

RCラーメン高架橋の耐震補強最適化に関する研究

Research on optimum seismic reinforcement of RC rigid-frame viaducts

杉本博之*, 渡辺忠朋**, 斎藤裕俊†

Hiroyuki Sugimoto, Tadatomo Watanabe & Hirotoshi Saitoh

- * 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)
 ** 北武コンサルタント株式会社 (〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通7丁目)
 † 北海学園大学工学研究科土木工学専攻 (〒064-0926 札幌市中央区南26条西11丁目)

Optimum reinforcement of existing reinforced concrete(RC) rigid-frame viaducts is studied. The design method applying the ultimate earthquake method was proposed by the authors already¹⁾. In the course of the discussion on the paper, several subjects have been pointed out. They are, the propriety of applying the design method based on Newmark's law, the possibility of using the nonlinear response spectrum diagram, the difference of the response character between the structure on the direct foundation and the structure on the pile foundation, how to relate the result of nonlinear dynamic analysis to the design improvement, and the propriety of the simplified reinforcement effect of the members. The purpose of this paper is to response to these subjects pointed out and to investigate the reinforcement design difference due to the foundation structure or the class of the ground. Several numerical examples are shown also.

Key words : optimum seismic reinforcement, RC rigid-frame viaducts, genetic algorithm, foundation structure

1. まえがき

新しい耐震設計の考え方^{1) 2)}に基づき, 鉄筋コンクリート(RC)高架橋の最適耐震補強に関して研究成果を発表してきた^{3) 4) 5) 6)}. その過程, およびその後の多数のディスカッションで多くのご指摘をいただいた。

それらを要約すると, (1)部材の補強効果の評価は, 限界たわみ角の改善のみであったが, そのモデル化は実際の実験結果を正しく反映しているか. (2)ニューマークのエネルギー一定則に基づく耐震設計法であるがその妥当性. (3)エネルギー一定則ではなく非線形応答スペクトル図の利用. (4)基礎構造の存在および基礎構造の種類の違いを考慮したらどうなるか. (5)非線形動的解析の結果を設計にどう使うか. などであった。

本研究は, これらの課題に対して検討した結果を発表することを目的としている. つまり, (1)に対しては, 部材のM- θ 関係を軟化領域を有するテトラリニアモデルとする. これに伴い弾塑性の解析プログラムも軟化領域の解析が可能なるように変更する. (2)(3)に対しては, JRで作成した降伏震度スペクトル図を用いる最適設計も試み, ニューマークのエネルギー一定則による設計と比較する. (4)同一上部構造でも, 直接基礎と杭基

礎をモデル化し, 両者の補強設計の違いを検討する. この過程で, 最適化手法を用いて杭基礎を簡単なモデルに変換する方法を説明する. (5)の動的解析に関しては, 得られた最適設計に対して非線形動的解析を行い, 結果が制約を満足するかどうかの検討を行った。

最適化問題は, 目的関数が材料費を含む総工費, 設計変数は, 補強箇所, 補強量であり, 材料としては, 鋼板, アラミド繊維, および炭素繊維を考えている. これらの変数は離散量であるので, 最適化手法としては, 遺伝的アルゴリズム^{7) 8)}を用いる。

2. 部材の補強効果と構造解析

文献3)では, 補強前も補強後も, 部材の曲げモーメントとたわみ角の関係は完全弾塑性を仮定し, 補強効果は限界たわみ角の改善のみと考えた。

しかし, 実際の実験結果を考慮すると, この関係は軟化領域を有するテトラリニアモデルのほうが妥当であるという結論に至る。

それで, 本研究では, 下記のような考え方の基づいて, 図-1に示すようなテトラリニアモデルで補強効果を評価することにした。

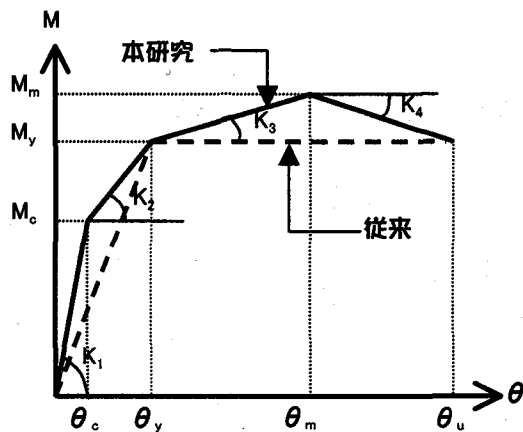


図-1 従来と本論文のM-θ関係

図中、cはひび割れ発生点、yは降伏点、mは最大荷重点、uは限界点に対応する。

このモデル化は、RC部材の水平交番荷重実験結果をもとに、部材のひび割れ、降伏を部材の剛性変化点とし、かつ最大耐力(Mm)に達したのちに水平抵抗を失って行く過程をモデル化したものである¹²⁾。

鋼板巻き補強、繊維シート巻付け補強部材の水平交番荷重実験結果によると、補強部材もRC部材と概ね同様の挙動を示すことから、本論文では、部材の材端の曲げモーメントとたわみ角の関係にこのモデルが適用できるものと考えた。

なお、各補強工法の限界回転角は、既往の靱性率算定手法^{9) 10) 11)}を用いて次式で算定した。

$$\theta = \delta_y \cdot \mu / L \quad (1)$$

ここで、 δ_y は降伏変位、 μ は靱性率、Lはせん断スパンである。

軟化領域のあるテトラリニアモデルの部材から構成される構造の弾塑性解析を簡単に説明すると以下のようになる。

計算の目的は、特定の荷重載荷点に作用する水平荷重(P)と、やはり特定の着目点(荷重載荷点と異なることもある)の水平変位(δ)の関係を出すことにある。

部材の塑性化は部材端部のみにおいて進行する¹³⁾とし、部材の中間部の塑性化はないとする。各部材、各端部毎に図-1に示されるテトラリニアの関係を有する回転ばねで各点に結合するとする。回転ばねの剛性が、作用曲げモーメントの値の増加に対応して、 $K_1 \rightarrow K_2 \rightarrow K_3 \rightarrow K_4$ へと変わるものとする。

ある段階(k)における全体剛性マトリクスを $\{K\}^{(k)}$ とすると、どこかの回転ばねの剛性が次の段階に移るまでの間は線形関係にあるので、次の剛性方程式を解く。

$$\{K\}^{(k)} \{X\} = \{p\} \quad (2)$$

ここで、 $\{p\}$ は荷重ベクトルで、荷重載荷点に対応する自由度に値1、他はすべて値0のベクトルである。この方程式を解き、着目点の水平変位 u_0 、各回転ばねの回転角 $\{\theta\}$ を計算する。 $\{\theta\}$ は次式である。

$$\{\theta\} = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots\} \quad (3)$$

図-1の θ には正負ありうるので、それぞれの状態に応じた変曲点までの余裕たわみ角を求める。つまり、回転剛性 K_2 を用いている時は、部材iの θ_y が目標たわみ角 θ_i^t となり、 θ_i^t までの余裕量が余裕たわみ角になる。正の余裕たわみ角を θ_i^{max} 、負の余裕たわみ角を θ_i^{min} とすると、それぞれの回転ばねが目標たわみ角に達する荷重増分量 ΔP_i は次式で計算できる。

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= \theta_i^{max} / \theta_i : \theta_i \cdot u_0 > 0 \\ \Delta P_i &= \theta_i^{min} / \theta_i : \theta_i \cdot u_0 < 0 \end{aligned} \quad (4)$$

以上より、最初にどこかの回転ばねが目標たわみ角に達する水平荷重の増分量 $\Delta u^{(k)}$ は、次式で求まる。

$$\Delta u^{(k)} = \min(u_0 \cdot \Delta P_i) \quad (5)$$

この $\Delta u^{(k)}$ に対応する ΔP_i が荷重増分量になる。ここで、

$$\begin{aligned} \theta_i^{max} &= \theta_i^t - \theta_i^0 \\ \theta_i^{min} &= -\theta_i^t - \theta_i^0 \end{aligned} \quad (6)$$

である。

ここで、 θ_i^t は回転ばねiの現段階における目標たわみ角、 θ_i^0 は段階(k-1)までに回転ばねiに蓄積されたたわみ角である。

式(5)を用いて水平変位量を1次的に求めることにより変位制御の解析が可能になり、軟化領域を有する部材から構成される構造物の解析が可能になる。

3. 耐震性の評価

本研究の耐震性の評価は、エネルギー一定則に基づく方法³⁾と降伏震度スペクトル図²⁾を用いる方法の2つを検討した。

軟化する部材を含む構造の、水平荷重と対応する水平変位の関係は図-2のようになる。Yは、どこかの回転ばねが最初に降伏たわみ角に達する点、 δ_y はそのときの水平変位、P₀は設計水平荷重、Mは最大荷重を与える点、Uはどこかの回転ばねが最初に限界たわみ角に達する点、 δ_u はそのときの水平変位である。

エネルギー一定則に基づく場合の耐震性評価は、文献3)と基本的には同じで、

$$\Delta OEB - E_N = 0 \quad (7)$$

ここで、 ΔOEB は構造物が弾的に挙動すると仮定した場合のひずみエネルギーで、次式で計算される。

$$\Delta OEB = P_e \cdot \delta_e / 2 = K_{hc} \cdot W \cdot \delta_e / 2 \quad (8)$$

K_{hc} は設計水平震度、 W は当該構造物が支持している上載構造物の総重量と構造躯体の重量である。 E_N は多角形OYMAの面積である。安全係数の概念は入れないで検討している。

一方、地震動に対する1自由度系の最大応答を、縦軸に降伏震度を取り、塑性率ごとに固有周期と降伏震度の関係を図化したものを降伏震度スペクトルという²⁾。この降伏震度スペクトル図²⁾を用いる耐震性評価は以下のように行った。

地盤条件 G_1 (岩盤)、 G_2 (洪積層)に対するスペクトル図を図-3、および図-4に示した。図で、降伏震度(K_y)は次式で計算される値である。 W は上記の定義と同じである。

$$K_y = P_y / W \quad (9)$$

また、図中の数値(1~10)は応答塑性率(μ_r)である。応答塑性率の値は、固有周期 T と降伏震度 K_y を与えて内挿して求めた。設計靱性率(μ_d)を、

$$\mu_d = \delta_u / \delta_y \quad (10)$$

と定義すると、この場合の耐震性の評価は、

$$\mu_r - \mu_d \leq 0 \quad (11)$$

で行った。

4. 補強最適化問題の定式化と説明

本研究の補強最適化問題は、目的関数は材料費を含む総補強工費、制約条件は、式(7)あるいは式(11)で表現される耐震性の評価、および各部材の剪断耐力に関する条件を考慮している。

エネルギー一定則による耐震性の評価を用いる場合は、大規模地震動に対する水平耐力(降伏耐力)の照査のみ行うことにする。なお、本研究における大規模地震動は、兵庫県南部地震以降の鉄道構造物の耐震設計に用いられている地震動を用いることとした。

また、部材端部のたわみ角の制約、塑性ヒンジによる崩壊機構形成の保証に関する条件³⁾は、前者は構造解析の過程で、後者は各補強に対する補強効果を計算すると

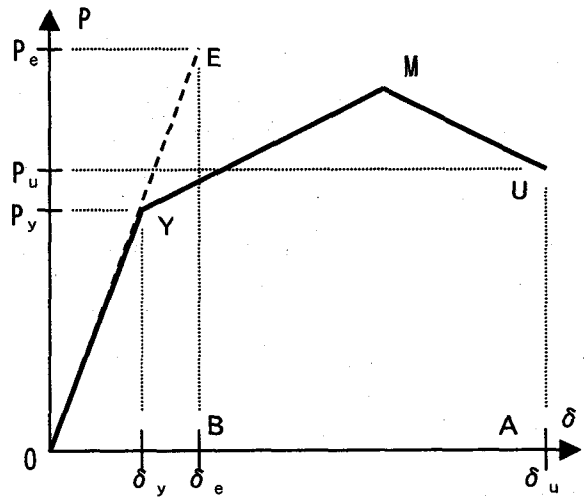


図-2 軟化する部材を含む構造のP-δ関係

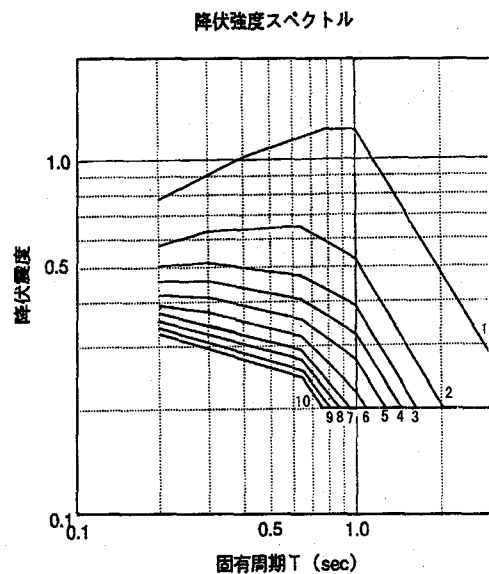


図-3 地盤 G_1 の降伏震度スペクトル図

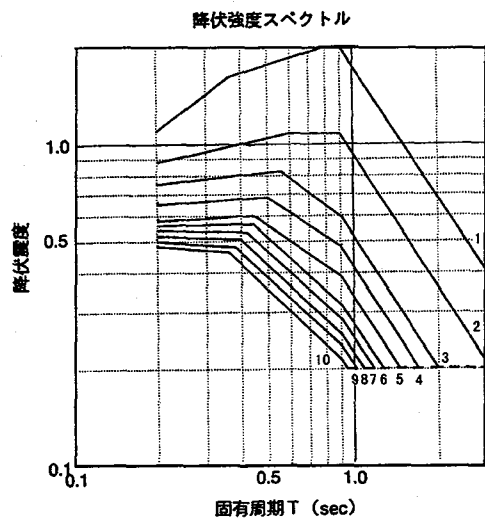


図-4 地盤 G_2 の降伏震度スペクトル図

きに考慮されているので、制約条件には含めなかった。

設計変数は、鋼板であれば板厚が変数となる。繊維補強であれば、各部材ごとに剪断補強、および部材両端の靱性補強のためのシート厚さと巻き数の組み合わせが設計変数になる。

材料費を含む総補強工費で定義される目的関数、鋼板、アラミド繊維、および炭素繊維の詳細、および設計変数の和の算定式等は、文献3)と同じであるのでここでは省略する。

結局、本研究の最適化問題は以下のように定義される。

・目的関数 : $C \rightarrow \min$ (12)

・制約条件 :
エネルギー一定則による耐震性評価の場合 ;
 $g_1 = \Delta OEB - E_N \leq 0$ (13)

降伏震度スペクトル図による耐震性評価の場合 ;
 $g_1 = \mu_r - \mu_d \leq 0$ (14)

剪断耐力に関する条件 ;
 $g = V_i - V_i^u \leq 0 \quad (i = 1 \sim n)$ (15)

ここで、 n は補強の対象となる部材数、 V_i^u 、および V_i はそれぞれ部材 i の剪断耐力、および終局時の作用剪断力である。

・設計変数 : 鋼板巻きと繊維巻きの場合でそれぞれ次のように定義される。

鋼板巻きの場合

$$\{I\} = \{I_1, I_2, \dots, I_n\} \quad (16)$$

これらの変数の値は、表-1に示す4種類の補強レベルから選択される。補強レベルは、図-5に示す鋼板の板厚 t_s である。

繊維巻きの場合

$$\{I\} = \{I_1, I_2, \dots, I_{3n}\} \quad (17)$$

繊維巻きの場合は、図-6に示すように1部材につき3つの変数(i_0, i_1, i_2)があるので変数の総数は $3n$ になる。これらの変数の値は、繊維のシート厚さと巻き数の異なる16種類の組み合わせ(表-2, 3に示す)を用意し、その中から選ばれることになる。

結局本研究の最適化問題は、式(13)あるいは式(14)、および式(15)を満足し、式(12)を最小化する設計変数式(16)あるいは式(17)の決定と定義される。

設計変数は、すべて離散量であるので、この最適化問題の解法には遺伝的アルゴリズム(GA)⁸⁾を用いる。

なお、これらの設計変数による補強効果は、部材端部の回転剛性のみにも貢献し、部材自身の弾性剛性は変わらないものとしている。

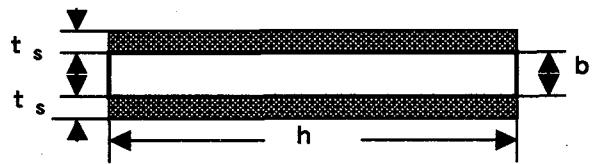


図-5 鋼板による補強 (塗りつぶし部)

表-1 鋼板のデータ

| レベル | 板厚 (mm) | A_{sf}/S_{sf} (cm ² /cm) |
|------------------------------|---------|---------------------------------------|
| 1 | 0 | 0 |
| 2 | 6 | 1.2 |
| 3 | 9 | 1.8 |
| 4 | 12 | 2.4 |
| 引張り強度 : 240N/mm ² | | |

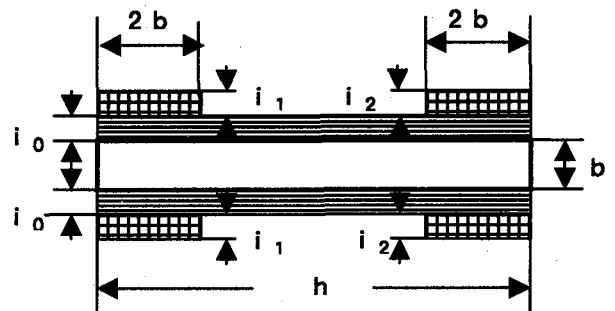


図-6 繊維補強 (全面的剪断補強と端部の靱性補強)

5. 杭基礎のモデル化

本研究では、基礎構造も考慮した耐震補強最適化を目標としている。直接基礎のみでなく、図-7に示すような杭基礎も検討の対象としている。なお、図では、杭に結合している水平ばねおよび垂直ばねは等価な梁に置換して示している。

杭基礎を考慮すると図に示すように節点数が増え、1解析の計算時間が数倍増えることになる。最適化の過程では、多くの構造解析を要するので、同じ解が得られるのであれば1解析の計算時間は短いほうが良い。本研究では、基礎構造は弾性、線形と考えているが、弾性、線形の範囲であれば、杭基礎頭部の変位を一致させることにより力学的にまったく等価なかつ簡単なモデルに置換することができる。それらを以下に説明する。

まず、図-8に示すように、杭基礎を取り出し頭部に3方向の単位荷重(H, V, M)をそれぞれ載荷して解析を行う。得られた頭部の変位を、それぞれ $\delta_h, \theta_h, \delta_v, \delta_m, \theta_m$ とする。

置換する構造モデルの形式は、頭部の変位が完全に合うものであれば任意である。ここではいくつか試行した結果、図-9に示す4部材、5節点の左右対称構造とした。やはり杭の解析と同様に頭部に3方向の単位荷重($H, V,$

表-2 炭素繊維のデータ

| レベル | 巻き数の組合せ | | Acf/Scf (cm ² /cm) |
|-----|---------|---------|----------------------------------|
| | 0.111mm | 0.167mm | |
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 0.0222 |
| 3 | 2 | 0 | 0.0444 |
| 4 | 0 | 2 | 0.0666 |
| 5 | 1 | 2 | 0.0888 |
| 6 | 2 | 2 | 0.111 |
| 7 | 0 | 4 | 0.1332 |
| 8 | 1 | 4 | 0.1554 |
| 9 | 2 | 4 | 0.1776 |
| 10 | 0 | 6 | 0.1998 |
| 11 | 1 | 6 | 0.222 |
| 12 | 2 | 6 | 0.2442 |
| 13 | 0 | 8 | 0.2664 |
| 14 | 1 | 8 | 0.2886 |
| 15 | 2 | 8 | 0.3108 |
| 16 | 0 | 10 | 0.333 |

引張り強度: 3000N/mm²

表-3 アラミド繊維のデータ

| レベル | 巻き数の組合せ | | | Aaf/Saf (cm ² /cm) |
|-----|---------|---------|---------|----------------------------------|
| | 0.168mm | 0.252mm | 0.378mm | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 0.0756 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 0.126 |
| 4 | 0 | 0 | 2 | 0.1512 |
| 5 | 1 | 0 | 2 | 0.1848 |
| 6 | 0 | 1 | 2 | 0.2016 |
| 7 | 0 | 0 | 3 | 0.2268 |
| 8 | 1 | 0 | 3 | 0.2604 |
| 9 | 0 | 1 | 3 | 0.2772 |
| 10 | 0 | 0 | 4 | 0.3024 |
| 11 | 1 | 0 | 4 | 0.336 |
| 12 | 0 | 1 | 4 | 0.3528 |
| 13 | 0 | 0 | 5 | 0.378 |
| 14 | 1 | 0 | 5 | 0.4116 |
| 15 | 0 | 1 | 5 | 0.4284 |
| 16 | 0 | 0 | 6 | 0.4536 |

引張り強度: 2400N/mm²

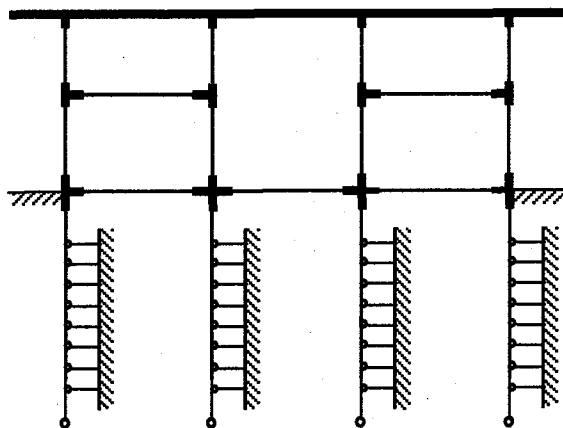


図-7 杭基礎と上部構造物

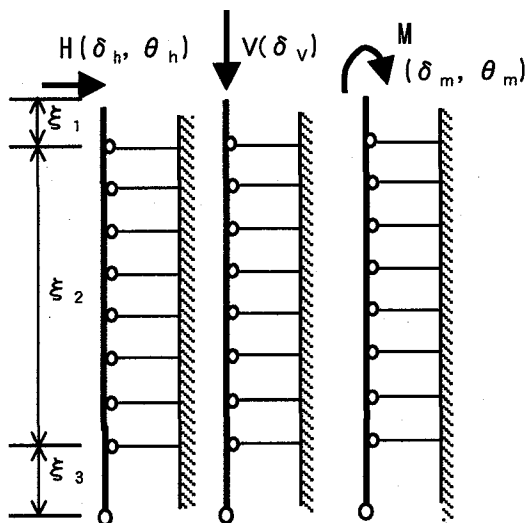


図-8 3方向の荷重に対する杭の解析

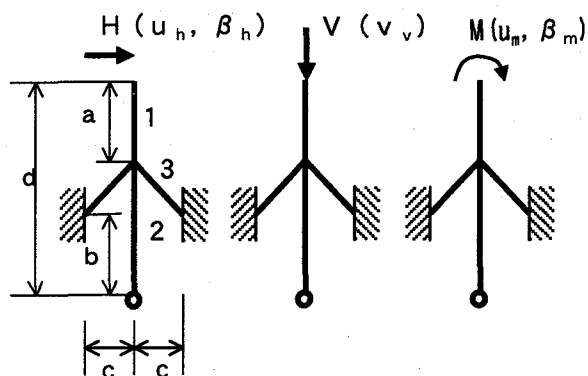


図-9 3方向の荷重に対する杭モデルの解析

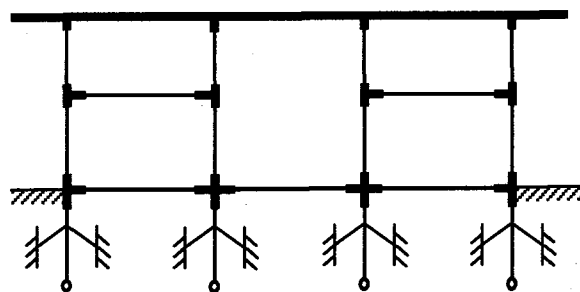


図-10 杭基礎モデルと上部構造

M)をそれぞれ載荷する。対応する変位をそれぞれ u_h , β_h , v_v , u_m , β_m とすると、この問題は以下のように最適化問題として定義できる。

$$\text{目的関数} : O = \{(u_h - \delta_h)^2 + (\beta_h - \theta_h)^2 + (v_v - \delta_v)^2 + (\beta_m - \theta_m)^2\}^{1/2} \rightarrow \min \quad (18)$$

$$\text{設計変数} : \{X\} = \{A_1, l_1, A_2, l_2, A_3, l_3\} \quad (19)$$

ここで、 A_i , l_i ($i=1\sim 3$)は、それぞれ i 部材の断面積、断面2次モーメントである。

式(18)で、モーメントが作用した場合の水平変位 u_m を無視しているのは、相反定理により水平荷重が作用した場合のたわみ角 β_h と等しいからである。

この計算は、設計変数が連続量で無制約の最適化問題となるので、ADS¹⁴⁾の可変計量法により解を求めた。数値計算の詳細は省略するが、式(18)の目的関数の値を0にする解を得ることができ、図-7の構造系を図-10の構造系で置換することができた。当然であるが、上部構造の部材にテトラリニアの関係を用いる両方の全体構造の弾塑性解析の結果は完全に一致する。

6. 非線形動的解析の概要

動的解析には、図-11に示すばねマスモデルを用いた。補強部材の非線形特性は、2.で示したように部材端部の曲げモーメントとたわみ角の関係で考慮することとし、軟化領域を考慮したモデルを用いた。なお、復元力特性には、剛性低減型を用いた。

設計入力地震動は、非線形スペクトルとの整合を図るために該当する地盤の地表面波形(G2波)²⁾を用い、基礎部分に直接入力する方法を用いた。設計入力地震動の弾性応答スペクトルを図-12に示す。この地震動は、兵庫県南部地震以降の鉄道構造物の設計に適用されている内陸型地震を想定した設計用地震動であり、構造物の耐用期間中に稀に発生する規模の地震動(大規模地震)に相当する地震動である。

なお、動的解析は、杭基礎を有した高架橋の、鋼板巻き補強およびアラミド繊維補強に対して得られた最適解(図-4の降伏震度スペクトル図による照査の杭基礎の欄に示されている設計)に対して実施し、最適解の正当性を照査することを目的として実施した。

7. 数値計算例

数値計算例として、JRの山陽新幹線に用いられている2層構造のRCラーメン高架橋^{3) 15)}の橋軸方向を例にとり説明する。

図-13は直接基礎の場合、図-14は杭基礎の場合の構造図である。杭基礎は鉄筋コンクリート製であり、断面積は 1.131m^2 、断面2次モーメントは 0.1018m^4 である。

杭基礎の場合が実際の構造物であるが、無補強時には、柱および中間梁が剪断破壊を生じる破壊形態を有しており、本研究の対象として妥当と考えて選ばれたものである。

これらの計算例において、骨組構造の隅角部に該当する部分は剛域と定義し、取り付け部材の断面寸法の4倍の値の断面寸法を設定して計算している¹⁶⁾。

7.1 静的弾塑性解析に基づく最適設計

数値計算は、直接基礎、杭基礎双方に対し、エネルギー一定則に基づく照査法と、降伏震度スペクトル図による照査法を適用し、結果を検討した。

構造物の総重量 W は4690kN、エネルギー一定則による場合、設計水平震度は1.5である。スペクトル図を用いる場合は、直接基礎に対しては地盤 G_1 (図-3)、杭基礎に対しては、地盤 G_2 (図-4)に対応する図を用いている。

最適設計の結果を表-4に示した。

表には、左から設計変数番号、各設計変数にリンクされている部材番号、補強箇所が示され、続いてエネルギー一定則による照査、降伏震度スペクトル図による照査に基づく最適設計の結果が示されている。補強箇所の欄の「全体」は、部材全長に巻く剪断補強、「上」「下」はそれぞれ部材端部の長さ $2b$ (図-6)に巻く靱性補強を意味する。最適設計の結果は左に直接基礎、右に杭基礎の結果が示され、それぞれ鋼板、炭素繊維、およびアラミド繊維の順で示されている。また、表の下には、目的関数の値(単位:ユニット)、エネルギー一定則により評価を行う場合には式(7)と式(8)に関する値、降伏震度スペクトル図により評価を行う場合には、式(9)~式(11)の固有周期、降伏震度、応答塑性率、及び設計靱性率の値を示している。

シート巻き補強の場合の最適設計の結果は、剪断補強、靱性補強に対応する値の他に、部材両端部に関しては、両者を加えた値(図-6参照)を括弧書きで示している。

実際には括弧書きの数字が各場所ごとに補強される量に対応する。例えば、基礎構造が直接基礎で、炭素繊維で補強する場合は、すべての部材をレベル3、つまり表-2を参考にすると0.111mmのシートを2層巻くことになる。

数値計算結果の最適性を検討すると以下ようになる。

エネルギー一定則による照査法による最適設計で、アラミド繊維を使う直接基礎と杭基礎の場合は、結果にほとんど差がないように見られる。しかし、杭基礎の結果を直接基礎に適用すると式(13)を満足せず、逆に直接基礎の結果を杭基礎に適用すると今度は式(14)を満足しないことになる。また、降伏震度スペクトル図による照査法による結果で、杭基礎の炭素繊維を使う場合において、設計変数番号5の剪断補強レベルは2であるが、靱性補強レベルの値は13とかかなり大きくなっている。例えばその部材の剪断補強レベルを1にすると、目的関数の値は

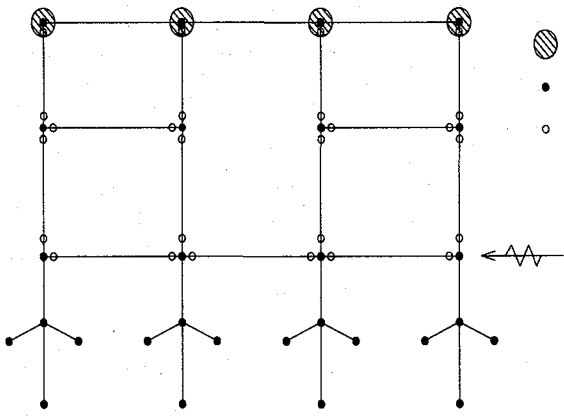


図-11 動的解析のためのばねマスモデル

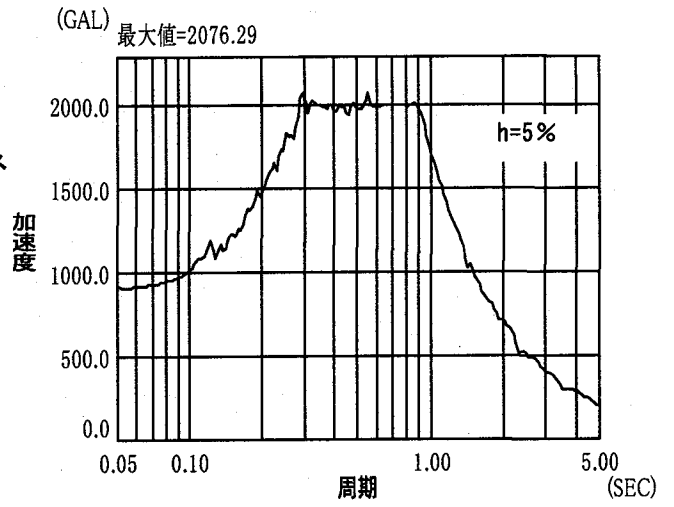


図-12 設計入力地震動の弾性応答スペクトル

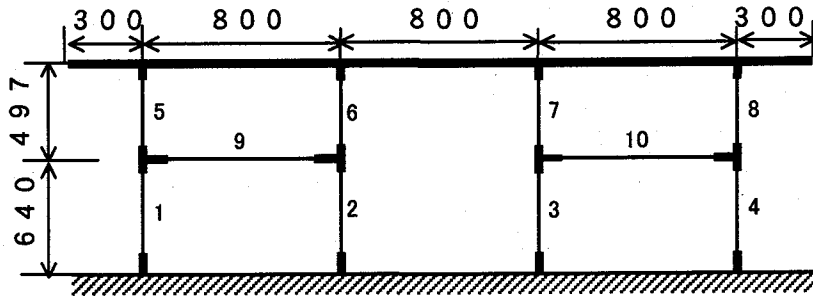


図-13 直接基礎とラーメン高架橋

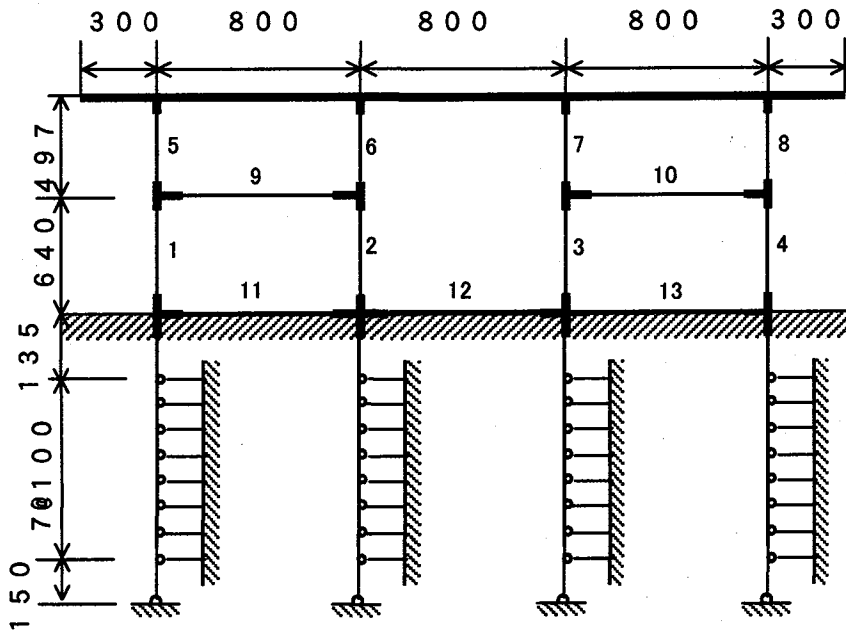


図-14 杭基礎とラーメン高架橋

表-4 静的弾塑性解析に基づく最適設計の結果

| 設計変数 | リンク部材番号 | 補強箇所 | エネルギー一定則による照査 | | | | | | 降伏震度スペクトル図による照査 | | | | | | |
|---------------------------------|------------|------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|-------|-------|----------|---------|-------|---|
| | | | 直接基礎 | | | 杭基礎 | | | 直接基礎 (G1) | | | 杭基礎 (G2) | | | |
| | | | 鋼板 | 炭素 | アラミド | 鋼板 | 炭素 | アラミド | 鋼板 | 炭素 | アラミド | 鋼板 | 炭素 | アラミド | |
| 1 | 1, 4 | 上 | 2 | 1 (3) | 2 (4) | 2 | 1 (3) | 1 (2) | 2 | 1 (3) | 1 (2) | 2 | 1 (3) | 1 (2) | |
| | | 全体 | | 3 | 2 | | 3 | 2 | | 3 | 2 | | 3 | 2 | |
| | | 下 | | 1 (3) | 1 (2) | | 7 (9) | 1 (2) | | 1 (3) | 1 (2) | | 10 (12) | 3 (6) | |
| 2 | 2, 3 | 上 | 2 | 1 (3) | 2 (4) | 2 | 1 (3) | 1 (3) | 2 | 1 (3) | 1 (2) | 2 | 1 (3) | 1 (4) | |
| | | 全体 | | 3 | 2 | | 3 | 3 | | 3 | 2 | | 3 | 4 | |
| | | 下 | | 1 (3) | 1 (2) | | 4 (6) | 1 (3) | | 1 (3) | 1 (2) | | 10 (12) | 1 (4) | |
| 3 | 5, 8 | 上 | 2 | 1 (3) | 1 (2) | 2 | 1 (7) | 1 (2) | 2 | 1 (3) | 1 (2) | 2 | 13 (15) | 6 (9) | |
| | | 全体 | | 3 | 2 | | 7 | 2 | | 3 | 2 | | 3 | 2 | |
| | | 下 | | 1 (3) | 1 (2) | | 1 (7) | 1 (2) | | 1 (3) | 1 (2) | | 1 (3) | 1 (2) | |
| 4 | 6, 7 | 上 | 2 | 1 (3) | 1 (2) | 2 | 1 (7) | 1 (3) | 2 | 1 (3) | 1 (2) | 2 | 13 (15) | 1 (5) | |
| | | 全体 | | 3 | 2 | | 7 | 3 | | 3 | 2 | | 3 | 5 | |
| | | 下 | | 1 (3) | 1 (2) | | 1 (7) | 1 (3) | | 1 (3) | 1 (2) | | 1 (3) | 1 (5) | |
| 5 | 9, 10 | 上 | 2 | 1 (3) | 1 (2) | 2 | 5 (8) | 1 (3) | 2 | 1 (3) | 1 (3) | 2 | 13 (14) | 1 (7) | |
| | | 全体 | | 3 | 2 | | 4 | 3 | | 3 | 3 | | 2 | 2 | 7 |
| | | 下 | | 1 (3) | 1 (2) | | 4 (7) | 1 (3) | | 1 (3) | 1 (3) | | 13 (14) | 1 (7) | |
| 6 | 11, 12, 13 | 上 | - | - | - | 1 | 1 | 1 | - | - | - | 1 | 1 | 1 | |
| | | 全体 | | - | - | | 1 | 1 | | - | - | | 1 | 1 | |
| | | 下 | | - | - | | 1 | 1 | | - | - | | 1 | 1 | |
| 目的関数 | | | 14640 | 8398 | 8130 | 14640 | 15490 | 8841 | 14640 | 8398 | 7868 | 14640 | 20430 | 12120 | |
| $P_e \cdot \delta_e / 2$ (kN·m) | | | 207 | 270 | 275 | 393 | 433 | 456 | | | | | | | |
| E_N (kN·m) | | | 871 | 271 | 377 | 897 | 436 | 474 | | | | | | | |
| 固有周期 | | | | | | | | | 0.397 | 0.454 | 0.457 | 0.548 | 0.575 | 0.582 | |
| 設計震度 | | | | | | | | | 0.587 | 0.548 | 0.551 | 0.557 | 0.520 | 0.527 | |
| 応答塑性率 | | | | | | | | | 4.909 | 2.619 | 2.600 | 3.853 | 4.912 | 4.824 | |
| 設計靱性率 | | | | | | | | | 10.22 | 3.312 | 2.601 | 6.179 | 4.993 | 4.830 | |

表-5 非線形動的解析による照査結果

| 着目部材 | 鋼板巻き補強 | | | アラミド繊維補強 | | |
|-------|---------------------|------------------|-----------------------------------|---------------------|------------------|-----------------------------------|
| | θ_{rd} (rad) | θ_d (rad) | $\gamma_i \theta_d / \theta_{rd}$ | θ_{rd} (rad) | θ_d (rad) | $\gamma_i \theta_d / \theta_{rd}$ |
| 1(上端) | 2.28E-02 | 1.96E-03 | 0.09 | 1.16E-02 | 4.26E-03 | 0.37 |
| 1(下端) | 2.78E-02 | 1.03E-02 | 0.37 | 2.05E-02 | 1.93E-02 | 0.94 |
| 2(上端) | 2.05E-02 | 1.75E-03 | 0.09 | 1.18E-02 | 3.99E-03 | 0.34 |
| 2(下端) | 3.00E-02 | 1.10E-02 | 0.37 | 2.08E-02 | 2.01E-02 | 0.97 |
| 5(上端) | 2.57E-02 | 8.83E-03 | 0.34 | 2.05E-02 | 1.48E-02 | 0.72 |
| 5(下端) | 1.91E-02 | 1.03E-03 | 0.05 | 1.17E-02 | 1.74E-03 | 0.15 |
| 6(上端) | 2.85E-02 | 9.68E-03 | 0.34 | 2.07E-02 | 1.58E-02 | 0.76 |
| 6(下端) | 1.60E-02 | 8.70E-04 | 0.05 | 8.73E-03 | 1.31E-03 | 0.15 |
| 9(左端) | 3.30E-02 | 1.07E-02 | 0.32 | 2.32E-02 | 1.77E-02 | 0.76 |
| 9(右端) | 3.30E-02 | 9.64E-03 | 0.29 | 2.32E-02 | 1.59E-02 | 0.69 |

18700 と下がり制約条件 (14) は満足するが部材 9, 10 の剪断抵抗に関する制約条件式 (15) は満足しない。また、今度は剪断補強レベルを 13 とし、靱性補強レベルを 1 とすると、今度はすべての制約条件式は満足するが目的関数の値は 21700 となる。12 まで下げると式 (14), 及び式 (15) の制約条件を満足しない。

一部ではあるが、最適性に関する説明を加えた。

さて、これらの計算結果に対し、照査法(エネルギー一定則による照査と降伏震度スペクトル図による照査)による最適設計の差、基礎構造(直接基礎と杭基礎)による最適設計の差、及び補強工法(鋼板、炭素繊維、アラミド繊維)による最適設計の差をそれぞれ説明する。

- ・照査法による差：直接基礎の場合はほとんど差がないが、杭基礎の場合は大きな差が現れている。特に繊維シートを用いる補強工法の場合、降伏震度スペクトル図による最適設計の設計変数番号 3～5 (上層柱と中間梁) の補強レベルが、エネルギー一定則による最適設計の 2 倍前後の値になっている。

- ・基礎構造による差：基礎構造による差は明らかで、杭基礎の方が大きな補強レベルを要求している。特に、繊維シートを用いる補強工法の場合、下層よりは上層の柱及び中間梁に差が大きく、特に降伏震度スペクトル図による最適設計では、杭基礎のそれらの部材は直接基礎の場合の 4 倍から 5 倍の剪断補強レベルが要求されている。

- ・補強工法による差：補強工法による差を検討するためには、目的関数³⁾を見る必要がある。直接基礎では、鋼板巻き立て工法が他に比べて目的関数の値は大きい。これは、鋼板の場合、得られた最適設計は剪断強度を確保するための最小値で決まっており、式 (13) あるいは式 (14) に関してはかなり余裕のある結果になっているからである。

また、炭素繊維とアラミド繊維の差はほとんどない。しかし、杭基礎になると、降伏震度スペクトル図による結果に示されているように、繊維シートによる補強工法の優位性は必ずしも顕著ではなくなる。この点に関しては、今後さらに検討が必要と思われるが、今回の計算範囲(G2 レベルまで)では、アラミド繊維による目的関数の値が最小であるという表現に止める。

7. 2 非線形動的解析による照査

非線形動的解析による照査は、前記の最適解のうち、降伏震度スペクトル図による設計の中で、杭基礎で鋼板巻きとアラミド繊維巻きの場合を行った。

これらは、表-4 の最下欄の応答塑性率と設計靱性率の関係に示されているように、鋼板巻きたてが余裕のある設計(応答塑性率が 3. 853 に対し設計靱性率が 6. 179) であるのに対し、アラミド繊維の場合は、式 (14) の耐震性評価がクリティカル(応答塑性率が 4. 824 に対し設計靱性率が 4. 830) となった設計である。各節点の限界た

わみ角との定量的な関係の他に、これらの相対的な関係が非線形動的解析でどう現れるのかも関心があった。

非線形動的解析による安全性の照査は、上記のように次式を用いて行った。

$$\gamma_i \cdot \theta_{d,i} / \theta_{r,d,i} \leq 1.0 \quad (20)$$

ここで、 γ_i は構造物係数 (1.0)、 $\theta_{d,i}$ は最大応答たわみ角、および $\theta_{r,d,i}$ は補強部材の限界たわみ角である。

非線形動的解析のための構造モデル(ばねマスモデル)を図-11 に、照査結果を表-5 に示す。

まず、限界たわみ角との関係では、静的弾塑性解析に基づく最適設計は動的解析でも制限式 (29) を犯すことはなかった。また、鋼板巻きたては数値的にかなり余裕があり(許容値に対する比が最大で 0.37)、一方、アラミド繊維の方は、部材 1, 2 の下端のように限界値に近い(0.94 及び 0.97) 結果が得られている。

一例であるが、この結果に関しては、静的弾塑性解析による照査を満足した最適設計は非線形動的解析で照査してもたわみ角の条件を満足し、かつ定性的な傾向は一致したことになる。

8. あとがき

文献 3)～5) の発表後の種々の議論を受け、その後の研究成果をまとめた。主要な点は以下のように要約される。

- (1) 部材の補強効果を、従来の完全弾塑性のバイリニアから、実験結果を考慮してテトラリニアに変えた。
- (2) 静的弾塑性解析による耐震性の評価をエネルギー一定則に加えて降伏震度スペクトル図を用いた。
- (3) 基礎構造を考慮し、直接基礎と杭基礎を検討した。
- (4) 非線形動的解析による照査を試みた。
- (5) 数値計算例により、基礎構造の種類、あるいは耐震性の評価法が補強設計に与える影響を検討した。
- (6) 動的解析による最適設計の照査を行った。

本研究の目的は、まず、静的弾塑性解析による照査法を利用して最適設計法を適用し、既存の RC 構造物の補強設計を得ることにある。次に、非線形動的解析による照査が要求される場合には、得られた設計を 1 次設計として照査し、定められている照査式を満足するかどうかの検討を行う。満足していれば 1 次設計を最終設計とすることができる。満足していなければ、満足していない程度と内容に応じて最適化問題を改良して、以上の過程を繰り返すことになる⁶⁾。そのために、上記の (1)～(6) を取り入れ従来の設計システム³⁾ の改良を試みた。

本論文の数値計算より得られた事項を簡単にまとめると以下ようになる。

2 層ラーメン構造を計算例として、上部構造が同じで基礎構造が異なる構造物を比較した結果、当然であるが杭基礎の方が補強レベルは高かった。

また、1層目の柱の補強レベルは静的弾塑性解析法あるいは基礎構造の種類によって大きな変化はなかったのに対し、2層目の柱及び中間梁の補強レベルに大きな差が現れた。つまり、直接基礎よりは杭基礎の方が、またエネルギー一定則による照査よりは、降伏震度スペクトル図による照査による最適設計の方がかなり大きな補強レベルを与えた。

補強工法については、今回の計算の範囲(G2まで)では、鋼板巻きたてよりは、繊維シートによる補強の方に経済的な優位性が見られた。さらに、炭素繊維とアラミド繊維では、直接基礎では差はほとんどないが、杭基礎でアラミド繊維の方に経済的な優位性が現れた。

静的弾塑性解析による最適設計を非線形動的解析により照査した。今回の計算では、たわみ角に関する制約条件をすべて満足し、かつ静的弾塑性解析における定性的関係が非線形動的解析でも得られた。

但し、以上の数値計算に関わる考察は、本論文の計算例のみから得られたものであり、より一般的な議論のためには、より多くの計算例が必要と考える。

謝辞

本研究の実施において、文部省平成11年度私立大学学術フロンティア推進拠点事業(積雪寒冷地における災害に強い都市環境モジュールの開発とシステム構築)の援助を受けた。未筆ではあるが記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 丸善株式会社, 1997.
- 2) 鉄道総合技術研究所編:新設建造物の当面の耐震設計に関する参考資料, 1996.
- 3) 杉本・渡辺・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, pp.423-432, 1999.
- 4) 渡辺・杉本・斎藤・満尾:RCラーメン橋脚の補強

最適化に関する一考察, 土木学会北海道支部論文報告集, 第55号(A), pp.294-299, 1999.

- 5) H. Sugimoto, T. Watanabe & J. Mitsuo: Research on Optimum Reinforcement of Reinforced Concrete Rigid-Frame Bridges Based on Ultimate Resistance Method, Optimization in Industry, Banff, 1999.
- 6) 斎藤・渡辺・杉本・満尾:弾塑性挙動を考慮する建造物の耐震補強・設計最適化支援システムについて, 土木学会第54回年講概要集1-A, pp.246-247, 1999.
- 7) 古田・杉本:遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用, 森北出版, 1997.
- 8) 杉本博之・Lu Bianli:工業最適設計のための汎用GAプログラムについて, 北海学園大学学園論集, 第96・97号, pp.81-105, 1998
- 9) 瀧口, 渡辺, 西川:鋼板巻き補強されたRC部材の変形性能について,「コンクリート系建造物の耐震技術」に関するシンポジウム論文報告集, 1997.
- 10) (財)鉄道総合技術研究所:炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針, 1996.
- 11) (財)鉄道総合技術研究所:アラミド繊維補強による鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針, 1996.
- 12) 瀧口, 渡辺, 佐藤:RC部材の変形性能評価, 鉄道総研報告, Vol13, No4, 1999.4
- 13) 杉本博之・岸徳光・又坂一弘:半剛性連結部を有する骨組建造物の最小重量設計について, 土木学会北海道支部論文報告集第47号, pp.59-64, 1991.
- 14) G. N. Vanderplaats & H. Sugimoto:A GENERAL-PURPOSE OPTIMIZATION PROGRAM FOR ENGINEERING DESIGN, Computers & Structures, Vol. 24, No. 1, pp. 13-21, 1986.
- 15) (財)鉄道総合技術研究所:兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書, 鉄道総研報告 特別第4号, 1996.
- 16) 杉本・斎藤・渡辺:RCラーメン建造物の解析における剛域寸法の影響について, 土木学会北海道支部論文報告集第56号, 2000.

(1999年9月17日受付)