンケート点数等で評価することが考えられる。これらは、線形・橋梁スパンなど計画段階の要素である。本検討においては、下部工施工済みで線形やスパン割の変更は不可能であったため、評価対象外とした。

#### (3) アクセス

アクセスは、構造物による分断地域の連続化によるアクセス時間短縮などで評価できる。しかし、この評価は、どのルートを通して、どこにICを作るかなど、計画段階で決定されるものであり、本件においてはすでに変更不可であったため、評価対象外とした。

#### (4) 労働安全性

支保工施工における墜落災害の発生リスクが高い高所作業量に着目して、これを評価指標とした。

表-6.1. 評価指標の抽出結果（社会的側面）

項目	評価指標
$\gamma_i$	耐震安全性の余裕度（橋脚基部の曲げモーメント）
労働安全性	高所作業量
住民問題	生活道路通行止め日数
	資機材運搬車両台数

#### (5) 住民問題

GMでは支保工施工の計画であり、交差する生活道路の一部通行止めが必要であった。そこで、工事期間中の生活道路の通行止め日数と、資機材運搬車両台数を評価指標とした。本プロジェクトにおいて社会的側面として検討対象とした評価指標を表-6.1.に示す。

### 6.3.1.2. 経済的側面

#### (1) ライフサイクルコスト

上部工に関するライフサイクルコストを算出するにあたり、上部工に関する耐用年数をコンクリートの中性化に着目して検討した。GMを対象にした設計における鉄筋かぶり(t=45mm)で耐用年数を算定した結果、供用耐用年数100年を大きく上回った。そのため、コンクリート本体のメンテナンスコストの影響は小さいと判断し、初期建設コストのみを評価指標とした。なお、実際の設計に供する場合には、コンクリート構造のみでなく、橋梁付属物や舗装などのメンテナンスコストも考慮する必要がある。今回

の検討では、GMとの比較において供用期間中に差が生じないため付属物などのメンテナンスコストも評価対象外とした。

## (2) 地域への効果

高速道路の早期供用による経済効果などが、地域経済に与える影響に関する評価指標として考えられる。しかし、本工事では工期短縮は求められていなかったことから、早期供用の経済効果については評価対象外とした。

## (3) 労務コスト

建設業従事者が大幅に減少している日本の社会情勢を顧みると、省力化施工により労働者数を低減することが求められており、この点を評価の対象とするために、指標として労務コストを用いることとした。労務コストは、延労働者数に労務単価を乗じた価を指標とした。本プロジェクトにおける経済的側面として検討対象とした評価指標を表-6.2.に示す。

表-6.2. 評価指標の抽出結果(経済的側面)

項目	評価指標
ライフサイクルコスト	初期建設コスト
労務コスト	人数×労務単価

### 6.3.1.3. 環境的側面

#### (1) 材料

コンクリート構造物の主要資材（コンクリート、鉄筋、P C 鋼材）と施工に必要な資機材（木製型枠、仮設鋼材）について使用数量を算出した。この数量は、エネルギー、温暖化ガス排出量の算出に利用した。

#### (2) エネルギー

使用機械について使用電力と使用軽油量を算出し、熱量換算して評価指標とした。

#### (3) 輸送

資機材の「運送距離×重量」（＝運搬量）を評価指標とした。

#### (4) 温暖化ガス排出量

材料、エネルギー、輸送の計算結果を用いて算出した、資材製造時、施工時(機械の電力消費/燃料消費)、資機材運送時におけるCO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、ばいじんの各排出量を評価指標とした。

#### (5) 廃棄物

工事で発生したコンクリート塊、建設発生木材等の産業廃棄物量を評価指標とした。

#### (6) 土地利用

支保工設置に伴う土地改変面積、また土地改変で失われた緑のCO<sub>2</sub>固定量総損失量を評価指標とした。

#### (7)騒音

周辺に閑静な住宅街があったため、法的な騒音規制値は85dBであるが、上部工施工時において、騒音に対する自主管理規制値を55dBに設定した。自主管理規制値を超える騒音の発生期間と、騒音が自主管理規制値レベルに近い作業となる場所打ちコンクリート（50dB）の作業時間を評価指標とした。

#### (8)生物多様性

工事箇所の生物特徴を希少動物調査等により把握して、特別な生物環境であれば、今までであった自然環境を壊すという観点から評価を行うことが考えられる。しかし、本立地条件下では、一般的な生物環境であったことから、評価対象外とした。

#### (9)水資源

水資源を保護する観点から、上部工施工時に使用する水量を評価指標とした。本プロジェクトにおいて環境的側面として検討対象とした評価指標を表-6.3.に示す。

表-6.3. 評価指標の抽出結果（環境的側面）

項目	評価指標
エネルギー	熱量
輸送	運搬量=運送距離×重量
温暖化ガス排出量	CO <sub>2</sub> 、SO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> 、ばいじんの排出量
廃棄物	産業廃棄物量
土地利用	施工ヤードの土地改変面積
	CO <sub>2</sub> 固定量総損失量
騒音	自主規制値(55dB)を超えた騒音の発生時間
	コンクリート打設(50dB)の作業時間
水資源	工事使用水量

なお、上記で抽出したエネルギー、温暖化ガス排出量については、本来は工事期間中だけでなく供用期間中も対象とすべきである。今回の検討では、GMとの比較において供用期間中に差が生じないため、施工中のみを対象期間とした。

### 6.3.2. 要求性能の設定

本プロジェクトにおける基本情報を考慮した評価指標の抽出結果から、社会的側面、経済的側面、環境的側面に対する3つの要求性能を以下の通り設定した。

#### 6.3.2.1. 社会的側面

- (1) 橋脚の耐震安全性の余裕度(サステナビリティ係数)を $\gamma_f=1.1$ に設定する。
- (2) 墜落災害の発生リスクが高い高所作業量をGM 以下とする。
- (3) 住民への負荷（生活道路の通行止め日数、工事車両台数）をGM 以下とする。

#### 6.3.2.2. 経済的側面

- (1) 他の要求性能を満足させたいうえで、初期建設コストをGM以下とする。
- (2) 省力化施工を導入し、労務コストをGM以下とする。

#### 6.3.2.3. 環境的側面

環境側面に関する以下の指標をすべてGM以下とする。

- (1) エネルギー使用量(熱量)
- (2) 運搬量(輸送距離×重量)
- (3) 温暖化ガス排出量(CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, ばいじん)
- (4) 産業廃棄物量
- (5) 地形改変面積およびCO<sub>2</sub>固定量の総損失量
- (6) 周辺の住宅街への騒音
- (7) 工事使用水量

新規プロジェクトにおいて設計を実施する場合は、サステナビリティ係数 $\gamma_i$ は絶対値を設計者が任意に設定し、図-5.1の設計フローに従い、必要に応じて変更することで最終的に決定する。今回は、過去のプロジェクトをバックキャストしてGMとの比較を行ったため、実際の断面耐力から逆算して設定した。他の要求性能の値についても、本来、絶対値を設定すべきところを同様の理由からGM以下とすることに設定した。

### 6.3.3 技術的検討

先述した要求性能を確保する上で重要な課題は、耐震安全性の余裕度を向上させること、また支柱基礎の杭打ち作業による騒音や生活道路の通行止めなど周辺住民への社会的影響の低減、および環境負荷の低減である。

本橋では、地面上での作業を可能な限り排除して、地形改変面積を低減できる架設桁を用いたプレキャストセグメント工法が選定された。サステナビリティ設計のフローに従い、基本情報から整理された要求性能に対する課題とそれらに対する対策を以下に示す。

#### 6.3.3.1. 新しいプレキャストセグメント構造の開発

プレキャストセグメント工法の採用にあたり、想定される東海地震に対して安全性の余裕度を向上させるための方策を考える必要があった。しかし、既に下部工は完成しており、構造全体系での改善はできなかったため、上部構造の軽量化により安全性の要求余裕度を確保する方策がとられた。

標準的なセグメントは図-6.4.に示すように、箱桁断面だけでなく張出し床板を含めてすべてをプレキャスト化する構造となっている。一方、新たに開発されたプレキャストセグメント(図-6.5.)は、箱桁コア断面にリブとストラットを取り付けた構造となっている。張出し床版はプレキャストセグメント架設完了後、橋面上からリブ間にPC板を設置したのち現場打ちコンクリートを打設する。このセグメント構造の採用により、標準的な断面と比較して約10%主桁重量を低減することが可能となった。本構造の採用により、主桁の軽量化と施工における省人化および急速化を実現できる。

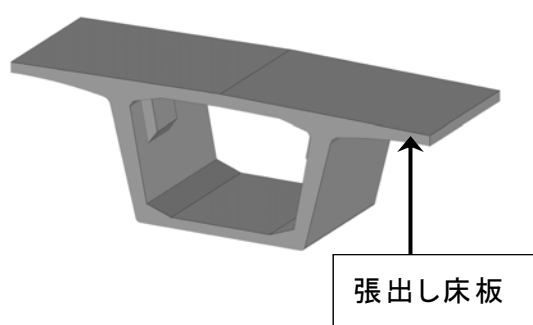


図-6.4. 標準的なセグメント

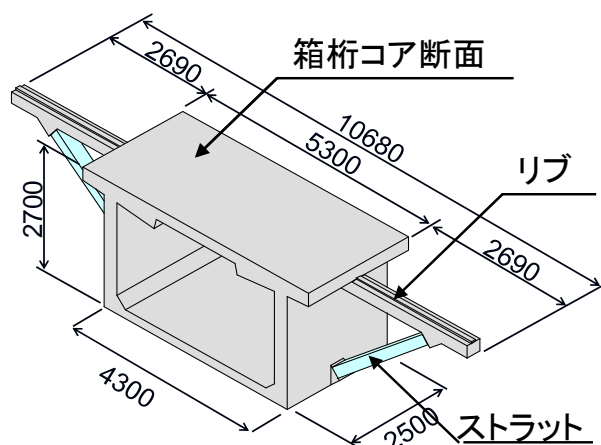


図-6.5. 開発したセグメント

### 6.3.3.2 架設桁を用いたプレキャストセグメントによる張出架設工法の採用

プレキャストセグメント工法は、主に急速施工や品質確保を目的としており、一般にスパンバイスパン工法（図-6.6.、図-6.7.、以下、「SSM(Span by Span Method)」と称する。）により架設される。図-6.7.に示すとおり、SSMとはプレキャストセグメントを架設桁直下にトレーラー等で輸送し、架設桁（エレクションガーダー）を用いて、支間一括で吊り下げて一体化する工法である。



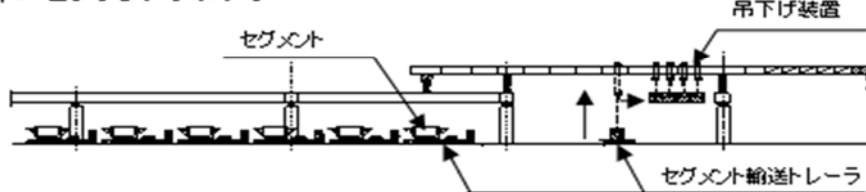
図-6.6. スパンバイスパン工法（SSM）

1 支間分の全主桁重量を負担するため機械費（架設桁）が高くなり全体工費を増加させることや、工事用道路の整備に伴う地形改変により環境負荷はGMより大きくなる。

#### Step1 エレクションガーダーの移動



#### Step2 セグメントの吊下げ



#### Step3 1スパン接合

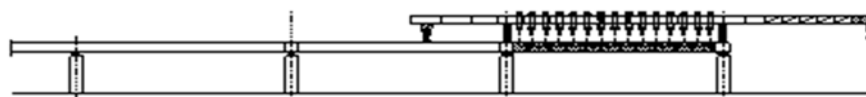


図-6.7. スパンバイスパン工法（SSM）の施工ステップ

上述のSSMでの課題を解決するため、1橋脚から両側に1ブロック毎に架設するプレキャストセグメントの張出し架設工法が採用された（図-6.8.、図-6.9.、以下、「BCM(Balanced Cantilever Method)」と称する。）。



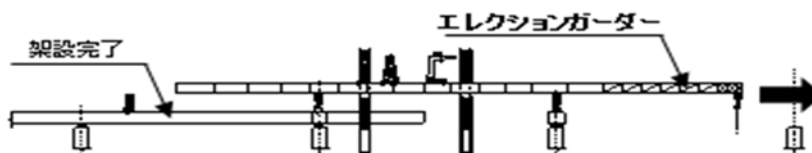
BCM は、SSM の架設桁設備と比較して、機械費を約 30% 圧縮できる。また、通常は支保工の場所打ちコンクリートで構築する柱頭部もセグメント化し架設桁により架設された。これにより、地面上での作業を大幅に低減され、地形改変を極小化することができる。

プレキャストセグメントは工場で製作し、トレーラーで架設現場へ輸送するのが一般的である。

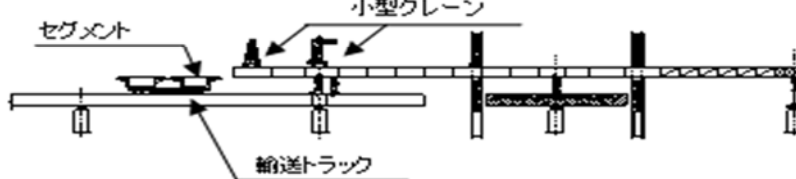


図-6.8. 張出し架設工法 (BCM)

#### Step1 エレクションガーダーの移動



#### Step2 プレキャストセグメントの張出し架設



#### Step3 中央併合



図-6.9. 張出し架設工法 (BCM) の施工ステップ

本プロジェクトでは既に整備されていた A2 橋台背面の盛土エリアを有効利用し、セグメント製作ヤードが建設された (図-6.10.)。

また、プレキャストセグメントの製作ヤードから架設桁までの輸送は電動式の運搬台車を用い、エレクションガーダーにより架設された (図-6.11.)。



図-6.10. セグメント製作ヤード



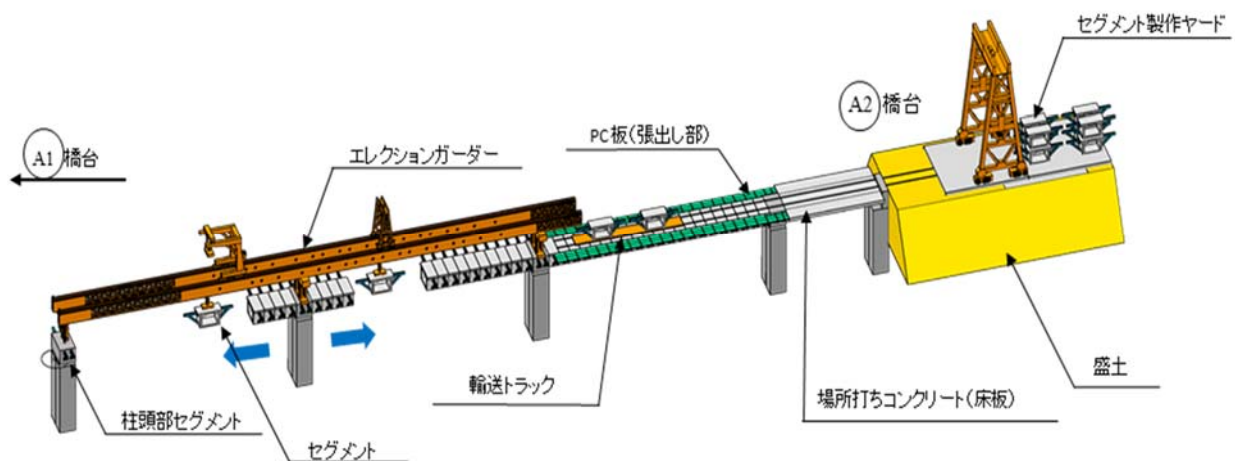


図-6.11. セグメント架設のイメージ (BCM)

#### 6.3.4 保持性能の算定及び照査

GMとBCMにおける各評価指標について、保有性能を算定し、要求性能を満足するかどうかを照査した。各工法の算定結果および照査結果を以下に述べる。

##### 6.3.4.1. 社会的側面

###### (1) 安全性の余裕度 $\gamma_i$ (サステナビリティ係数)

地震動の分担水平力に対する橋脚基部に作用する曲げモーメントM (図-6.12.) と抵抗モーメント $M_r$ を算定し、保持性能を照査した。その結果、表-6.4.に示すように、GMでは安全性の余裕度  $\gamma_i$  ( $M_r/M$ )は1.1を下回った。一方、BCMでは上部工軽量化の効果により  $\gamma_i$ は1.1を上回り、要求性能は満足された。

表-6.4. 評価結果 (安全性の余裕度)

評価指標	単位	GM	BCM
M	kNm	100,266	90,821
$M_r$	kNm	102,913	102,913
$M_r/M = \gamma_i$		1.03	1.13

$M_r$ :抵抗モーメント

M:作用モーメント

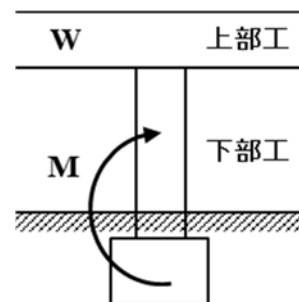


図-6.12. 橋脚基部のモーメント図

###### (2) 労働安全性

墜落災害の発生リスクが高く、安全帯を使用する支保工組立・解体等の高所作業日数を算定し照査した。GMでは、支保工組立・解体([15日+10日]×上下線30径間)の計750日となる。BCMでは、架設桁の組立・横移動・解体(95日+30日+30日)と側径間支保工

([15日+10日]/2×4箇所)の組立・解体等の計205日となった。BCMの採用により、高所作業日数は27%まで低減された。

BCMの採用により、労働安全性に関する要求性能は満足された(表-6.5.)。

表-6.5. 評価結果(労働安全性)

評価指標	単位	GM	BCM	BCM/GM
高所作業量	延日数	750	205	0.27

### (3) 住民問題

生活道路の分断の影響を、道路上での支保工組立解体作業による通行止めの日数を算定し照査した。GMでは、町道2箇所の生活道路において、支保工組立・解体([15日+10日]×上下線)の通行止め100日が想定された。BCMでは、生活道路上に支保工を設置する必要がなくなったため、通行止め日数は0日である。

また、資機材運搬車両による影響を、運搬車両台数(10t車換算)で算定し照査した。GMは運搬車両台数が3634台であるのに対し、BCMでは3284台に抑制され、生活道路への影響(渋滞、粉塵)は90%まで低減された。

BCMの採用により、表-6.6に示すように、住民問題に関する要求性能は満足された。

表-6.6. 評価結果(住民問題)

評価指標	単位	GM	BCM	BCM/GM
生活道路の通行止め日数	日	100	0	0.00
運搬車両台数	台	3,634	3,284	0.90

### 6.3.4.2. 経済的側面

#### (1) ライフサイクルコスト

図-6.13.に、工法別初期建設コストを示す。SSMを採用すると、GMに対して、労務費が20%減少する代わりに機械費が162%増大し、トータル建設コストは12%増大する。しかし、BCMを採用することで、SSMと比較して、ストラットを有する箱桁断面の採用による軽量化で材料費は11%抑制され、張出架設工法の採用による架設桁の軽量化で機械費は28%低減される。

この結果、BCMの採用により、初期建設コストはGMと同程度に抑制され、ライフサイクルコストに関する要求性能は満足された。

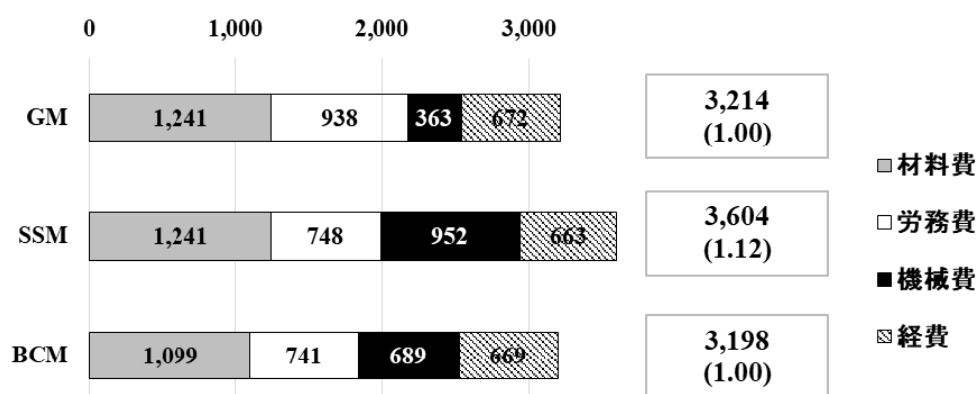


図-6.13. 工法別初期建設コストの比較

## (2) 労務コスト

延労働者数に作業員平均設計単価を乗じた労務コストとして算定し照査した。表-6.7.示すように、BCMでは省力化が図られ、労務コストを82%に抑制できた。

BCMの採用により、労務コストに関する要求性能は満足された。

表-6.7. 評価結果(労務コスト)

評価指標	単位	GM	BCM	BCM/GM
労務費=労務単価×人数	円・人	919	750	0.82

## 6.3.4.3 環境的側面

### (1) 材料使用量

BCMではプレキャスト部材の採用により、本体構造のコンクリートを高強度化(36N⇒50N)して断面形状をスリム化されたため、コンクリート使用量は92%に減少した。また、鉄筋は13%増加したものの、PC鋼材は本体の軽量化により12%減少した。木製型枠はプレキャスト部材の採用により25%に減少した。

表-6.8. 評価結果(材料使用量)

評価指標	単位	GM	BCM	BCM/GM
コンクリート	m <sup>3</sup>	12,576	11,579	0.92
鉄筋	t	2,097	2,365	1.13
PC鋼材	t	551	482	0.87
型枠	t	203	50	0.25
仮設鋼材	t	2,041	992	0.49
セメント	t	4,186	4,965	1.19
骨材	t	22,686	19,972	0.88

仮設鋼材については、GMではH鋼杭を残置することとなっており、支柱式支保工は6径間分のリース材を転用する計画であった。BCMでは、支保工材が側径間工4箇所分となり大幅に削減された。BCMの採用により、張出施工で必要となる架設桁620tを合わせても仮設鋼材は49%に減少した。コンクリートに関しては、各部材において強度が異なるなどの影響を考慮して、セメントと骨材の内訳についても配合毎に算定した。BCMの採用により、コンクリート使用量が減少したものの、高強度化によりセメントは119%に増加し、一方で骨材は88%に減少した。これらの結果を表-6.8.に示す。

## (2) エネルギー消費量

杭打ち機械やクレーン等の重機類や車両系は軽油に換算した燃料消費量を、その他各工種で使用する機械類や架設機械については電力消費量を算定した<sup>6.3)6.4)</sup>。

電力消費量は、GMに対して、セグメント製作ヤード及び架設桁を使用するBCMの方が212%に大きく増加した。一方、燃料消費量は、支保工設置及び高所作業によるクレーン、杭打機他の重機使用が多いGMに対して、BCMの方は13%に減少した。

これらを熱量換算し照査した結果、表-6.9に示すように、BCMの方が24%に抑制でき、施工期間中のエネルギー消費量に関する要求性能が満足された。

表-6.9. 評価結果(エネルギー消費量)

評価指標	単位	GM	BCM	BCM/GM
電力消費	kwh	93,289	197,739	2.12
燃料消費量	ℓ	357,464	46,285	0.13
熱量	MJ	14,495	3,548	0.24

## (3) 運搬量

資機材の運送距離×質量を運搬量として算定した<sup>6.4)</sup>。

プレキャスト部材を使用した場合、通常は工場からの運搬距離の影響により、運搬量が大きくなる。しかし、本工事においては、既に整備されているA2橋台背面にセグメント製作ヤードを建設したため、運搬量の増大を抑制できた。BCMの採用により、多径間にわたって同時に設置する必要があった支保工材が大幅に減少し、運搬量は74%に低減され、表-6.10.に示すように、運搬量に関する要求性能は満足された。

表-6.10. 評価指標(運搬量)

評価指標	単位	GM	BCM	BCM/GM
運送距離×重量	km・t	1,767,677	1,314,907	0.74

#### (4) 温暖化ガス排出量

使用する資材の製造、運搬、施工時に消費するエネルギーにより排出されるガス(CO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、ばいじん)を算定した<sup>6.3)6.4)</sup>。各項目における単位排出原単位を表-6.11.に示す。

表-6.11. 単位排出原単位の一覧

項 目		種 別	単位排出量							
			CO <sub>2</sub>		SO <sub>x</sub>		NO <sub>x</sub>		ばいじん	
			単位	値	単位	値	単位	値	単位	値
資材製造	コンクリート	セメント	g/kg	766.6	g/kg	1.22E-01	g/kg	1.55E+00	g/kg	3.58E-02
		粗骨材	g/kg	3.7	g/kg	8.60E-03	g/kg	5.88E-03	g/kg	1.99E-03
		細骨材	g/kg	2.9	g/kg	6.07E-03	g/kg	4.10E-03	g/kg	1.41E-03
		混和剤	g/kg	123.0	g/kg	3.90E-01	g/kg	2.80E-01	g/kg	2.00E-02
	鉄 筋		kg/kg	0.767	g/kg	0.134	g/kg	0.124	g/kg	0.010
	PC鋼材		kg/kg	1.322	g/kg	1.180	g/kg	1.810	g/kg	0.009
	型枠		kg/kg	0.052						
	工場製品		kg/t	294.9	kg/t	0.041	kg/t	0.348	kg/t	0.025
資材運搬	コンクリート	30N/mm <sup>2</sup>	kg/km <sup>3</sup>	0.253	kg/km <sup>3</sup>	1.95E-04	kg/km <sup>3</sup>	3.79E-03	kg/km <sup>3</sup>	1.92E-04
	鉄 筋		kg/tkm	0.122	kg/tkm	9.41E-05	kg/tkm	9.14E-04	kg/tkm	7.68E-05
	PC鋼材									
	工場製品									
	移動作業車									
施工	上部工	電力消費	kg/kwh	0.407	g/kwh	0.130	g/kwh	0.130	g/kwh	0.330
		主桁製作 地覆工								
		燃料消費	kg/L	2640	g/L	2040	g/L	39.610	g/L	2010
		クレーン ポンプ車 地覆作業車								

BCMの採用により、CO<sub>2</sub>は91%に減少、SO<sub>x</sub>およびNO<sub>x</sub>は約64%に減少、ばいじんは52%に減少した。これにより、表-6.12.に示すように、環境的側面に関する施工期間中の各排出ガスに関する要求性能は満足された。

表-6.12 評価結果(温暖化ガス排出量)

評価指標	単位	GM	BCM	BCM/GM
CO <sub>2</sub>	t-CO <sub>2</sub>	12,882	11,739	0.91
SO <sub>x</sub>	kg-SO <sub>x</sub>	5,622	3,593	0.64
NO <sub>x</sub>	kg-NO <sub>x</sub>	34,079	21,487	0.63
ばいじん	kg-PM	1,282	663	0.52

#### (5) 産業廃棄物量

工事で発生した産業廃棄物として、コンクリート塊、建設発生木材の数量を算定した。BCMではコンクリートと型枠材の使用量が減少したため、産業廃棄物量は78%に減少した(表6.13)。

BCMの採用により、産業廃棄物量に関する要求性能は満足された。

表-6. 13. 評価結果（産業廃棄物量）

評価指標	単位	GM	BCM	BCM/GM
産業廃棄物量	t	1,426	1,117	0.78

(6) 土地利用

施工時の土地利用として、支保工設置のために新たに土地改変が必要となった面積を図-6. 14. に示す。BCMでは、支保工設置箇所がA1, A2橋台付近のみに大幅に削減され、表-6. 14. に示すように、土地改変面積はGMに比べ11%に抑制された。

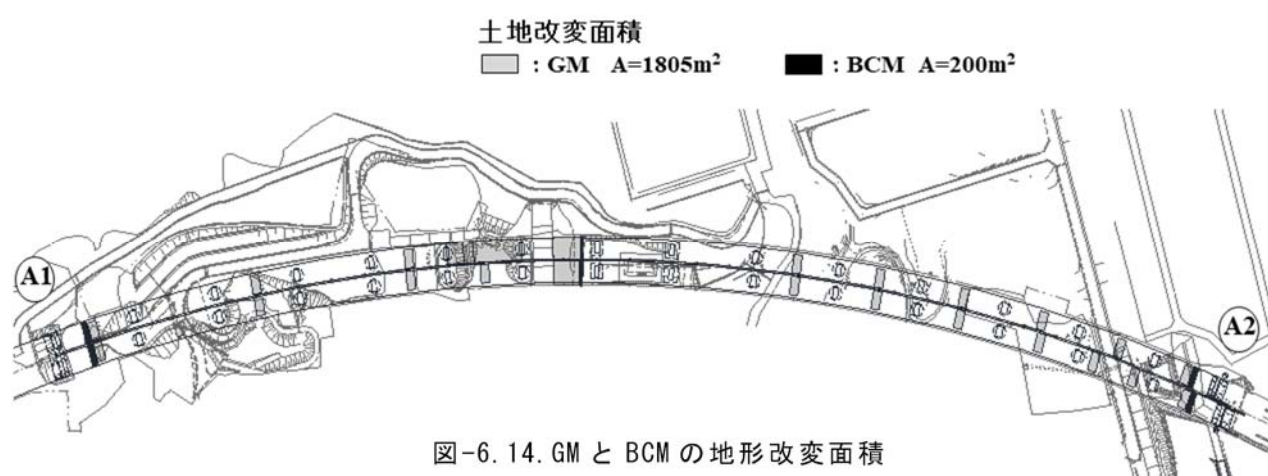


図-6. 14. GM と BCM の地形改変面積

表-6. 14. 評価結果（土地改変面積）

評価指標	単位	GM	BCM	BCM/GM
土地改変面積	m <sup>2</sup>	1,805	200	0.11

次に、工事中の土地改変により失われた緑のCO<sub>2</sub>固定量に着目した。対象となる樹木の種類や高さによって数値は異なるが、現場状況に近い代表種として目通し幹周15cmの常緑広葉樹シラカシ（CO<sub>2</sub>固定量：5.4376kg/m<sup>2</sup>）を選定した<sup>6.5)</sup>。失われた緑が再び樹林化するまでの期間を15年間と設定し、CO<sub>2</sub>固定量を算定した（図-6. 15.）。BCMでは、CO<sub>2</sub>固定量の総損失量は11%に減少できた。

表-6. 15. に示すように、BCMの採用により、土地利用に関する要求性能は満足された。

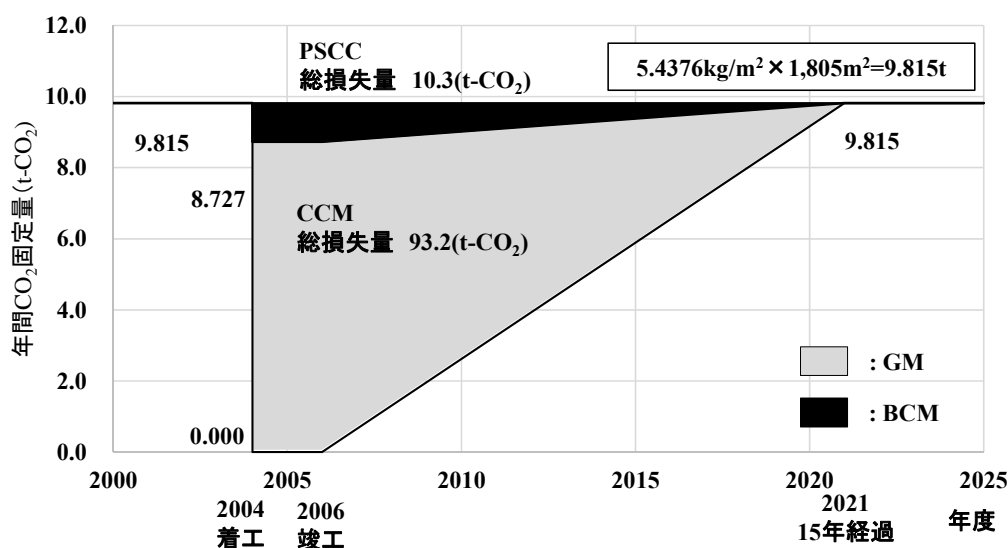


図-6.15. 地形改変面積の差による CO<sub>2</sub> 固定量の推移

表-6.15. 評価結果 (CO<sub>2</sub> 固定量総損失量)

	改変面積 (m <sup>2</sup> )	年間CO <sub>2</sub> 固定量(t-CO <sub>2</sub> )				CO <sub>2</sub> 固定量 総損失量 (t-CO <sub>2</sub> )	BCM/GM
		着工前	着工	竣工	15年後		
年 度		2004	2004	2006	2021		
GM	1,805	9.815	0.000	0.000	9.815	93.2	1.00
BCM	200	9.815	8.727	8.727	9.815	10.3	0.11

#### (7) 騒音

図-6.16. に示す民家境界にて騒音の自主管理規制値55dBを超える杭打ち作業日数を算定した。算定の結果、GMの作業日数は延120日となった。一方でBCMは民家に近接する杭打ち作業をすべて排除できたため、自主管理規制値を超える作業日数は0日となった。

次に、騒音レベルが55dB以下ではあるが民家境界で50dB程度となる場所打ちコンクリートの打設作業について着目し、その作業時間を算定した。GMは、全て場所打ちコンクリートであるため、作業時間は延158時間であった。

BCMでは、床版部のみが場所打ちコンクリートであり、作業時間は延38時間まで抑制された。よって、民家近くでの50dB程度となる場所打ちコンクリートの打設作業を24%に削減できた。表-6.16. に示すように、BCMの採用により、騒音に関する要求性能は満足された。

表-6.16. 評価指標 (騒音)

評価指標	単位	GM	BCM	BCM/GM
自主規制値55dBを超える期間	日	120	0	0.00
コンクリート打設の作業時間(50dB程度)	時間	158	38	0.24

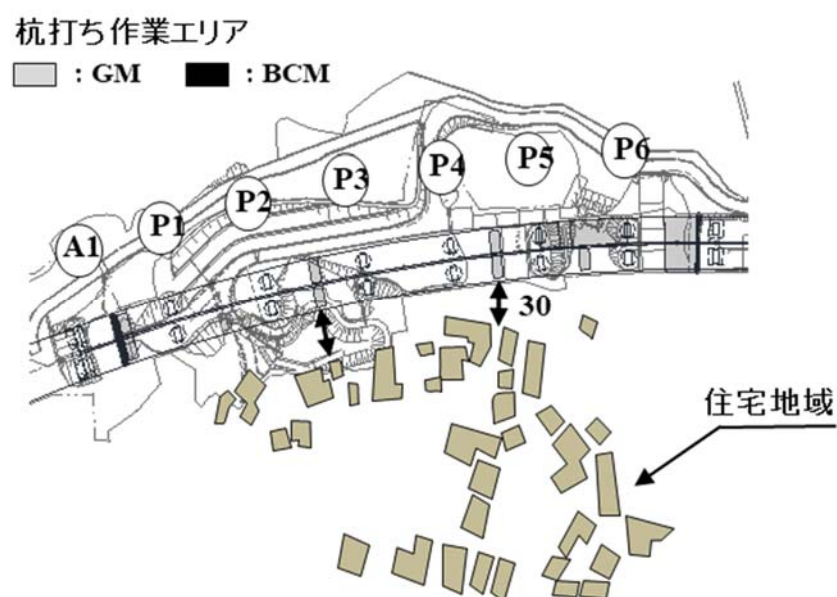


図-6. 16. 民家境界にて自主管理値 55dB を超える杭打ち作業箇所

#### (8) 水資源

水資源消費量として、コンクリート製造時の水の使用量をコンクリート配合の単位水量から算定した。表-6. 17. に示すように、BCM の採用により、工事使用水量(上部工)は 91%に減少し、水資源に関する要求性能は満足された。

表-6. 17. 評価結果(水資源)

評価指標	単位	GM	BCM	BCM/GM
工事使用水量(上部工)	t	2,046	1,868	0.91



## 6. 4. 総合評価

既存高架橋に対するサステナビリティ設計の適用に基づいて、サステナビリティ設計の総合評価を行う。社会的側面の評価項目として、サステナビリティ設計の基軸となる安全性の余裕度  $\gamma_i$  (サステナビリティ係数) を 1.1 と設定し、重要な要求性能である経済的側面の初期建設コストと、環境的側面の代表的な評価指標を抽出して三角図を作成する。

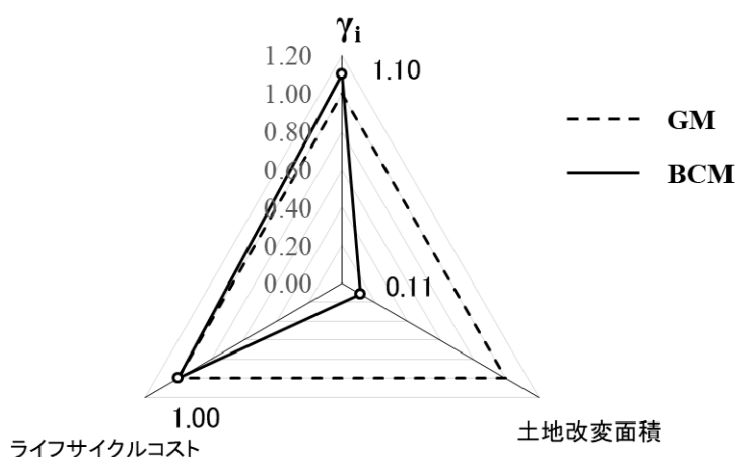


図-6. 17. サステナビリティ設計の総合評価 (1)

初めに、当該プロジェクトにおいて重要性の高い土地改変面積を比較対象とした結果を図-6. 17. に示す。安全性の余裕度を 10% 増加させたにもかかわらず、初期建設コストは標準コストとほぼ同じに抑えることができたとともに、土地改変面積は 11% に抑制され大きな低減効果があることが分かる。

次に、環境的側面として各排出ガスを比較対象として取り上げる(図-6. 18. )。採用した BCM は、CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、ばいじんともに GM の 91%~52% に低減された。ここでも安

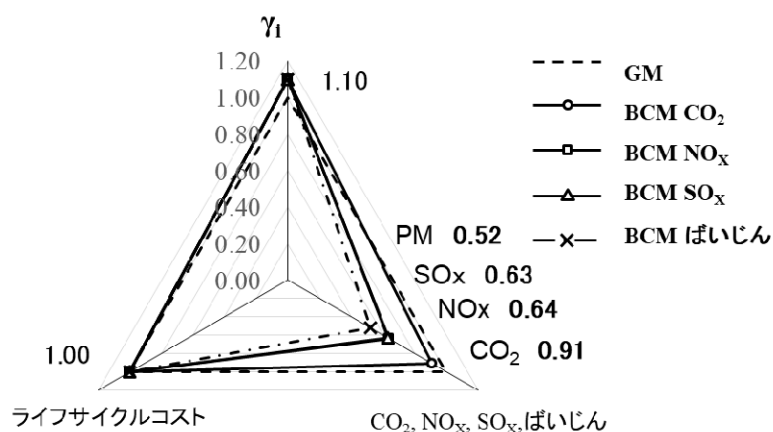


図-6. 18. サステナビリティ設計の総合評価 (2)

全性の余裕度を上げ、かつ初期建設コストを GM とほぼ同じとしながら、各排出ガスの低減が可能であることが分かる。

以上、安全性の余裕度と、初期建設コスト及び環境的側面の評価指標を比較検証した。その結果、社会的側面の要求性能である安全性の余裕度を適切に考慮し、経済的側面と環境的側面の要求性能を評価するサステナビリティ設計は、各性能の相関を明らかにして、より合理的な設計・施工の可能性を検討し得ることが明らかになった。

GM と採用した BCM に対して、社会的側面、経済的側面、及び環境的側面のそれぞれの評価指標がどのような比率になっているかを図-6.19. に示す。一般的には、安全性の余裕度  $\gamma_i$  を高めると、経済的側面、環境的側面の評価指標の値は大きくなる。しかし、今回の検討では、安全性の余裕度を  $\gamma_i=1.1$  に設定したにもかかわらず、全ての評価指標が GM を下回る結果となった。当然ながら、各評価指標にはそれぞれの重要度に応じた重みがあり、低減された数値自体を定量評価することはできないが、対象とした構造物に革新的な技術を適用したことにより、大きな効果が得られたことは確かである。この事実は、サステナビリティ設計の導入が技術革新の推進に大きな駆動力を与えることを示唆する。

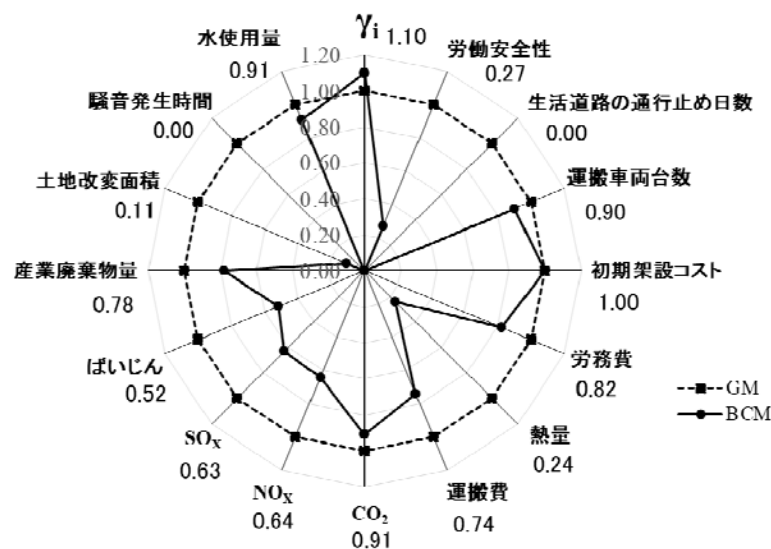


図-6.19. 各評価指標の比較

今回のケースでは、すべての評価指標が GM との比較において 1.0 を下回ったが、要求性能や条件の設定次第では、ある評価指標が 1.0 を上回ることもあり、これを否定するものではない。その場合、要求性能の重要度等を勘案し、3 つの側面の各評価指標の計算値のバランスを見て最終判断することになる。

このように、サステナビリティ設計は、安全性の余裕度ならびに要求性能をコストや環境負荷との関係から適切に設定することで、構造物のレジリエンス、ひいては社会のサステナビリティを合理的に捉えることが可能となる。

なお、今回は過去のプロジェクトをバックキャストして、GMと比較して評価したが、実際の設計に適用するには、サステナビリティ係数ならびに要求性能を絶対値で設定し、総合評価も各指標の計算値から判断することとなる。したがって、要求性能を如何に設定し、各評価指標の計算結果を全体バランスからどのように評価するかが、ポイントとなり、今後の検討課題である。

## 6.5. まとめ

社会的側面である安全性や使用性に関する従来設計法を、その他の社会的側面や、経済的側面及び環境的側面をも含め包括的に扱うサステナビリティ設計を既設高架橋へ適用し、その有効性を検討した結果を以下の知見を得た。

- 1) 検討対象高架橋の構造性能や建設現場の各種制約条件を、社会的側面、経済的側面、及び環境的側面に関する要求性能として適切に設定することができる。
- 2) 要求性能を設定することにより、それらを満足するための構造諸元及び施工法の選定あるいは開発すべきことが明確になる。
- 3) 安全性の余裕度を増加させても、新技術の導入により、コストを増大させずに社会的側面や環境的側面のパフォーマンスを従来工法より向上させることができる。
- 4) 経済的側面に関しては、新たに開発されたプレキャストセグメントの適用により主桁重量を低減したこと、張出架設工法の採用により架設機械設備費の抑制したことにより、一般的に割高となるプレキャスト工法の弱点をカバーして標準的な工法と同程度の建設コストとできた。すなわち、新たな技術開発、既往の技術の工夫や適切な工法の組み合わせにより、サステナブルな構造物の設計施工が可能となることを示した。
- 5) サステナビリティ設計は、安全性の余裕度ならびに要求性能をコストや環境負荷との関係から適切に設定することで、構造物のレジリエンス、ひいては社会のサステナビリティを合理的に捉えることが可能となる。

## ◎参考文献

- 6.1) T Shibata, ・ H Asai ・ T Fujioka ・ A Kasuga ・ K Sakai : Application of sustainability design to an existing viaduct in in a hilly area, Structural Concrete journal of the fib、 Version of Record online: 29 AUG 2017 | DOI: 10.1002/suco.201600237
- 6.2) John Anderson, Christian Bucher, Bruno Briseghella, Xin Ruan and Tobia Zordan : Sustainable Structural Engineering、 IABSE, 2015

- 6.3) 橋梁架設工事の積算 日本建設機械化協会 H6
- 6.4) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)、コンクリートライブラリー125、2005
- 6.5) 高速道路事業における CO2 排出量推計手法の提案 高速道路技術センター監修
- 6.6) Keiichi Aoki, Mitsutaka Miyabe, Kenichi Nakatumi, Akio Kasuga : Precast Segment Prestressed Concrete Box Girder with Ribs and Struts -The No.1 Yamakiri Viaduct-, National Report、pp61-64、The Third fib Congress 2010

## 第7章 サステナビリティ設計のバタフライウェブ橋への適用

### 7.1. 概要

新しい構造形式と施工法の開発によって実現したバタフライウェブ橋<sup>7.1)</sup>は、従前にはなかったものであるという意味で革新的と言えるが、その革新性が何をもたらしたかは明確ではない。つまり、この橋梁技術の優位性が定量的に示されているわけではなかった。本来橋梁技術に求められるべきものは、安全性はもちろんのこと、コスト、及び環境問題など多様な側面を定量的に評価して、それらの間の適切なバランスの判断であると思われる。こうしたことを実現するための方法の一つが、サステナビリティ設計である。

ここでは、バタフライウェブを用いた構造であり、すでに建設された芥川橋<sup>7.2)</sup>を対象橋梁として、サステナビリティ設計の有効性を明らかにする<sup>7.3)</sup>。

### 7.2. バタフライウェブ橋の開発の背景

橋梁は土木技術を代表する構造であり、様々な橋梁形式が開発され適用されてきた。また、この構造物には、まず力学的に安全であることが求められ、これまでの設計技術体系は安全性を中心に確立されてきたと言える。しかし、近年では、橋梁の長期にわたる利用により疲労等で劣化が目立つようになり、そうした橋梁の長寿命化や耐久性の向上などが一つの社会問題としてクローズアップされるようになっている。

一方、日本のように地震が多く発生するような国では、橋梁建設において軽量化により部材寸法を小さくして耐震性を向上させる構造が求められてきた。このような要求に対しては、これまでは鋼部材とコンクリート部材を組み合わせた複合構造などで軽量化が図られてきた。また、狭隘な地形で厳しい自然環境において工費の削減と早期のサービス提供を目的とした工期短縮も大きな社会的要請の一つとなっている。加えて、耐久性の向上による長期的な維持管理コストの低減も求められている。

このような多様で高度な要求に対して既存構造のみで対応するには限界がある。これらの課題を解決するために、橋梁技術—バタフライウェブ橋—は開発された<sup>7.1)</sup>。この橋梁構造は、蝶型の高強度コンクリートプレファブパネルをウェブに用いる形式である。この構造は、ウェブを薄い高強度コンクリートパネルに置き換えることで、結果としてウェブに開口部が形成されることから、橋体の軽量化が図られ、耐震性向上が実現される。さらに、この構造は、橋軸方向のウェブパネルは独立しており、パネルどうしの連続性を考慮する必要がないため、施工性も向上する。加えて、ウェブ用パネルは高強度コンクリート工場製品であり、内部に通常鉄筋を配置しないことから、高品質で耐久性に優れ、維持管理を容易にする。パネル内に発生する引張応力は、プレテン

ションPC構造で対処される。

バタフライウェブ橋は、新しい構造形式と施工法を導入したことにより、コンクリートは高強度となり、単位量当たりの材料コストを押し上げている。また、施工法やパネルの輸送費が全体コストや環境負荷に及ぼす影響が明らかでない。したがって、従来の橋梁技術とは全く異なる橋梁技術の優位性をどう評価するかが大きな課題となる。

こうした新たな課題に対して、従来の設計体系における安全性や使用性、あるいはその基礎となる耐久性を個別に扱っても、構造体が有する優位性の存否が明らかにならない。橋梁建設に求められる要件は、安全性やコストあるいは環境問題など多様であり、これらの総合的な評価が新しい技術開発を推進させる駆動力となる。そうした評価の有力な拠り所の一つが、「サステナビリティ」設計である<sup>7.4)</sup>。

まずは、新たに開発されたバタフライウェブ橋に関して、構造の概念、数値解析・実験での検証、設計手法、工場での製作方法、架設方法、材料として用いた高強度繊維補強コンクリートなど、その開発概要を述べる。

### 7.3. バタフライウェブ橋の概要

#### 7.3.1. バタフライウェブ構造の概<sup>7.5)</sup>

バタフライウェブ橋は、高強度コンクリートによる蝶型の薄いパネルをウェブに用いる橋梁構造である(図-7.1.)。パネルが蝶型形状のため、ウェブに作用するせん断力は、パネル内で主として圧縮力と引張力として伝達される。これはダブルワレントラスに類似した構造挙動と見做せる。換言すれば、バタフライウェブはダブルワレントラス構造の抵抗メカニズムを蝶型のパネルで再現しているともいえる(図-7.2.)。

本構造では、パネル内に伝達する圧縮力と引張力に関しては、圧縮側はコンクリートで抵抗し、引張側はP C鋼材で補強することによって抵抗させている。

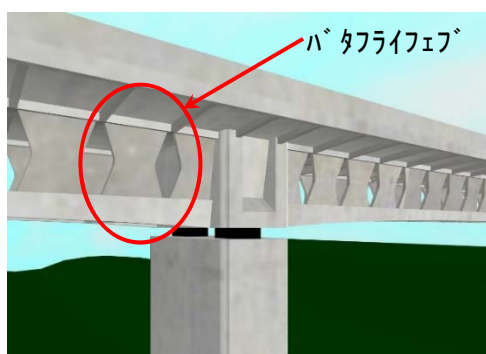


図-7.1. バタフライウェブイメージ

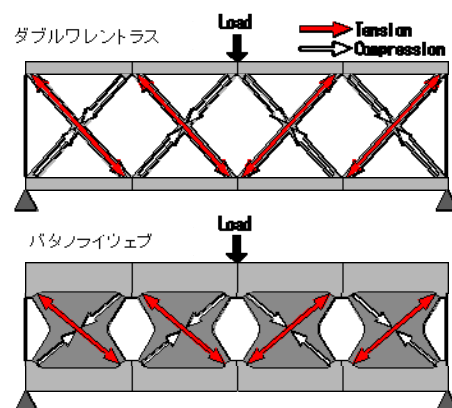


図-7.2. バタフライウェブの挙動の特徴

また、ウェブに用いられるパネルが橋軸方向に個別に独立して配置されており、パネルが橋軸方向のプレストレスの導入にほとんど影響しない。加えてパネル同士の接合作業が不要であり、パネルと上下床版をジベルで線上に接合させる簡易な構造なの

で、施工性が向上する(図-7.3.)。

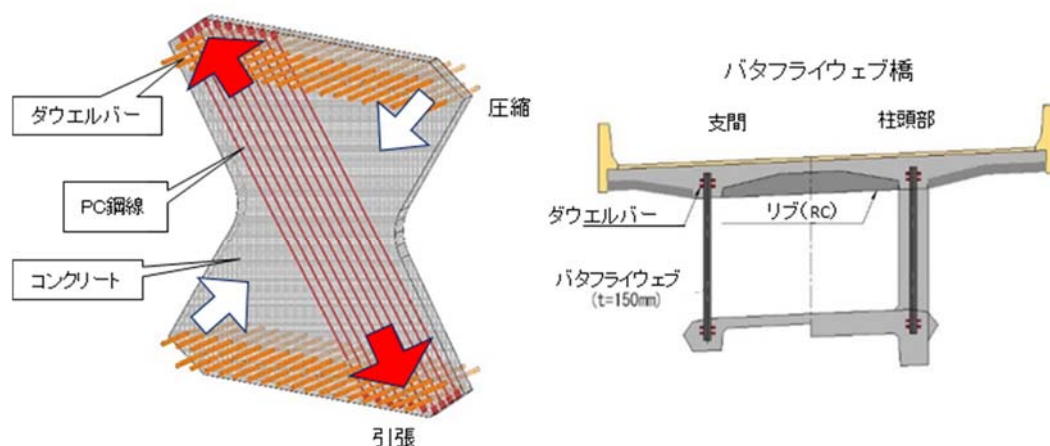


図-7.3. バタフライウェブの構造概要

### 7.3.2 数値解析と実験による検証<sup>7.5) 7.6)</sup>

バタフライウェブという新しい形状部材の挙動を確認するために、3次元弾性FEM解析を実施して荷重に対する応力分布が確認された。この解析結果をふまえて、パネルの実挙動および解析との整合性を確認するために1/2サイズの供試体にて載荷試験が行われた。試験は図-7.4.のようにパネル1枚に水平せん断を作用させて行われた。

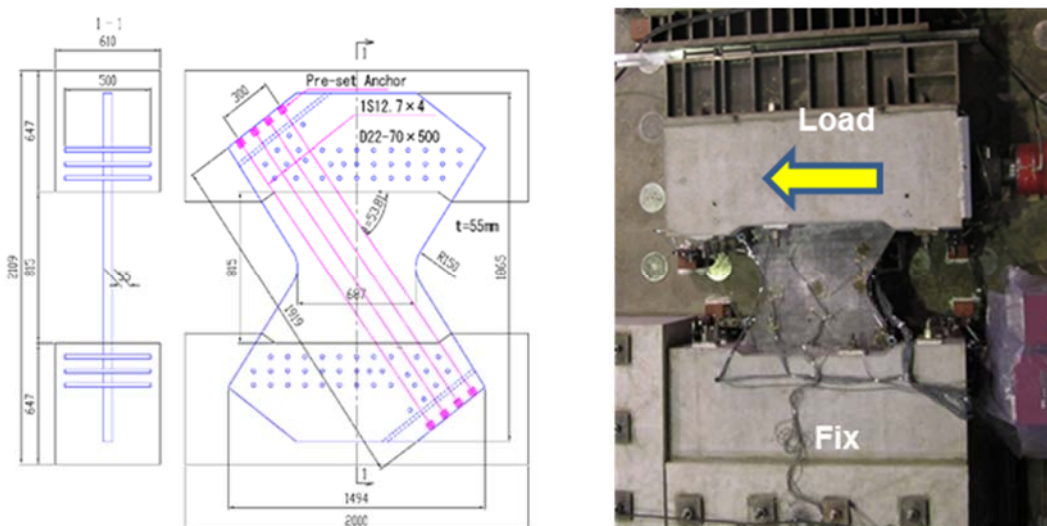


図-7.4. 実験供試体と載荷方法

図-7.5. に荷重と水平変位の比較結果を示す。このグラフからも分かるように解析と実験の整合性が確認され、バタフライウェブの挙動が解析でシミュレーションできることが明らかとなった。また、図-7.6. は非線形解析での破壊直前の圧縮応力分布である。非線形領域に達しても、応力度分布がダブルワレントラス構造特性と類似した分

布となっていることが確認されている。

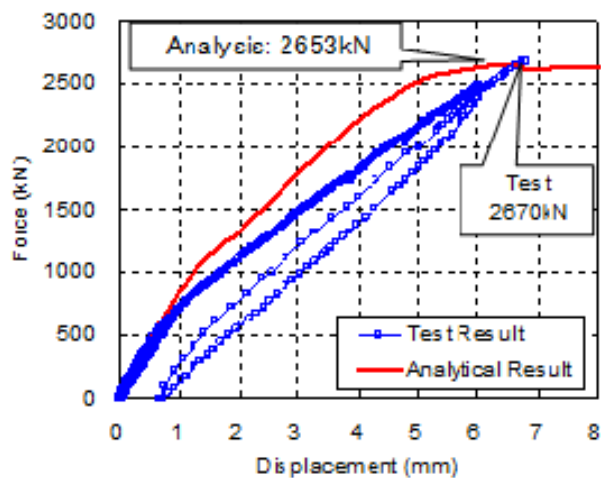


図-7.5. 実験結果 (荷重と水平変位)

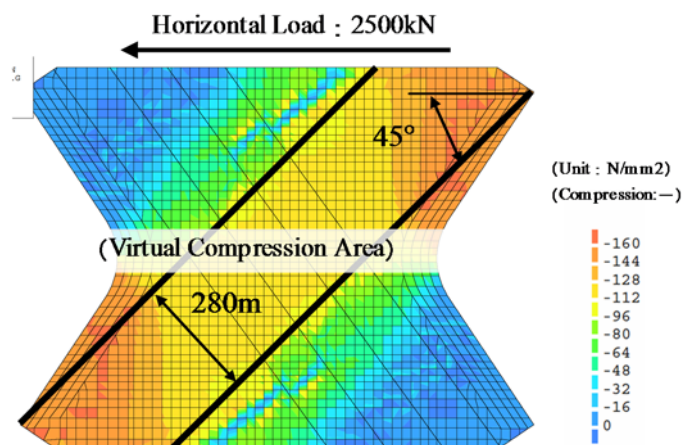


図-7.6. 非線形解析における圧縮応力分布

図-7.7. は、荷重増加によるパネル損傷後の橋梁全体の挙動を確認した非線形3次元FEMモデルである。この解析では材料非線形と解析ステップに応じた座標更新を行う幾何学的非線形が考慮された。これは既存の構造に比べてせん断剛性が相対的に低いバタフライウェブ構造が、荷重増加によるウェブパネルの損傷発生でさらに剛性が低下する影響を検討するためである。図-7.8. に荷重（自重+橋面荷重+活荷重）の載荷倍率と支間中央部での鉛直変位を示す。この結果によると、バタフライウェブは荷重の増加にともない、作用せん断力が最も大きいパネルでPC鋼材の降伏が発生したあと、そのパネルにて集中的に損傷が進むわけではなく、隣接パネルのPC鋼材が降伏するような破壊形態をとり、冗長性のある構造であることが明らかにされた。



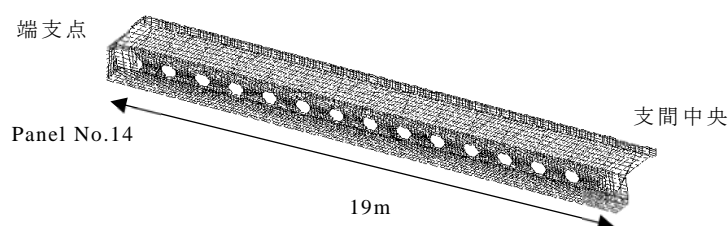


図-7.7. 非線形解析モデル

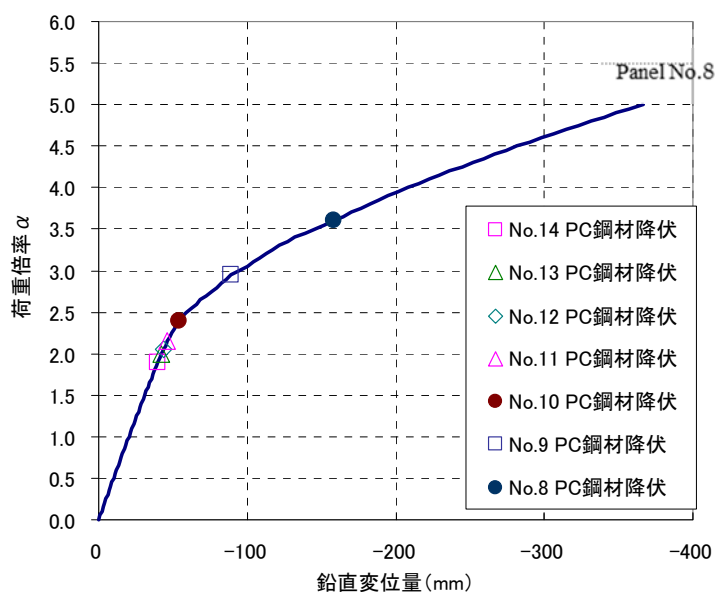


図-7.8. 解析結果（荷重-変位曲線）

### 7.3.3 設計手法の構築<sup>7.6)</sup>

これまでの開発成果を踏まえて、主桁の設計、パネルの設計手法を確立し、パネルの厚さ、補強するPC鋼材量の決定方法が確立された(表-7.1.)。主桁の曲げに対しては平面保持の成立を確認し曲げ応力度の算出方法を設定している。せん断に対してはパネルが受け持つせん断比率を安全側に設定し、パネル内の圧縮応力、引張応力、パネル幅の寸法が最小となるくびれ部の安全性の確認方法が構築されている。

表-7.1. 設計手法を確立した項目

設計部位	設計項目	設計内容
主桁	曲げ応力度	平面保持の設定
バタフライウェブ	パネル圧縮領域の設計手法	抵抗断面の設定と必要厚さの算出
	パネル引張領域の補強方法	補強PC鋼材量の算出
	くびれ部の純せん断に対する設計方法	くびれ部必要幅の算出

### 7.3.4 工場におけるパネルの製作方法<sup>7.7)</sup>

工場でのバタフライウェブの製作工程を図-7.9.に示す。パネルは運搬の制約上、全幅が3.0m未満となり、製作効率を上げるために外形と厚みを一定にして、工場にて集中管理のもと製作される。プレストレス導入はプレテンション方式によって行うため

PC鋼材緊張後、コンクリートを打設して硬化後にPC鋼材を解放することになる。

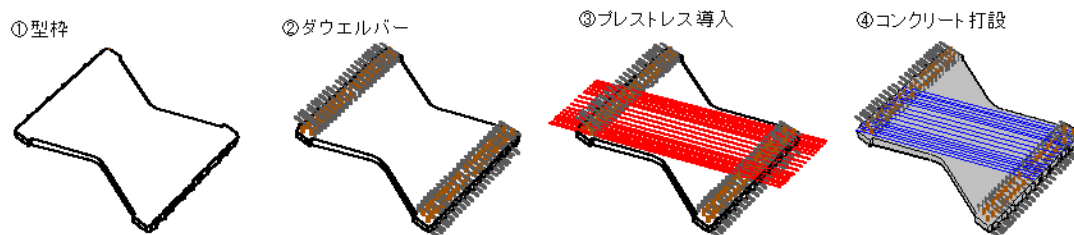


図-7.9. 工場での製作工程



図-7.10. 工場での製作状況



図-7.11. 製作されたバタフライウェブ

加えてプレストレスの導入時期を早めるために、強度発現の促進を目的として必要に応じて蒸気養生も行われている。バタフライウェブの製作状況と完成した状況を図-7.10、図-7.11. に示す。

### 7.3.5. 架設方法の開発<sup>7.7)</sup>

バタフライウェブは、支保工架設や張出し架設、プレキャストセグメント架設など複数の架設工法に採用することが可能である。張出し架設は、橋の直下の地形改変が不要であるため、環境への負荷が小さい工法の一つである。

バタフライウェブを張出し架設に用いた場合の架設方法を図-7.12. 及び図-7.13. に示す。通常1ブロックあたりの施工ブロック長は移動作業車の能力に依存し従来型箱桁では一般的な、施工ブロック長が2.5m～4.0mとなる。一方、バタフライウェブの場合はウェブのパネルの配置ピッチが制約条件となる。パネルは長さ3.0m未満で一枚あたりの重量は約3.25tで従来型箱桁に比べて主桁を10%程度軽量化できるので、施工ブロック長は1ブロックあたり片側パネル2枚配置した6.0mとすることができる。その結果、施工するブロック数を低減できるので、張出し施工期間を大幅に短縮することが可能となる。加えて、前述のようにバタフライウェブパネルは橋軸方向に連続している部材ではないため、ウェブ部材どうしを接合する必要がない。

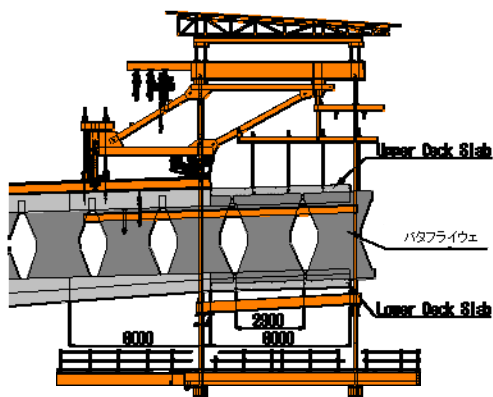


図-7.12. 張出し施工のブロック長の設定



図-7.13. 張出し施工状況

#### 7.3.6. 高強度繊維補強コンクリートの開発<sup>7.8)</sup>

構造的な解析と同時に、バタフライウェブで使用するパネルのコンクリート材料が開発された。コンクリートは特殊な材料を用いず、できるだけ多くのプラントで製作できるように汎用性のあるもので構成することをコンセプトに開発が進められた。パネル内に配置する補強鋼材はPC鋼材のみであり、部材の必要厚さはその配置による制約もうける。よってコンクリートの強度に関しては、その厚みで設計的な要求が満足できるように設計基準強度として80MPaを目標とし、材料のばらつきを考慮して配合強度を100MPaとされた。また蝶形状のくびれ部でのせん断破壊やPC鋼材の定着部のひび割れ防止に対応するために鋼繊維が混入された。複数の補強繊維を試験し、使用する鋼繊維は目標とする強度を発現するケースの中から繊維混入量が最も小さく、かつ材料の入手が容易なものとして図-7.14.に示す鋼繊維が用いられた。

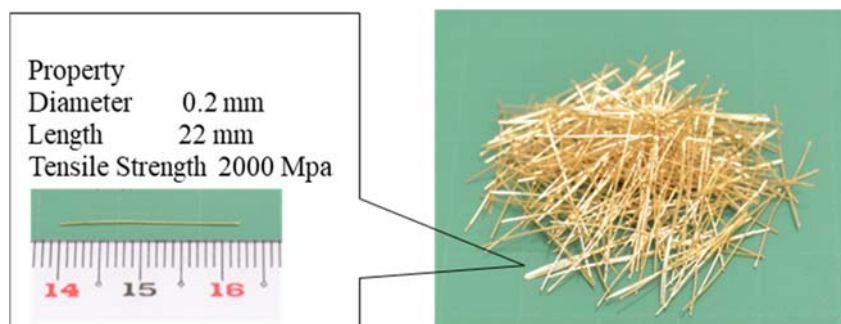


図-7.14. 選定した鋼繊維

#### 7.4. バタフライウェブ橋の実橋への適用

バタフライウェブ橋は4橋の施工実績がある(表-7.2.)。いずれも箱桁橋であるが、このうち3橋は張出し架設、1橋はプレキャストセグメント架設<sup>7.9)</sup>により施工された。

また張出し架設のうち1橋は、エクストラードード構造を併用したものである<sup>7, 10)</sup>。

表-7.2. バタフライウェーブ橋実績

橋 梁 名	橋 梁 諸 元	最大スパン (m)	架 設 工 法
芥川橋	6 径間連続 PC ラーメン橋	75.0	張出し架設
田久保川橋	10 径間連続 PC ラーメン橋	87.5	張出し架設
武庫川橋	5 径間連続 PC エクストラード・スト橋	100.0	張出し架設
桶川第二高架橋	多径間連続 PC ラーメン橋	45.0	スパンバイスパン架設

①芥川橋<sup>7.2)</sup>

図-7.15.に本章でサステイナビリティ評価の対象とした芥川橋の構造概要を、図-7.16.に完成写真を示す。この橋は張出し架設で施工された、6径間連続PCラーメン構造の箱桁橋である。橋長は348.0m、最大支間75.0mである。上下床版には設計基準強度50MPaのコンクリートが用いられている。

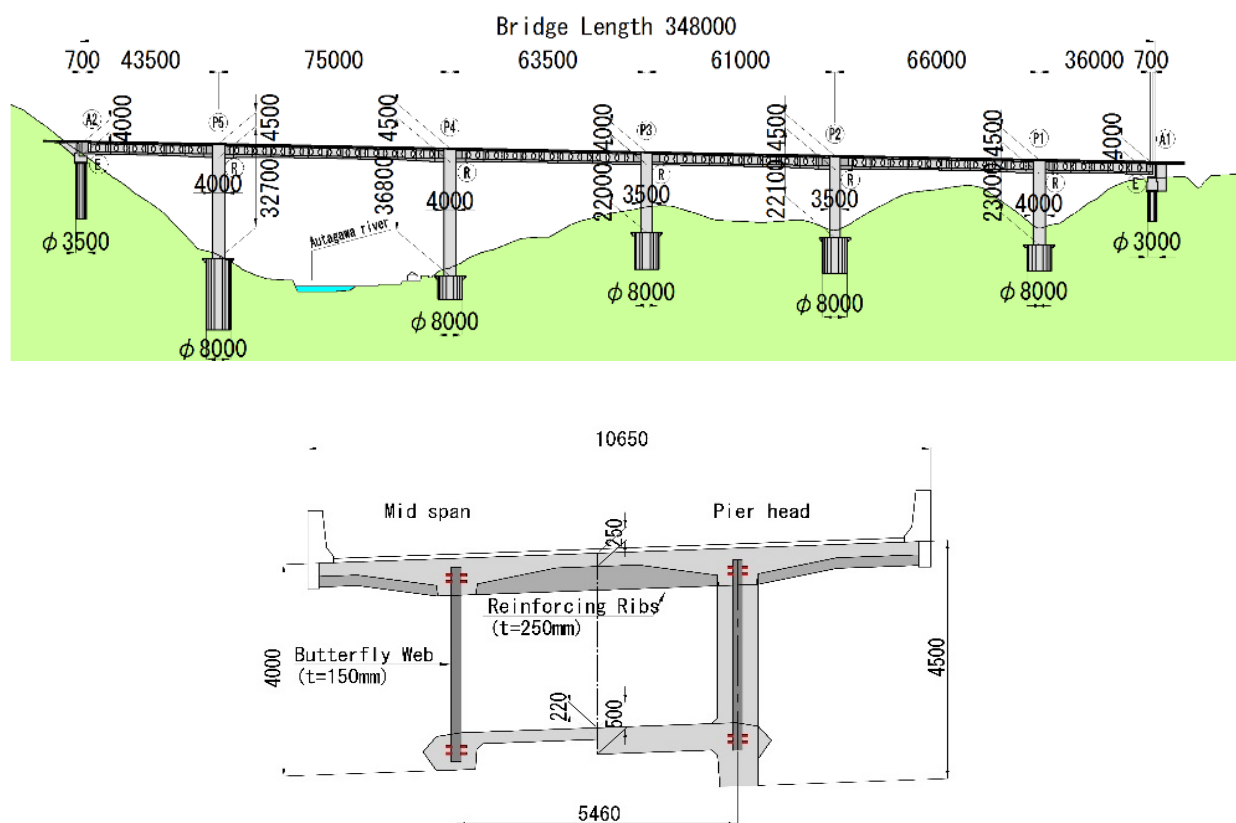


圖-7.15. 芥川橋 構造概要

桁高は柱頭部で4.5m、支間中央で4.0mである。断面では厚み250mmのリブを3.0mピッチで配置して横方向の剛性を高めている。本橋はもともと従来型のコンクリートウェブ箱桁構造（以下、従来型箱桁）で計画・設計されていたが、バタフライウェブコンクリート箱桁構造（以下、バタフライウェブ）に変更して上部工重量を11%ほど低減し、下部構造の寸法も縮小されている。また詳細は後述するが、下部構造の縮小に加え、上部工の施工ブロック数に関しても従来の箱桁構造では1張出しが9ブロックとなるのに対しバタフライウェブ構造に変更することで5ブロックに低減して上下部工で工期短縮が図られている。



図-7.16. 芥川橋

## ②田久保川橋<sup>7.11)</sup>

田久保川橋は、橋長712.5mのP C 10径間連続箱桁橋で、ウェブに蝶型形状をしたコンクリート製のプレキャストパネルである「バタフライウェブ」を世界で初めて使用された新しい構造形式の橋梁である。図-7.17. は橋梁一般図、図-7.19. は主桁断面図、図-7.18. は中央併合状況の写真である。本構造を採用することにより、上部工重量を従来のコンクリートウェブ箱桁橋に比べて約10%の軽量化が可能となり、P C 鋼材重量の低減や支承の縮小化により建設コストの縮減が図られた。

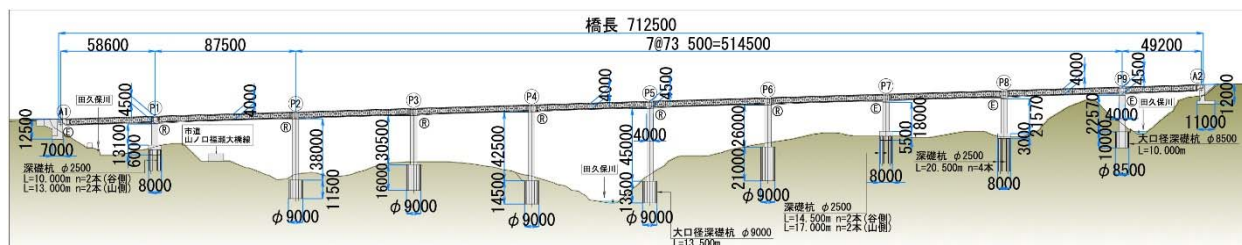


図-7.17. 橋梁一般図(田久保川橋)



図-7.18. 中央併合状況

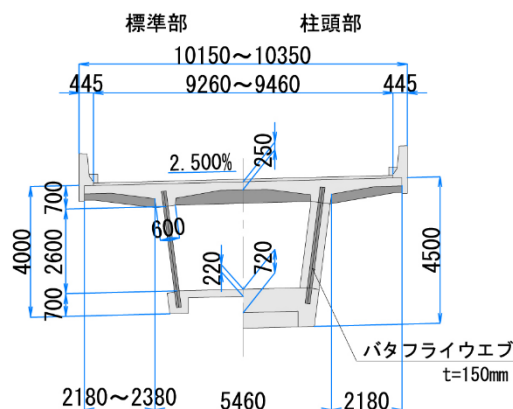


図-7.19. 主桁断面図



### ③武庫川橋<sup>7.10)</sup>

武庫川橋は、世界初のバタフライウェブエクストラード橋である。本橋は、耐震性の向上と施工の省力化を図ることを目的として、主桁ウェブにバタフライウェブを採用し、かつ桁高一定のエクストラード構造とすることにより、上部工重量の大幅な低減が図られている。

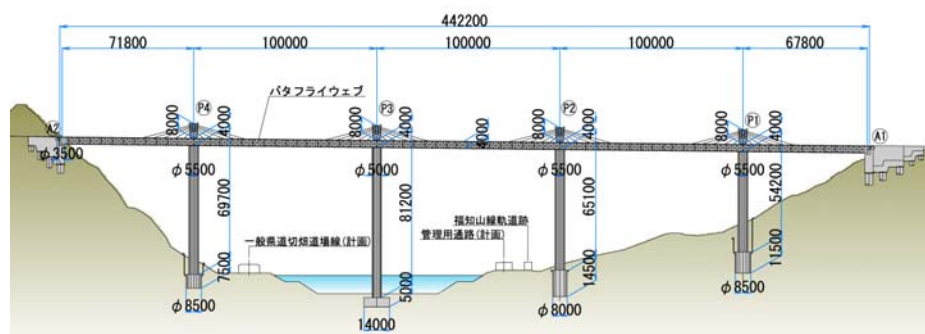


図-7.20. 橋梁一般図(武庫川橋)

図-7.21. はバタフライウェブ(プレキャストパネル)を移動作業車により架設している状況、図-7.22. は斜材で吊りながら張出し施工を行っている状況である。



図-7.21. 架設状況



図-7.22. 張出し施工状況

### ④桶川第二高架橋<sup>7.9)</sup>

桶川第二高架橋は、図 7-23. に示すような標準スパン 45m、8 橋（総延長 3,089m）からなる多径間連続PC箱桁橋である。セグメントの製作・架設日数の短縮を目的に、セグメントの軽量化策として、上床版を後打ち施工するリブ付きU形コアセグメントを採用し、さらなる軽量化を図るためウェブにバタフライウェブが適用された。その結果、全断面セグメントに比べ、セグメント数を約 35%少なくでき架設桁重量も軽減できた。セグメントは、2 工場でショートラインマッチキャスト方式にて製作され、架設桁を用いて1径間毎に架設を行うスパンバイスパン工法が採用された。図-7.24. にセグメント架設状況、図-7.25. に完成写真を示す。

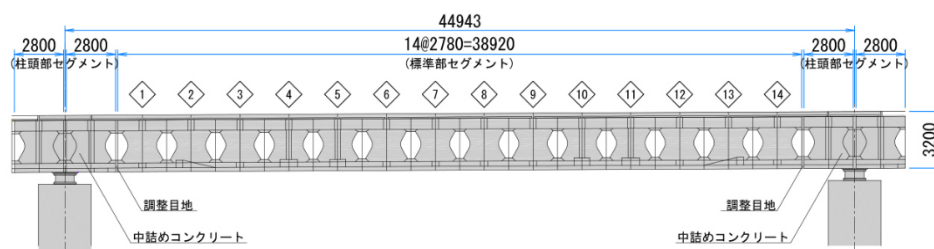


図-7.23. 橋梁一般図(桶川第二高架橋)



図-7.24. セグメント架設状況



図-7.25. 完成写真(桶川第二高架橋)

## 7.5. サステナビリティ設計の適用

### 7.5.1 評価指標の抽出

7.4. ①で示した図-7.15 の構造概要を有する芥川橋を対象にサステナビリティ設計の適用を図る。サステナビリティ設計において考えられる評価指標を洗い出し、この中から、本プロジェクトにおける基本情報を考慮して社会的側面、経済的側面および環境的側面における評価指標を抽出した。

#### 7.5.1.1. 社会的側面

##### (1) 安全性の余裕度 $\gamma_i$

高速道路の社会的な重要性と地震時に対する安全性向上の観点から、供用時の主桁のコンクリート応力度と地震時の橋脚の鉄筋応力度に関する安全性の余裕度をサステナビリティ係数  $\gamma_i$  として設定した。

なお、6章と同様に、あくまでサステナビリティの設計の枠組みの適用性を確認することが目的であるため、上記の二つの指標に絞って検証することとした。

##### (2) 工期

工期短縮による早期の供用への効果の評価として、1橋脚分の基礎工から上部工張出し終了までの工期を指標に設定した。

##### (3) 美観および周辺環境との調和

本橋はウェブの開口部とリブが橋体にアクセントを加え、単調な側面外観とはことなり、コンクリートのマッシブな重苦しさを軽減する新しい景観を創出していると言える。景観については、社会科学的な定量的評価が可能であるが、ここでは評価対象外とした。社会的側面として検討対象とした評価指標を表-7.3.に示す。

表-7.3. 評価指標の抽出結果(社会的側面)

評価項目	評価指標
$\gamma_i$	供用時の安全性の余裕度(主桁のコンクリート応力度)
	地震時の安全性の余裕度(橋脚の鉄筋応力度)
工期(早期供用)	1橋脚の施工開始から張出し完了までの日数

#### 7.5.1.2. 経済的側面

##### (1) 初期建設コスト

経済的側面の評価指標としては、上下部工をあわせた初期建設コストを取り上げる。なお、6章と同様に、メンテナンスコストは評価対象外とした。

表-7.4. 評価指標の抽出結果(経済的側面)

評価項目	評価指標
初期建設コスト	上下部工の初期建設コスト

#### 7.5.1.3. 環境的側面

##### (1) 材料使用量

コンクリート構造物の主要資材(コンクリート、鉄筋、P C 鋼材、型枠、プレキャスト製品)の使用数量について使用数量を算出した。この数量は、温暖化ガス排出量の算出に利用した。

##### (2) 温暖化ガス排出量

材料、エネルギー、輸送の計算結果を用いて算出した。資材製造時、資機材運送時、施工時におけるCO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, ばいじんの各排出量を評価指標とした。

本プロジェクトにおいて環境的側面として検討対象とした評価指標を表-7.5.に示す。なお、上記で抽出したエネルギー、温暖化ガス排出量については、本来は工事期間中だけでなく供用期間中も対象とすべきである。今回の検討では、GMとの比較において供用期間中に差が生じないため、施工中のみを対象期間とした。

表-7.5. 評価指標の抽出結果(環境的側面)

項目	評価指標
温暖化ガス排出量	CO <sub>2</sub> , SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> , ばいじんの排出量



## 7.5.2 要求性能の設定

本プロジェクトにおける基本情報を考慮した評価指標の抽出結果から、社会的側面、経済的側面、環境的側面に対する3つの要求性能を以下の通り設定した。

### 7.5.2.1. 社会的側面

#### (1) 安全性の余裕度

- ・主桁と橋脚の安全性の余裕度を従来型箱桁橋 (Ordinary Box Girder、以下**OBG**という) に比べて低下させない。

#### (2) 工期

- ・1橋脚分の基礎工から上部工張出し終了までの工期を**OBG**より短縮する。

### 7.5.2.2. 経済的側面

#### (1) 初期建設コスト

- ・初期建設コストを**OBG**以下とする。

### 7.5.2.3. 環境的側面

#### (1) 温暖化ガス排出量

- ・材料、エネルギー、輸送の計算結果を用いて算出した、資材製造時、資機材運送時、施工時におけるCO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, ばいじんの各排出量を**OBG**以下とする。

今回は、過去のプロジェクトをバックキャストして **ORB** との比較を行ったため、安全性の余裕度  $\gamma_i$  は、**OBG** を下回らないこととした。他の要求性能の値についても、本来、絶対値を設定すべきところを同様の理由から **OBG** 以下とすることに設定した。

## 7.5.3. 技術的検討

本橋は当初、従来型箱桁で計画・設計されていた。この構造とバタフライウェブに変更した場合の構造寸法に関する比較を表-7.6. に示す。

従来型箱桁と比較するとバタフライウェブを用いることで上部工の重量が11%低減できる。この上部工重量の低減に伴い、施工ブロック長を片側パネル2枚配置した6.0mとすることができ、張出し架設のブロック数が9ブロックから5ブロックに減少した。

また、上部工重量の低減により下部工の寸法低減が可能となっている。橋脚幅は従来型箱桁の7.0mに対して6.0mに縮小され、基礎の直径は9.0mから8.0mへ縮小できる。

表-7.7に、主桁断面と橋脚断面配筋図の**OGB**とバタフライウェブ橋の比較を示す。

表-7.6. 構造諸元に関する比較

## 従来型箱桁橋(OBG)

### 上部工

Plan view of the traditional box girder bridge (OBG) showing segment lengths and block counts. The bridge is symmetrical around a central pier head. The segment lengths are: 284.0m, 383.5m, 283.0m, 282.5m, 12.0m (Pier Head), 282.5m, 283.0m, 383.5m, 284.0m. The total length is 2840.0m. The block counts are: 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. The total block count is 9 blocks per span.

上部工重量	46700kN	(1.00)
セグメント長	2.5m~4.0m	
ブロック数	9ブロック/1張出	

### 下部工

Cross-section of the traditional box girder bridge (OBG) showing pier dimensions. The pier is a square shape with a side length of 7000mm. The total width of the pier is 9000mm. The height of the pier is 7000mm. The foundation diameter is 9000mm.

橋脚形状	7.0m×4.0m
深礎径	9.0m

## バタフライウェブ橋

### 上部工

Plan view of the butterfly web bridge showing segment lengths and block counts. The bridge is symmetrical around a central pier head. The segment lengths are: 586.0m, 8.8m (Pier Head), 586.0m. The total length is 1180.8m. The block counts are: 5, 4, 3, 2, 1, 1, 2, 3, 4, 5. The total block count is 5 blocks per span.

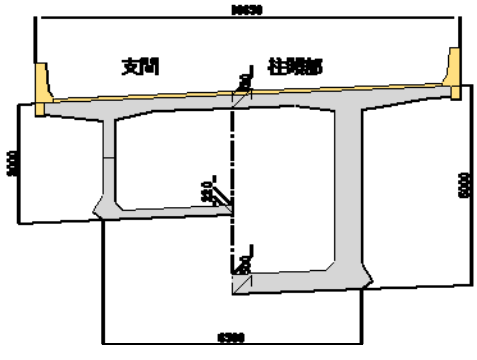
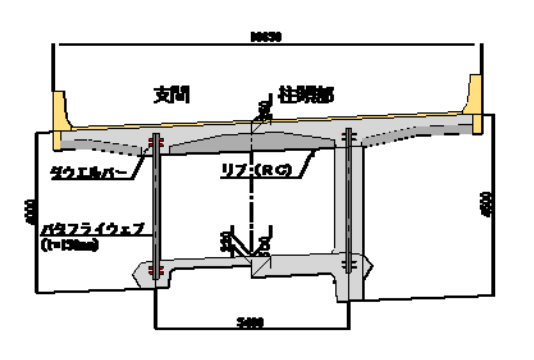
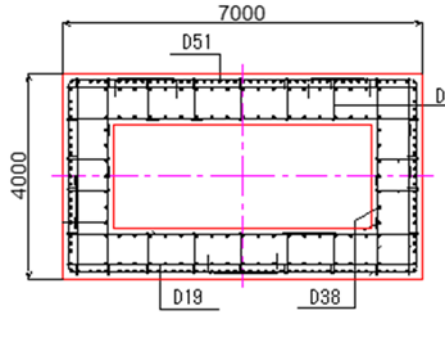
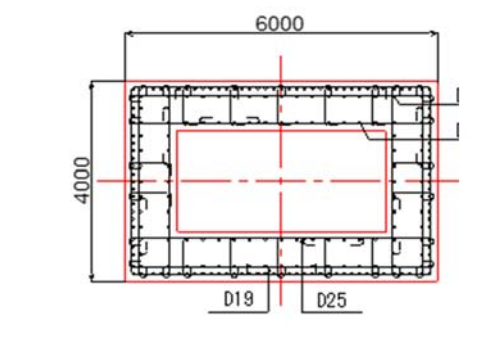
上部工重量	41700kN	(0.89)
セグメント長	6.0m	
ブロック数	5ブロック/1張出	

### 下部工

Cross-section of the butterfly web bridge showing pier dimensions. The pier is a square shape with a side length of 6000mm. The total width of the pier is 8000mm. The height of the pier is 6000mm. The foundation diameter is 8000mm.

橋脚形状	6.0m×4.0m
深礎径	8.0m

表-7.7. 主桁断面と橋脚断面配筋の比較

	従来型箱桁橋(OBG)	バタフライウェブ橋
主桁断面図		
橋脚断面配筋図		

#### 7.5.4. 保持性能の算定及び照査

従来箱桁とバタフライウェブ橋における各評価指標について、保有性能を算定し、要求性能を満足するかどうかを照査した。各工法の算定結果および照査結果を以下に述べる。

##### 7.5.4.1 社会的側面

###### (1) 安全性に対する余裕度

安全性に関しての評価として、表-7.8に主桁と橋脚の同一荷重状態での部材応力度の比較を示す。上段は死荷重作用時ならびに供用時における主桁のコンクリート応力度であり、下段は地震時における橋脚の鉄筋応力度を示している。

主桁のコンクリート応力度に着目すると、死荷重作用時には従来箱桁、バタフライウェブ橋ともに引張応力は発生せず許容値を満足しているが、余裕の度合い(引張発生までの応力度の比)は $1.08/0.87=1.24$ と24%バタフライウェブ橋のほうが大きい。供用時の応力度は構造では部材寸法や補強鋼材量を低減しているものの引張応力度は許容値 $1.27\text{MPa}$ に対して、従来箱桁で $0.89\text{MPa}$ 、バタフライウェブ橋で $0.88\text{MPa}$ と同等である。

橋脚の鉄筋応力度の余裕度として許容値/応答値を定義すると、バタフライウェブでは上部工重量の低減にともない下部工寸法を縮小しているが、従来型箱桁時に $1.40$ であった余裕度が $1.41$ とほぼ同等である。

以上のことから、主桁と橋脚の安全性の余裕度を一般的な構造(従来箱桁)に比べて低下させないという要求性能は満足された。

表-7.8 応力度の比較

部材	荷重条件	従来型箱桁橋 (OBG)	バタフライウェブ橋	許容応力度
主桁 [コンクリート応力]	死荷重時	$0.87 \text{ MPa}$	$1.08 \text{ MPa}$	$> 0.0 \text{ MPa}$
	供用時	$-0.89 \text{ MPa}$	$-0.88 \text{ MPa}$	$> -1.27 \text{ MPa}$
橋脚 [鉄筋応力]	地震時	$214.0 \text{ MPa}$ Safety Ratio 1.40	$212.6 \text{ MPa}$ Safety Ratio 1.41	$< 300.0 \text{ MPa}$

###### (2) 工期

表-7.9. に従来箱桁(OBG)とバタフライウェブ橋の工期を比較したものを示す。

7.4.3で述べたように、バタフライウェブ橋では上部工重量の低減効果で、張出し架設のブロック数がOBGの9ブロックから5ブロックに減らすことが可能となった。上部工の張出し架設のサイクル日数は、従来型箱桁が1ブロックあたり10日、バタフライウェブはブロック長が長いので11日となるが、ブロック数を掛けると一橋脚あたりでOBGでは90日、バタフライウェブ橋で55日となり35日の日数短縮が可能となった。

下部工の工期については、橋脚は高さが変わらないため短縮効果はでないものの、基礎に関しては上部工重量の低減効果で形状が縮小されたため、掘削面積の減少に比例して、**OBG**より25日ほど工期が短縮できる。この結果、1橋脚あたりの基礎工から張出し架設終了までに関して12%、日数にして60日ほどの工期短縮が可能となった。

以上のことから、1橋脚分の基礎工から上部工張出し終了までの工期が**OBG**より短縮するという要求性能は満足された。

日本のように狭隘な地形の場合には、工事用道路を造ることが困難な箇所が多く、建設費の高騰を招く場合が多い。そのため、完成した橋梁を隣接区間の工事用道路として用いる場合がある。本橋でも完成後は隣接するトンネル工事の工事用道路として使用する計画であったため、バタフライウェブ構造採用による工期短縮で、隣接工事の早期着手に貢献できたことを付記しておく。

表-7.9. 工期に関する比較

				従来型箱桁橋 (OBG)	バタフライウェブ橋
上部工	主桁	セグメント数	seg	9	5
		施工サイクル	日数/seg	10	11
		施工期間	日数	90	55
	架設作業車		日数	40	40
	柱頭部		日数	90	90
下部工	橋脚		日数	160	160
	深礎		日数	120	95
合計			日数	500	440
			比率	1.00	0.88

#### 7.5.4.2. 経済的側面

経済性に関する評価結果として使用材料の数量と初期建設コストの比較を表-7.10 および表-7.11. に示す。

コストに関しては、積算要領<sup>7.12)</sup>により算出すると、バタフライウェブは上部工で高品質な材料を用いるために材料単価が増加し、従来型箱桁に対して1%程のコスト増となる。一方で下部工では使用材料が同一のため寸法が縮小された分はコストが15%低減される。計算の結果、上下部工合計でバタフライウェブの方が6%ほどコストを低減できた。

この結果、バタフライウェブ構造の採用により、初期建設コストは**OBG**より低減でき、要求性能は満足された。

表-7. 10. 材料数量の比較

		材料		単位	従来型箱桁橋 (OBG)	バタフライウェブ橋
上部工	コンクリート	30 Mpa		m <sup>3</sup>	274	286
		40 Mpa		m <sup>3</sup>	3,594	0
		50 Mpa		m <sup>3</sup>	0	2,788
	鉄筋			kg	769,875	638,354
	PC鋼線			kg	121,751	105,460
	型枠			m <sup>2</sup>	10,437	8,108
	バタフライウェブ			t	0	567
下部工	橋脚	コンクリート	30 Mpa	m <sup>3</sup>	2,427	2,237
		鉄筋		kg	762,100	735,300
	深礎	コンクリート	24 Mpa	m <sup>3</sup>	5,110	4,105
		鉄筋		kg	571,700	489,100

表-7. 11. 初期建設コストの比較

		従来型箱桁橋 (OBG)	バタフライウェブ橋
上部工	億円	420.0	422.7
	比率	1.00	1.01
下部工	億円	335.2	285.0
	比率	1.00	0.85
合計	億円	755.2	707.7
	比率	1.00	0.94

#### 7. 5. 4. 3. 環境的側面

##### (1) 概要

環境負荷因子であるCO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、ばいじんの排出量の算出に関しては前述の表-7. 6. に示した各項目に関して部位別での影響が分かるように上部工・橋脚工・基礎工に分け、材料製造に起因するもの、運搬に起因するもの、架設に起因するもので整理して算出した。

資材運搬に関する単位量は、数量に運搬距離をかけた値として単位排出量を算定した。施工に起因するものとしては施工機械等の使用時間または施工数量に基づき電力消費量あるいは燃料消費量によって単位排出量を算定した。また、架設機材製造に関しては使用する移動作業車の主部材に大きな差異がないため本評価では考慮していない。表-7. 12. に各項目における単位排出原単位の一覧を示す<sup>7. 13)</sup>。

表-7. 12. 単位排出量の一覧

			単位排出量							
			CO <sub>2</sub>		SO <sub>x</sub>		NO <sub>x</sub>		ばいじん	
項 目		種 別	単位	値	単位	値	単位	値	単位	値
資材製造	コンクリート	セメント	g/kg	766.6	g/kg	1.22E-01	g/kg	1.55E+00	g/kg	3.58E-02
		粗骨材	g/kg	3.7	g/kg	8.60E-03	g/kg	5.88E-03	g/kg	1.99E-03
		細骨材	g/kg	2.9	g/kg	6.07E-03	g/kg	4.10E-03	g/kg	1.41E-03
		混和剤	g/kg	123.0	g/kg	3.90E-01	g/kg	2.80E-01	g/kg	2.00E-02
	鉄 筋		kg/kg	0.767	g/kg	0.134	g/kg	0.124	g/kg	0.010
	PC鋼材		kg/kg	1.322	g/kg	1.180	g/kg	1.810	g/kg	0.009
	型枠		kg/kg	0.052						
	工場製品	パタフライウェブ	kg/t	294.9	kg/t	0.041	kg/t	0.348	kg/t	0.025
資材運搬	コンクリート	30N/mm <sup>2</sup>	kg/km・m <sup>3</sup>	0.253	kg/km・m <sup>3</sup>	1.95E-04	kg/km・m <sup>3</sup>	3.79E-03	kg/km・m <sup>3</sup>	1.92E-04
	鉄 筋		kg/tkm	0.122	kg/tkm	9.41E-05	kg/tkm	9.14E-04	kg/tkm	7.68E-05
	PC鋼材									
	工場製品	パタフライウェブ								
	移動作業車									
施工	上部工	電力消費	kg/kwh	0.407	g/kwh	0.130	g/kwh	0.130	g/kwh	0.330
		燃料消費	kg/L	2.640	g/L	2.040	g/L	39.610	g/L	2.010
	下部工	型枠足場工	kg/h	21.3	kg/h	1.64E-02	kg/h	3.20E-01	kg/h	1.62E-02
		コンクリート工	kg/m <sup>3</sup>	0.400	kg/m <sup>3</sup>	3.40E-04	kg/m <sup>3</sup>	6.62E-03	kg/m <sup>3</sup>	3.36E-04
		パイプレータ	kg/h	0.200	kg/h	7.72E-05	kg/h	9.50E-05	kg/h	1.78E-05
		掘削工	kg/h	21.3	kg/h	1.64E-02	kg/h	3.20E-01	kg/h	1.62E-02
		ズリ出し	kg/h	51.7	kg/h	3.98E-02	kg/h	5.42E-01	kg/h	3.93E-02
		ズリ運搬	kg/tkm	0.122	kg/tkm	9.41E-05	kg/tkm	9.14E-04	kg/tkm	7.68E-05

(2) CO<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub>に関する算定一覧を表-7. 13. に示す。上部工での排出量はOBGが1894. 3tに対してパタフライウェブは1780. 9tと6%ほど減少できた。これは、パタフライウェブの方がコンクリート数量は少ないものの高強度なコンクリートを用いているのでコンクリート単体では排出量の低減に大きな効果はなく、排出量の低減は鉄筋やPC鋼材の数量が減じられたことに起因する。一方、橋脚工や基礎工など下部工に着目すると上部工重量の低減による寸法縮小が使用材料数量に反映されるため、運搬、架設を含め排出量が低減できる。橋脚工ではOBGが1244. 7tであったのに対してパタフライウェブでは1172. 7tと6%ほど低減しており、基礎工では従来型箱桁が1697. 3tであるのに対してパタフライウェブが1386. 7tと18%の低減となった。この結果、上下部工全体ではパタフライウェブの方が、10%低減できたことが明らかとなった。

表-7. 13. CO<sub>2</sub> 排出量の比較表単位排出量の一覧

上部工			数量			排出量			
部位	項 目	種 別	単位	従来構造	バタフライ	単位	従来構造	バタフライ	比率
資材製造	コンクリート	30MPa	m <sup>3</sup>	274	286	t	72.1	75.2	
		40MPa	m <sup>3</sup>	3594	0	t	984.3	0.0	
		50MPa	m <sup>3</sup>	0	2788	t	0.0	831.4	
	鉄 筋		kg	769875	638354	t	590.5	489.6	
	PC鋼材		kg	121751	105460	t	161.0	139.4	
	型枠		kg	100199	77841	t	5.2	4.0	
	工場製品	バタフライウェブ	t	0	567	t	0.0	159.3	
						小計	1813.0	1699.0	0.94
資材運搬	コンクリート	30MPa	km・m <sup>3</sup>	6586	6857	t	1.7	1.7	
		40MPa	km・m <sup>3</sup>	86264	0	t	21.8	0.0	
		50MPa	km・m <sup>3</sup>	0	66922	t	0.0	16.9	
	鉄 筋		tkm	50812	42131	t	6.2	5.1	
	PC鋼材		tkm	7062	6117	t	0.9	0.7	
	型枠		kg	37849	35447	t	2.0	1.8	
	工場製品	バタフライウェブ	tkm	0	99739	t	0.0	12.2	
	移動作業車		tkm	61132	87482	t	7.5	10.7	
					小計	40.0	49.2	1.23	
施工	電力消費	主桁製作	kwh	27677	21471	t	11.3	8.7	
		地覆工	kwh	1015	1057	t	0.4	0.4	
	燃料消費	クレーン	L	0	0	t	0.0	0.0	
		ポンプ車	L	11219	8915	t	29.6	23.5	
		地覆作業車	L	0	0	t	0.0	0.0	
						小計	41.3	32.7	0.79
						合計	1894.3	1780.9	0.94

橋脚工			数量			排出量			
部位	項 目	種 別	単位	従来構造	バタフライ	単位	従来構造	バタフライ	比率
資材製造	コンクリート	30MPa	m <sup>3</sup>	2427	2237	t	638.3	588.4	
	鉄 筋		kg	762100	735300	t	584.5	564.0	
	型枠								
						小計	1222.9	1152.3	0.94
資材運搬	コンクリート	30MPa	tkm	58248	53693	t	14.7	13.6	
	鉄 筋		tkm	50299	48530	t	6.1	5.9	
	型枠								
						小計	20.9	19.5	0.93
施工	型枠足場工		h			t	0.0	0.0	
	コンクリート工	ポンプ車	m <sup>3</sup>	2427	2237	t	1.0	0.9	
		パイプレータ	h	80.9	74.6	t	0.0	0.0	
						小計	1.0	0.9	0.92
						合計	1244.7	1172.7	0.94

基礎工			数量			排出量			
部位	項 目	種 別	単位	従来構造	バタフライ	単位	従来構造	バタフライ	比率
資材製造	コンクリート	24MPa	m <sup>3</sup>	5110	4105	t	1188.1	954.4	
	鉄 筋		kg	571700	489100	t	438.5	375.1	
						小計	1626.6	1329.6	0.82
資材運搬	コンクリート	24MPa	tkm	122650	98515	t	31.0	24.9	
	鉄 筋		tkm	37732	32281	t	4.6	3.9	
						小計	35.6	28.9	0.81
基礎工	掘削工	掘削数量	m3	5145	4138				
		削工	h	250	201	t	5.3	4.3	
		ズリ出し	h	250	201	t	12.9	10.4	
		ズリ運搬	tkm	121280	97542	t	14.8	11.9	
	コンクリート工	ポンプ車	m3	5110	4105	t	2.0	1.6	
		パイプレータ	h	171.5	137.9	t	0.0	0.0	
							小計	35.1	28.2
						合計	1697.3	1386.7	0.82

総計	4836.3	4340.3	0.90
----	--------	--------	------

(3) SO<sub>x</sub>

SO<sub>x</sub>に関する算定結果一覧を表-7. 14. に示す。部位別に見ると上部工ではOBGの510. 3kgに対してバタフライウェブが487. 5kgと4%低減した。低減できた理由はCO<sub>2</sub>と同様に、コンクリートに起因するものはほぼ同等で、鉄筋やPC鋼材での数量低減の効果である。橋脚工、基礎工でもバタフライウェブの排出量はOBGに対して低減できてお

りそれぞれ10%、19%に達している。その結果、橋梁全体で、バタフライウェブはSOxに関して11%ほど排出量を低減できたことが明らかとなった。

表-7. 14. SOx 排出量の比較表

上部工			数量			排出量			
部位	項 目	種 別	単位	従来構造	バタフライ	単位	従来構造	バタフライ	比率
資材製造	コンクリート	30MPa	m <sup>3</sup>	274	286	kg	15.0	15.7	
		40MPa	m <sup>3</sup>	3594	0	kg	192.6	0.0	
		50MPa	m <sup>3</sup>	0	2788	kg	0.0	168.2	
	鉄 筋		kg	769875	638354	kg	103.2	85.5	
	PC鋼材		kg	121751	105460	kg	143.7	124.4	
	型枠		kg	100199	77841				
	工場製品	バタフライウェブ	t	0	567	kg	0.0	36.0	
						小計	454.4	429.8	0.95
資材運搬	コンクリート	30MPa	km・m <sup>3</sup>	6586	6857	kg	1.3	1.3	
		40MPa	km・m <sup>3</sup>	86264	0	kg	16.8	0.0	
		50MPa	km・m <sup>3</sup>	0	66922	kg	0.0	13.0	
	鉄 筋		tkm	50812	42131	kg	4.8	4.0	
	PC鋼材		tkm	7062	6117	kg	0.7	0.6	
	型枠								
	工場製品	バタフライウェブ	tkm	0	99739	kg	0.0	9.4	
	移動作業車		tkm	61132	87482	kg	5.8	8.2	
					小計	29.3	36.5	1.25	
施工	電力消費	主桁製作	kwh	27677	21471	kg	3.6	2.8	
		地覆工	kwh	1015	1057	kg	0.1	0.1	
	燃料消費	クレーン	L	0	0	kg	0.0	0.0	
		ポンプ車	L	11219	8915	kg	22.9	18.2	
		地覆作業車	L	0	0	kg	0.0	0.0	
						小計	26.6	21.1	0.79
					合計	510.3	487.5	0.96	

橋脚工			数量			排出量				
部位	項 目	種 別	単位	従来構造	バタフライ	単位	従来構造	バタフライ	比率	
資材製造	コンクリート	30MPa	m³	2427	2237	kg	144.9	122.6		
	鉄 筋		kg	762100	735300	kg	102.1	98.5		
	型枠									
						小計	247.0	221.1	0.90	
資材運搬	コンクリート	30MPa	tkm	58248	53693	kg	11.4	10.5		
	鉄 筋		tkm	50299	48530	kg	4.7	4.6		
	型枠									
						小計	16.1	15.0	0.93	
施工	型枠足場工		h			kg	0.0	0.0		
	コンクリート工	ポンプ車	m³	2427	2237	kg	0.8	0.8		
		パイプレータ	h	80.9	74.6	kg	0.0	0.0		
						小計	0.8	0.8	0.92	
							合計	263.9	236.9	0.90

基礎工			数量			排出量			
部位	項 目	種 別	単位	従来構造	バタフライ	単位	従来構造	バタフライ	比率
資材製造	コンクリート	24MPa	m³	5110	4105	kg	257.5	206.9	
	鉄 筋		kg	571700	489100	kg	76.6	65.5	
						小計	334.1	272.4	0.82
資材運搬	コンクリート	24MPa	tkm	122650	98515	kg	23.9	19.2	
	鉄 筋		tkm	37732	32281	kg	3.6	3.0	
						小計	27.5	22.2	0.81
基礎工	掘削工	掘削数量	m3	5145	4138				
		削工	h	250	201	kg	4.1	3.3	
		ズリ出し	h	250	201	kg	9.9	8.0	
		ズリ運搬	tkm	121280	97542	kg	11.4	9.2	
	コンクリート工	ポンプ車	m3	5110	4105	kg	1.7	1.4	
		パイプレータ	h	171.5	137.9	kg	0.0	0.0	
						小計	27.2	21.9	0.80
						合計	388.8	316.6	0.81

総計	1163.1	1040.9	0.89
----	--------	--------	------



#### (4) NOx

NOxに関する算定結果一覧を表-7. 15. に示す。部位別、全体的ともにCO<sub>2</sub>の場合と同じ傾向を有している。上部工ではOBGの3351. 2kgの排出量に対してバタフライウェブは3258. 1kgとほぼ同程度となった。しかし、橋脚工、基礎工においてはバタフライウェブによる寸法低減の効果があり橋脚工で7%、基礎工で19%ほど排出量を低減した。その結果、上下部工全体でバタフライウェブはOBGに比べて排出量を10%低減できたことが明らかとなった。

表-7. 15. NOx 排出量の比較表

上部工			数量			排出量			
部位	項 目	種 別	単位	従来構造	バタフライ	単位	従来構造	バタフライ	比率
資材製造	コンクリート	30MPa	m <sup>3</sup>	274	286	kg	144.9	151.2	
		40MPa	m <sup>3</sup>	3594	0	kg	1981.7	0.0	
		50MPa	m <sup>3</sup>	0	2788	kg	0.0	1672.8	
	鉄 筋		kg	769875	638354	kg	95.5	79.2	
	PC鋼材		kg	121751	105460	kg	220.4	190.9	
	型枠		kg	100199	77841				
	工場製品	バタフライウェブ	t	0	567	kg	0.0	313.2	
					小計	2442.4	2407.3	0.99	
資材運搬	コンクリート	30MPa	km・m <sup>3</sup>	6586	6857	kg	25.0	26.0	
		40MPa	km・m <sup>3</sup>	86264	0	kg	326.9	0.0	
		50MPa	km・m <sup>3</sup>	0	66922	kg	0.0	253.6	
	鉄 筋		tkm	50812	42131	kg	46.4	38.5	
	PC鋼材		tkm	7062	6117	kg	6.5	5.6	
	型枠								
	工場製品	バタフライウェブ	tkm	0	99739	kg	0.0	91.2	
移動作業車		tkm	61132	87482	kg	55.9	80.0		
					小計	460.7	494.8	1.07	
施工	電力消費	主桁製作	kwh	27677	21471	kg	3.6	2.8	
		地覆工	kwh	1015	1057	kg	0.1	0.1	
	燃料消費	クレーン	L	0	0	kg	0.0	0.0	
		ポンプ車	L	11219	8915	kg	444.4	353.1	
		地覆作業車	L	0	0	kg	0.0	0.0	
					小計	448.1	356.0	0.79	
				合計	3351.2	3258.1	0.97		

橋脚工			数量			排出量			
部位	項 目	種 別	単位	従来構造	バタフライ	単位	従来構造	バタフライ	比率
資材製造	コンクリート	30MPa	m³	2427	2237	kg	1283.3	1182.8	
	鉄 筋		kg	762100	735300	kg	94.5	91.2	
	型枠								
						小計	1377.8	1274.0	0.92
資材運搬	コンクリート	30MPa	tkm	58248	53693	kg	220.8	203.5	
	鉄 筋		tkm	50299	48530	kg	46.0	44.4	
	型枠								
						小計	266.7	247.9	0.93
施工	型枠足場工		h			kg	0.0	0.0	
	コンクリート工	ポンプ車	m³	2427	2237	kg	16.1	14.8	
		パイプレータ	h	80.9	74.6	kg	0.0	0.0	
						小計	16.1	14.8	0.92
						合計	1660.6	1536.7	0.93

基礎工			数量			排出量			
部位	項 目	種 別	単位	従来構造	バタフライ	単位	従来構造	バタフライ	比率
資材製造	コンクリート	24MPa	m <sup>3</sup>	5110	4105	kg	2386.8	1917.4	
	鉄 筋		kg	571700	489100	kg	70.9	60.6	
						小計	2457.7	1978.1	0.80
資材運搬	コンクリート	24MPa	tkm	122650	98515	kg	464.8	373.4	
	鉄 筋		tkm	37732	32281	kg	34.5	29.5	
						小計	499.3	402.9	0.81
基礎工	掘削工	掘削数量	m3	5145	4138				
		削工	h	250	201	kg	79.9	64.3	
		ズリ出し	h	250	201	kg	135.4	108.9	
		ズリ運搬	tkm	121280	97542	kg	110.8	89.2	
	コンクリート工	ポンプ車	m3	5110	4105	kg	33.8	27.2	
		パイプレータ	h	171.5	137.9	kg	0.0	0.0	
						小計	360.0	289.5	0.80
					合計	3317.0	2670.4	0.81	

総計	8328.9	7465.2	0.90
----	--------	--------	------

(5) ばいじん

ばいじんに関する算定結果一覧を表-7.16.に示す。前述の3項目は資材製造の影響が大きい、ばいじんはコンクリート強度による単位排出量の差は小さく、資材運搬や機械使用量の影響が大きいことが異なる点である。そのためバタフライウェブはウェブパネルの工場からの運搬があるため、上部工に着目するとOBGの125.3kgに対して129.9kgと排出量が4%多くなる結果となった。一方で下部工においては、バタフライウェブによる使用数量の低減が機械使用量にもつながるため、橋脚工で7%、基礎工で19%排出量が低減でき、上下部工全体で従来型箱桁の312.5kgに対して288.3kgとバタフライウェブの方が排出量を8%低減できたことが明らかとなった。

表-7.16. ばいじん排出量の比較

上部工			数量			排出量				
部位	項 目	種 別	単位	従来構造	バタフライ	単位	従来構造	バタフライ	比率	
資材製造	コンクリート	30MPa	m <sup>3</sup>	274	286	kg	4.1	4.3		
		40MPa	m <sup>3</sup>	3594	0	kg	53.4	0.0		
		50MPa	m <sup>3</sup>	0	2788	kg	0.0	46.5		
	鉄 筋		kg	769875	638354	kg	7.8	6.4		
	PC鋼材		kg	121751	105460	kg	1.1	0.9		
	型枠		kg	100199	77841					
	工場製品	バタフライウェブ	t	0	567	kg	0.0	14.2		
						小計	66.4	72.3	1.09	
資材運搬	コンクリート	30MPa	km・m <sup>3</sup>	6586	6857	kg	1.3	1.3		
		40MPa	km・m <sup>3</sup>	86264	0	kg	16.6	0.0		
		50MPa	km・m <sup>3</sup>	0	66922	kg	0.0	12.8		
	鉄 筋		tkm	50812	42131	kg	3.9	3.2		
	PC鋼材		tkm	7062	6117	kg	0.5	0.5		
	型枠									
	工場製品	バタフライウェブ	tkm	0	99739	kg	0.0	7.7		
移動作業車		tkm	61132	87482	kg	4.7	6.7			
						小計	27.0	32.2	1.20	
施工	電力消費	主桁製作	kwh	27677	21471	kg	9.1	7.1		
		地覆工	kwh	1015	1057	kg	0.3	0.3		
	燃料消費	クレーン	L	0	0	kg	0.0	0.0		
		ポンプ車	L	11219	8915	kg	22.6	17.9		
		地覆作業車	L	0	0	kg	0.0	0.0		
							小計	32.0	25.4	0.79
							合計	125.3	129.9	1.04

橋脚工			数量			排出量			
部位	項 目	種 別	単位	従来構造	バタフライ	単位	従来構造	バタフライ	比率
資材製造	コンクリート	30MPa	m <sup>3</sup>	2427	2237	kg	36.5	33.6	
	鉄 筋		kg	762100	735300	kg	7.7	7.4	
	型枠								
						小計	44.2	41.1	0.93
資材運搬	コンクリート	30MPa	tkm	58248	53693	kg	11.2	10.3	
	鉄 筋		tkm	50299	48530	kg	3.9	3.7	
	型枠								
						小計	15.0	14.0	0.93
施工	型枠足場工		h			kg	0.0	0.0	
	コンクリート工	ポンプ車	m <sup>3</sup>	2427	2237	kg	0.8	0.8	
		パイプレータ	h	80.9	74.6	kg	0.0	0.0	
						小計	0.8	0.8	0.92
						合計	60.0	55.8	0.93

基礎工			数量			排出量			
部位	項 目	種 別	単位	従来構造	バタフライ	単位	従来構造	バタフライ	比率
資材製造	コンクリート	24MPa	m <sup>3</sup>	5110	4105	kg	70.0	56.2	
	鉄 筋		kg	571700	489100	kg	5.8	4.9	
						小計	75.7	61.2	0.81
資材運搬	コンクリート	24MPa	tkm	122650	98515	kg	23.5	18.9	
	鉄 筋		tkm	37732	32281	kg	2.9	2.5	
						小計	26.4	21.4	0.81
基礎工	掘削工	掘削数量	m3	5145	4138				
		削工	h	250	201	kg	4.0	3.3	
		ズリ出し	h	250	201	kg	9.8	7.9	
		ズリ運搬	tkm	121280	97542	kg	9.3	7.5	
	コンクリート工	ポンプ車	m3	5110	4105	kg	1.7	1.4	
		パイプレータ	h	171.5	137.9	kg	0.0	0.0	
								小計	24.9
						合計	127.1	102.6	0.81

総計	312.5	288.3	0.92
----	-------	-------	------

以上のことから、資材製造時、資機材運送時、施工時におけるCO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, ばいじんの各排出量をOBG以下とするとう要求性能は満足された。

#### 7.5.5. 総合評価

バタフライウェブ橋は、新しく開発した従来と全く異なる構造形式である。その開発意図は、橋梁上部躯体軽量化とそれに伴う橋脚のスリム化、並びに革新的施工法による工期短縮である。その実現のために高強度コンクリートを用いたバタフライウェブパネルは開発された。

社会的側面の評価項目として、橋脚の鉄筋応力度に関する安全性の余裕度を  $\gamma_i$  (サスティナビリティ係数) とし、その他の要求性能である経済的側面のライフサイクルコストならびに環境的側面の代表的な評価指標を抽出して三角図を作成した(図-7.26.)。

図-7.26. より、OBG と同じ  $\gamma_i$  を確保しながら、コストを 6%程度低減し、かつ CO<sub>2</sub> 等の排出量を削減していることが示された。

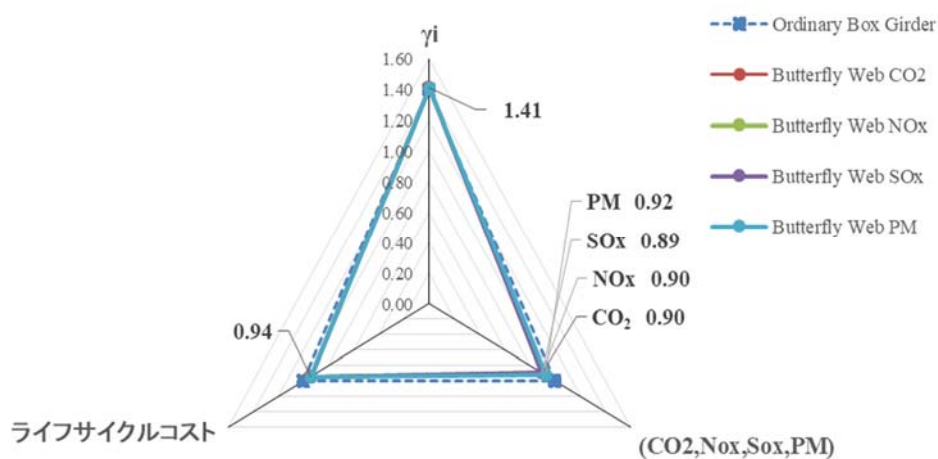


図-7.26. 総合評価 1

また、図-7.27. は社会的側面の評価項目として、工期を取り上げ、その他の要求性能である経済的側面のライフサイクルコストと環境的側面の代表的な評価指標を抽出し

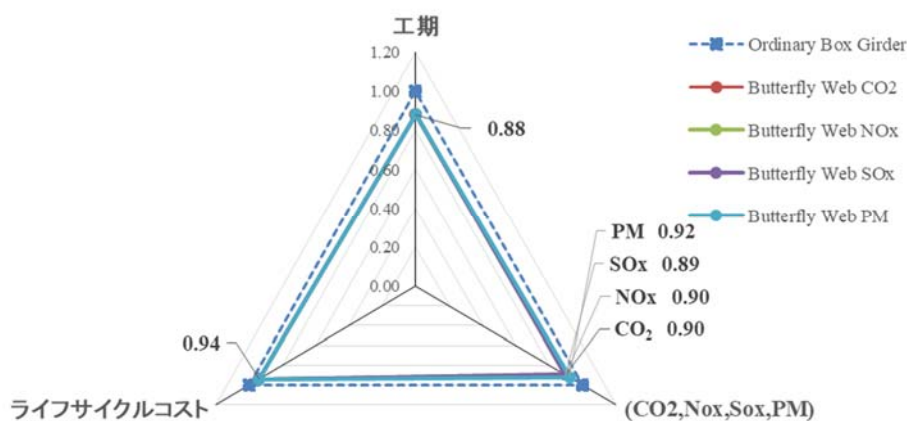


図-7.27. 総合評価 2

て三角図を作成した。結果、工期を 12%短縮するとともに、コストを 6%程度低減し、かつ CO<sub>2</sub>等の排出量を削減していることが示された。

このように今回のケーススタディの条件下においては、バタフライウェブ橋は、従来工法と同じ安全性を確保ししながら、コストや環境負荷を低減していることが明らかになった。すなわち、新しい構造形式と施工法により開発されたバタフライウェブ橋において、サステナビリティの観点からの優位性が示された。

## 7.6. まとめ

革新的な技術として開発されたバタフライウェブを用いた橋梁に対して、サステナビリティ設計を適用し、その有効性を検証した結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 多岐に渡る複雑な要求を解決するために開発された「バタフライウェブ橋」は、社会性、経済性、環境性に関して従来の構造より優れていることが示された。
- 2) 高強度コンクリートを用いたバタフライウェブを適用した結果、橋梁上部躯体軽量化とそれに伴う橋脚のスリム化、並びに革新的施工法による工期短縮という効果が得られた。従来型箱桁と同じ安全性を確保したうえで、トータルコストを低減、CO<sub>2</sub>等の排出量の削減、更に工期を12%短縮できた。
- 3) 新たな材料、新しい構造形式に対しても、社会的側面の要求性能を適切に設定すれば、サステナビリティ設計により、経済的側面ならびに環境的側面を合理的に評価できる。
- 4) バタフライウェブ橋の開発から、単に材料だけでなくその特性を考慮した設計・施工方法も含めた総合的开发アプローチによって、サステナビリティに優れた革新的構造を創出することが可能であると言える。

### ◎参考文献

- 7.1) A. Kasuga : Butterfly Web Effects on Bridge Design, Structural concrete Journal of the fib, 2017;18:128-142
- 7.2) Y. Kaminaga, K. Ashizuka, A. Takahashi, T. Yamamoto, Y. Hashi and K. Kawano: Design and construction of butterfly web bridge - Akutagawa bridge. In: Proceedings of IABSE Conference Nara. IABSE, Zurich, Switzerland; 2015, IA-23.
- 7.3) T Shibata, K Kata, A Kasuga, K Sakai : Sustainability Evaluation of Butterfly Web Bridge, Structural Concrete journal of the fib, Version of Record online: 5 SEP 2017 | DOI: 10.1002/suco.201700010

- 7.4) K Sakai・T Shibata・A Kasuga・H Nakamura : Sustainability design of concrete structures、Structural Concrete journal of the fib,, Volume 17 No.6、pp1114-1125、2016
- 7.5) A. Kasuga, N. Nagamoto, K. Kata and H. Asai、Kasuga A、Nagamoto N、Kata K、Asai H. Study of a bridge with a new structural system using ultra high strength fiber reinforced concrete. In: Proceeding of 3rd fib International Congress. Precast Prestressed Concrete Institute、Washington, DC, USA; 2010.
- 7.6) Nagamoto N、Kata K、Asai H、Kasuga A、Technical research on the new web structure using ultra high strength fiber reinforced concrete、Journal of JSCE, 2010;66(2):132-146.
- 7.7) K. Ashizuka、K. Miyamoto、K. Kata and A. Kasuga: Construction of a butterfly web bridge. In: Proceeding of fib Symposium、2012、Concrete structures for a sustainable community、Swedish Cement and Concrete Institute、Stockholm、Sweden、pp.545-548
- 7.8) K. Ashizuka、N. Maehara、K. Kata and N. Nagamoto: An expressway bridge having prestressed butterfly-shaped web. In: Proceeding of 38th Conference on Our World in Concrete & Structure、2013、Singapore: CI-Premier Pte Ltd.
- 7.9) A. Homma、T. Kojima、A. Kasuga and K. Nakatsumi: Design and construction of okegawa viaduct which has precast segmental U-shaped butterfly web girders. In: Proceeding of fib Symposium、2015、Concrete - Innovation and Design、Henrik Stang and Mikael Breastrup: Copenhagen、Denmark.
- 7.10) K. Mizuno、J. Samizo、M. Fukuda and A. Kasuga: Design and construction of the Mukogawa bridge. In: Proceeding of fib Symposium、2015. Concrete - Innovation and Design、Henrik Stang and Mikael Breastrup: Copenhagen、Denamrk.
- 7.11) 三保雄司、花田克彦、高原良太、中積健一: 東九州自動車道田久保川橋の施工、第22回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム、2013、10.
- 7.12) Nippon Expressway Research Institute Company Limited. Estimation Standards for Civil Works. Nippon Expressway Research Institute Company Limited: Tokyo, Japan; 2011.
- 7.13) 土木学会: コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)、2006

## 第 8 章 サステナビリティ設計による技術革新

### 8.1. 技術革新の方向性<sup>8.1)</sup>

本章では、これまでの検討を振り返り、サステナビリティ設計と技術開発の関係性について考察する。

第 5 章では鉄筋コンクリート単純梁を対象に、その安全性、コスト、環境負荷としての CO<sub>2</sub> について検討したが、計算は構造体に限定し、その他のライフサイクル段階である施工に関わる事項については無視した。しかし、実際には、ライフサイクルの観点から合理的な構造形式及びその施工法や維持管理手法を決定しなければならない。一般的には、構造物建設プロジェクトを計画・実施するには、与えられた条件に基づいて標準的な構造形式や施工法が考えられる。一方、サステナビリティ設計では、社会的側面の安全性に対する余裕度に重きを置いている。したがって、もしこれらの標準的な施工方法や維持管理方法を踏襲すれば、安全性の余裕度の増加は一般的にはコスト及び環境負荷の増加を招く。

しかし、第 6 章や第 7 章で示したように、構造形式や施工法の革新を図ることで、安全度の余裕度を増加させても（あるいは、従来構造と同等）、コストや環境負荷を標準的なもの以下に抑えることも可能である。その概念図を図-8.1. に示す。

ケース①は、安全性を増加させると、単純にコストや環境負荷は増加することを意味する。ケース②は、安全性を増加させてもコストや環境負荷の増加を招かない領域が存在することを示す。理想的には、ケース③のように、安全性を増加させてもコストや環境負荷の増加を招かない構造形式及び施工法が望ましいことは言うまでもない。したがって、ケース③を目指したサステナビリティ設計の実現するには、構造形式や材料並びに施工法を一体的に考えて、これまでの既成概念を打ち破るような技術開発が必須となる。

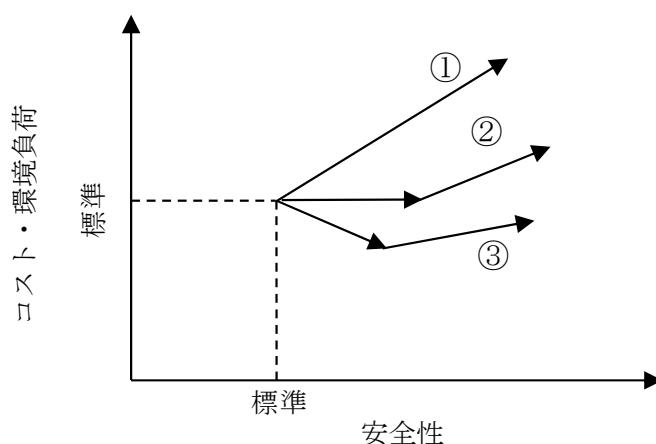


図-8.1. 安全性とコスト・環境負荷の関係

## 8.2. サステナビリティ設計を踏まえた技術開発アプローチ

### 8.2.1 はじめに

これまで、サステナビリティ設計の基本的な枠組みに基づいて、過去に新しい技術を導入した PC 橋梁建設のサステナビリティ評価を行ったが、標準的な構造・工法との比較において、高いサステナビリティ性能を保持することを明らかにした。一つは第 6 章で述べた新たな構造のプレキャストセグメントとバランスドキャンチレバー工法を用いた高架橋、もう一つが第 7 章で述べた革新的な構造であるバタフライウェブ橋である。これらの成功例から、バックキャスト思考を導入すれば新たな技術開発のアプローチが比較的容易になるように思われる。以下、分かり易くするために、極端な命題を考え、今後の方向についても検討する。

### 8.2.2. 安全性

構造物の安全性は、作用力が決まれば、材料・構造形式・断面を選択して検証される。作用力を割り増せば断面力は増加するから、耐荷力を増す必要がある。耐荷力を増大させるためには、一般に断面や鉄筋量を増加させる必要がある。サステナビリティ設計では、構造物が崩壊しないことを一つの目安として（例えば、建築基準法が求めているもの）作用力は一般的に用いられているものを前提とした上で、断面力をサステナビリティ係数で割り増す体系と考えている。この割り増しは、当然コストや環境負荷に影響するが、被災損傷を最小限に抑えて被災後使用を可能にし、総合的な観点から「強靱（レジリエント）」な構造物を実現し、これをサステイナブルな構造物と表現できる。

サステナビリティ係数の導入は、構造物の安全性の余裕度を増すことを意味する。安全性の余裕度を増してコストや環境負荷を低減する技術開発が究極のイノベーションとなる。ただし、重要な構造物ではライフサイクルにおける不確実性を担保するために、コストや環境負荷の増大があっても安全性の余裕度を増す便益も存在し得る。これがよく用いられる安全「安心」なる表現に繋がる。

技術開発における命題は、断面や補強筋量を増加させないで構造物としての安全性を増加させる方法は何か、あるいは、それらの増大をある程度許すが、コストや環境負荷を極力低減するための方策は何か、例えば、安全性の余裕度を 5 割増しにするが、コスト増は 5% 増に抑えるために何が必要か、である。もちろん、こうした要求には、材料、構造形式、及び施工法のイノベーションが必要となる。

### 8.2.3. コスト

一般的な構造物の建設では、与えられた条件における標準工法が定まり、標準コス

トが算定される。当然、標準コストは、標準的な材料を使用することを前提とする。一般的には、コストを下げるために、材料の性能を低下させる選択肢はないと思われる、むしろ、材料の性能を上げることが、構造形式や施工法の革新を生み出すことに繋がる。つまり、材料コスト増を構造形式や施工法によりトータルとして相殺、あるいは低減させるシナリオが現実的と考えられる。

技術開発における命題は、材料・構造形式・施工法の革新でコストを著しく低減する方法を考えよ、である。安全性の余裕度を 5 割増しにすると、通常の技術ではコストは 2~3 割上昇することになるなら、イノベーションによりコスト増を 5%に抑えるためには何が必要か、あるいは、安全性の余裕度を 2 割増しにしても、コスト増をもたらさないためには何が必要となるかである。逆に言えば、コスト増をもたらさないためには、イノベーションで安全性の余裕度をどこまで増すことができるか、様々なアプローチが考えられる。

#### 8.2.4. 環境負荷

環境負荷低減は、材料の使用量の影響が最も大きく、次いで施工となる。環境負荷低減を図るためには、すべてのプロジェクトで環境負荷を算定することが必須となる。革新的技術開発には、汎用の材料の利用では限界があり、低炭素高強度のような材料開発や他分野で用いられている先端材料の利用などが有効となる。プレキャスト部材を利用する場合、生コンのような JIS 規格が制約にならないので、環境に配慮した材料を適用することができ、環境負荷の評価も容易である。前述した二つのプロジェクトにおいて扱った橋梁は、プレキャスト構造と施工法のイノベーションが図られたことが総合的に高いサステナビリティ性能を有することに繋がったと考えられ、今後こうしたアドバンテージを一層進化させていくことが必要である。換言すれば、環境負荷低減技術の開発が、構造全体のサステナビリティ向上に繋がる可能性が高いと考えられる。環境負荷評価は、従来の技術開発で注目されなかった新しい重要な切り口になる。

#### 8.2.5. 社会的キーワードからのアプローチ

技術開発には、何らかの取掛りが必要となるが、社会的キーワードから思考を進めるのが一つの方法と考える。たとえば、高耐久性、メンテナンスフリー、長寿命化、ローカーボン、水素社会、高性能化、i-Construction、国土強靱化、震災復興、既存構造物の補強、少子・高齢化、等々、時代の変革とともに求められる社会からの要請にこたえる技術開発を行うことで、サステナブルな社会を実現できると考えられる。



### 8.3. 技術革新の事例に基づく課題の抽出

ここでは、社会的ニーズから技術革新をもたらした事例として、橋脚の急速施工技術の開発について紹介し、この事例から導き出される課題について、言及する。

#### 8.3.1. 橋脚の急速施工技術開発の経緯

第二東名高速の建設も終盤を迎えているが、建設が開始され当初はその建設ルートが東名高速道路に比べ山岳地帯で計画され、橋梁においては橋脚の高さが 50m を超えるいわゆるハイピアとなり、如何にして早く橋脚を施工するかが、早期開通への課題のひとつとなっていた。さらに、建設事業推進の途中で用地買収が遅れ、結果として計画していた開通時期に間に合わせるには、多少コストが高くなっても大幅な工期短縮を実現できる施工法が発注者から求められることも多くなってきた。

加えて、昨今顕著化してきた社会的要請が、省力化・省人化の実現である。少子高齢化の進展、生産人口の減少、特に建設業離れによる担い手不足は深刻で、省力化・省人化に資する施工技術の開発に異議を唱える発注者はいない。しかしながら、橋脚構造は、躯体を鉛直方向に真っすぐに構築するという比較的シンプルな施工法ゆえに、古くから経済性の観点から主に現場打ちコンクリートによる鉄筋コンクリート製で建設されてきており、施工技術改革への意欲は比較的小さい。近年においてもその傾向は大きく変わらない。図-8.2. は、橋脚施工に携わる職種別人工を表したもので、鉄筋コンクリート製の中空断面橋脚（高さ約 90m）を対象に試算した参考データである<sup>8.2)</sup>。図によれば橋脚施工に労力を最も費やす職種は型枠工・鉄筋工であり、両者を合わせると合計人工の約 65%に達することが分かる。橋脚施工の省力化・省人化を図るためには、これら 2 つの職種の負荷を軽減することが現状の大きな課題であると言える。

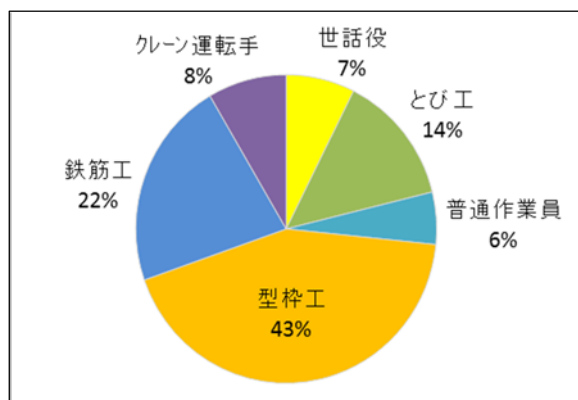


図-8.2. 橋脚施工に係る人工  
（中空断面橋脚の例）

この課題に対し、鉄筋をH形鋼や鋼管に置き換えて橋脚断面を複合構造化する技術<sup>8.3), 8.4)</sup>、鉄筋の一部をセミプレハブ化した施工例、橋脚断面の一部をプレキャスト化（埋設型枠含む）する技術など様々な事例が報告されているが、費用対効果の観点からか、適用橋梁は比較的限定されている。

こうした事例のうち、橋脚の一部をプレキャスト化する試みは、省力化・省人化の効果は高いものの、場所打ち部との一体性など構造上および品質上の課題が明確になっていなかったこと、高橋脚での施工方法が確立されていなかったこと、更にはコスト増となる傾向があることから、なかなか普及してなかった。これらの問題を解決する



施工の概念図を図-8.6.に示す。工場で製作された PCa 部材はトレーラーで現場へ搬入し、主鉄筋の組立後にクレーンを用いて建て込み、間詰め部に型枠を設置した後、内部にコンクリートを打設して橋脚を構築する。

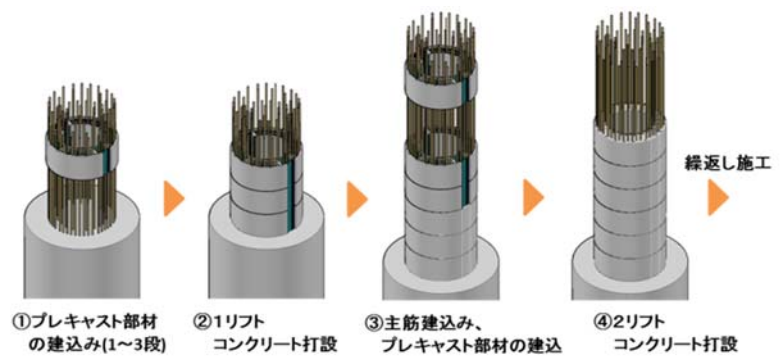


図-8.6. 施工概念図

1 施工サイクルは、高さ 12.0m を 2 リフトに分けて構築するものである。1 リフトは PCa 部材を 3 段積み重ねた後に、高さ 6.0m の中詰めコンクリートを打設して構築される。施工ステップを詳細に示したものを図-8.7.に示す。①足場組立て、②主鉄筋組立て、③PCa 部材建込み (3 リング)、④型枠設置・中詰めコンクリート打設 (1 リフト)、⑤PCa 部材建込み (3 リング)、⑥型枠設置・中詰めコンクリート打設 (2 リフト) のサイクルを繰り返し行うことで急速施工が図られた。

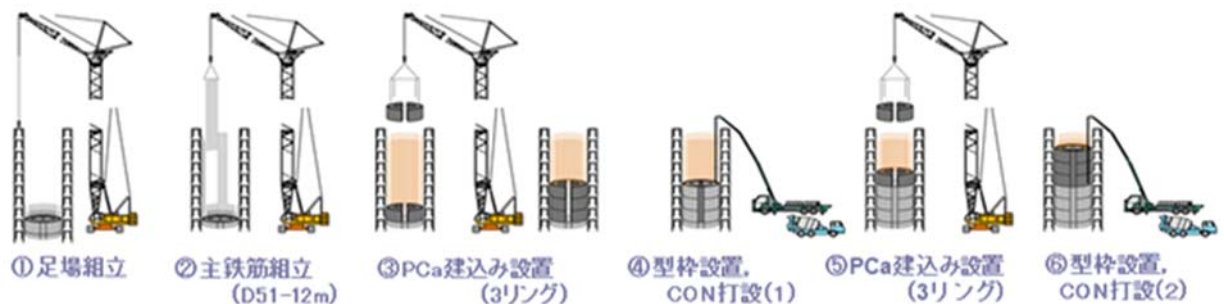


図-8.7. 施工ステップ図

1 サイクル (2 リフト 12.0m) に要する施工日数は、武庫川橋の実績によると、従来工法による実働 23 日に対し、PCa 部材を用いた場合では実働 12 日となり従来の約 2 倍のスピードでの施工が実現されている(表-8.1.)。

表-8.1. サイクル工程表

		1 サイクル																						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
		1 リフト												2 リフト										
従来工法	足場組立	■																						
	鉄筋組立(主鉄筋)		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■											
	鉄筋組立(帯鉄筋)					■	■	■	■	■	■	■	■				■	■	■	■	■	■	■	■
	型枠組立										■	■	■	■	■	■					■	■	■	■
	コンクリート打設														■	■								■

		1 サイクル											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		1 リフト						2 リフト					
プレキャスト工法	足場組立	■											
	鉄筋組立(主鉄筋)		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	PCa部材建込					■	■	■	■	■	■	■	
	型枠組立							■	■	■	■	■	
	中詰めコンクリート打設								■	■			■

なお、基部並びに脚頭部にかかる施工を含めた橋脚全体の工程は約 70%に低減された。

### 8.3.3. 急速施工による省人化効果

現地における作業量の大幅な省力化による工程短縮効果について述べてきたが、ここでは省人化効果に着目して整理する。

図-8.8. は、従来工法（現場打ちコンクリート）とハーフプレキャスト化した場合での職種別人工割合を示したものである。ハーフプレキャスト化のデータは、橋脚施工の1サイクル

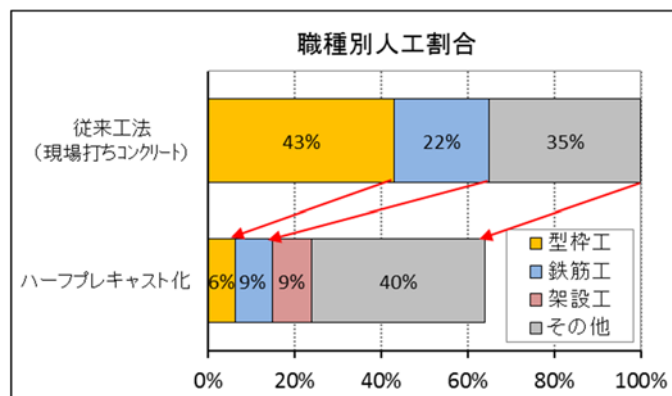


図-8.8. 省人化効果の一例

（高さ12m）の作業人工実績をもとに整理したものである。現地における型枠数量および鉄筋組立て手間が削減されることから、労力を費やす型枠工、鉄筋工は大幅に削減される試算結果である。ハーフプレキャスト化の場合、架設工の作業が新たに発生し人工を要するが、人工合計としては従来工法の約65%まで削減でき、大幅な省人化を可能とした。

### 8.3.4. 技術開発の効果

橋脚の急速施工の例として、ハーフプレキャストを用いた施工技術について紹介したが、以下のことが明らかとなった。

- ① 本技術の採用により、橋脚1サイクルの施工速度は、従来工法の約2倍のスピードを達成、橋脚全体で工期が約3割短縮された。
- ② 合理化施工により、従来工法に比べ型枠・鉄筋の現地作業が大幅に削減され、作業員の人工は約35%低減された。

上記の効果は、これまでの施工の創意工夫に比べると非常に大きな効果と言え、ハーフプレキャストを用いた施工技術の開発は、ある意味で技術革新をもたらしたと言っても過言ではない。

### 8.3.5. サステナビリティの観点による課題の抽出

サステナビリティの観点から、ハーフプレキャスト化による急速施工技術について論じてみる。まず、社会的側面については、従来工法（場所打ちコンクリート）と同等の安全性能を確保しつつ早期開通に向けた工期短縮を実現できたことは、十分に要求性能を満足できたと考える。次に環境的側面であるが、現場での木製型枠の不使用（工場では鋼製型枠を転用して製作）による省資源化、プレキャスト化による作業期間の短縮による安全性の向上、現場作業時間の低減による周辺環境への影響低減（振動・騒音）など環境負荷低減に対して貢献する部分は多いと考える。

最後に、経済的側面である。一般的に、プレキャスト部材の適用については、いわゆる物量が多くなると経済的優位性が生じない、すなわち割高になると言われている。プレキャスト部材の製作場所、輸送における制約、現地架設条件および形状の種類数等により大幅に変動するため一概には評価できないが、本プロジェクトにおいても直接工事費ベースでは1～2割程度、従来工法よりコストアップになったのではないかと試算している。

本技術の適用にあたっては、様々な設計的配慮ならびに施工上の工夫を実施したが、経済的側面の初期建設コストを増加させずに社会的側面の要求を満足し、環境負荷低減を成し遂げるといった理想的なケース(図-8.1.に示すケース③)を実現できたことまでは言い切れない。しかしながら、若干のコストアップという代償を払いながらも、大幅な工期短縮、労務縮減を達成できたという結果から、サステナビリティ評価の観点からは、革新的な技術開発のひとつと評価できるのではないかと考える。

課題はコストである。国土交通省が推進する「i-Construction」<sup>8,6)</sup>で要求される生産性向上に向かう技術を導入し、工期短縮を図り、環境にも優しい施工を実現したが、現状の入札制度ではこういった技術開発に対してコストをもって評価される仕組みがない。

国土交通省は、建設業の担い手不足を解消する狙いで、建設現場の生産性向上に向けて、測量・設計・施工・管理にいたる全プロセスにおいて、i-Constructionを導入した。3つの視点のトップランナー施策として、ICTの全面的な活用(ICT土工)、全体最適の導入(コンクリート工の規格の標準化等)、施工時期の平準化を設定している。このうち、ICT土工については、比較的精度を要求されない切盛土の出来形管理の省力化、ICT建機によるマシンガイダンス施工による省人化は、管理規定も構築され急速に浸透している。ただし、CIM(Construction Information Modeling)のベースとなる3D-CADについては、ソフトウェアの標準化の問題などから、設計段階からの適用は思うように進んでいない。また、土工以外の工種への適用のハードルは高く、まずはできるところから、といった感は否めない。

コンクリート工の規格の標準化については、機械式継手・定着工法を推進したり、流動性を高めたコンクリートを活用するために発注時のスランプの参考値を12cmに改定したりと、ややマイナーな取り組みにとどまっている。最も省人化・工期短縮効果が高く、環境負荷低減にも繋がるプレキャスト化施工については、アドバルーンは上げているものの、コストアップ分を請負者に支払う公平性のある仕組みは構築されていない。すなわち、現状のi-constructionには、社会的側面(早期のプロジェクト完成など)と経済的側面(他の側面を良くした対価)、環境的側面を総合的に評価するサステナビリティ思考がない。工期短縮、省力化施工や環境負荷低減に資する革新的技術開発を促し、働きやすい現場環境を整備して次世代の担い手を確保するには、



これらを命題とした技術提案を課し、優れた提案者にインセンティブを与えるような入札制度への改革が必要と考える。単なる品質向上や安全に関する一般的な技術提案を求める総合評価方式もそろそろ方向転換する時期に来ていると言える。また、近い将来、労働者不足の進展により労務単価上昇を招く可能性も高く、適正な歩掛りを調査して評価すれば、紹介した橋脚のプレキャスト急速施工技術は経済的側面においてもメリットを発揮できるものと考ええる。生産性向上に資する技術開発に対するコストをどのように評価するか、サステナビリティの観点からの問題提起である。

#### 8.4. まとめ

6章と7章で述べた具体的な2ケースのサステナビリティ評価に加え、橋脚の急速施工技術を革新的な技術開発の事例として取り上げ、サステナビリティ設計と技術革新の関連について考察し、以下の知見が得られた。

- 1) 橋脚の急速施工技術は、経済的側面のコストが従来技術よりは若干上回ったものの、このデメリットを上回る大幅な工期短縮効果、労務低減効果が得られているため、サステナビリティの観点からは評価できる技術開発例としてとらえられる。
- 2) 技術開発における最大の命題は、材料・構造形式・施工法の革新でコストを著しく低減する方法を見出すことと言える。
- 3) 現在の i-construction は省力化施工や担い手確保を目的として、生産性向上をメインテーマとしているが、社会的側面、経済的側面、環境的側面を総合的に評価するサステナビリティ思考となっていない。生産性向上に資する技術開発に対して、コスト面を含めてインセンティブを与える仕組みづくりの必要性をサステナビリティの観点からの問題提起したい。

#### ◎参考文献

- 8.1) K Sakai・T Shibata・A Kasuga・H Nakamura : Sustainability design of concrete structures、Structural Concrete journal of the fib,、Volume 17 No.6, pp1114-1125, 2016
- 8.2) 村尾光則、富山茂樹：ハーフプレキャスト化による橋脚の急速施工技術、橋梁と基礎, pp64-74、2017.8
- 8.3) 土木研究所：プレハブ・複合部材を用いた山岳橋梁の下部工の設計施工技術の開発に関する共同研究報告書-研究開発報告書-、No. 223, 1994. 4
- 8.4) 福本栄一郎、久正、川端淳、田村多佳志、篠崎裕生：鋼管コンクリート合成構造橋脚の設計・施工-本州四国連絡橋下田水高架橋 SP2 橋脚-、橋梁と基礎、1999. 3

- 8.5) 佐溝純一、福田雅人、諸橋明、村尾光則：新名神高速道路武庫川橋の設計と施工、基礎工、  
pp. 61-64, 2013. 10
- 8.6) 国土交通省：i-Construction 委員会報告書：i-Construction ～建設現場の生産性革命～、  
平成 28 年

## 第 9 章 結論 (Part2) および今後の課題

PART2 では、社会的側面、経済的側面、環境的側面の 3 つの要素を包括的かつ定量的に評価できるサステナビリティ設計を提案し、具体的な 2 つの橋梁建設プロジェクトを例にとってその適用性について検証した。更に、サステナビリティ設計と技術開発の必要性について考察した。

最後に、これまでの検討を踏まえ、今後の課題について考察する。

### 9.1 結論 (Part2)

#### ① サステナビリティ設計の提案 (第 5 章)

- ・ 社会的側面、経済的側面、環境的側面からなるサステナビリティ思考を建設分野に導入することの重要性を明らかにした。
- ・ そのうえで、サステナビリティ設計の具体的な設計体系を提案した。
- ・ 社会的側面の一つである安全性を他のサステナビリティ要素(コスト、CO<sub>2</sub> 排出量)との相関について、数値的に示し、サステナビリティの本質を明らかにした。

#### ② サステナビリティ設計の PC 高架橋への適用 (第 6 章)

- ・ サステナビリティ設計を、すでに実施したプロジェクトである PC 高架橋へ適用し、その有効性を明らかにした。
- ・ 従来技術の合理化と適切な要素技術の組み合わせにより、安全性の余裕度を上げて、コストは増加せず、環境負荷が低減可能となるサステナブルな構造物が成立しうることを示した。

#### ③ サステナビリティ設計のバタフライウェブ橋への適用 (第 7 章)

- ・ 新しい構造形式であるバタフライウェブ橋を事例として、サステナビリティ設計を実施した。
- ・ サステナビリティ設計を適用することで、従来とは全く異なる革新的技術開発が可能となることを明らかにした。

#### ④ サステナビリティ設計による技術革新 (第 8 章)

- ・ 革新的な技術革新を実現するためには、技術開発の方向性と適切なアプローチの方法を明確として、サステナビリティ設計を適用することが重要であることを明らかにした。
- ・ 革新的な技術革新を目標としてサステナビリティ設計を適用しても、すべての要求性能が常に満足されとは限らず、その場合、要求性能を満足しない項目(たと



えば、コスト)について総合的な判断が必要となることを橋脚急速施工技術の事例を示して明らかにした。

## 9.2. 今後の課題

今回の研究を踏まえ、今後、コンクリート構造物の設計にサステナビリティ設計を適用していく際の課題について、最後に言及する。

### ① 新規プロジェクトへのサステナビリティ設計の適用

- ・ 本研究においては、過去に実施した革新的技術開発を含む2つのプロジェクトについて、提案したサステナビリティ設計が適用可能であることを示した。今後は、サステナビリティ設計を新規プロジェクトに対して、設計段階から適用する事例を増やしていき、その有効性について多面的に検討していくことが必要と考える。
- ・ 今回は過去のプロジェクトをバックキャストして、標準工法と比較して評価したが、実際の設計に適用するには、サステナビリティ係数ならびに要求性能を絶対値で設定し、総合評価も各指標の計算値から判断することとなる。したがって、サステナビリティ係数として何を選択するか、その値をいくりに設定するか、要求性能をどの程度に設定し、各評価指標の計算結果を全体バランスからどのように評価するかなど、設計の適用事例を増やししながら、検討していくことが重要である。

### ② サステナビリティ設計のガイドラインの必要性

- ・ サステナビリティ設計の適用を容易にするためには、これまでチャレンジしてきた技術開発についてサステナビリティ設計の枠組みで基本的技術事項を整理しガイドラインを策定することが重要である。注意しなければならないことは、サステナビリティは様々な指標の総合評価であり、材料だけを低炭素にしてサステイナブルな材料としてその利用形態を考慮しなかったり、あるいは都合の良い事項のみに注目して判断することは避けなければならない。常に、考えられるすべての事項を定量化し、プラスマイナスを明確にすることがもっとも重要である。こうしたことを含むガイドラインの作成が必要である。

### ③ 建設分野へのサステナビリティ思考の導入

- ・ 建設分野で注目されている様々な問題・動向、例えば i-construction、国土強靱化、インフラ長寿命化などについて、サステナビリティ思考で整理することが必要である。
- ・ 国交省は建設業の担い手不足を解消する狙いで、建設現場の生産性向上に向けて

i-construction を推進しているが、比較的導入しやすい土工事の出来形管理や、機械式継手・定着工法の推進などマイナーな取り組みにとどまっている。最も省人化・工期短縮効果が高く、環境負荷低減にも繋がるプレキャスト化施工については、アドバランは上げているものの、コストアップ分を請負者に支払う公平性のある仕組みは構築されていない。すなわち、現状の i-construction には、社会的側面(早期のプロジェクト完成など)と経済的側面(他の側面を良くした対価)、環境的側面を総合的に評価するサステナビリティ思考がなされていないことが問題である。工期短縮、省力化施工や環境負荷低減に資する革新的技術開発を促し、働きやすい現場環境を整備して次世代の担い手を確保するには、これらを命題とした技術提案を課し、優れた提案者にインセンティブを与えるような入札制度への改革が必要と考える。

- ・ 国土強靱化は国土交通省の重要な課題として認識されている。明らかに、従来の固定化した安全性のみに注力できた時代背景が様変わりし、地震規模の増大や温室効果ガスの削減などの喫緊の課題に対応するためには、インフラ・建築物の設計について新たな枠組みが必須となっている。国土強靱化を施策にする場合、強靱化の本質を設計で実現できるものでなければならないが、現状は非常にあいまいな扱いとなっている。結果として、施策のほとんどがソフト対応となっている。避難などのソフト対策は重要であることは論を待たないが、本質的には災害をどう防ぐかが最も重要な問題である。安全から安心へ、国民のニーズが変革していく中、サステナビリティ思考に立ち、安全の余裕度をどのように考えるか、社会全体のシステムとしての精査が必要な時期に来ていると考える。
- ・ インフラの長寿命化も、長寿命化の本質的意味を明確にする必要があるが、これも現状はきわめてあいまいな扱いになっている。高度経済成長が終焉を迎え、欧米諸国と同様に大量のインフラを維持していくには、これまでの初期コストミニマムの考え方から、LCC を取り入れるとことを前提とした設計体系の整備が急務である。
- ・ 真に持続可能な社会の実現するには、「i-Construction」、「国土強靱化」、「長寿命化」等をサステナビリティの観点で総合的に捉え、施策に展開するための議論を早急に始めるべきである。

## 謝 辞

本研究をまとめるにあたりましては、多くの方々から御指導、御協力、御助言をいただきました。

名古屋大学大学院工学研究科 中村光教授におかれましては、国内外の研究活動、学会活動で御多忙にもかかわらず、論文の構成から取りまとめに至るまで貴重なお時間を割いていただき、懇切丁寧なる御指導と御助言を賜りました。短期間で本論文を書き上げることができたのも、中村教授のきめ細やかで終始熱心な御指導と叱咤激励があったからでございます。ここに、深甚なる謝意を表します。

名古屋大学大学院工学研究科 舘石和雄教授におかれましては、サステイナビリティ設計の提案について、設計の本質的な観点から貴重な御指摘と御意見をいただきました。さらに、論文審査に際しましては貴重なお時間を割いていただき御指導いただきました。ここに深く感謝申し上げます。

名古屋大学大学院環境学研究科 谷川寛樹教授におかれましては、建設環境分野の専門家の幅広い視点から、サステイナビリティの本質的な意味合いをご指導いただき、また貴重な御意見をいただきました。ここに、深く御礼申し上げます。

岐阜大学工学部社会基盤工学科 内田裕市教授におかれましては、コンクリート工学の専門家の御立場から、サステイナビリティ設計の提案について、的確な御指導と御助言をいただきました。さらに、論文審査に際しましては貴重なお時間を割いていただき詳細に御指摘、御指導いただきました。ここに深く感謝申し上げます。

本研究分野の国内外での第一人者である、日本サステイナビリティ研究所 堺孝司代表(元香川大学工学部副学部長)におかれましては、足掛け4年にわたり、懇切丁寧、かつ厳しい御指導により、妥協を許さない探究心、既成概念を打ち破る思考の大切を教えていただきました。その集大成として本論文を執筆できたことは、私にとってかけがえのない喜びであるとともに、堺代表の熱き思いに多少なりとも報いることができたと思っています。誠にありがとうございました。

三井住友建設(株)春日昭夫技術本部長からは、本研究のきっかけ、ならびに本論文作成の動機付けを与えていただいたとともに、議論の中での的確な方向性を示していただいたこと、深く感謝いたします。

三井住友建設(株)新井英雄社長、益子博志土木本部長には、本論文執筆の機会を与えていただき、完成に至るまで御理解と御支援をいただきました。心より御礼申し上げます。

三井住友建設（株）技術本部構造技術部の永元直樹部長、藤岡泰輔氏、環境・リニューーアル技術部の西尾新一部長、土木本部土木設計部の片健一グループ長、東北支店土木部の浅井宏隆グループ長とは、三年に渡るワーキンググループの中で、サステイナビリティに関して様々な議論を交すことができました。その成果を反映して本論文を執筆できたことを、ここに深く御礼申し上げます。

最後に、長期間にわたる休日や深夜の論文執筆活動に際して、暖かく見守り、時として励ましてくれた妻 久美には本当に感謝しております。

以上、本論文は、お世話になった皆さんに捧げたいと思います。