

高強度材料を用いたRC構造物の最適耐震設計について

杉本博之¹・亀海貴寛²・渡邊忠朋³

¹正会員 工博 北海学園大学教授 工学部土木工学科（〒064-0926 札幌市中央区南26条西11丁目）

²学生員 北海学園大学大学院 建設工学専攻（〒064-0926 札幌市中央区南26条西11丁目）

³正会員 工博 北武コンサルタント（〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通7丁目）

1. まえがき

筆者らは、従来から、JRのRC構造物の耐震設計を対象として、時刻歴応答解析法を多数回用いしないで良質な設計解を得るための研究を行ってきた¹⁾⁴⁾。

一方、現在、土木学会をはじめとする種々の機関において性能照査型設計法の導入が検討されている⁵⁾。これにより従来に比べ設計の自由度が増し、より合理的な設計を行うことができると考えられる。

従来の設計法は、仕様規定型設計法とも呼ばれ、所定の仕様を満足するように設計を行う事で、構造物の要求性能を間接的に満足していたと考えられる。これに対して性能照査型設計法は、要求性能を明確にした上で、構造物がそれを満足しているか否かを直接的に照査する設計法であると考えられる。そのため、構造物が要求性能を満足しているのであれば、設計者は、構造物の使用材料を限定する必要はなく、より広い設計空間から、最も合理的な材料を選択することができ、良質な設計を行うことも可能になると思われる。

事実、近年では、高強度の使用材料を用いた設計・施工も行われており、これらの使用材料を用いることで、従来に比べより合理的な設計を行うことができると考えられる。しかし、現時点ではこれらの材料を用いた設計が、従来の設計に比べどの程度優位性があるか、あるいは、これらの材料を使用することが設計解へどのような影響を及ぼすかといった問題は、必ずしも明確になっておらず、より合理的な設計を行うためにも、これらを明らかにすることが重要であると考えられる。

そこで本研究では、鉄道RCラーメン高架橋を例にとり、高強度材料を用いる最適耐震設計を試みた。最適耐震設計では、構造物の耐震性に関する要求性能として、地震の影響に対する復旧性に着目し設計を行った⁴⁾。JR構造物の復旧性に関しては、損傷を受けた部材の補修に関わるコストと、さらに補修工事のための通行不能によ

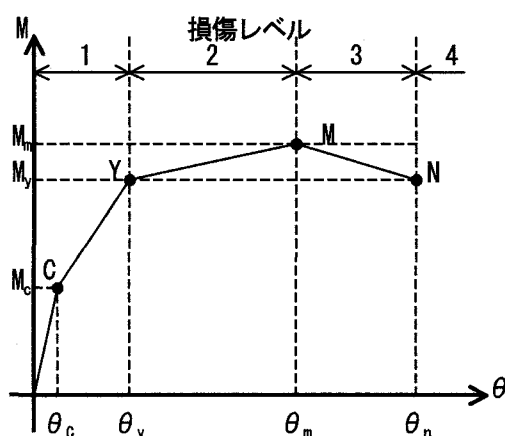


図-1 RC部材の骨格曲線

る時間的損失の両方が考えられる。本研究は前者のみを対象とする。

本文では、いくつかの数値計算により得られた結果から、鉄筋及びコンクリートそれぞれの強度特性が、構造物の初期設計、あるいは復旧性も考慮した設計解に及ぼす影響について検討した。

2. RC部材の骨格曲線

本研究は、鉄道RC構造物を対象としている。そのため部材の骨格曲線は鉄道構造物等設計標準⁶⁾（以下、鉄道標準）に示されるテトラリニアモデルのモーメントM一部材角θの関係を用いた。骨格曲線は、耐震性能及び部材の損傷レベルと関連づけられている。骨格曲線と損傷レベルの関係を図-1に示す。図のC点はひび割れ発生点、Y点は鉄筋降伏点、M点はモーメント最大点、N点は終局点である。Y点までを損傷レベル1、Y点からM点を損傷レベル2、M点からN点までを損傷レベル3、それ以上を損傷レベル4と本研究では定義する。こ

れらは、それぞれ後記の鉄道標準に規定される耐震性能と関連づけられる。

3. 使用材料

ここでは、本研究で用いた使用材料と、その組み合わせについて説明する。本研究で用いた使用材料は、コンクリートの場合、材料強度が 27, 30, 40, 50, 60, 70N/mm²、鉄筋の場合、材料強度が 345, 390, 490, 685, 785N/mm² である。使用材料の組み合わせは鉄道標準（案）に示される規定に基づき定めた。使用する材料およびコンクリートと鉄筋の組み合わせを表-1 に示した。表-1 の縦軸はコンクリートの材料強度、横軸は鉄筋の材料強度を示しており、表中の○が鉄道標準の規定を満たす組み合わせである。後の数値計算例では、表-1 に示す組み合わせの計算を行った。

骨格曲線を算定する際には、鉄筋及びコンクリートの材料特性である応力-ひずみ曲線を用いるが、これは材料強度に応じて異なる。そこで、図-2 に鉄筋の応力-ひずみ曲線を、図-3 にコンクリートの応力-ひずみ曲線を示す。次式には、図-3 の k_1 、 ϵ'_{cu} を示した。

$$k_1 = \begin{cases} 0.85 & (f'_{ck} \leq 50) \\ 1 - 0.003 f'_{ck} & (f'_{ck} > 50) \end{cases} \tag{1}$$

$$\epsilon'_{cu} = \begin{cases} 0.0035 & (f'_{ck} \leq 50) \\ \frac{155 - f'_{ck}}{30000} & (f'_{ck} > 50) \end{cases} \tag{2}$$

ここで、 k_1 はコンクリートの応力-ひずみ曲線式に用いる係数、 ϵ'_{cu} は、コンクリートの終局ひずみ、 f'_{ck} は、コンクリートの設計基準強度である。 k_1 の値は骨格曲線の折れ点全てに影響し、 ϵ'_{cu} の値は、骨格曲線の M 点、N 点の部材角 θ の算定に大きく影響する。つまり、 ϵ'_{cu} の値が小さくなると、M 点、N 点に対応する部材角の値も小さくなる。

本研究は、高強度材料を用いた最適耐震設計を対象としているが、現在、高強度材料という言葉に対して、必ずしも明確な定義はされていない現状がある。そこで、本研究では、現在一般的に用いられている 27N/mm²の強度を持つコンクリート、345N/mm²の強度を持つ鉄筋を普通強度材料とし、それよりも大きな強度を持つコンクリート及び鉄筋を高強度材料と定義する事とした。

4. 最適設計問題の定式化

本研究では、筆者らが提案する最適耐震設計システム¹⁾⁴⁾を用いて設計を行っている。以下に、その設計システ

表-1 使用する材料強度と組み合わせ (N/mm²)

		鉄筋				
		345	390	490	685	785
コン ク リ ー ト	27	○	○	○	×	×
	30	○	○	○	○	×
	40	○	○	○	○	○
	50	○	○	○	○	○
	60	○	○	○	○	○
	70	○	○	○	○	○

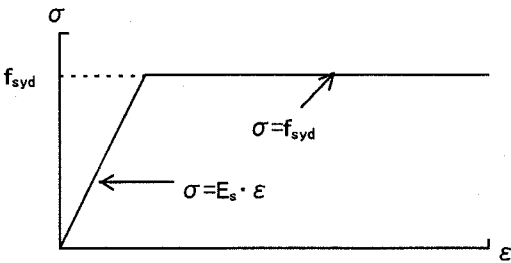


図-2 鉄筋の応力-ひずみ曲線

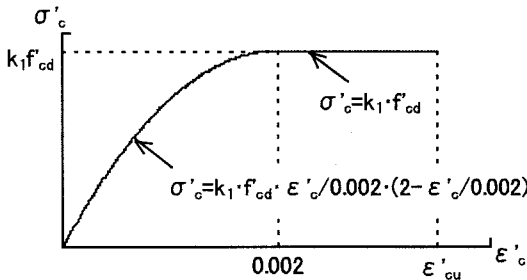


図-3 コンクリートの応力-ひずみ曲線

ムの概要、最適設計のための目的関数、制約条件、及び設計変数について説明する。

(1) 最適耐震設計システム

本研究で用いる、最適耐震設計システムのフローチャートを図-4 に示す。最適耐震設計システムでは、最適化手法である遺伝的アルゴリズム（以下、GA）から解析を要求される設計に対し、静的弾塑性解析と、簡易動的解析法である非線形スペクトル法により耐震性の照査を行い、得られた目的関数の値及び制約条件の値を最適化(GA)に返す。これを繰り返すことにより、最適化(GA)から設計解が得られる。本研究では、これを一次設計と位置付け、この一次設計に対して時刻歴応答解析法を行ない、最終の耐震性の照査を行う 2 段階設計システムである。GA を用いるのは、設計変数総てが離散的な値を取ると考えられるからである。

(2) 目的関数⁴⁾

本研究での目的関数は、初期建設費用と地震動による

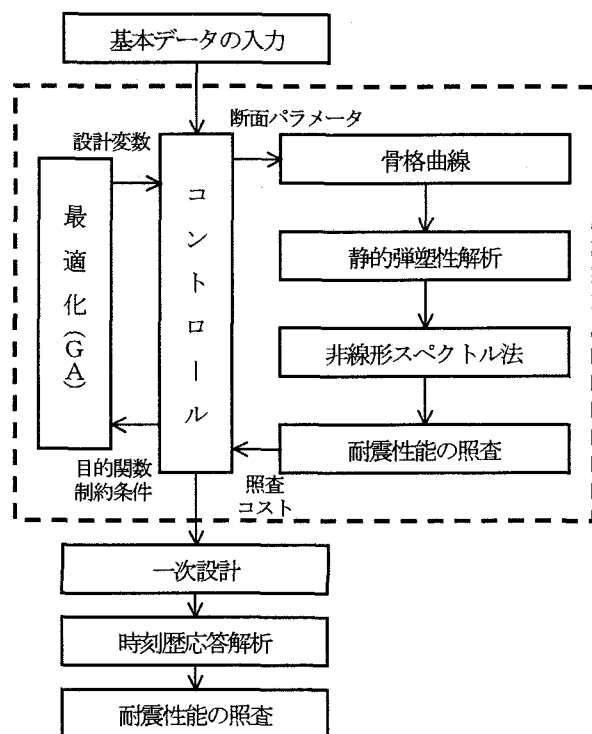


図-4 最適耐震設計システム

損傷の補修に要する費用（以下、補修費用）の和からなるトータルコストとし、次式で定義した。

$$TC=C+C \quad (3)$$

ここで、 TC はトータルコスト、 C は材料費を含む初期建設費用、 C は補修費用である。補修費用は、後に説明する L2 地震動スペクトル I、II による補修費用のどちらか大きい方を選択する事とした。

a) 初期建設費用

初期建設費用は、コンクリート量と鉄筋量の関係から、次式により算定する。

$$C=\alpha_c \cdot V_c \cdot K_c+\alpha_s \cdot V_s \cdot G_s \cdot K_s \quad (4)$$

ここで、 $V_c(\text{m}^3)$ はコンクリート量、 $V_s(\text{m}^3)$ は鉄筋量、 α_c はコンクリートの単価補正係数、 α_s は鉄筋の単価補正係数で材料強度毎に設定した。 α_c 、 α_s の値は、表-2、3に示した。 K_c は呼び強度 27N/mm^2 のコンクリート単位容積当たりのコスト(=65.1unit/m³)、 K_s は規格が 345N/mm^2 の鉄筋単位重量当たりのコスト(=9.1unit/kN)、 G_s は鉄筋の単位重量(=77kN/m³)である。

b) 補修費用

補修費用は、次式により算定する。

$$C=\sum_{i=1}^n C_i \quad (5)$$

表-2 コンクリートのコスト比

呼び強度	α_c
27	1.00
30	1.02
40	1.11
50	1.50
60	1.65
70	1.83

表-3 鉄筋のコスト比

規格	α_s
345	1.00
390	1.13
490	1.42
685	3.00
785	3.00

表-4 補修費用の計算式

項 目	単価	数 量 計 算 式
掘削工	6,720	$[(H+2)^2-H^2] \times H_s \times 2 \times 6,720$
ひび割れ注入工 かぶり修復	5,500	$(H^2 \times B) \times 2 \times 25 \times 5,500$
(コンクリート工)	22,410	$(H^2 \times B) \times 2 \times 0.35 \times 22,410$
(型枠工)	7,090	$H^2 \times 4 \times 2 \times 7,090$
埋戻工	1,112	$[(H+2)^2-H^2] \times H_s \times 2 \times 1,112$

ここで、 C_i は各部材の補修費用、 n は対象となる部材数である。部材種別、位置、損傷レベル毎に補修の方法及び費用は異なる。そこで、これらの場合毎に補修費用を設定した。一例として柱下端、損傷レベル3の補修費用を表-4に示す。 H は断面高さ、 B は断面幅、 H_s は地盤から損傷部位までの高さである。

(3) 制約条件

制約条件は、耐震性に対する照査と、せん断破壊に対する照査、部材の損傷レベルに対する照査を行っている。

a) 耐震性に対する照査

鉄道標準では、想定する地震動として構造物の設計耐用期間内に数回程度発生する確率を有する地震動である L1 地震動、構造物の設計耐用期間内に発生する確率は低い非常に強い地震動である L2 地震動の2つのレベルの地震動に対し耐震性の照査を行うとしている。L1 地震動に対しては部材の損傷レベルを1に留め、L2 地震動に対しては耐震性能に応じた損傷レベルに抑えなければならない。鉄道標準では、耐震性能 I～III まで、3つの性能を示している。耐震性能 I は、地震後にも補修せずに機能を保持でき、かつ過大な変位を生じない性能で、本研究の損傷レベル1に対応する。耐震性能 II は、地震

後に補修を必要とするが、早期に機能が回復できる性能で、損傷レベル2以下に対応する。耐震性能Ⅲは、地震によって構造物全体が崩壊しない性能で、損傷レベル3以下に対応する。L2地震動には海洋型地震を対象とするスペクトルⅠと内陸型地震を対象とするスペクトルⅡの2種類があり、それぞれに対し耐震性の照査を行う。L1地震動に対する照査は震度法により行い、L2地震動に対する照査は、非線形スペクトル法により行う。式(6)に震度法による照査を、式(7)に非線形スペクトル法による照査を示す。

$$g(i)=\frac{\alpha/g}{K_{hy}}-1\leq 0 \tag{6}$$

$$g(i)=\frac{\mu_i}{\mu_a}-1\leq 0 \quad (i=I,II) \tag{7}$$

ここで、 α はL1地震動による応答加速度、 g は重力加速度、 K_{hy} は構造全体系での降伏震度である。 μ_i はスペクトルⅠ、Ⅱに対応した応答塑性率、 μ_a は、静的弾塑性解析により得られる許容塑性率である。

b) セン断破壊に対する照査

本研究では、各部材毎に、せん断破壊に対する照査を次式より行っている。

$$g(i)=\rho_m\frac{V_{di}}{V_{rdi}}-1\leq 0 \quad (1\sim M) \tag{8}$$

ここで、 ρ_m は構造物係数(=1.2)、 M は全部材数、 V_{di} は部材*i*に対するせん断力、 V_{rdi} は部材*i*の設計せん断耐力である。

c) 部材の損傷レベルに対する照査

損傷レベルの照査は、耐震性能から損傷レベルを定め、損傷レベルに応じた部材角を用い、部材の両端に対して次式より行う。

$$g(i)=\gamma_i\frac{\theta_{di}}{\theta_{rdi}}-1\leq 0 \quad (1\sim M) \tag{9}$$

ここで、 γ_i は、構造物係数(=1.0)、 θ_{di} は部材*i*に対する応答部材角、 θ_{rdi} は部材*i*に対する損傷レベルに応じた制限部材角である。 θ_{rdi} は図-1のY、M、Nの部材角に応じた値をとる。

(4) 設計変数

本研究では図-5に示すような、正方形断面を対象とした最適化を行っている。設計変数となる断面諸元は、断面幅B、軸方向鉄筋段数J、軸方向鉄筋本数Nである。軸方向鉄筋径は32mmに統一した。せん断補強鉄筋に

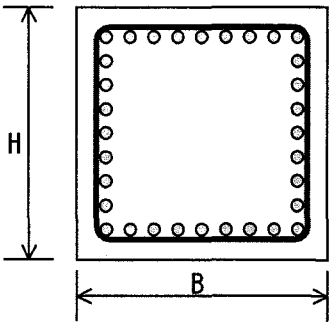


図-5 設計断面図

表-5 断面諸元の設計変数

B (mm)	H (mm)	N (本)	J (段)
600	600	4~6	1
700	700	4~8	
800	800	4~9	
900	900	4~10	
1000	1000	4~11	
1100	1100	4~11	
1200	1200	4~11	
1300	1300	5~12	

表-6 セン断補強鉄筋の設計変数

Dw (mm)	Nw (mm)	Sw (mm)	Sv (mm)
16	1~2	100	100
19	1~2		or
22	1~2		200

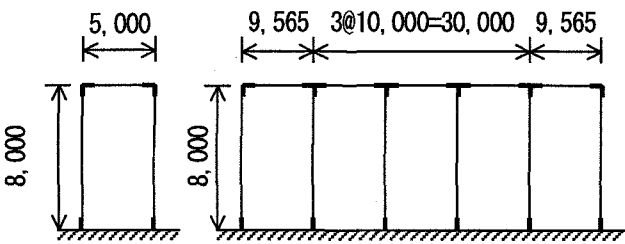


図-6 構造モデル (mm)

表-7 検討に採用した耐震性能と目的関数

	耐震性能	目的関数
CASE 1	Ⅱ	初期建設費用
CASE 2	Ⅲ	
CASE 3	Ⅲ	トータルコスト

関わる設計変数は、せん断補強鉄筋径 D_w 、せん断補強鉄筋組数 N_w 、せん断補強鉄筋配置間隔 S_v とした。GAによる最適化のための、断面諸元に関わる設計変数の候補値を表-5に、せん断補強鉄筋に関わる候補値を表-6に示す。

5. 数値計算例および考察

本研究で対象とした構造物は、図-6に示すような、1層5径間の鉄道RCラーメン高架橋である。地盤種はG0～G3地盤、基礎は直接基礎とした。最適化の対象とした部材は柱部材のみとした。最適化の対象とする部材に対しては非線形領域を考慮し、それ以外の部材は全て弾性として解析を行った。

本研究では、部材の損傷レベルを2に抑えた耐震性能Ⅱ、部材の損傷レベルを3に抑えた耐震性能Ⅲに対し、初期建設費用のみを目的関数にした設計をそれぞれCASE 1、CASE 2とした。また、損傷レベルを3まで許容し、式(3)に示すトータルコストを目的関数にした設計のCASE 3の合計3例の設計を試みた。それらを表-7にまとめて示した。

(1) CASE 毎の検討

ここでは、G2地盤を対象とした設計をCASE 毎に示し、検討を行う。図-7～9に鉄筋とコンクリートの強度の組合せ毎の目的関数値を示す。図の縦軸は目的関数となる初期建設費用及びトータルコスト、横軸の右はコンクリート強度、左は鉄筋強度を示している。

図-7より、CASE 1で初期建設費用が最小となる組み合わせはコンクリート強度が27N/mm²、鉄筋強度が490N/mm²であった。図-8より、CASE 2で初期建設費用が最小となる組み合わせはコンクリート強度が30N/mm²、鉄筋強度が490N/mm²であった。図-9より、CASE 3でトータルコストが最小となる組み合わせは、コンクリート強度が30N/mm²、鉄筋強度が490N/mm²であった。

これらの結果は、若干強度が高い材料を使用する事で、材料を減らし目的関数を低くする事が可能である事を示している。しかし、さらに高強度材料を使う事による、コスト的な優位性は必ずしも見られなかった。

以上により、本研究では、コンクリート強度が従来通りの27N/mm²か、やや強度が高い30N/mm²と、鉄筋強度が390N/mm²か490N/mm²の組み合わせが最も目的関数が小さくなる結果となった。現時点でのコスト比と、材料強度の関係の下で設計を行った場合、このような材料強度の組み合わせが合理的であると考えられる。また、全てのCASEにおいて鉄筋強度が685N/mm²以上になると、鉄筋強度が490N/mm²の時と比べ目的関数が大きくなる傾向があった。これは、鉄筋強度が685N/mm²以上になると、表-3の鉄筋コスト比が3.00と大幅に増加するためであると考えられる。コンクリートに関しても、強度が40N/mm²以上になると、目的関数が大きくなる傾向があった。今後、これらの材料の単価が下がれば、これらの材料を用いる事で、さらに合理的な設計解を算出できると考えられるため、今後検討を加えたい。

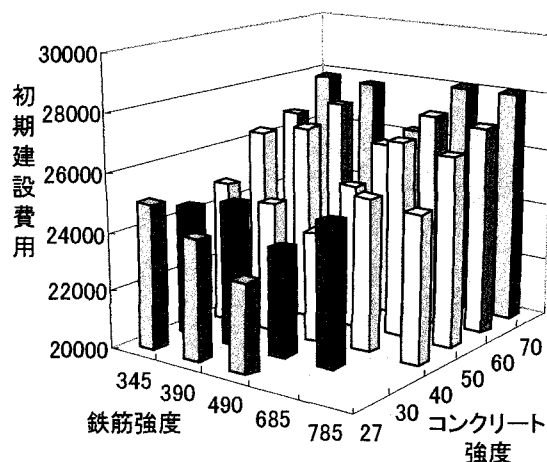


図-7 材料強度別目的関数比較 (CASE 1)

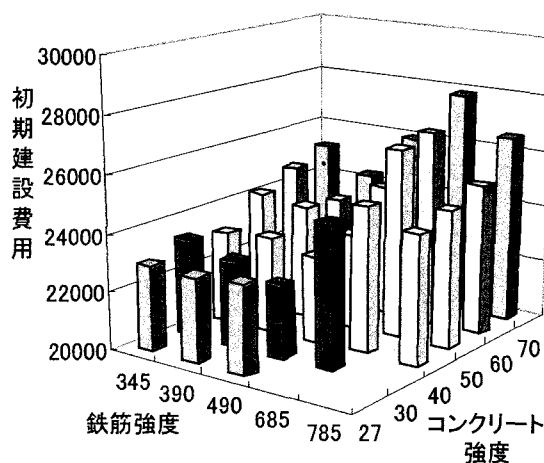


図-8 材料強度別目的関数比較 (CASE 2)

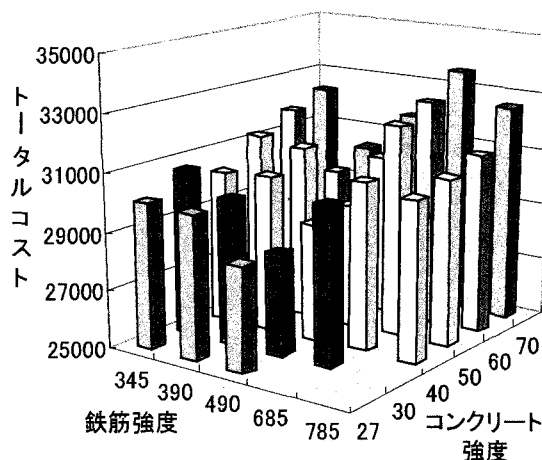


図-9 材料強度別目的関数比較 (CASE 3)

(2) 地盤種間の検討

本研究ではG0～G3地盤までの4種類の地盤種を対象

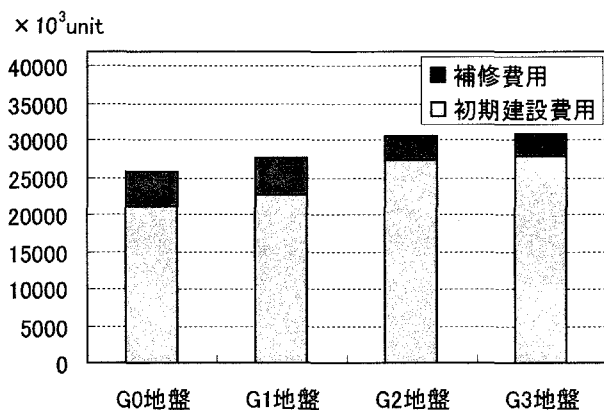


図-10 地盤種別目的関数比較

(CASE 3, コンクリート強度 40N/mm², 鉄筋強度 785N/mm²)

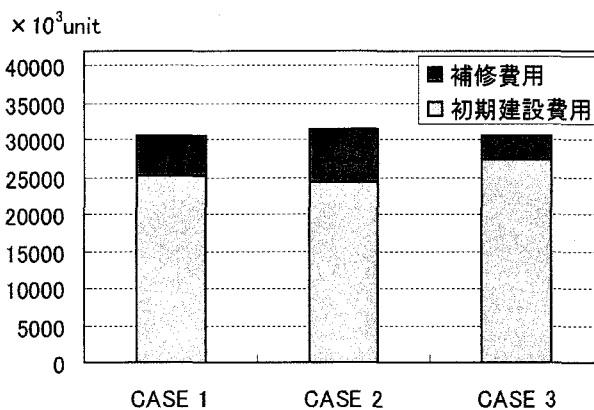


図-11 ケース別目的関数比較

(G2 地盤, コンクリート強度 40N/mm², 鉄筋強度 785N/mm²)

として設計を行っている。ここでは、地盤種の影響を検討するため、一例として CASE 3, コンクリート強度 40N/mm², 鉄筋強度 785N/mm² の目的関数を図-10 に示す。図-10 の縦軸はコスト、横軸は地盤種を表している。図-10 から、地盤種が上がると初期建設費用が増加するが、補修費用は減少する傾向が見られる。トータルコストに関しても、地盤種が上がると増加する傾向が見られた。

(3) CASE間の検討

ここでは、設計条件が異なる CASE 間の比較を行なう。一例として G2 地盤, コンクリート強度 40N/mm², 鉄筋強度 785N/mm² の CASE 1~3 の目的関数を図-11 に示す。

図-11 の縦軸はコスト、横軸は CASE 番号を表している。図より、初期建設費用が最小となるのは CASE 2 となり、次いで CASE 1, CASE 3 となっている。しかし、トータルコストで比較すると、CASE 3 のトータルコストが最も小さく、次いで、CASE 1, 2 の順となった。これは、CASE 1, 2 が初期建設費用を目的関数にしているのに対し、CASE 3 は、トータルコストを目的関数にしているためである。初期建設費用最小の設計より、断面を大きくする事で、補修費用を縮小し、それによってトータルコストを小さくしていると考えられる。

6. あとがき

本研究では、鉄道 RC 構造物を対象として、高強度材料を用いた最適耐震設計を行った。初期建設費用最小、トータルコスト最小のいずれの設計においても、現在一般的に用いられている普通強度材料を用いた組み合わせの設計ではなく、他の材料強度の組み合わせを用いた設計の目的関数が最小となった。これは、若干強度の高い材料を用いる事で、使用する材料を少なくし、コスト削

削減が可能である事を示している。今後は、それ以上の強度持つ材料を用いた設計に対しても、さらに検討を行いたい。また、杭基礎を考慮した構造物に対する同様の検討や、地震の規模や順序、回数を確率論的に設定した設計などを試みたいと考えている。

また、現在の規定は、材料の非線形領域での応答を評価しているの、部材の損傷は前提条件と考えざるを得ない。そうであれば、初期の設計段階から損傷の復旧に要するコストを考慮すべきであるという立場でこの研究は行なわれている。その時、まえがきにも書いたように、損傷の評価は、部材の補修に要するコストのみでなく、もしその損傷により車両の運行が不能になるのであれば、それによる時間的な損失を経済的な損失に置き換えて考慮すべきではないかと考えられる。本研究は、前者のみ定量化し目的関数に含めているが、道路橋と異なり、時間的な損失の定量化は、JR 橋梁の場合は比較的容易であると考えられるので、今後はそれらを定量化し、目的関数に含める研究が必要でないかと考える。

参考文献

- 1) 杉本・渡邊・満尾：弾塑性挙動を考慮する RC ラーメン構造の補強最適化の一試み、構造工学論文集 Vol.45A, 1999.
- 2) 杉本・齋藤・渡邊：RC ラーメン高架橋の耐震補強最適化に関する研究、構造工学論文集 Vol.46A, 2000.
- 3) 杉本・渡邊・齋藤：RC ラーメン高架橋の最適耐震設計・補強に関する研究、北海学園大学工学部研究報告集、第 28 号、2001.
- 4) 渡邊・杉本・朝日：補修費用を考慮した耐震設計に関する一考察、土木学会論文集 No.718/V-57, 81-93, 2002.
- 5) 土木学会：2002 年制定 コンクリート標準示方書 [耐震性能照査編]、丸善株式会社、2002.
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計編、丸善株式会社、1999.