

第1章

序論

1. 1 背景と目的

現代の構造設計は性能設計を指向しているが、性能設計の裏づけとなる実建物の挙動は全くといっていいほど確認されていない。このため真の意味での性能確保が十分できていないものと考えられる。建築物には、大地震が起こるたびに想定外の被害が発生し、基準が見直されることがこれまで繰り返されてきているのが現状である。

他産業に目を向けると、例えば自動車の設計においては、破壊実験や走行試験、実際の事故などの詳細な分析によるフィードバックが設計に活かされている。一方建築物に対しては、実大実験は実際のところ困難であるし、建物が大地震に遭遇する確率はまれであることから、建物の地震挙動を計測することもほとんど行われず、被災した建物の挙動を分析しようとしても、どのような外力が作用したかを特定することは困難である。また構造解析モデルは、完成した実建物としてのフィードバックのない設計時の解析モデルがあるのみで、被災状況分析のための実建物の挙動を表現できる十分信頼性の高い構造解析モデルもないのが実情である。

実際の建物を計測しその分析結果を設計や品質確認、損傷評価あるいは構造解析モデルの信頼性向上に反映することができれば、より安全で、経済的で長寿命の構造体をつくることが出来るものと考えられる。このような実測による構造性能把握は新築建物だけでなく既存建物に対しても有効と考えられる。既存建物の数は新築建物よりも圧倒的に多く、これらの構造安全性及び経済性の確保、長寿命化を図ることも課題である。建物設計用の入力地震動予測がまだ発展途上の技術であることを考えると、現在設計中の建物がすぐに要求性能を満たさなくなる可能性も否定できず、改修による構造安全性の確保が多くの既存建物に必要とされることが想定される。既存躯体に新築躯体が複合される改修建物の挙動はさらに複雑なものとなり、改修工事および改修後の品質確認のために、微動計測や歪み計測などの実測とその分析は欠かせない技術であると考えられる。

一方で最新の地震動予測研究の結果、東海、東南海、南海といった M8 クラスの海洋性巨大地

震が近い将来に発生することが確実視されており、30年以内に発生する確率は、東海地震で87%、東南海地震で60~70%、南海地震で60%程度（海溝型地震の長期評価の概要（算定基準日 平成22年(2010年)1月1日）であることが地震調査研究推進本部より公表されている。これら巨大地震の発生時には、大阪平野や濃尾平野など大都市を擁する大規模堆積平野部では震度5強~7の大きな震度が予想されるとともに、堆積平野の深部地盤構造やプレート境界の付加体の存在によって長周期成分を多く含む継続時間の長い地震動となることが分かっている。長周期の地震動は平成15年（2003年）十勝沖地震でも観測され、石油タンク内のスロッシングなど長周期の共振現象による新たな被害をもたらしている。予想される東海・東南海・南海地震は、超高層建物など重要度の極めて高い長周期構造物を擁する大都市を襲うはじめての長周期地震動となる。現代の構造設計では制振構造などを採用して、これらの長周期地震動に対しても安全なように構造設計がされているが、構造設計のベースとなる実建物の性能が不明であり、これら切迫する巨大地震時の長周期の揺れに対する被害が懸念される。

このような背景から本論では、実際の建築物の構造性能を把握・検証することを目的として、静的及び動的変形を計測可能な光ファイバセンサを用いて、柱の軸変形の計測を実施し、建設時から竣工後までの継続的な変化を、計測結果と3次元構造解析モデルに基づいて分析する新たな方法論を構築した。さらにこの分析結果を活用して、新築建物に対しては以下の①から③の評価を行うことを具体的な目標とした。

① 建物と設計時との比較分析に基づく建物の構造性能評価・構造システム評価・施工品質評価。

具体的には「構造性能評価」とは性能設計の裏づけとなる構造体の耐力の余裕度などを、計測結果を踏まえて再評価すること、「構造システム評価」とは制振システムを含む構造体の挙動が設計で意図した通りであるかを評価すること、「施工品質評価」とは計測結果の分析から施工が適切におこなわれ、構造材として適切な品質が確保されているかを評価すること。

② 今後の設計手法へのフィードバック。

具体的には、計測結果から明らかとなった一般的な設計手法に関する問題点をフィードバックすることや、計測結果を踏まえて、長期の安全性確保のための耐力確保などといった目標に対し、実態を踏まえて目標性能の設計に利用すること。

③ 被災後の構造損傷程度の推定法の構築。

具体的には、損傷部材の特定や建物継続使用の可否判断など計測の目的に応じて、損傷が生じた場合にセンサで検出可能な影響範囲を想定して、効率良く被災後の損傷を検出すること。

また既存建物に対しては、最新の知見を反映した性能確保の手法について具体的な事例をふまえて示し、事例に示す既存建物の性能確保にも構造モニタリングが有効であることを論じる。

このように建物の建設途中から供用期間終了までの構造物のモニタリングを実施し、構造安全性の確保、被災後の損傷度推定、構造設計法へのフィードバックに利用し建物のライフタイムにわたる安全性を確保する技術を「ライフタイムモニタリング」と定義する。一般的な構造ヘルスマニタリング（以下 SHM と略す）が構造物の劣化や損傷度程度の把握など、建設後の健全性を把握する技術であるのに対して、より広範囲に構造物の性能を評価する技術であるところに大きな特徴がある。施工途中からの計測結果の分析によって、一般的な SHM で課題として残る、信頼性

の高い構造解析モデルの作成を可能としており、SHMとしての精度向上も実現している。

提案するライフタイムモニタリングは、比較的容易に設置可能な1種類の光ファイバセンサを計画的に建物に配置することで、建物の部材レベルの応力負担状況から建物全体モデルの振動特性など、静的及び動的挙動を把握し、計測結果を反映して作成した3次元構造解析モデルに基づく分析を加えることで、設計から建物の供用期間終了まで、設計手法へのフィードバックから、適切な構造体が建設されたかの判定や、被災後の損傷度推定など一連の構造把握が効率良く出来る手法であるところにも独自性がある。

1. 2 既往の研究の総括

1. 2. 1 既往の研究の成果

実際に施工された構造物の柱梁部材の応力を計測によって算出して、構造性能の評価に反映させようとする研究はほとんどない。1987年～1992年頃に小野、井戸田らが実構造物に対して柱・梁に歪みゲージを設置し、実構造物の不確定性を把握しようとする研究を実施している（例えば1)～6)）。小野、井戸田らが指摘するように、これ以前に同様の研究はほとんどない。そして、これらの研究の後も同様の研究はなされてきていない。

小野、井戸田らは、計測柱軸歪量を数値解析による軸歪量で無次元化した値を統計処理し、ヒストグラムを描いた分析を行っており、事務所建築における柱設計用積載荷重の階数による低減係数としてまとめられ、建築物荷重指針1993年改定版⁷⁾改定時の参考資料となっている。公表されている分析結果は、これら積載荷重に対する分析がまとめられているのみで、構造解析モデルの不確定性には言及されておらず、筆者が目標とする実測結果と解析結果の比較に基づく構造性能評価には至っていない。

実構造物を計測して、対象構造物に蓄積された損傷の程度を把握し、健全性を判定する技術はヘルスマモニタリングと呼ばれる。ヘルスマモニタリングに関しては山本が著書⁸⁾で体系的にまとめて技術を紹介している。この文献によると、ヘルスマモニタリングは1992年頃にアメリカを発祥として使われ出した言葉であり、背景としてアメリカにおける多くのシビルインフラストラクチャが1900年初頭に建設され、建設後約100年を経過してその老朽化が社会問題となっていたことが大きな理由の一つとして解説されている。発祥の背景から、ヘルスマモニタリングは、主に「疲労破壊」をターゲットとして、これを原因とする事故を事前に察知して防止することを目的とした技術であり、完成した構造物の健全性判定技術として発展してきたといえる。このため筆者が目標とするライフタイムモニタリングとは目的が異なっている。建築物はシビルストラクチャよりも不静定次数が大きな複雑な構造物であり、積載荷重など不確定要素も多く大きいのが実情である。建築物に対しては、実際の建物の挙動を表現できるような信頼性の高い構造解析モデルも無く、実測したとしても計測結果を評価することも困難であるのが現状である。

このように、新築建築物であっても計測結果を反映した構造安全性の確保は難しい問題であるが、既存建物の改修の場合はさらに難問である。重要度の高い既存建物では耐震改修工法として免震・制振工法が採用される場合も多いが、既存壁などの剛性評価が、追加される免震・制振装置の効果に大きく影響することが考えられ、実際建物の改修後の挙動の判定はより難しいものとなると考えられるし、補強のために追加する構造部材が使用性や文化財的価値を総合的に判断する必要が生じる。2006年には免震・制振工法を採用した改修が適切かつ確実に実施されることを目的として耐震改修ガイドライン⁹⁾がまとめられている。ガイドラインでも免震改修建物の計測による構造安全性確保に関して記載があるものの、躯体の沈下計測による施工中の安全確保に限定されており、実際の構造性能把握で問題となる既存壁などの剛性の影響に関しては言及されていない。また既存の改修は特に個々の建物の事情による部分が多いが、工法選定にあたって十分な時間とコストがかけられることはまれであり、このため工法選定にあたり、耐震性以外の使用性や文化財的価値に対する専門家の見識を反映した価値観の調整が十分には実施されていないと

考えられる。ガイドラインでもごく簡単に一般的 contentのみ示されるにとどまっている。

1. 2. 2 既往の研究と本研究の位置づけ

既往の研究では、実際に施工された構造物の柱梁部材の応力を計測によって算出して、構造的な性能の評価に反映させようとする研究はほとんどない。構造物を計測することで完成した構造物の健全性を判定しようとするところみは、構造ヘルスマモニタリングとよばれて近年その活動が注目されている（例えば 10）～28）。しかし、完成後の建物のみを計測したとしても、それを適切に評価する構造モデルもなく、実際のところの適切な評価はできていないものと考えられる。本論文で提案するライフタイムモニタリングは、建物の建設途中から計測を開始し、施工中から竣工後そして建物の供用期間が終了するまでの計測により、建物のライフタイム全般にわたる構造的な性能を把握して構造的な安全性の確保や、被災時の損傷度把握を行う新たなモニタリングシステムであり、本論文で初めて定義する概念である。

また、本論ではライフタイムモニタリングの活用による重要な拠点施設となる既存建物の構造的な安全性の確保についても論じている。耐震工学はいまだ未熟であり、大きな被害をもたらす地震が起こるたびに、耐震規定の見直しが行われ、新築された建物でもすぐに最新の耐震規定を満たさないと判断される状況がこれまでも繰り返されており、既存建物数が新築建物数よりも圧倒的に多いことを考慮すると、既存建物の構造的な安全性を確保することは課題である。

既存建物のうち今後も長期間継続使用される重要施設では、免震、制振により耐震性を確保しようとする試みも多くなってきた。このような背景から 2006 年にはこれらに対するガイドライン⁹⁾が出版されている。しかしガイドラインは平成 12 建設省告示 1461 号による地震動、いわゆる告示波を入力地震動とした一般的な検討が示されているのみで、またモニタリングに関しては、免震改修に対する荷重盛り替え施工時の沈下計測などに限定して言及しているのみである。

地震動に関していえば、告示波のみで耐震安全性を検討することでは不十分である。近年の地震被害では、どこに建てられていたかで建物の被害に大きな差があることが分かっている。現在の地震動予測技術では、ある程度敷地地盤の振動特性、周期特性やゆれの大きさを評価することが可能となり、地域地盤の特性を考慮した地震動を用いて検討することの重要性が高まっている。しかし、現在の建築基準法では敷地のごくローカルな揺れ方を評価する枠組みがなく、このため、敷地の特性を考慮した設計をしようとしても、現時点では建築基準法を超える安全性を確保することに対して、建築主の（官庁施設であれば市民の）理解が得にくい状況がある。

本論文では、重要拠点施設の免震改修における性能確保の具体的な手法も示しているが、ここでは、最新の知見をふまえて作成した地域地盤の特性を考慮した地震動を採用し、耐震性だけでなく、使用性や意匠性などに関して専門分野の学識経験者の見識を踏まえた客観的な評価を行い、建築主の理解を得る手順を示している。

1.3 論文の構成

本論文は6つの章で構成されており、大きくは4つの内容を含んでいる。このうち前半2つの章（第2章・第3章）は新築の建物を対象として論じている。第2章ではライフタイムモニタリングの手法を、そして第3章では具体的計測結果を分析している。後半2つの章（第4章・第5章）は既存建物を対象として論じている。第4章では既存建物の改修に際して、構造安全性を確保する手法を、そして第5章では既存建物改修の具体事例を示し、モニタリング結果を分析している。このように本研究では提案するライフタイムモニタリングを新築及び既存建物に適用し、実測結果と解析結果の比較に基づく分析を行い、提案するモニタリングが構造把握に有用であることを示した。

第1章では、現代の構造設計が、性能設計を指向しながら、性能設計の裏づけとなる実建物の挙動が確認されていない現状から、実際の建物を計測しその分析結果を設計や品質確認、損傷評価あるいは構造解析モデルの信頼性向上に反映することの重要性を指摘した。また、既往の研究では実建物と設計との乖離を十分埋めることが出来ないとの問題点を指摘した上で、研究の目標と展望について論じている。

第2章ではまず、提案するライフタイムモニタリングの手法について論じている。本研究の目的に沿った計測対象を整理した上で、計測装置として光ファイバセンサ SOFO が適切であることを示した。そして、計測対象とした2つの超高層建物の概要を説明し、センサ設置の概要を説明する。

次に、モニタリング結果を評価するための基礎的研究を含めてまとめている。計測装置が歪センサであることから、力への換算時に温度歪の影響を取り除くことが不可欠で、センサの取り付け状況をふくめた評価が必要であるため、実際の計測結果の分析をもとに温度歪の補正に関する考察を行った。また、計測対象とした柱が CFT 柱であることから、CFT 柱の充填コンクリートの収縮挙動、そして CFT 柱の鋼管と充填コンクリートの一体的挙動を確認するための実大実験を行い次章以降の計測結果の評価に用いている。

さらに、モニタリング結果を反映した信頼性の高い構造解析モデルを作成する手法を示している。建物完成後の建物固有周期計測だけでは、重量・剛性がそれぞれ適切かを評価することが困難であるが、施工段階の異なる2時点で計測した固有周期を合理的に説明できるモデルとすることで信頼性の高い構造解析モデルとすることができることを示し、計測対象とした建物の構造解析モデルを作成している。そして、信頼性の高い構造解析モデルの作成の検討の過程で明らかとなった一般的な設計の手順に対する注意点にも言及している。

第3章では、モニタリングした実建物の柱の静的および動的歪みを、前章で作成した信頼性の高い構造解析モデルに基づき、実建物の挙動を解析的に表現出来るかどうかに着目した分析を行っている。

静的計測の結果、センサは施工段階から竣工後までの継続的な計測により、施工の進捗に伴う

建物重量変化をとらえることができることを示し、解析結果による柱軸力との比較により実建物の構造把握を行っている。また、建物完成後にも積載荷重によると思われる柱歪の変化が生じることから、被災後の損傷度推定のための建物重量の適切なモデル化に有意な情報を与えることを示した。

動的計測では、実建物で実施した自由振動実験のシミュレーション解析から、センサが動的な柱変動軸力を適切に捉えることができることを示し、動的解析の結果でも実建物の動的挙動把握に有用であることを示している。また、センサは部材の曲げ応力も適切に捉えており、これを利用することで、鉄骨造建物でもっとも懸念される梁の下フランジ破断の被害を検出することが可能で、被災後の損傷度推定にも有用であることを示した。

第4章では、既存建物の改修による構造安全性確保の事例として、重要拠点施設の免震改修における性能確保の具体的な手法も示しているが、ここでは、学識経験者と共同して地震工学に対する最新の知見をふまえて作成した地域地盤の特性を考慮した地震動を採用し、耐震性だけでなく、使用性や意匠性などに関して専門分野の学識経験者の見識を踏まえた客観的な評価を行い、建築主の理解を得る手順を示している。この手法により、最適な工法が選出されるだけでなく、工法選出にあたっての説明性がより増すことができている。また、結果として、ごくローカルな敷地地盤の振動特性を反映した地震動を設計に採用することができ、より構造安全性の高い改修の実施に結びつけることができたことを示す。

第5章では、前章で選定した改修工法を採用した既存建物の免震改修の具体的設計事例を示す。

さらに、新築と同様に施工途中からの計測によるライフタイムを通しての安全性確保について論じ、改修工事中のモニタリング結果の分析結果から、提案するモニタリングが、施工中の構造安全性の確保、ならびに設計へのフィードバックに有用であることを示している。

第6章では、分析の結果をまとめて結論し展望を示した。

参考文献

- 1) 井戸田秀樹, 小野徹郎, 真喜志卓, 中野大治: 松崎博彦: 実測に基づく鋼構造骨組の信頼性レベルに関する研究 (その 1) 実測方法および実測結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B 分冊, pp.1385-1386, 1987.10
- 2) 大矢純子, 小野徹郎, 井戸田秀樹, 中野大治: 実測に基づく鋼構造骨組の信頼性レベルに関する研究 (その 2) 実測値の統計データと信頼性指標の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B 分冊, pp.13-14, 1989.10
- 3) 井戸田秀樹, 小野徹郎: 実測に基づく事務所建築の積載荷重に関する考察: 柱軸力用積載荷重の階数による低減に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B.構造 I 分冊, pp.163-164, 1991.9
- 4) 大矢純子, 小野徹郎, 井戸田秀樹: 実測に基づく鋼構造骨組の信頼性レベルに関する研究 その 3 実構造物の実測測定による信頼性評価の位置づけについて, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C.構造 II 分冊, pp.1485-1486, 1991.9
- 5) 大木仁, 小野徹郎, 井戸田秀樹: 実測に基づく鋼構造骨組の信頼性レベルに関する研究 その 4 複数建物の実測データと信頼性指標の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C.構造 II 分冊, pp.1487-1488, 1991.9
- 6) 早川由則, 小野徹郎, 井戸田秀樹, 大矢俊樹: 実測に基づく鋼構造骨組の信頼性レベルに関する研究 その 5 柱軸歪測定による設計・施工の不確定性性に関して, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造(2)分冊, pp.1349-1350, 1992.8
- 7) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説 1993 年改定
- 8) 山本鎮男: ヘルスモニタリング 機械・プラント・建築・土木構造物・医療の健全性監視, 共立出版株式会社, 1999.8
- 9) 日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の免震・制振による耐震改修ガイドライン, 2006.6
- 10) 斎藤知生: システム同定による建築物の確率論的損傷評価, 日本建築学会構造系論文集 No.557, pp.93-100, 2002.7
- 11) 石井清, 稲田裕, 杉村義広: 炭素繊維束センサの開発と性能評価 杭の健全性モニタリング手法の開発 (その 1), 日本建築学会構造系論文集 No.557, pp.129-136, 2002.7
- 12) 濱本卓司, 森田高市, 勅使川原正臣: 複数モードの固有振動数変化を用いた多層建築物の層損傷検出, 日本建築学会構造系論文集 No.560, pp.93-100, 2002.10
- 13) 稲田裕, 石井清, 杉村義広, 佐々木建一: 炭素繊維束センサの杭の損傷検知に対する性能評価 杭の健全性モニタリング手法の開発 (その 2), 日本建築学会構造系論文集 No.563, pp.91-98, 2003.1
- 14) 山田聖志, 中澤博之, 小宮巖: FRP 形材を骨組とした膜構造のクランプ部破壊性状と光ファイバセンサによる内部損傷モニタリング, 日本建築学会構造系論文集 No.564, pp.71-77, 2003.2
- 15) 仁田佳宏, 西谷章: 絶対加速度応答のみの計測に基づく 2 段階からなる構造システム同定, 日

- 本建築学会構造系論文集 No.568, pp.91-97, 2003.6
- 16) 楠浩一, 勅使川原正臣: リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発のための加速度積分法, 日本建築学会構造系論文集 No.569, pp.119-126, 2003.7
 - 17) 吉元怜毅, 三田彰: 部分空間法及び部分構造アプローチを用いた免震構造物の層剛性及び減衰の同時同定, 日本建築学会構造系論文集 No.569, pp.31-36, 2003.7
 - 18) 稲田裕, 石井清, 岡田敬一, 杉村義広: コンクリート杭の損傷モニタリング手法の実構造物への適用, 日本建築学会技術報告集, 第18号, pp.79-84, 2003.12
 - 19) 荒川利治, 山本和也: 常時微動測定に基づく鉄骨造高層建物の振動特性に関する経年変化および時間変動, 日本建築学会技術報告集, 第19号, pp.61-66, 2003.12
 - 20) 荒木慶一, 宮城佑輔, 上谷宏二: 感度に基づくグルーピングと組み合わせ非線形混合最適化による骨組構造物の損傷推定, 日本建築学会構造系論文集 No.582, pp.65-71, 2004.8
 - 21) 谷口龍太, 三田彰: サポートベクトルマシンとインパルス加振を用いたアクティブ損傷検知, 日本建築学会構造系論文集 No.583, pp.55-59, 2004.9
 - 22) 谷明勲, 山邊友一郎, 河村廣: 無線ICタグ応用のユビキタス建築構造ヘルスマニタリング構想加速度センサ実験に基づく応用システムの構築, 総合論文誌, No.4, pp.111-116, 2006.2
 - 23) 濱本卓司, 森田高市, 相馬澄子: 逐次最小二乗法による多層建築物の地震損傷追跡, 日本建築学会構造系論文集 No.603, pp.39-46, 2006.5
 - 24) 塩田寿美子, 遠藤龍司, 登坂宣好: フィルタ理論に基づくフレーム構造物の損傷同定解析, 日本建築学会構造系論文集 No.605, pp.95-102, 2006.7
 - 25) 桐田史生, 金澤健司, 森清宣貴, 北村春幸: 建築物の地震損傷検知のための適応回帰型システム同定, 日本建築学会構造系論文集 No.619, pp.65-102, 2007.9
 - 26) 濱本卓司, 井上了太: 並列モデル同定を用いた多層建築物の部材損傷検出, 日本建築学会構造系論文集 No.665, pp.1661-1670, 2010.9
 - 27) 三田彰: サステイナブル構造システムとリスク制御, 建築雑誌, Vol.119 No.1514, pp.036-037, 2004.2
 - 28) 日本建築学会構造委員会振動運営委員会構造ヘルスマニタリング小委員会: 建築構造物の健康診断に関するワークショップ, 2005.12

