土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 70, No. 3, 389-408, 2014.

多目的関数を用いた橋梁用ビーム型防護柵の性能照査型最適設計

伊藤　誠慈[1]・吉野　彰宏[2]・伊藤　義人[3]

[1]正会員　東海旅客鉄道株式会社　新幹線鉄道事業本部東京保線所(〒108-0023 東京都港区芝浦4-2-33)

[2]学生会員　名古屋大学大学院院生　工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: yoshino.akihiro@h.mbox.nagoya-u.ac.jp

[3]フェロー会員　名古屋大学大学院教授　情報基盤センター長　工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: itoh@civil.nagoya-u.ac.jp

日本における車両用防護柵は防護柵設置基準・同解説によって性能設計される．その中では，4つの安全性能以外にも，景観等への配慮が求められている．本論文では，新しい車両用防護柵の多目的な性能を実現するため，多目的関数を遺伝的アルゴリズムにより最適化することにより，安全性，経済性および景観性を同時に満足する性能照査型最適設計を行う手法を考案した．多目的関数のPareto集合解が，有意な解であることを部材の静的な有限変位弾塑性解析と防護柵への車両衝突シミュレーションによって実証し，また，景観に配慮した既製の橋梁用ビーム型防護柵と比較することによって，提案した新しい性能照査型最適設計法の有効性を確かめた．

Key Words : *bridge railing, shape optimization, genetic algorithm, FEM*

1.　緒言

車両用防護柵は，人命や財産を守るために衝突車両の路外逸脱防止や進行方向復元等の安全性能を有する重要な交通安全施設である．日本の防護柵の設置基準は，平成 10 年の改訂によりそれまでの仕様規定から性能照査型規定に変更された [1]．この設置基準で規定された防護柵の有すべき性能は，1)車両の逸脱防止性能，2)車両乗員の安全性能，3)車両の誘導性能，4)構成部材の飛散防止性能の 4 つである．この改訂により防護柵の設計の自由度が増大し，これらの 4 つの性能を満たしていれば，自由に使用材料や形状を決定する事が可能となった．

また，平成 16 年の再改訂により防護柵を設置する際に，その地域特性に応じた景観や走行車車両からの眺望性への配慮を行うことが明確に規定された [2]．これに従って良好な景観形成を図るため，従来の防護柵とは異なる構造的特徴を有した新しいタイプの防護柵が開発されてきた [3][4]．

これら安全性能と景観性の他にも，施工性や維持管理性能など防護柵に関する要求性能は多岐にわたり [5]，それらを同時に満足する必要がある．また，防護柵は，一品生産ではなく標準製品として製作される場合が多く，仕様の変更が同種の防護柵に反映されるため，コストや環境負荷といった評価事項を最小化する最適化の影響は大きいと考えられる．

しかし，現行の防護柵の設置基準では，橋梁用ビーム型防護柵を除いて，実車衝突実験による安全性能照査の方法のみが規定されており，他の照査方法に関する規定がなされていない．また，これまでに多面的な要求性能を同時に満たし評価項目を最小化する設計手法は確立されておらず，設計者の経験などを頼りに，非効率な試行錯誤や繰り返し試行を行うことは，設計者にとっては大きな負担となっている．

そこで，本研究では，まず防護柵の多面的な要求性能と評価事項について検討する．さらに，多目的関数に対して遺伝的アルゴリズムを適用して，多面的な要求性能を満足しながら最適な形状を効率的に探索できる，防護柵の性能照査型最適設計法を開発し，今後の防護柵設計の方向性を示すことを目的としている．なお，本研究はGA などの最適化手法自体を研究するものではない．

本研究では，橋梁用ビーム型鋼製防護柵を対象とした性能照査型最適設計法の開発を行い，他のタイプの防護

柵を対象とする汎用的な設計法開発の可能性もさぐることとする．なお，橋梁用ビーム型鋼製防護柵は，橋梁に設置されるために景観性能や眺望性への配慮が重要視されるので，多目的関数を用いる本研究の対象とした．

2. 性能照査型最適設計法の開発

(1) 性能照査型最適設計法

本研究で提案する防護柵の性能照査型設計法は，防護柵設計に特化し，防護柵の特徴を考慮した最適設計法である．防護柵のライフサイクル性能は，供用時における偶発的な車両衝突を主な対象としており，安全性の要求性能を保持していくことが最優先事項である．その上で，経済性や景観性等の目的関数を最小化または最適化することが，防護柵設計に求められる設計プロセスである．

(2) 防護柵に対する要求性能

防護柵に求められる性能は多岐にわたるが [5]，**図-1** に防護柵の要求性能をまとめたものを示す．最も重要な防護柵の要求性能である安全性に加え，経済性，景観性，維持管理性，施工性，美観特性，地域環境対応性，地球環境対応性が含まれている．景観性は，走行中の視認誘導が容易に行なわれるための視認誘導性，車両の運転者や同乗者の視線を遮らないで外部への眺望を多く確保する眺望性を含んでいる [6]．それに対して，美観特性は，防護柵に対して景観の一部として調和するような形状・色彩を有することを要求する性能である．

定量化できる構造設計の要求性能は，設計法における制約条件にあたり，応答値 S と限界値 R を比較する性能照査式($S \leq R$)によって評価される．構造設計には要求性能のほかに，例えば経済性のような最小化または最適化しなければならない目的関数が存在する．本研究では，定量化できる防護柵設計の多目的関数として，**図-2** に示すものを用いる．

(3) 多目的遺伝的アルゴリズム

計算機の発達に伴い，最適化設計や構造最適化に関する研究は近年，多く行われるようになってきている．構造設計を単純化して構造最適化問題として捉えることができる場合，従来のような試行錯誤あるいは経験によって決定していた構造物の形状決定の作業は，計算機を用いて決定することが可能である．

Liu ら [7]は，1997 年に多目的関数に対して遺伝的アルゴリズムを用いて，橋梁床板の最も効率的な維持管理法を提案している．また，建設分野において，遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm)を用いた構造物の最適化に関する研究が盛んに行われている [8]．

最適化を取り扱う問題に対して，遺伝的アルゴリズムは有効で，多目的遺伝的アルゴリズム(Multi-Objective Genetic Algorithm)によれば，多目的関数を用いて，構造設計のような多様な要求事項を同時に考慮すべき問題がある場合に対して，Pareto 最適集合解を求めることが可能となり，設計者はそれらの中から自らの選好によって解の選定を行う設計ができる．

文献 7)で示したように，第 3 筆者らは 20 年前から，多目的関数の最適化を橋梁の維持管理に適用したが，その後 GA 手法の研究が多くの研究者によって発表されており，文献 8)の大森らとも議論し，本研究では多目的遺伝的アルゴリズムの解法として，Deb[9]らによって提案された NSGA2(Niched Sharing Genetic Algorithm 2)を採用した．NSGA2 は，エリート主義や混雑度等の評価指標を導入した，Pareto 最適解集合の探索性能に優れているアルゴリズムである．なお，大森ら [8]により，鉄骨ラーメン構

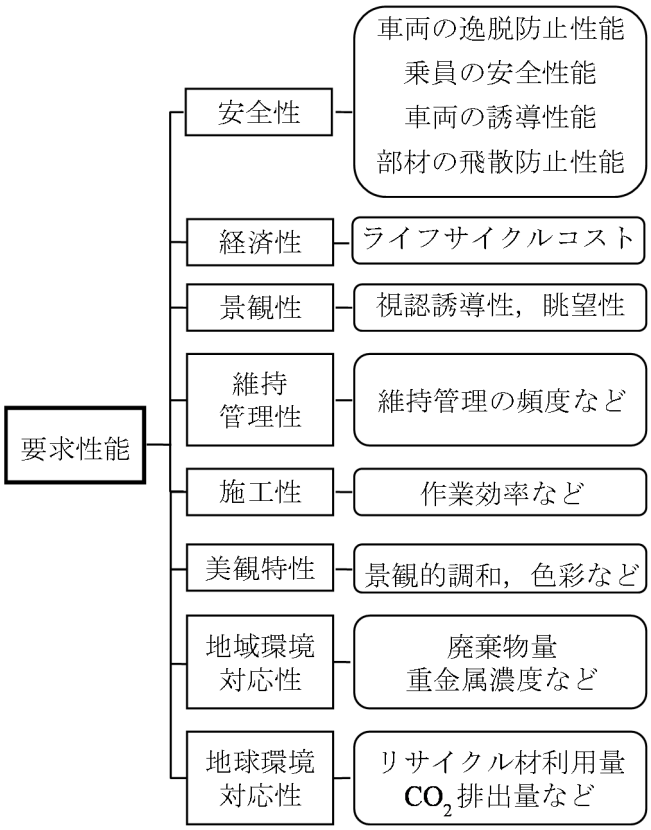


図-1 防護柵の要求性能

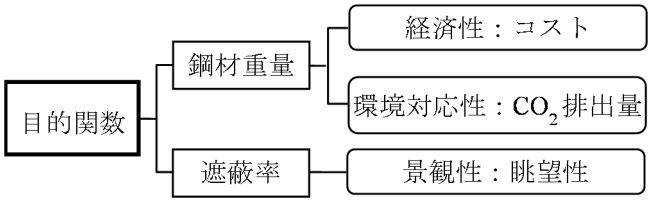


図-2 本研究の防護柵の目的関数

造の最適設計に対してこの手法が適用できることが示されている.

(4) 目的関数

防護柵の目的関数は図-2 で示したように，鋼材重量と遮蔽率の 2 つを目的関数として設定する.

a) 鋼材重量

本来，防護柵の経済性は，構造コストに加え，施工・製作コストや維持管理コストを含めた LCC (Life Cycle Cost)で評価する必要があるが，本研究では，防護柵に使用する鋼材重量を目的関数の 1 つとして扱う．これは，同時に考える環境対応性として CO_2排出量を指標としたときに，同じ鋼材重量に原単位をかけた値でほぼ評価できるためである[10].

b) 遮蔽率

景観性の評価として，眺望性を測る遮蔽率を使用する．遮蔽率は，図-3 に示すように防護柵の 1 スパンの長さである 2.0m と，最も背の高い防護柵を基準とした高さ 1.2m の平面空間における防護柵の全投影面積の割合であり，遮蔽率が小さいほど眺望性が良くなり景観性に優れた防護柵とする．この遮蔽率は文献 6)で扱ったものと同じである.

c) 多目的関数の定義

鋼材重量と遮蔽率の 2 つの多目的関数を式(1)のように考える.

$$\text{minimize}(x_i) = \begin{cases} f_1(x_i) = \dfrac{C(x_i)}{\prod_j r_j} \\ f_2(x_i) = \dfrac{R(x_i)}{\prod_j r_j} \end{cases} \tag{1}$$

ここで，
- $f_1(x_i)$ ：鋼材重量の関数値（kg）
- $f_2(x_i)$ ：遮蔽率の関数値（%）
- C ：防護柵の鋼材重量
- R ：防護柵の遮蔽率
- x_i ：部材形状の設計変数
- i ：部材寸法番号
  - 1~14 （横ねじれ座屈タイプ）
  - (詳細は 4.(3)に記す)
- r_j ：ペナルティ関数
- j ：制約条件番号
  - 1, 2 （2.(6)に示す制約条件）

(5) ペナルティ関数

制約条件の扱い方には，式(2)のペナルティ関数 r_j を用いて遺伝的アルゴリズムにおける，ある情報体を持つ個体が設計者の要求性能を満たしていない場合には適合度に罰則を与える方法がよく用いられる．これは適合度を直接低減あるいは増大させることによって，望ましくない個体を淘汰することを目的とするものである．本研究では，それらの方法のうち各制約条件に対して独立した関数を設け，それぞれ制限値を超えた割合だけ適合度を低減あるいは増大させる方法を用いる.

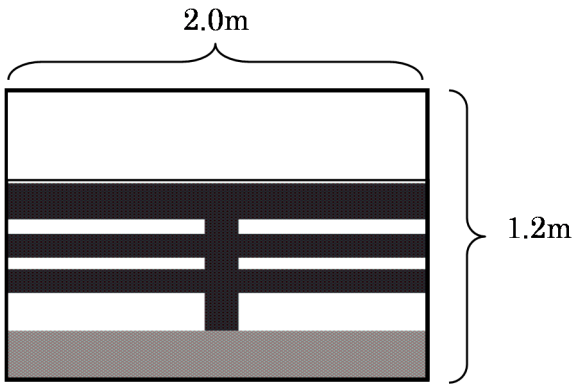


図-3 遮蔽率

$$r_j = \begin{cases} \dfrac{u_{\lim}}{u} & if\ u < u_{\lim} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{2}$$

ここで，
- u ：応答値($u > 0$)
- $u_{\lim}$ ：制限値

例えば安全性能の照査において，ある個体が，後に示す防護柵種別選定グラフに定められた強度を満たしていないと判断された場合，規定の強度を有していない割合の分だけ目的関数にペナルティを課すものとする.

(6) 制約条件

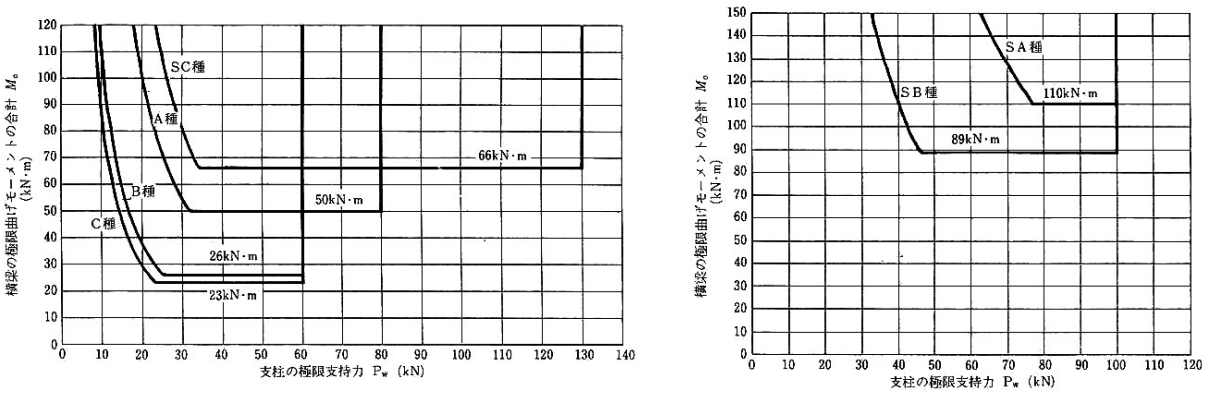
本設計法では，ペナルティ関数として置き換える制約条件を，構造決定に大きな影響を及ぼす安全性能と景観性とする.

a) 安全性能

本研究では，安全性能は数値シミュレーションによる手法を採用する．なお，照査方法は，防護柵設置基準・同解説 [5]に示されている橋梁用ビーム型防護柵の標準設計法を用いる．具体的には，制約条件としては，図-4 の部材選定グラフに応答値をプロットし，満足しない場合に，部材選定グラフの境界値を $u_{\lim}$ とし，応答値 u との比をペナルティ値とする.

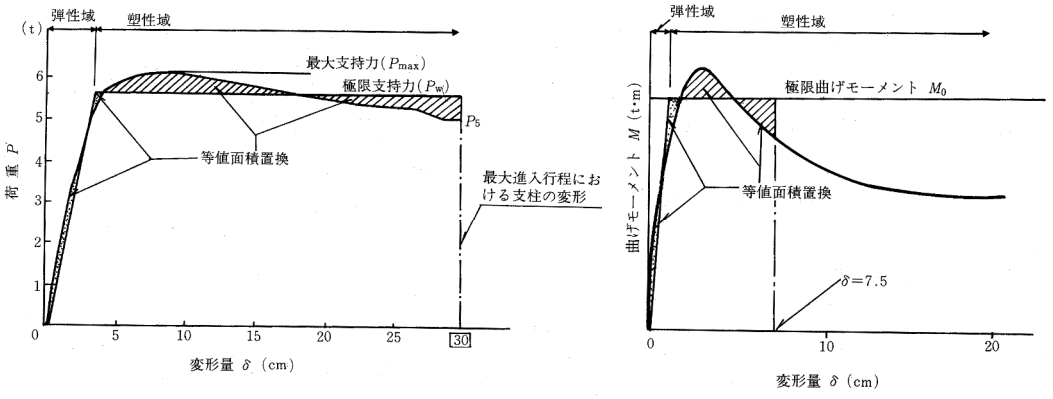
b) 景観性

景観性能の評価のための目的関数は，遮蔽率を使用する．制約条件として，既存の防護柵で最も遮蔽率が高いコンクリート製防護柵の制限値 $u_{\lim} = 91.7\%$ と遮蔽率の応答値 u との比をペナルティ値とする.



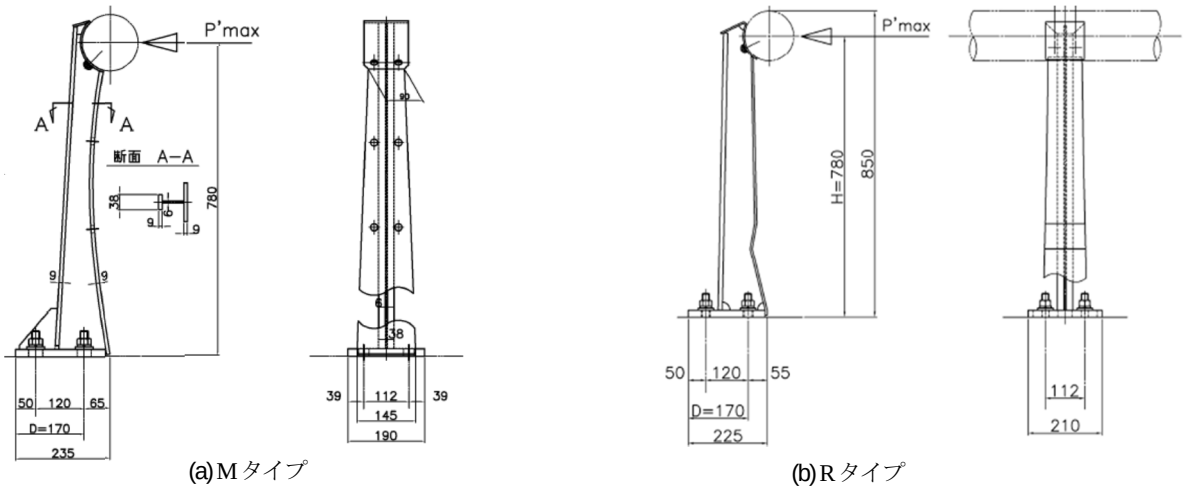
(a) C, B, A, SC種　　(b) SB, SA種

図-4　橋梁用防護柵の部材選定グラフ[5)]



(a) 支柱　　(b) 横梁

図-5　橋梁用防護柵の部材評価[5)]



(a) Mタイプ　　(b) Rタイプ

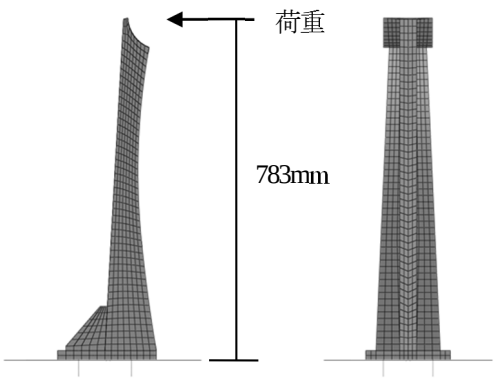
図-6　景観に配慮した防護柵

3. 安全性能の照査方法

(1) 橋梁用ビーム型防護柵の安全性能照査

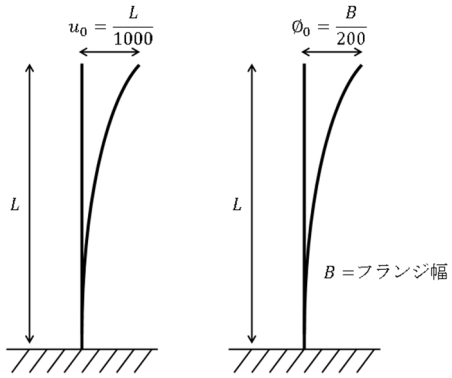
防護柵設置基準・同解説[5)]においては実車衝突試験によって防護柵の性能を確認することが規定されているが，本研究で対象とする橋梁用ビーム型防護柵については，その構成部材である支柱の極限支持力 P_w と横梁の極限モーメント M_0 が規定された範囲内の値であることを静荷重試験結果により確認することによって，衝突試験にかえることができるとしている．

現行の防護柵の設置基準では，**図-4** に示す部材選定グラフが基本となっている．**図-4** は支柱と横梁の組み合わせを選定するためのものである．まず，想定した支柱と横梁に対し静荷重試験を行い，その荷重−変位関係から **図-5** に示すように等値面積置換することによって，支柱の極限支持力 P_w と横梁の極限曲げモーメント M_0 を求



(a) 側面図　(b) 背面図

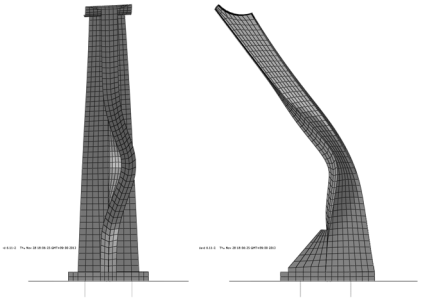
図-7　解析モデル



(a) 初期たわみ　(b) 初期ねじれ

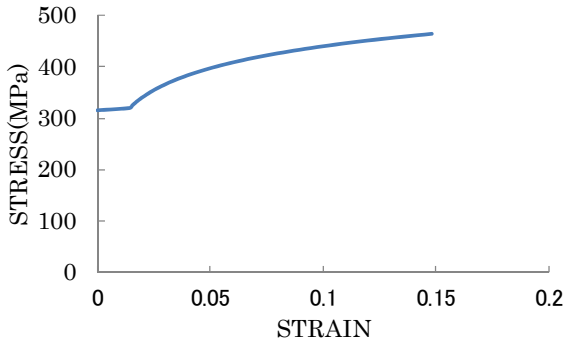
図-8　初期たわみと初期ねじれ

(a) 実験



(b) 解析

図-9　支柱の変形モード



降伏応力 σ_Y　$= 280.9$ MPa

ヤング係数 E　$= 2.01 \times 10^5$ MPa

ポアソン比 ν　$= 0.287$

図-10(a)　真応力－真ひずみ関係

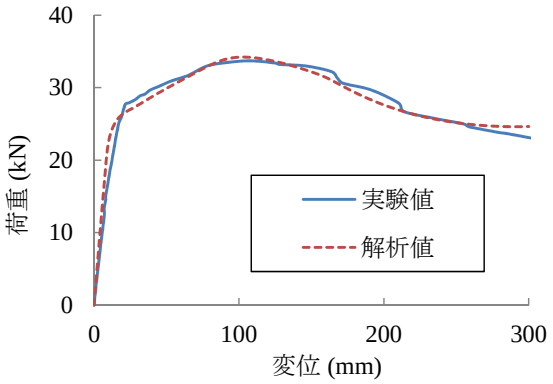


図-10(b)　荷重－変位関係

める．そして，求めた P_w と M_0 を図-4 にプロットした場合に設定した防護柵種別の領域に入れなければならない．

(2)　静的解析による静荷重試験との比較

(1)で示す性能照査方法を本設計法に組み込むために，次節で支柱形状と極限支持力の関係性について検討を行い，定式化を行う．

まず，静荷重試験を再現した静的数値解析を用いるため，実験結果と比較することにより，その精度について検討する．対象とする防護柵は，図-6 に示す，近年開発された景観に配慮した防護柵 M タイプ [3]と R タイプ [4]のうち，M タイプを選択する．これらの橋梁用防護柵は，景観性を向上させるため，支柱の圧縮フランジの幅を狭くし，圧縮側に横ねじれ座屈を生じさせることで支柱が変形し，衝突エネルギーを吸収するという，従来の局部座屈を発生させるものとは異なる変形特性を有した構造である [3, 4]．計算には汎用有限要素法プログラム ABAQUS Ver6.11(SIMULIA 社)[11]を用いた．図-7 に解析モデルを示す．鋼材の材料定数に関しては，支柱の鋼材に

対して行った引張試験の結果から得られた，公称応力－公称ひずみ関係を，図-10(a)に示す真応力－真ひずみに換算して用いた．実験条件と同じように，支柱はアンカー構造とし，アンカーボルトの上部は支柱の底板と結合し下部は完全固定とした．また，基部を再現するために，支柱底板の下に剛体のプレートを設置し完全固定とした．アンカーボルトは，実験の結果から弾性域内でしか変形していないことが分かっているので解析においても弾性体とした．支柱を 1 次低減積分シェル要素，支柱底板を 2 次完全積分ソリッド要素，アンカーボルトは，はり要素によってモデル化している．また，初期たわみは，座屈モードを考慮して図-8 に示すように [12]，支柱軸方向(支柱高さ L)に沿って振幅 $L/1000$ で sin の 1/4 波のたわみ u_0 を与え，支柱頂部の上下フランジ(フランジ幅 B)のエッジの差が $B/200$ となるように，こちらも支柱軸方向に沿って sin の 1/4 波のねじり角 ϕ_0 を与えた．

実験結果の変形モードを図-9(a)に，解析結果の変形モードを図-9(b)に示す．また，荷重－変位関係の解析結果を，実験結果と共に図-10(b)に示す．図-10(b)から実験値と比べ，解析値の初期剛性がわずかに大きくなっていることがわかる．これは，静荷重実験では実験装置のあそびによって変位が大きめに計測されることが原因として考えられる．しかし，全体的な変位特性は良く再現できていると考えられ，図-9 からも実験結果と同様に背面圧縮部に横ねじれ座屈が生じる変形モードであることが分かる．また，等値面積置換によって求まる極限支持力 P_w は，実験値が 29.3kN，解析値が 29.0kN と，ほぼ近い値となり，有限要素解析による数値解析結果の精度は高く，静的実験に代えることが出来るといえる．

(3) 安全性能照査の定式化

a) 極限支持力と極限曲げモーメント算出に関する既往の研究

防護柵設置要綱・資料集 [13]によると，支柱の極限支持力 P_w と横梁の曲げモーメント M_0 は同一材料，同一載荷条件においては塑性断面係数 Z_0 の関数として，以下の式によって定式化されている．

$$P_w = \alpha \cdot \frac{\sigma_y \cdot Z_p}{H_1} \tag{3}$$

$$M_0 = \alpha \cdot \sigma_y \cdot Z_p \tag{4}$$

ここで，
α ：計算値と実験値の補正係数
σ_y ：JIS による降伏応力(N/mm^2)
Z_p ：塑性断面係数(mm^3)
H_1 ：防護柵の主要横梁中心高さ(mm)

防護柵設置要綱・資料編 [13]では，支柱及び下段横梁に用いる部材は比較的幅厚比が小さく，大きな変形を受けても荷重の急激な低下は見られないことから計算値と実験値の補正係数として α = 1.1～1.4 程度としている．主要横梁については，用いる部材の幅厚比が大きく，大きな変形をうけると座屈が生じることから α = 0.6～0.9 程度であるとされている．塑性断面係数 Z_p については断面形状に応じて個々に算定するのがよく，一般的には弾性域での断面係数と，断面形状や部材の厚さにより定まる形状係数で決定される．形状係数は，角管の場合は概ね 1.2，円管と H 形断面の場合には概ね 1.3 という値となる．

横梁は単純な等断面形状のものがほとんどで，建設省土木研究所ら [14]や高速道路調査会 [15]によれば表-1 に示すように，上記に示した理論式は実験結果と概ね良い一致を示す．しかし，支柱については，単純な等断面のものに限らず，多様な変形特性を持った支柱が開発されており，変形特性によって傾向が異なるため，必ずしもこの算定式のみで包括的に照査できない．そこで，橋梁用防護柵の安全性能照査を定式化するにあたり，変形特性別

表-1 極限強度の計算式と実験結果の比較

支柱の断面形状	極限支持力(kN)		横梁の断面形状	極限曲げモーメント(kN·m)	
	計算値	実験結果		計算値 (kN·m)	実験結果 (kN·m)
H－157.7(t6)×150(t9)	79.8(α=1.4)	64.7	○－165.2×t7.1	57.1(α=1.4)	79.4
H－164.5(t6)×150(t9)	84.1(α=1.4)	62.7	○－139.8×t4	15.2(α=0.9)	26.5
H－164.5(t9)×150(t9)	87.7(α=1.4)	62.1	□－150×150×t4.5	31.3(α=0.9)	30.4
M タイプ	12.3(α=1.4)	29.5	□－175×175×t6	56.1(α=0.9)	64.2
R タイプ	28.5(α=1.4)	32.3	□－200×200×t6	74.2(α=0.9)	70.6

※補正係数 α は，幅厚比，径厚比の大きいものは 0.9，小さいものは 1.4 とした．

に支柱の極限支持力についての検討を行う．検討には橋梁用防護柵の標準設計法の部材選定グラフを利用し，静的解析を用いてパラメトリックに行う．

b) 支柱の変形特性

現在設置されている橋梁用鋼製防護柵の支柱の変形特性は，**図-11** に示すように 3 つに大別される．

この 3 タイプの防護柵に対して，JIS 規格 [16]を参考にした高さ 900mm の供試体モデルを対象とし，静的解析を行った．基部局部座屈タイプについては，既存の防護柵で主に使用されている JIS 規格 G 3444 にある一般構造用炭素鋼鋼管 STK400 の 16 パターンを対象として解析を行った．くびれ部局部座屈タイプと横ねじれ座屈タイプについては既存の防護柵で主に使用されている JIS 規格 G3192 にある熱間圧延-H 形鋼(SS400)の 12 パターンを基本として解析を行った．くびれ部局部座屈タイプの供試体モデルについては，支柱下部圧縮側の基部から高さ 120mm の位置にくびれ部を設けており，くびれ部のウェブ高さは，基部とくびれ部にかかる応力が等しくなる高さまで減肉した．また，くびれ部局部座屈タイプは，下段横梁受け部での応力集中に耐えるウェブ高さが必要であるため，ウェブ高さが既存の防護柵の中で最小の値である 100mm 以上のものを対象とした．

横ねじれ座屈タイプの供試体モデルについては，横ねじれ座屈を発生させるために圧縮フランジの幅を既存の M タイプと同値の 38mm とした．また，横ねじれ座屈タイプは，引張フランジに引張力が加わることで発生する下段横梁取り付け穴の断面欠損による強度低下に耐えるため，引張フランジの板厚を既存の M タイプと同値の 9mm 以上に改変した．

c) 解析モデル

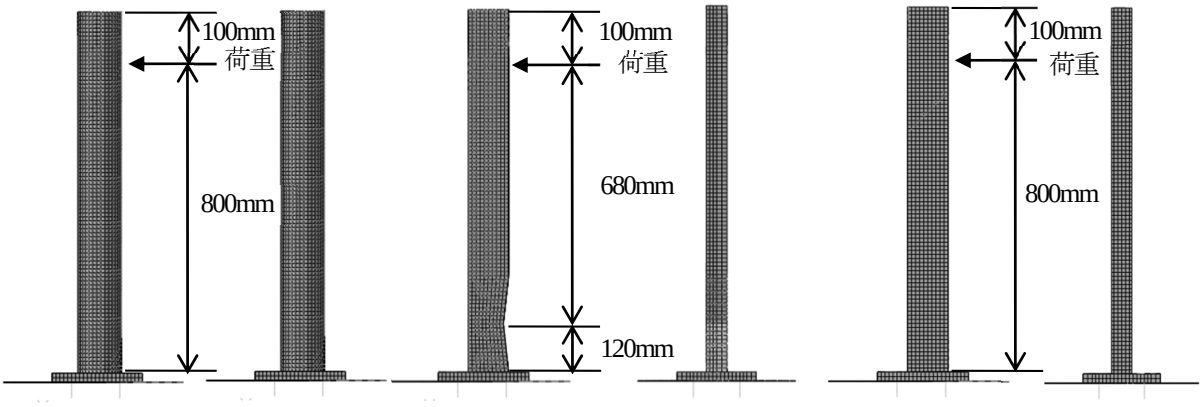
3 つのタイプに対して解析モデル例を**図-12** に示す．計算には前節と同様に汎用有限要素法プログラム ABAQUS Ver6.11 を用いた．鋼材の材料定数に関しては，JIS に示されている公称値にしたがって SS400 と STK400 の降伏応力 235MPa，引張強度を 400MPa と仮定し，公称応力－公称ひずみ関係を，真応力－真ひずみに換算して

(i) 変形前　(ii) 変形後
(a) 基部局部座屈タイプ

(i) 変形前　(ii) 変形後
(b) くびれ部局部座屈タイプ

(i) 変形前　(ii) 変形後
(c) 横ねじれ座屈タイプ

図-11　支柱の変形特性



(i) 側面図　(ii) 背面図
(a) 基部局部座屈タイプ

(i) 側面図　(ii) 背面図
(b) くびれ部局部座屈タイプ

(i) 側面図　(ii) 背面図
(c) 横ねじれ座屈タイプ

図-12　解析モデル

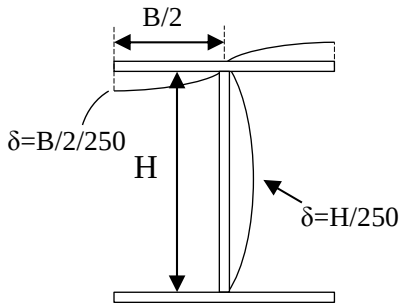


図-13　初期たわみ分布

用いた．JIS の公称値を用いることは，防護柵設計時に想定している降伏点応力および引張強度を考慮しているため，支柱の最低性能を確認する上で有効である．要素，境界条件，基部構造などの解析条件については前節の静的解析モデルと同様であるが，載荷位置は 800mm とした．

初期不整については，横ねじれ座屈タイプは，前節と同様の初期たわみを与える．基部局部座屈タイプについては初期不整を考慮しない．また，くびれ部局部座屈タイプの初期不整については，道路橋示方書の鋼橋編 [17]に従い，支柱頂部が，図-13 に示すような，局部座屈を生じる圧縮フランジ(フランジ幅 B)とウェブ(ウェブ高さ H)に対して振幅 $B/250$ と $H/250$ の sin 波が生じるように，支柱軸方向に沿って sin の 1/4 波の初期変位を与えた．なお，残留応力については，考慮したものも検討したが，大きな差はないのでここでは省略している．

d)　解析結果

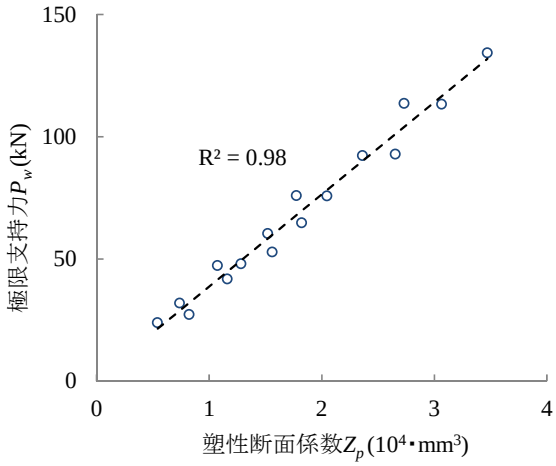
各タイプの極限支持力 P_w ー塑性断面係数 Z_p の関係を図-14 に示す．極限支持力は，荷重ー変位関係から図-5 に示すように等値面積置換することによって算出した．不等断面であるくびれ部局部座屈タイプは，応力が最も集中するくびれ位置の塑性断面係数によって評価した．図-14(a)～(c)より，いずれのタイプも，極限支持力 P_w と塑性断面係数 Z_p は，防護柵適用範囲内において線形に近い関係があるので，最小二乗法を用いて破線のような結果を得た．得られた回帰式を式(5)～(7)に示す．

基部局部座屈タイプ　$P_w = 0.985 + 37.7 Z_p$　(5)

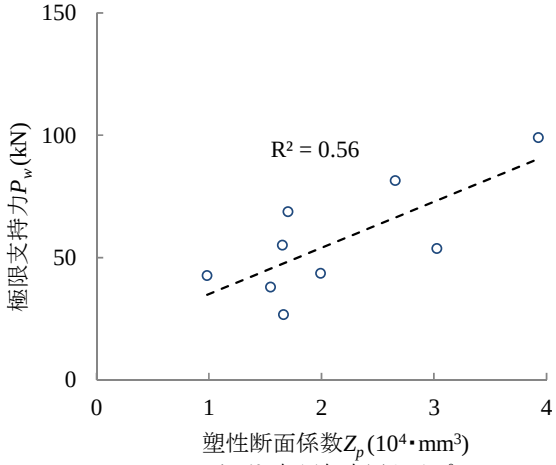
くびれ部局部座屈タイプ　$P_w = 18.4 + 20.6 Z_p$　(6)

横ねじれ座屈タイプ　$P_w = 26.8 + 23.8 Z_p$　(7)

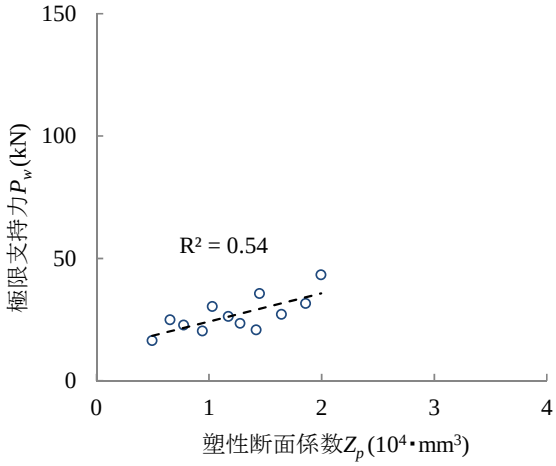
それぞれのタイプの決定係数 R^2は，図-14 中に示す値となっている．基部局部座屈タイプの回帰式は 0.98 と強い相関があり，横ねじれ座屈タイプとくびれ部局部座屈タイプの 2 つの回帰式は相関係数がそれぞれ 0.56 と 0.54 であった．なお，下限値を取って安全性に余裕を持たせるという考え方もあるが，平均値の回帰直線を用いて，



(a) 基部局部座屈タイプ



(b) くびれ部局部座屈タイプ



(c) 横ねじれ全体座屈タイプ

図-14　極限支持力 P_wー塑性断面係数関係 Z_p

今回は良い結果が得られた．

各タイプの変形モード例を図-15 に示す．各タイプともに，想定した変形モードで解析が行われていることが分かる．ただし，くびれ部局部座屈タイプは横ねじれ座屈を発生させた 3 体の結果を除外した．

(4) 横ねじれ座屈の検討

前節では，変形特性に限らず全てのタイプについて，極限支持力を塑性断面係数の関数として定式化したが，図-14(c)の横ねじれ座屈タイプは，基部局部座屈タイプと比べ相関性が低い．これは，横ねじれ座屈タイプが，背面の圧縮フランジに横ねじれ座屈が生じて衝突エネルギーを吸収するものであり，基部局部座屈タイプのように，断面の全塑性強度に達し，局部座屈が発生するのではないと考えられる．したがって，塑性断面係数を用いて極限強度を算出するのは合理的でなく，座屈パラメータを考慮する必要がある．

a) 弾性横ねじれ座屈モーメント M_E

座屈設計ガイドライン[12]では，断面形，境界条件，荷重条件の影響を含んだ弾性横ねじれ座屈モーメント M_E の一般式として，以下の式で示されている．

$$M_E = \frac{C_{b1}\pi^2 EI_z}{(K_v K_\phi)l^2}\left[(C_{b2}h_p + C_{b3}\beta_y) \pm \sqrt{(C_{b2}h_p + C_{b3}\beta_y)^2 + \frac{I_w}{I_z}\left(1 + \frac{(K_\phi l)^2 GJ}{\pi^2 EI_w}\right)}\right] \tag{8}$$

ここで，
C_{b1} ：モーメント分布に関する換算係数
C_{b2} ：荷重作用位置に関する換算係数
C_{b3} ：断面の非対称性に関する換算係数
$K_v K_\phi$ ：有効長さ係数
h_p ：荷重作用高さ
β_y ：断面形状定数
EI_z ：弱軸回りの曲げ剛性
EI_w ：そりねじり剛性
GJ ：ねじり剛性
l ：はり長さ

また，Nethercot[18]は，一端で面内変形に対して固定された 2 軸対称 I 型断面片持はりの横ねじれ座屈モーメントを両端単純支持はりの横ねじれ座屈モーメント M_{0cr} を用いて以下の式で表している．

$$M_E = C_b M_{0cr} \tag{9}$$

修正係数 C_b は，上フランジ載荷のとき，以下のように与えられる．

$$C_b = A/B \tag{10}$$

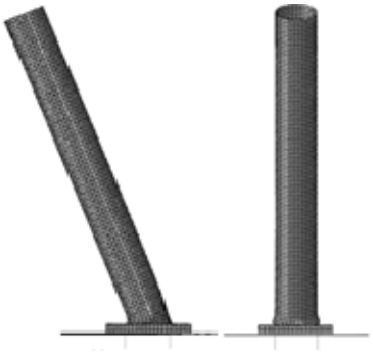
ここに，

$$A = 1.287 - \frac{3.539}{R^2} + \frac{2.521}{R},\ B = -\frac{3.016}{R^2} + \frac{2.364}{R}$$

$$R = \frac{\sqrt{l^2 GJ}}{EI_w}$$

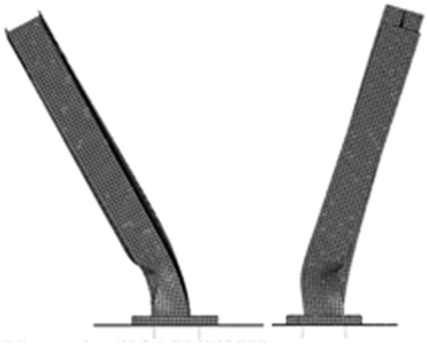
b) 非弾性の考慮

非弾性横ねじれ座屈における既往の研究には，福本・伊藤[19]による実験データベースによる耐荷力曲線が提案されている．溶接はりの耐荷力の平均値曲線は以下で与えられている．



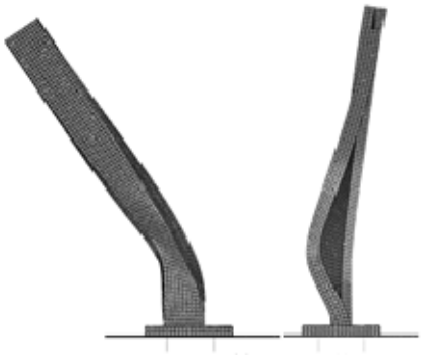
(i) 側面図　(ii) 背面図

(a) 基部局部座屈タイプ



(i) 側面図　(ii) 背面図

(b) くびれ部局部座屈タイプ



(i) 側面図　(ii) 背面図

(c) 横ねじれ全体座屈タイプ

図-15　変形モード

表-2　修正係数の検討

	静的解析結果 (kN)	計算結果 (kN)	
		変断面の考慮無し	変断面の考慮有
M タイプ	29.0	32.0 (9.4%)	28.1 (3.1%)
R タイプ	29.4	31.6 (7.0%)	29.0 (1.6%)

$$\frac{M_u}{M_p}=\begin{cases}-0.493\bar{\lambda}+1.197 & \left(0.4<\bar{\lambda}\le\sqrt{2}\right)\\ \dfrac{1}{\bar{\lambda}^2} & \left(\bar{\lambda}>\sqrt{2}\right)\end{cases} \tag{11}$$

ここに，M_u は耐荷力モーメントであり，$\bar{\lambda}$ は載荷・境界条件を考慮した弾性座屈モーメント M_E と全塑性モーメント M_p を用いて無次元化($\sqrt{M_p/M_E}$)した細長比パラメータである．

c)　極限支持力 P_w の定式化

式(8)~(11)より求めた弾性横ねじれ座屈モーメント M_E 及び，耐荷力モーメント M_u と極限支持力 P_w との関係を**図-16** に示す．**図-16** より，前節と同様に 2 つの関係が線形に近いため，その最小二乗回帰式より，極限支持力 P_w の算出式とする．

$$P_w=14.3+0.14M_E \tag{12}$$

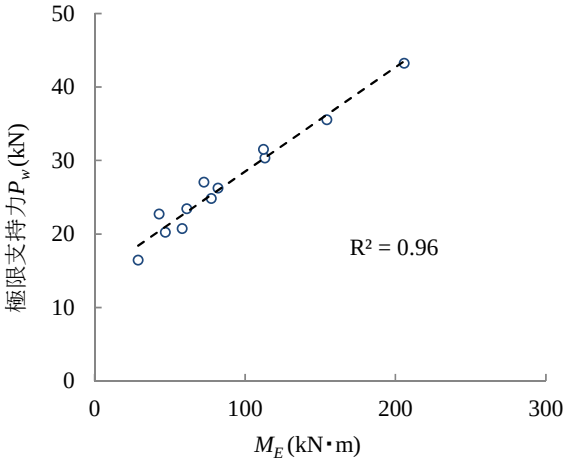
$$P_w=11.0+0.62M_u \tag{13}$$

図-16 より，弾性横ねじれ座屈モーメント M_E と極限支持力 P_w との回帰式において，相関性を示す決定係数は，0.96 と強い相関がある．しかし，非弾性を考慮した耐荷力モーメント回帰式では，0.70 と弾性横ねじれ座屈モーメントほどの相関性はなかった．これは，限られた範囲の座屈パラメータが適用される防護柵支柱であること，また，極限支持力 P_w は，荷重－変位曲線を矩形にモデル化することによって求めるためと考えられる．本研究の設計法では，弾性横ねじれ座屈モーメント M_E を用いた式(12)を極限支持力算定式に採用する．なお，式(13)を用い，非弾性を考慮した場合についても，次章で同様に検証を行うこととする．

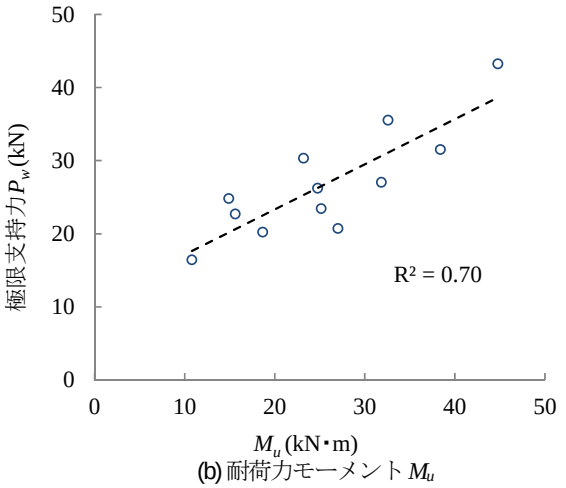
d)　不等断面の考慮

JIS 規格を参考にし，解析で使用した H 形鋼は，いずれも防護柵高さ方向に等断面形状である．しかし，M タイプに代表される既製品防護柵は，高さ方向にウェブ高さなどの，断面が変化する形状をしており，式(9)をそのまま適用できない．

久保・渡辺 [20]は，はり高及びフランジ幅にテーパーがある単純支持はりの横ねじれ座屈モーメントの修正係数 C_γ を以下で表している．



(a) 弾性横ねじれ座屈モーメント M_E



(b) 耐荷力モーメント M_u

図-16　極限支持力 P_w との関係

はり高テーパーの場合　$C_\gamma=0.6+0.4\gamma_h$　(14)

フランジ幅テーパーの場合　$C_\gamma=0.6\gamma_b+0.4\gamma_b{}^2$　(15)

ここで，γ_h，γ_b は，いずれも大きい断面に対する小さい断面の寸法比を表す．

また，一般にテーパーが横ねじれ座屈強度に与える影響は，圧縮フランジ幅，ウェブ高さ，引張フランジ幅の順に大きいとされている [12]．今回対象とする防護柵は，フランジ幅が一定であるが，ウェブ高さは，変化するため，式(14)の修正係数のみ考慮する．この考察を踏まえ，M タイプ及び R タイプにおいて，変断面の影響を考慮し，式(12)より算出した極限支持力，変断面の影響を考慮せずに算出した極限支持力及び静的解析の結果による極限支持力を**表-2** に示す．なお，R タイプの静的解析は，3.(2)で示した M タイプの静的解析と同様の条件で行っ

た．表-2 における括弧内の数字は，数値解析結果との差異である．これより，変断面の影響を考慮しない場合よりも修正係数を乗じて，変断面の影響を考慮した場合の方が，解析結果との差が少ないことがわかる．

4. 最適設計法の検証

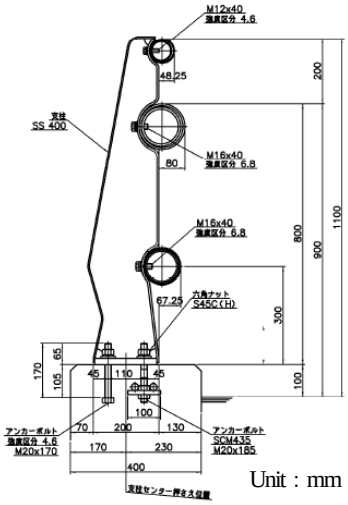
(1) 対象モデル

最適化設計の検証対象とする防護柵として，横ねじれ座屈タイプの M，R タイプの 2 種類を用いる．また，くびれ部局部座屈タイプの対象モデルとして図-17 に示す，既存の防護柵を比較のため用いる．この防護柵を製品名の頭文字をとって，以後 N タイプとする．いずれも種別 A 種の橋梁用鋼製防護柵である．これら 2 つの防護柵を基本モデルとして，次節で定義する各部材の幅，板厚などの設計変数を変化させ，要求性能を満たし，かつ目的関数を最適化する防護柵形状を決定する．

(2) 構造設計による主構造寸法の決定

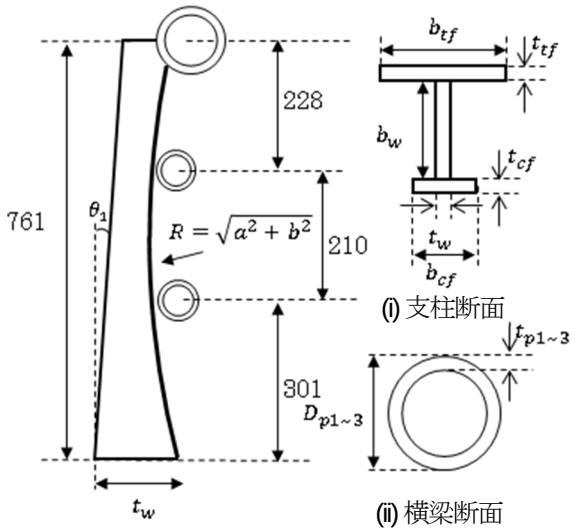
本最適設計法では，主構造寸法を決定する基本設計において遺伝的アルゴリズムを用いることで効率的な最適形状探索を行う．図-18 に防護柵の設計変数を示す．記号の意味は図中に示す．支柱のモデル化に際しては，支柱全体の高さ，くびれ位置の高さ，横梁設置一致の高さについては設計図面を参考に図-18 のように予め決定した．また，くびれ部局部座屈タイプの設計図面では，各横梁受け部を引張フランジに設け，ウェブに食い込ませているが，計算モデルでは応力が集中するくびれ付近の下段横梁受け部のみを再現し，下段横梁受け部のウェブ高さの確保は構造設計段階における検討事項とした．

(a) 防護柵の外観

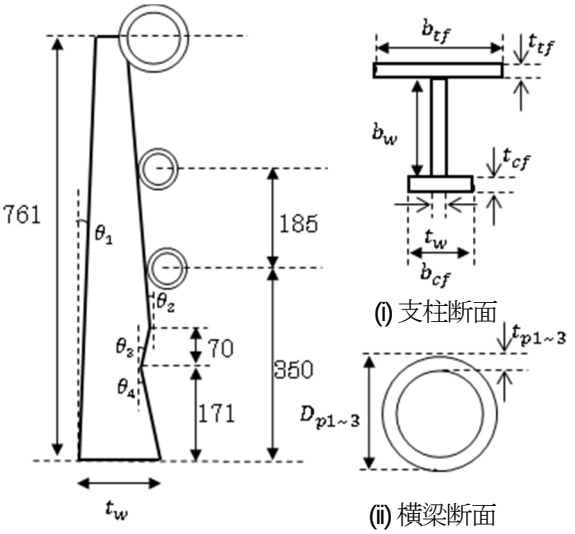


(b) 設計図面

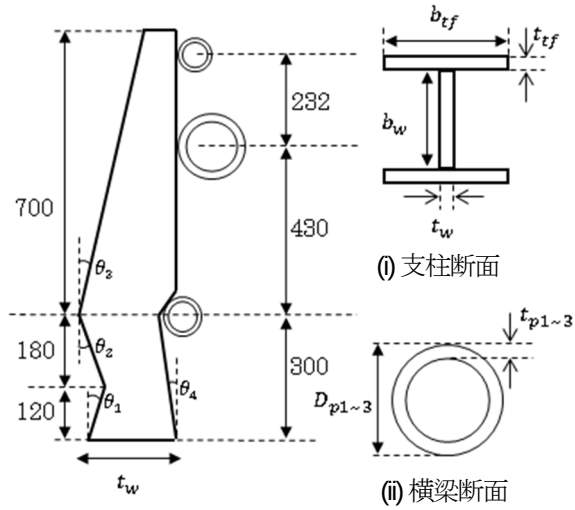
図-17 くびれ部局部座屈タイプ参考モデル



(a) 横ねじれ座屈 M タイプ



(b) 横ねじれ座屈 R タイプ



(c) くびれ部局部座屈タイプ

寸法： b= 幅 t=板厚 D =外径 θ =角度
添字： tf =引張フランジ cf =圧縮フランジ
w = ウェブ p =パイプ

図-18 計算モデル

表-3　横ねじれ座屈Mタイプ染色体情報

Name	b_w (mm)	t_w (mm)	b_{tf} (mm)	t_{tf} (mm)	b_{cf} (mm)	t_{cf} (mm)	θ_1 (度)	a (-)	b (-)	D_{p1} (mm)	t_{p1} (mm)	D_{p2} (mm)	t_{p2} (mm)	D_{p3} (mm)	t_{p3} (mm)
範囲 Max	150	20	150	20	50	20	20	2000	380	150	10	150	10	150	10
範囲 Min	100	6	80	6	20	6	0	8000	800	45	2	55	2	45	2

表-4　横ねじれ座屈Rタイプ染色体情報

Name	b_w (mm)	t_w (mm)	b_{tf} (mm)	t_{tf} (mm)	b_{cf} (mm)	t_{cf} (mm)	θ_1 (度)	θ_2 (度)	θ_3 (度)	θ_4 (度)	D_{p1} (mm)	t_{p1} (mm)	D_{p2} (mm)	t_{p2} (mm)	D_{p3} (mm)	t_{p3} (mm)
範囲 Max	150	20	150	20	50	20	20	20	20	20	150	10	150	10	150	10
範囲 Min	100	6	80	6	20	6	0	0	0	0	45	2	55	2	45	2

表-5　くびれ部局部座屈タイプ染色体情報

Name	b_w (mm)	t_w (mm)	b_{tf} (mm)	t_{tf} (mm)	θ_1 (度)	θ_2 (度)	θ_3 (度)	θ_4 (度)	D_{p1} (mm)	t_{p1} (mm)	D_{p2} (mm)	t_{p2} (mm)	D_{p3} (mm)	t_{p3} (mm)
範囲 Max	250	20	250	20	20	20	20	20	150	10	150	10	150	10
範囲 Min	100	6	75	6	0	0	0	0	45	2	55	2	45	2

表-6　標準仕様書の設計諸元 [5]

種別	ブロックアウト量(mm)		横梁の極限曲げモーメント(kN·m)			
	主要横梁	下段横梁	横梁合計	主要横梁	下段横梁(1本使用時)	下段横梁(複数本使用時)
A	55以上	45以上	50以上	36以上	14以上	7.0以上

※ブロックアウト量は，支柱の最前面から横梁最前面までの距離をいう．

(3)　設計諸元

防護柵支柱と横梁の部材性能をいくつかのグループに分け，各グループの部材情報を設計変数とする．グループ化の方法については，**図-18** の計算モデルにおいて，横ねじれ座屈タイプについては，支柱の断面寸法 6 種類($b_{tf}, t_{tf}, b_{cf}, t_{cf}, b_w, t_w$)，支柱の傾斜角 3～4 種類($\theta_1$～$\theta_4$)，横梁 3 本の各断面寸法 6 種類($D_{p1\sim3}, t_{p1\sim3}$)の計 15～16 種類のグループ化を，くびれ部局部座屈タイプについては，支柱の断面寸法 4 種類($b_{tf}, t_{tf}, b_{cf}, t_{cf}$)，支柱の傾斜角 4 種類($\theta_1$～$\theta_4$)，横梁 3 本の各断面寸法 6 種類($D_{p1\sim3}, t_{p1\sim3}$)の計 14 種類のグループ化を行い，染色体の各遺伝子座に格納する．この染色体により GA の進化計算を行うこととした．格納した染色体情報を**表-3**，**表-4** および**表-5** に示す．支柱の静的解析における検討より，横ねじれ座屈とくびれ部局部座屈を発生させるために，各パラメータの最小値を決定した．

材料については，既製品と同様に [4]，支柱については SS400，横梁については，STK400 を用いることとする．

安全性能に関する制約条件については，3.(1)で検討したように橋梁用防護柵の標準設計方法にある部材選定グラフによって照査し，その際に必要な横梁の曲げモーメントについては式(4)で示した既往の理論式によって算出し，支柱の極限支持力において，くびれ部局部座屈タイプについては，回帰式(6)を高さ換算したもの，横ねじれ座屈タイプは，式(10)，(14)の修正係数を考慮し，回帰式(12)によって算出する．また，橋梁用ビーム型防護柵の標準設計法には**表-6** に示す設計諸元に関する規定 [5]があり，これらも考慮した．

表-7　最適化パラメータ

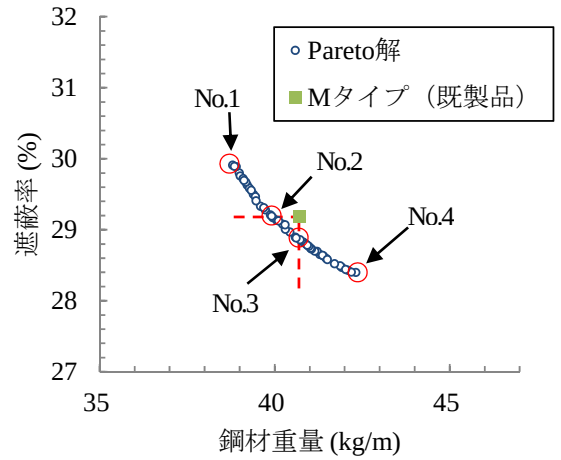
設計変数	14～16
個体数	50
アーカイブ数	50
世代数	500
交叉率	0.8
突然変異数	0.1
選択方法	エリート選択

(4)　計算結果

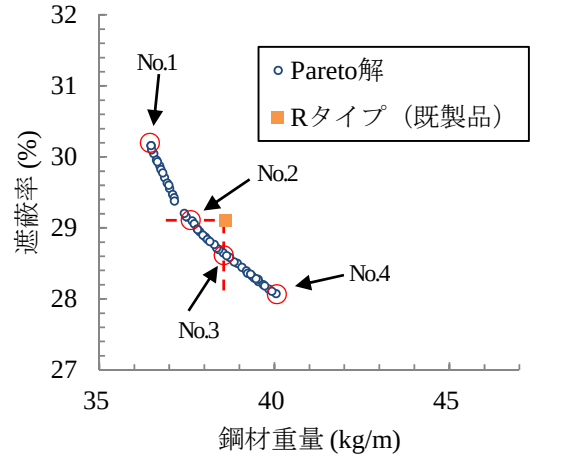
図-19 に，得られた防護柵 1m あたりの鋼材重量と遮蔽率の Pareto 集合解と，**図-17** に示す計算モデルの参考にした防護柵の鋼材重量および遮蔽率の既製品参考値を示す．また，大森ら [8]の研究を参考にして設定した最適化パラメータを**表-7** に示す．**表-7** に示したパラメータ周辺の値に対しても感度分析をしたが，大きな違いがみら

れなかったことを確認している．

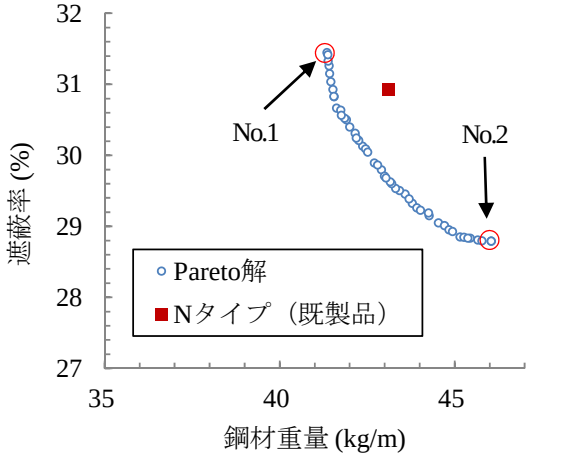
図-19 より，鋼材重量と遮蔽率の Pareto 集合解がトレードオフ関係の Pareto 集合解を形成していることが分かる．Pareto 集合解の鋼材重量に関して，どのタイプにおいても，その最小値と最大値の差は約 5kg/m であり，その間に Pareto 集合解が分布している．遮蔽率に関しては，どちらのタイプも制限値である 91.7%を十分に満足しており，良い遮蔽率の形状を有する Pareto 集合解が得られている．また，既製品と比較しても，Pareto 集合解は，遮蔽率と鋼材重量の両方において良い値が得られ，妥当性のある計算が行われたと言える．図中の遮蔽率と鋼材重量が既製品と同等，あるいは最小値を示した，No.1～No.4 の Pareto 解については，次章で複合非線形解析を用いた防護柵の安全性能照査の対象として，解の妥当性を



(a) 横ねじれ座屈 M タイプ

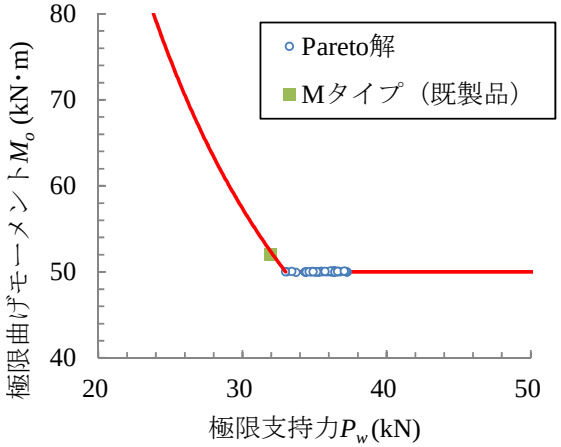


(b) 横ねじれ座屈 R タイプ

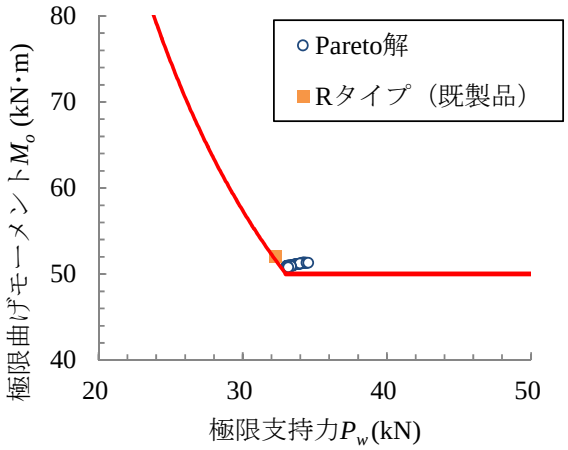


(c) くびれ部局部座屈タイプ

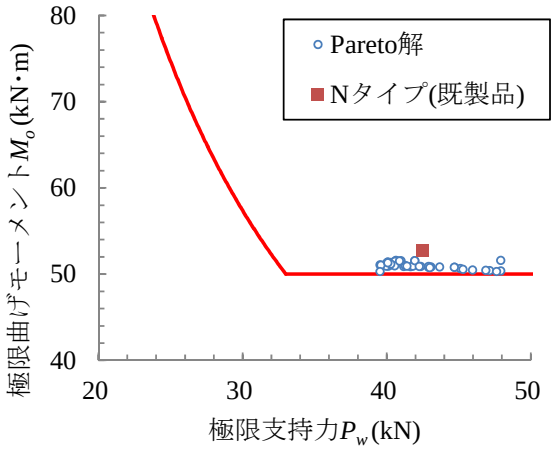
図-19　Pareto 集合解



(a) 横ねじれ座屈 M タイプ



(b) 横ねじれ座屈 R タイプ

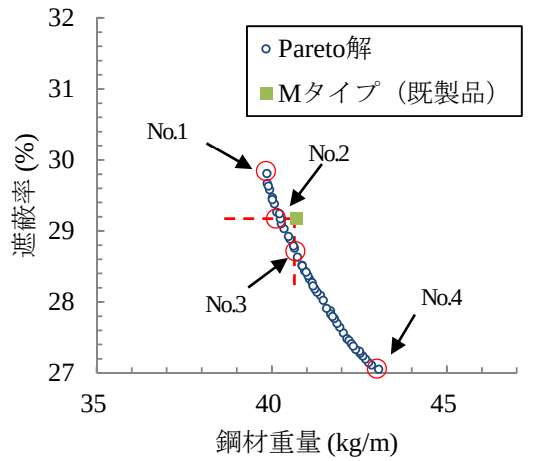


(c) くびれ部局部座屈タイプ

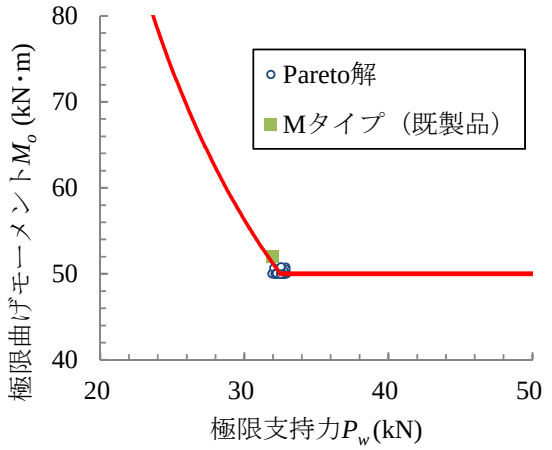
図-20　極限支持力－極限曲げモーメント

確認する．

また，得られた Pareto 集合解と対象防護柵の支柱の極限支持力 P_w および横梁の極限曲げモーメント M_0 の結果を図-20 に示す．Pareto 集合解の極限支持力 P_w および極限曲げモーメント M_0 は，図-20 の A 種部材選定域内にプロットされており，条件設定していた A 種防護柵としての安全性能を満足している．また，境界付近にプロットされていることから目的関数を最小化するために，



(a) Pareto 集合解



(b) 極限支持力－極限曲げモーメント

図-21　非弾性を考慮した場合の M タイプ

より合理的な設計解を選定したと言える．図-20(c)のくびれ部局部座屈タイプは，P_w の制約が効いていないが，既製品も同様な位置にプロットされており，このタイプの特性のようである．

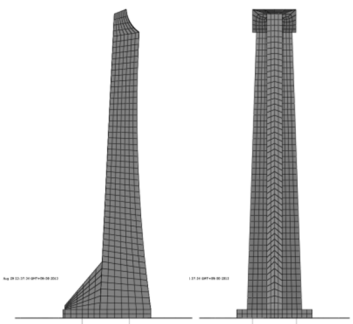
設計変数について，後述する表-8(a)の値を参考にして，各 Pareto 集合解の傾向を既製品の値と比較すると，横梁については，ほぼ同様の形状が選定されているが，支柱については，ウェブ幅が多少増大し，フランジ幅が減少していることが分かった．これは遮蔽率に影響を与えるフランジ幅を抑え，それによる耐力の減少分をウェブ幅の増加によって補っていると考えられる．

また，各 Pareto 集合解を比較すると，支柱のウェブの形状はどの Pareto 集合解もほぼ同様であるが，その他の部材形状については，図-19 において，遮蔽率が小さくなり，鋼材重量が大きくなるとともに，横梁の径厚比(D/t)とフランジの幅厚比(B/t)が小さくなる傾向にある．これは，遮蔽率に影響を与える表面積を抑えながら横梁の強度を確保するために，板厚を増加させるためであると考えられる．Pareto 集合解は鋼材重量と遮蔽率のバランスをとり，最適な形状を探索したと言える．

このように多目的遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化問題によって，鋼材重量および遮蔽率を目的関数とする多目的最適化問題の多様な Pareto 集合解を 1 度の計算(通常のパソコン(Inrel Core 2)を用いて約 300 秒)によって得られることが分かった．図-19 より，2 つの目的関数が互いにトレードオフの関係にあることが明確に確認できた．また，設計者によって経験などを頼りに行っていた設計を効率的に行い，経済性・環境対応性と景観性の面で優位性のある新たな防護柵形状の探索が可能であることが分かった．

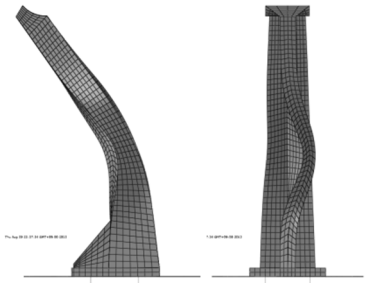
(5)　非弾性横ねじれ座屈の考慮

前節では，横ねじれ座屈タイプにおける支柱の極限支持力 P_w を弾性横ねじれ座屈モーメント M_E との関係に



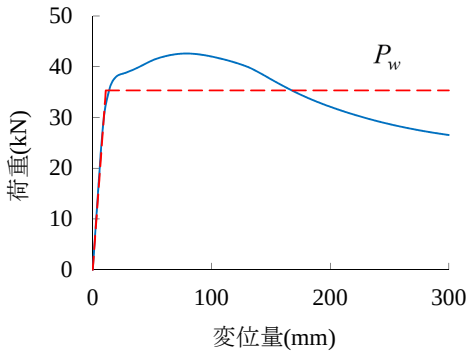
(i) 側面図　(ii) 背面図

(a) 支柱解析モデル



(i) 側面図　(ii) 背面図

(b) 支柱変形モード



(c) 変位－荷重曲線

図-22　M タイプ Pareto 解 No.1

表-8(a)　各防護柵タイプの部材寸法（染色体情報）

横ねじれ座屈Mタイプの部材寸法（図-19(a)の値）

Name	b_w (mm)	t_w (mm)	b_{tf} (mm)	t_{tf} (mm)	b_{cf} (mm)	t_{cf} (mm)	θ_1 (度)	a (-)	b (-)	D_{p1} (mm)	t_{p1} (mm)	D_{p2} (mm)	t_{p2} (mm)	D_{p3} (mm)	t_{p3} (mm)
No.1	127	133	39	11	6	7	0.05	3596	493	146	101	83	5	3	3
No.2	124	140	38	12	6	6	0.05	2975	482	142	98	79	5	3	4
No.3	125	140	38	12	6	6	0.05	3146	487	137	99	78	6	3	4
No.4	129	138	39	11	6	6	0.05	3652	499	128	102	79	6	4	4

横ねじれ座屈Mタイプの部材寸法（図-21(a)の値）

Name	b_w (mm)	t_w (mm)	b_{tf} (mm)	t_{tf} (mm)	b_{cf} (mm)	t_{cf} (mm)	θ_1 (度)	a (-)	b (-)	D_{p1} (mm)	t_{p1} (mm)	D_{p2} (mm)	t_{p2} (mm)	D_{p3} (mm)	t_{p3} (mm)
No.1	125	130	42	12	12	9	0.05	7216	561	62	60	33	6	4	3
No.2	122	123	42	12	12	10	0.05	6335	509	74	53	34	7	2	3
No.3	123	122	42	12	12	10	0.05	6401	511	75	54	34	6	2	3
No.4	129	124	41	13	12	8	0.05	6887	536	74	60	35	6	2	3

横ねじれ座屈Rタイプの部材寸法（図-19(b)の値）

Name	b_w (mm)	t_w (mm)	b_{tf} (mm)	t_{tf} (mm)	b_{cf} (mm)	t_{cf} (mm)	θ_1 (度)	θ_2 (度)	θ_3 (度)	θ_4 (度)	D_{p1} (mm)	t_{p1} (mm)	D_{p2} (mm)	t_{p2} (mm)	D_{p3} (mm)	t_{p3} (mm)
No.1	150	63	20	6	6	13	87.08	90.59	95.78	69.95	75	36	56	6	3	2
No.2	150	67	20	7	6	12	87.43	91.17	97.99	70.01	75	33	51	6	3	2
No.3	150	68	20	7	6	12	87.31	91.33	98.06	70.41	73	33	50	7	3	2
No.4	150	70	20	8	6	11	86.92	91.35	97.66	71.93	71	33	48	7	3	2

くびれ部局部座屈タイプの部材寸法（図-19(c)の値）

Name	b_w (mm)	t_w (mm)	b_{tf} (mm)	t_{tf} (mm)	θ_1 (度)	θ_2 (度)	θ_3 (度)	θ_4 (度)	D_{p1} (mm)	t_{p1} (mm)	D_{p2} (mm)	t_{p2} (mm)	D_{p3} (mm)	t_{p3} (mm)
No.1	201	93	6	6	0.34	0.05	0.16	0.21	117	85	113	6	3	5
No.2	239	96	6	6	0.35	0.00	0.21	0.30	135	87	120	5	3	4

よる回帰式(12)によって算出したが，M タイプを対象に，非弾性を考慮した耐荷力モーメント M_u との関係式(13)を用いた場合について検討する．これは，非弾性挙動をする場合は，M_E より M_u の方が合理的と当初考えたからである．染色体情報の設計緒元及び基本データは，前節と同様とする．得られた Pareto 集合解の鋼材重量と遮蔽率の関係を図-21(a)に，極限支持力 P_w および横梁の極限曲げモーメント M_0 の関係を図-21(b)示す．

図-21(a)より，回帰式(12)を用いた場合と同様に，既存の防護柵形状よりも優位性のある形状を算出できた．これより，非弾性横ねじれ座屈の耐荷力式を用いても，本設計法が適用可能であることを確認した．

5. 安全性能の検証

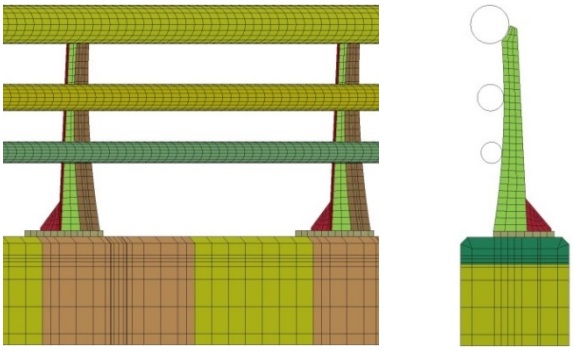
得られた Pareto 集合解が，防護柵設置基準・同解説 [5] の安全性能を満たしているかを検証する．

表-8(b) 最適化パラメータ

		極限支持力 P_w (kN)		極限曲げモーメント M_0 (kN·m)	
		解析結果	GA 計算結果	解析結果	GA 計算結果
横ねじれ座屈 M タイプ	No.1	35.3	33.0	53.2	50.0
	No.2	36.0	36.7	54.7	50.0
	No.3	35.9	36.4	50.1	50.0
	No.4	34.8	34.9	47.8	50.0
横ねじれ座屈 M タイプ (非弾性考慮)	No.1	65.3	33.2	52.4	50.0
	No.2	64.5	32.5	54.6	50.0
	No.3	65.6	33.1	49.7	50.0
	No.4	60.5	33.1	48.3	50.0
横ねじれ座屈 R タイプ	No.1	33.9	33.2	47.9	50.0
	No.2	32.5	33.4	50.0	50.0
	No.3	32.8	33.7	51.4	50.0
	No.4	33.9	34.6	56.1	50.0
くびれ部局部座屈 タイプ	No.1	48.4	44.7	52.0	51.4
	No.2	64.3	41.0	43.1	50.3

表-9 防護柵の種別と衝撃度

種別	C	B	A	SC	SB	SA	SS
衝撃度 I_s (kJ)	45	60	130	160	280	420	650



(a) 防護柵モデル　　(b) 側面図

図-23 M タイプ Pareto 解 No.2

(1) 静的解析における部材性能値の算定

部材性能の検証の対象とするのは，図-19 に示すように，横ねじれ座屈タイプについては，遮蔽率が最大で鋼材重量が最小(No.1)，遮蔽率が最小で鋼材重量が最大(No.4)，遮蔽率と鋼材重量がそれぞれ M，R タイプ既製品と同等(No.2，No.3)である 4 つを，くびれ部局部座屈タイプについては遮蔽率が最大で鋼材重量が最小(No.1)，遮蔽率が最小で鋼材重量が最大(No.2)である 2 つを対象に，静的解析を行った．横ねじれ座屈 M タイプ No.1 の支柱における解析結果を図-22 に示す．図-22(c)中の赤破線より極限支持力 P_w は 35.3kN と求まり，回帰式より算定した P_w =33.0kN に近い値となった．図-19 と図-20 の No.1～No.4 の部材寸法を表-8(a)に示す．表-8(b)では，式(12)を用いて算出した横ねじれ座屈タイプについては，3.(4)で示した極限支持力算定式に近い値を示している．非弾性を考慮し，式(13)を用いて算出した断面の極限支持力 P_w については，算定式の値とはやや異なるもの，安全側に位置し，A 種防護柵部材の条件を十分に満足している．くびれ部局部座屈タイプについても，同様に A 種部材の条件を満たしていることが確認できた．また，すべての解析で，それぞれ想定した変形モードを示した．

(2) 車両衝突解析を用いた性能評価

得られた Pareto 集合解が，車両の逸脱防止性能および誘導性能を有しているか確認するため，図-19 に示す M，R タイプの各 Pareto 解 No.2(既製品と遮蔽率が同じで鋼材重量が小さい)を対象に，設置基準で規定された車両衝突実験の数値解析シミュレーションを行った．防護柵の基部のコンクリート構造及びスパン間隔等の諸条件は 2010 年に筑波の土木研究所で行った車両衝突実験 [21]のものを参考にした．車両衝突解析の手法に関しては第 3 筆者らによって，これまでに実験値と比較して性能評価できることを明らかにしている [6)25)~30)]．

a) 解析モデル

M タイプ Pareto 解 No.2 の解析モデルを図-23 に示す．解析には，LS-DYNA Ver.971[22)-24)]を使用した．支柱には，静的解析と同様に SS400 鋼材を使用しており，その材料特性については，降伏後の公称ひずみ－公称応力の関係を von Mises 降伏基準に従う多直線近似等方弾塑性体モデルとし，伊藤ら [25]が行った動的引張試験から得られたひずみ速度効果の影響を考慮している．横梁は STK400 鋼材が用いられた円形中空断面であり，要素モデルは Belytschko-Tsay シェル要素によってモデル化した．SS400 と同様に動的引張試験から得られたひずみ速度効果の影

響を考慮している．

また，防護柵の支持構造については車両衝突実験[21]の設計図面を参考に，アンカーボルトと鉄筋コンクリート地覆をモデル化した．コンクリートの材料特性については，圧縮力に対してはDrucker-Prager降伏基準に従い，引張力に対しては引張強度(カットオフ圧力とする)に達した後は要素が破壊したと見なされ引張応力を伝えなくなる，LS-DYNAの破壊を考慮した土質およびクラッシャブルフォーム材を使用した．また，各材料定数のパラメータは，圧縮試験から得られたコンクリートの圧縮強度を基に決定した．コンクリートのひずみ速度効果については，伊藤ら[26]によって衝突を受けるコンクリート架台の変形が弾性域でほぼ収まる場合，ひずみ速度効果の有無は解析結果に影響を及ぼさないことが示されており，本研究では特に考慮していない．

なお，アンカーボルト及びコンクリート地覆内の埋め込み鉄筋については弾塑性体とした．要素特性に関してはコンクリート地覆，アンカープレート等を1点積分ソリッド要素によってモデル化し，埋め込み鉄筋とアンカーボルトついては，Hughes-Liuはり要素を用いてモデル

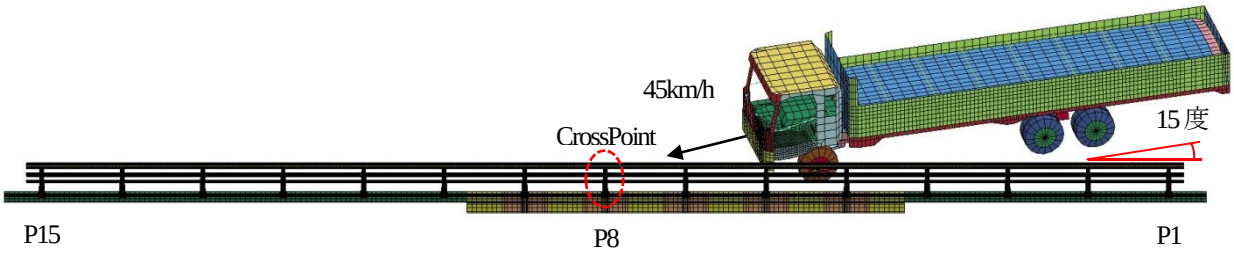
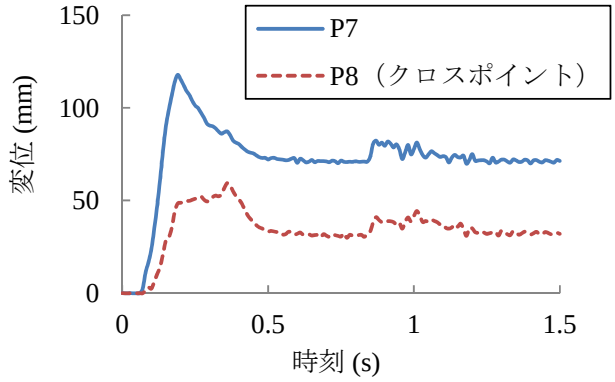


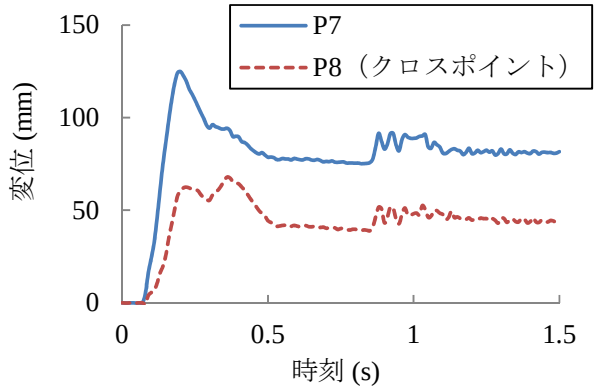
図-24　車両衝突

表-10　車両衝突解析結果

要求性能	照査項目	M-type_GA_No.2	M-type(既製品)	R-type_GA_No.2	R-type(既製品)
車両逸脱防止性能	最大変位(mm)	118	119	125	120
車両誘導性能	離脱速度(km/h)	36.3(0.81)	27.2	35.7(0.79)	27.3
	離脱角度(度)	4.6(0.31)	3.4	5.6(0.37)	5.6

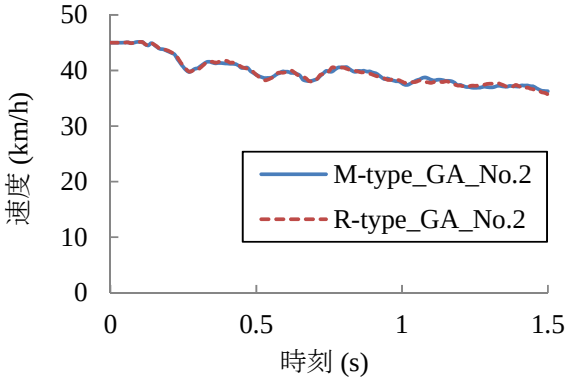


(a) Mタイプ Pareto解 No.2

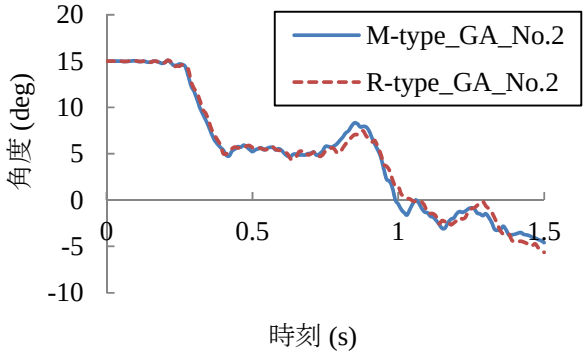


(b) Rタイプ Pareto解 No.2

図-25　支柱時刻歴変位



(a) 車両速度



(b) 車両角度

図-26　車両刻歴変位

化した．境界条件としてコンクリート地覆の下面を完全固定とし，埋め込み鉄筋とコンクリートの付着については，剥離を考慮せず完全付着とした．

衝突車両モデルは，自動車製造会社などの協力を得て名古屋大学で独自に開発した 25tf (245kN)トラック有限要素モデルを使用した[6),26)-30)]．

b) 衝突条件

防護柵の設置基準・同解説[5)]において車両用防護柵の種別は，式(16)に示す，衝突の際の衝撃度 I_s に応じて表-9 のように規定されている．衝撃度とは，防護柵の強度をエネルギーの観点から評価する指標である．すなわち，防護柵に車両が衝突した時，車両の持つ防護柵直角方向のエネルギーを全て防護柵が吸収するとして，防護柵が突破されない強度を衝撃度 I_s に換算されている．

$$I_s = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{V}{3.6} \cdot \sin\theta \right)^2$$

ここで，
I_s ：衝撃度 (kJ)
m ：衝突車両の質量 (t)
V ：衝突速度 (km/h)
θ ：衝突角度 (度)

衝突条件は，A 種防護柵の規定を満たす，車両重量 25tf (245kN)，衝突速度 45km/h，衝突角度 15 度を用い，車両の衝突解析を行う．また，図-24 に示すように，モデルの防護柵は 15 本の支柱によって構成されており，トラックの進行方向に P1～P15 と付番する．各支柱の中央に位置する支柱は車両衝突方向の延長線上の支柱であり，これを CP (Cross Point)支柱とする．なお，中央の支柱を CP とする理由は，トラックの初期衝突が横梁中央付近となり，衝突条件を最も厳しくするためである．

c) 解析結果

衝突解析より得られた各指標と，同様の条件で行った既存の M，R タイプに対する解析結果を表-10 に示す．離脱速度，離脱角度における( )内の数字は衝突前に対する衝突後の割合を示している．

車両の逸脱防止性能は，大型トラックの実車衝突実験によって防護柵が車両に突破されず，かつ車両の最大進入行程が規定値以内であることである．最大進入行程は，車両の衝突側の車輪が防護柵面からどの程度侵入したかを防護柵の変位によって推定する．コンクリート埋め込みである橋梁用ビーム型防護柵の場合，最大変位が 300mm 以内とされている．図-25 に最も変位の大きかった P7 と CP である P8 の時刻歴変位を示す．表-10 と図-25 より， M，R タイプ Pareto 解 No.2 の最大変位は，それぞれ 118mm，125mm であり，300 mm 以下であるため，車両の逸脱防止性能を満足する．

次に，車両の誘導性能として，防護柵設置基準・同解説[5)]では車両の離脱速度を衝突速度の 6 割以上，離脱角度を衝突角度の 6 割以内に保つように車両の誘導性能が規定されている．ここでは，車両重心の速度の時刻歴により，車両が離脱した後の速度ベクトルの絶対値から離脱速度を，また，速度ベクトルの方向から離脱角度を算出した．各モデルにおける車両の時刻歴速度および車両角度を図-26 に示す．表-10 と図-26 から，解析では，車両の離脱速度を衝突速度の 6 割以上，離脱角度を衝突角度の 6 割以内に保っていることが確認できる．よって，車両の誘導性能についても満足することが分かった．

(3) 構造細部の検討

構造設計において，遺伝的アルゴリズムによって効率的に Pareto 最適集合解を探索し設計形状案を得ることができた．設計者は，この Pareto 最適集合解の中から自らの選好によって解の選定を行い，最終的な設計形状を選択することができる．構造細部の検討における検討事項である施工性や美観特性を明らかに阻害する形状は選択されるべきではない．また，維持管理上および環境影響上に問題がある形状も選択してはならない．これらの条件を満足する形状を選好し，美観特性と環境負荷低減性を考慮して最終形状を決定すればよい．

(4) 橋梁用ビーム型防護柵以外のたわみ性防護柵の最適設計に関する課題

橋梁用ビーム型防護柵について，本論文では部材選定グラフを使って，防護柵の安全性を簡易的に求める手法を用いた．それ以外のたわみ性防護柵や道路用の土中柵などについては，簡易な設計法は示されておらず，実車衝突実験によって，その安全性を検証することが求められている．

最終的に実車衝突実験の検証が必要であっても，そこにいたるまでに数値シミュレーションによる最適化は有用と考える．数値衝突シミュレーションによって，種々の防護柵の安全性がある程度確認できることは，これまでの筆者らの研究でも明らかにしている[6),26)-30)]．しかし，最適設計手法の中に直接車両衝突シミュレーションを組み込むことは，たとえ遺伝的アルゴリズムが少ない反復回数で Pareto 集合解が得られるとしても現実的ではない．今回の研究から，以下のような手順の設計手法を今後検討するとよいと思われる．

1) 安全性能を大まかに確認できるエネルギー吸収能を基準にした防護柵の安全性能基準を求める．具体的には，これまでの類似の防護柵を対象に，車両衝突数値シミュレーションを行い，そのエネルギー吸収特性を明らかにし，さらに部材の寸法や形状を段階的に変えた複数の事例についても車両

衝突シミュレーションを行い，エネルギー吸収特性を明らかにして簡易な限界基準を求める．

2) 多目的関数を遺伝的アルゴリズム手法を適用して，上記で求めた安全性基準を組み込み，経済性や景観性などの複数の性能を同時に満足する Pareto 集合解を求める．
3) Pareto 集合解の中から，設計者が他の要求性能などを勘案して防護柵形状などを選択する．
4) 選ばれた防護柵の車両衝突数値シミュレーションを行い，その性能を確認する．
5) 選ばれた防護柵の性能を実車衝突実験によって，最終確認する．

6. 結言

本研究において，防護柵の性能照査型設計に新たに遺伝的アルゴリズムを導入し，多目的関数を用いた橋梁用防護柵の性能照査型最適設計法を開発した．なお，本最適設計法は，安全性能に関して，動的解析を直接組み込むものではなく，部材選定グラフを利用するために静的解析により，事前に断面性能と極限支持力 P_w との関係を求めておくものである．得られた Pareto 集合解を同種の既存の防護柵と比較することにより最適設計法の有効性を明らかにした．その結果，以下の結論が得られた．

1) 防護柵設計において，多目的遺伝的アルゴリズムによる最適化手法を導入し，多面的な要求性能を満足しながら最適な形状を効率的に探索する手法を示した．
2) 既存の橋梁用ビーム型防護柵の変形特性を，3 つのタイプに大別し，変形特性別に極限強度支持力 P_w の回帰式を求め，最適化手法の中で制約条件として組み込んだ．

   基部局部座屈タイプ　$P_w = 0.985 + 37.7\ Z_p$

   くびれ部局部座屈タイプ　$P_w = 18.4 + 20.6\ Z_p$

   横ねじれ座屈タイプ　$P_w = 14.3 + 0.14\ Z_p$

   ただし，M_E には，片持ちはりや不等断面の影響を考慮する修正係数を乗じる．
3) 本研究で提案した設計法を用いることにより，基本設計において，多目的遺伝的アルゴリズムにより経済性・環境対応性および景観性を目的関数とする多目的最適化問題の多様な Pareto 集合解が得られることを示した．
4) 複合非線形解析を用いた静的数値解析と動的数値解析を用いて，得られた Pareto 集合解が要求された防護柵の安全性能を満たすことを確認した．

謝辞：本論文の作成において，(株)住軽日軽エンジニアリングの高堂治氏と，名古屋大学名誉教授の大森博司先生にお世話になった．ここに深謝致します．

参考文献

1) 日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説，丸善，1998.
2) 日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説，丸善，2004.
3) 伊藤登，天野光一，横山公一，山口智，柴田康博：鋼製車両用橋梁用防護柵のデザインと開発，景観・デザイン研究講演集，No.1，pp.150-153，2005.
4) 伊藤登，横山公一，高堂治：新たな変形特性による鋼製橋梁用車両防護柵の開発，景観・デザイン研究講演集，No.3，pp.66-72，2007.
5) 日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説，丸善，2008.
6) 伊藤義人，伊藤誠慈，北根安雄，高堂治：景観性に配慮した橋梁用防護柵の衝突性能に関する実験的・数値解析的研究，土木学会論文集A1，Vol. 68，No.2，pp.413-426，2012.
7) Liu, C., Hammad, A. and Itoh, Y. : Maintenance Strategy Optimization of Bridge Decks using Genetic Algorithm, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, pp.91-100, 1997.
8) 大森博司，田村尚士，伊藤智幸：多目的最適化法による鋼構造物の構造設計支援手法の提案，構造工学論文集，Vol. 54B，pp.251-257，2008.
9) Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. : A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, pp.182-197，2002.
10) 伊藤義人，鈴木達也：車橋梁用防護柵の性能照査型統合設計システム，土木学会論文集，No.731，pp.353-366，2007.
11) SIMULIA社：Abaqus Analysis User's Manual Version 6.11, 2011.
12) 土木学会鋼構造委員会座屈設計ガイドライン改訂小委員会（委員長：宇佐美勉）：座屈設計ガイドライン，改訂第2版，鋼構造シリーズ12，2008.
13) 日本道路協会：防護柵設置要項・資料編（橋梁用防護柵・耐雪型防護柵），丸善，1986.
14) 建設省土木研究所ほか：鋼製高欄型S種防護柵の開発に関する共同研究報告書，共同研究報告書第74号，1992.
15) 高速道路調査会：橋梁用鋼製防護柵に関する研究報告書，1978.
16) 日本規格協会：JISハンドブック　鉄鋼，2010.
17) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説　鋼橋編，丸善，1990.
18) Nethercot, D. A.: The Effective Length of Cantilevers as Governed by Lateral Buckling, *The Structural Engineer*, Vol.51, No.5, pp.161-168, 1973.
19) 福本唀士，伊藤義人：座屈実験データベースによる鋼はりの横ねじれ基準強度に関する実証的研究，土木学会論文報告集，第341号，pp.137-146，1984.
20) 久保全弘，渡辺竜二：変断面I型はりの横座屈強度とその評価について，土木学会中部支部研究発表会講演概要集，pp.50-51，1983.

21) 土木研究センター：橋梁防護柵衝突試験評価業務報告書，2010.
22) 日本総合研究所：LS-DYNA Version 971 User's Manual Volume 1, 2007.
23) 日本総合研究所：LS-DYNA Version 971 User's Manual Volume 2, 2007.
24) 日本総合研究所：LS-DYNA使用の手引き Second Edition, 2004.
25) 伊藤義人，劉斌，宇佐美康一，草間竜一，貝沼重信：車両衝突を受ける橋梁用鋼製防護柵の材料ひずみ速度効果と性能照査に関する研究，土木学会論文集，No.759/I-67，pp.337-353，2004.
26) Itoh, Y., Liu, C. and Kusama, R.: Modeling and Simulation of Collisions of Heavy Trucks with Concrete Barriers, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol.133, No.8, pp.462-468, 2007.
27) 伊藤義人，森正樹，鈴木信哉：車両衝突を受ける橋梁用防護柵に関する数値解析的研究，構造工学論文集，Vol.45A，pp.1635-1643，1999.
28) Itoh, Y., Usami, K., Sugie, M. and Liu, C.: Numerical Analyses on Impact Performance of Steel and Aluminum Alloy Bridge Guard Fences, *Structures Under Shock and Impact IV*, pp.385-394, WIT Press, 2000.
29) 伊藤義人，宇佐見康一，貝沼重信，杉江昌宣：アルミニウム合金製防護柵の実車衝突に関する数値解析的研究，構造工学論文集，Vol.47A，pp.1707-1718，2001.
30) 劉斌，伊藤義人：FPC防護柵の性能照査型設計に関する研究，構造工学論文集，Vol.50A，pp.207-217，2004.

(2014. 2. 25 受付)

PERFORMANCE-BASED OPTIMUM DESIGN OF BRIDGE RAILINGS USING MULTI-OBJECTIVE FUNCTIONS

Seiji ITOH, Akihiro YOSHINO and Yoshito ITOH

Japanese specifications of railings require minimization of the cost, landscape-friendly appearance and continuous flow in the road user's as well as the four basic performances. In this paper the optimum design method of new bridge railings using the genetic algorithm for the multi-purpose functions has been developed to obtain the Pareto solutions. They were confirmed the availability comparing with the existing railings satisfied all requirements of the specifications. The static and collision analyses of vehicle and railing finally certificated the efficiency and safety of the developed design method.