

水平荷重の増加のための 橋脚補強最適化に関する一考察

RESEARCH ON OPTIMUM REINFORCEMENT OF BRIDGE PIER FOR HORIZONTAL LOAD INCREASE

杉本博之*、満尾淳**、鹿汴麗*
Hiroyuki SUGIMOTO, Jun MITSUO and LU Bianli

*工博 北海学園大学教授 工学部土木工学科 (〒064 札幌市中央区南26条西11丁目)
** 東急建設株式会社 施工本部土木設計部 (〒150 東京都渋谷区渋谷1丁目)
+工博 ㈱シー・イー・サービス 構造設計課 (〒062 札幌市豊平区西岡2条8丁目)

The purpose of this study is, under the condition that the horizontal design load is increased, to study the possibility of reinforcement method that increase the strength of the structure corresponding to the load increase, and also put the reaction increase due to reinforcement within the strength in reserve of the foundations of the structure. This problem is formulated as the optimization problem and is solved by Genetic Algorithms. Design variables are the amount of member reinforcement. Two objective functions are taken care of, one is minimum reinforcement and another is minimum reaction increase. In this study, the behavior of the design variables of which sensitivity to objective function are very small is also studied. Several numerical examples are shown and important remarks are gained.

Key words : pier reinforcement, foundation, load increase, GA

1. まえがき

道路橋におけるA活荷重、B活荷重の導入、あるいは阪神淡路大震災後の対応のように、構造物の供用後の社会情勢の変化、あるいは自然災害の再認識等により設計荷重の増大が求められている。このため、既存構造物を新設計荷重に対していかにして補強するかが重要な課題となっている。

構造形式にもよるが、例えば平面骨組構造物のように一般に高次不静定となる構造を考えた場合、設計荷重の増加に対する構造物の補強は、部材間の力の再配分を伴い、その結果当然反力も変化する。一般的に構造物は杭等の基礎構造の上ののっている。その基礎構造の設計荷重は上部構造による反力であるから、反力の変化に伴う基礎構造の補強ができない限り、構造物のトータルな安全性が保てないのは明らかである。阪神淡路大震災後の橋脚の補強では、橋脚全体の靱性を上げながら反力は増加しない工法を取り入れ、基礎構造への影響は避けて構造全体の安全性を保持している¹⁾。

一方、構造部材の設計でも、作用する軸力、曲げモーメント、あるいは剪断力のすべてに対してクリティカル(許容応力ぎりぎりになる状態)な設計はされないように、基礎構造でも、作用する垂直、曲げ、あるいは水平反力のすべてに対してクリティカルな設計はされず、いくらかの余裕があるのが通例^{2) 3)}のようである。

そこで本研究では、ラーメン形式の橋脚が供用後にそ

の水平設計荷重が増加されたことを想定し、各部材は水平荷重の増加に対応しながらかつ反力の増分が各基礎の持っている余裕以下になるような補強部材、補強量の決定が可能かどうかについて、定性的な面からの基礎的な考察を行うことを主な目的としている。

この問題は最適化の問題となるが、設計変数である補強量は離散量とした方が現実的と考えられるので、GA(遺伝的アルゴリズム)を用いて解を求めた。

本研究の最適化問題にGAを応用する過程で、目的関数に対する感度がほとんどない変数を設計変数として扱った時、その変数の値が不安定となる現象が現れた。これは、感度の計算を行わないGAゆえの現象であるが、GAを応用する種々の問題で注意すべき問題点と考えられるので、この点に関する考察も加えている。

目的関数は、反力の増分を考慮せずただ補強総量最小を考える場合と、各基礎に対する反力の増分が最小の二つを考え、それらの結果を比較している。

2. 研究の流れと補強最適化問題

基本的な考察を目的とし、まえがきにも書いたように各部材が設計水平荷重の増加に対応しながらかつ反力の増分が各基礎の持っている余裕以下になるような補強部材、および補強量の決定が可能かどうかについての知見を得ることを目的としているので、問題の設定は非常に単純に行った。しかし、問題設定は単純でも、設計の過

程は複雑であるので解析的な考察は出来なく、数値計算に頼らざるを得ない。本研究の流れを以下に簡単に説明する。

2. 1 初期設計の決定

まず、いくつかのラーメン形式の橋脚を想定し、設計荷重も決定する。この荷重が改定前の設計荷重となる。この荷重に対して構造各部材の断面を決定する必要がある。ここでは、全応力設計法⁴⁾により、改定前の設計荷重に対する断面を決定する。

応力の制約条件は次式で与えられる。

$$g_i = [\sigma_{Ni}(\{A\}) + \sigma_{Mi}(\{A\})] / \sigma_A - 1 \leq 0 \quad (i=1-m) \quad (1)$$

ここで、 σ_{Ni} は*i*部材の軸力による応力、 σ_{Mi} は*i*部材の曲げモーメントによる応力、 σ_A は許容応力度、*m*は部材数である。

全応力設計法は、通常の手続きであるので詳細は省略するが、設計変数は部材断面積 (*A*) のみとした。その部材断面積と断面二次モーメント (*I*)、断面係数 (*W*) との関係は次式を仮定した。

$$I = 2 \times A^2, \quad W = 1.5 \times A^{1.5} \quad (2)$$

この式は、既製H形鋼の関係式の数字を丸めたものである。コンクリート製にしる鋼製にしる実際の橋脚の設計に用いるのであれば不適切な関係式である。しかし、基礎構造との関係での橋脚の補強の定性的な傾向を知るためには、ある程度簡略化した関係式を用いることは、いたずらに問題を複雑にしないという意味でもやむを得ないと考えられる。後記(式(2)')の補強断面の計算法においても、同様な考え方を取っている。

本研究の結果を実際の設計に用いる場合は、使用する材料に応じた例えば *I*-*A* 関係、それが無理であれば断面を構成するパラメータを直接設計変数として適用すれば良いだけである。

上記の設計変数は連続量と考えており、また収束の条件は、試行間の断面積の差の絶対値が 0.01 cm^2 (おおよそ 0.01%) としているので、式(1)の応力の制約条件はほとんど等号として部材断面積が求められる。その部材断面積を、

$$\{A^0\} = \{A^0_1, A^0_2, \dots, A^0_{nf}\} \quad (3)$$

とする。*nf*は、全応力設計の設計変数の数である。

また、 $\{A^0\}$ に対する各反力を計算する。それらを、垂直反力 $\{V^0\}$ 、曲げ反力 $\{M^0\}$ 、及び水平反力 $\{H^0\}$ とする。これらの値は、基礎構造が本来持っている許容力よりも少ないと考え、本来支持できる許容力はそれらを係数倍した次式で与えられるものとする。

$$\left. \begin{aligned} \text{垂直許容反力 } \{V_a\} &= \beta_v \times \{V^0\} \\ \text{曲げ許容反力 } \{M_a\} &= \beta_M \times \{M^0\} \\ \text{水平許容反力 } \{H_a\} &= \beta_H \times \{H^0\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、反力余裕係数 β_v 、 β_M 、 $\beta_H \geq 1$ である。

したがって、各反力の余裕量は次式になる。

$$\text{垂直反力の余裕量} = (\beta_v - 1) \times \{V^0\}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{曲げ反力の余裕量} &= (\beta_M - 1) \times \{M^0\} \\ \text{水平反力の余裕量} &= (\beta_H - 1) \times \{H^0\} \end{aligned} \right\} \quad (4)'$$

2. 2 補強最適化問題

第1段階の初期設計が決定されると、次に補強最適化問題が解かれることになる。ここでは、改定前の設計荷重の内、水平荷重だけ $\alpha (> 1)$ 倍する。これが、改定後の設計荷重となる。この改定後の荷重に対しては、現段階の断面では応力の制約条件を満足しないのは明らかであるので、各部材を補強することになる。

各部材の応力の制約条件を満足する設計の内、設定された目的関数を最小にする各部材の補強量を決定することになる。目的関数は、一つは補強量最小であり、もう一つは増加反力最小である。

この問題は次のように定式化される。

$$\text{○目的関数} : 0 \rightarrow \min \quad (5)$$

$$\text{○制約条件} : \text{応力の制約条件式(1)より、}$$

$$g_i = [\sigma_{Ni}(\{A+\Delta A\}) + \sigma_{Mi}(\{A+\Delta A\})] / \sigma_A - 1 \leq 0 \quad (i=1-m) \quad (6)$$

$$\text{○設計変数} :$$

$$\{\Delta A\} = \{\Delta A_1, \Delta A_2, \dots, \Delta A_{no}\} \quad (7)$$

ここで、*O*は目的関数で3.で説明される。 $\{\Delta A\}$ は各部材毎に計算される補強量で、本研究では、離散量としている。8種類の値を設定したが、それらは、

$$0, 5, 10, 20, 30, 50, 80, 100 \text{ cm}^2$$

である。表-1にこれらと表示の記号を示している。

部材補強後の断面定数間には、次の関係がある。

$$I = 2(A + \Delta A)^2, \quad W = 1.5(A + \Delta A)^{1.5} \quad (2)'$$

また、*no*は補強最適化問題の設計変数の数であり、

$$no \geq nf \quad (8)$$

としている。

これらにより得られた反力の増加分は、各反力の余裕量と比較され、目的関数毎に、どのような反力余裕を持つ時、基礎構造に影響しない補強設計が得られるか否かについて検討を加える。

許容反力はすでに式(4)で与えられているので、それらを制約条件に取り入れて計算する方が直接的であるが、 α 及び β_v 、 β_M 、 β_H の値の設定によっては許容解が出ないことが十分に予想されるので、反力は制約条件に入れずに結果を考察する方法をとった。

3. GAにおける感度なし変数の扱いと目的関数

式(5)~(7)で定義される問題は、標準的な組合せ最適化問題であるので、通常のGAの適用が可能である。ここでは、著者らが作成した汎用GAプログラム⁵⁾を用いてこの問題を解くことにした。

目的関数に関してまだ明確な表現をしていないが、その前に感度なし変数の扱いについて説明する。

最適化問題において、目的関数に対する感度がないパラメータを設計変数に加えることは考えられない。数値計画法を用いる最適化問題においては、解析的にしる、

差分法等の数値計算により感度は計算されるので、目的関数に対する感度は常時得られて、もし感度がなければ設計変数からはずすことは容易にできる。しかし、GAを応用する問題では、感度は計算しない。感度の計算がいらなことが一つの特徴にもなっている。そこで、問題によっては、目的関数に対する感度が0かあるいは極めて少ないパラメータを設計変数に加えていることがありうる。その場合、その変数を取る値はまったく偶然に支配され、場合によってはまったく見当違いな値を持って解とみなされることも起こりうる。

一つの例として、本研究の過程で得られた結果を紹介する。これは、図-1に示す構造の式(5)～(7)の定式化において、目的関数として柔性最大をとり、構造最上部の水平変位を最大にする問題である^{6) 7)}。荷重条件は、後期の計算例と同様に与えている。GAのパラメータをいくつか替えた計算のうち、図-1に示すような結果が得られた。表-1との関係でもわかるように、部材3、6、12、15は設定された最大の補強をしている。ところが、各部材の目的関数に対する感度を、リンク部材、初期設計と共に示したのが表-2であるが、上記の部材に対応する設計変数3、6の感度は0であった。つまり、これらの部材の補強は本来必要ないことになるが、問題設定が不適切だったために不要な補強をすることになった訳である。なお、表-2の初期設計は前述の全応力設計の結果である。この構造では、変数が連続量であるにもかかわらず、4種類の全応力設計が得られている。ここではその中で最も鋼重が少ない設計を用いて考察を加えた。

この問題は比較的予想しやすい問題であるが、GAを用いる場合には、注意しなければならない点であると考えられる。

本研究では、式(5)の目的関数としては、補強総量最小と、増加反力最小の二つを考えている。それらは、次式で表される。まず補強総量は、

$$O_v = \sum_{i=1}^m (\Delta A_i \cdot \ell_i) \rightarrow \min \quad (9)$$

であり、反力増加割合の最大値は、次式となる。

$$O_R = \max \left\{ \frac{V_j}{V_{a,j}}, \frac{M_j}{M_{a,j}}, \frac{H_j}{H_{a,j}} \mid j=1-J \right\} \rightarrow \min \quad (10)$$

ここで、前記のような可能性を考慮して、2つの目的関数に重みをつけて加え、次式のように一つの関数として扱った。

$$O = O_R + \tau \cdot O_v / V_{o,1}^0 \rightarrow \min \quad (11)$$

ここで、 V_j 、 M_j 、 H_j はそれぞれj支点の垂直、曲げ、及び水平反力の値である。Jは支点の数、 $V_{o,1}^0$ は{A}に対する鋼材総容積の値であり、補強総量を除して無次元化している。 τ は第1項の反力増分の値と第2項の補強総量の値との間に重みをつける重み係数である。 τ の値は0.01から100の値を与えて計算した。

式(11)の目的関数の設定により、第1項の目的関数に対しては感度が無い設計変数があっても、第2項の目的関数の効果(補強量が減れば O_v も減る)によりその設計変数の値は必ず減少することになり、見当違いな解が出る可能性はほとんどなくなる。

以上の本研究の設計計算の流れを図-2に示す。照査が式(1)の計算であり、構造解析はマトリクス構造解析法で行っている。反力余裕は、すべての反力の組合せに対して4通りの余裕量があるとし、GAパラメータは10種類の値を与え、重み係数は5種類の値を与えて計算した。

4. 数値計算例

本研究では、図-3～5に示す3種類のラーメン形式の橋脚について計算を行い結果を考察した。図-3は1層4スパンの構造であり、これを構造1とする。図-4は2層4スパンの構造であり、これを構造2とする。図-5は1層のスパンを2層のスパンで挟む構造であり、これを構造3とする。それぞれの構造において、部材と初期設計の設計変数の関係、及び同様に補強最適化の部材と設計変数の関係を表-3に示した。荷重の載荷方向は図に示してあるが、 $\downarrow$ が20tf、 $\rightarrow$ が4tf、 $\uparrow$ が5tf、 $\leftarrow$ が1tfである。

水平荷重の増加係数 α は1.5とする。上記のように、反力の余裕は、1方向の反力から、3方向すべての反力の組合せまで7通りすべての組み合わせに余裕があるとした。表示の余裕量は、式(4)'の $(\beta-1)$ をパーセントで表して、40%、50%、60%、100%とした。

以下に、各構造毎に計算結果を説明し考察を加える。

表-4～6には各構造毎の余裕がある反力の方向と余裕量のそれぞれの組合せに対する補強総量、反力増加割合の最大値(括弧内)、および最大値を与える反力の方向(右肩)の結果を示している。各組合せ毎に、 τ の値は100、10、1、0.1、0.01の5ケース、またGAのパラメータは人口サイズ、ランダムシード、交叉率、突然変異率の適当な組合せ10ケースを与え、計50ケースのGAの計算結果の中から最も補強総量が少ない結果を「最小補強*」、式(10)の反力の増加割合の最大値が最も少ない結果を「最小反力増」、反力増加割合の最大値が1.005より少ない結果の内最も補強総量が少ない結果を「最小補強**」として示してある。反力増加割合の最大値が1.005より少ない結果が得られなかった場合は「なし」と示されている。

4-1 構造1

構造-1の結果を表-4に示す。

表全体を見て気がつくことは、水平方向の反力余裕がない場合は、目的関数の種類、余裕量に関係なく、反力の増加割合は1.5より大きいことである。

また、最小補強*の補強総量は、余裕がある反力の方向と余裕量に関係なく64cm³であった。この場合の反力

表-1 補強量と表示記号

ランク	表示	面積 (cm ²)
1		0
2	----	5
3	-----	10
4	=====	20
5	=====	30
6	=====	50
7	=====	80
8	=====	100

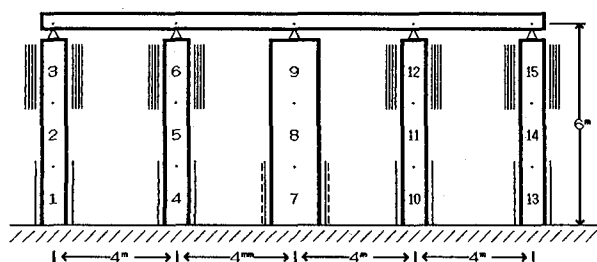


図-1 柔性最大設計の結果例

表-2 頂部水平変位に対する感度

設計変数	リンク部材	初期設計 (cm ²)	感度 (cm/cm ²)
1	1+13	54.4	0.0043
2	2+14		0.0004
3	3+15		0.0000
4	4+10		0.0042
5	5+11	53.2	0.0004
6	6+12		0.0000
7	7		0.0106
8	8		0.0038
9	9	352.0	0.0005

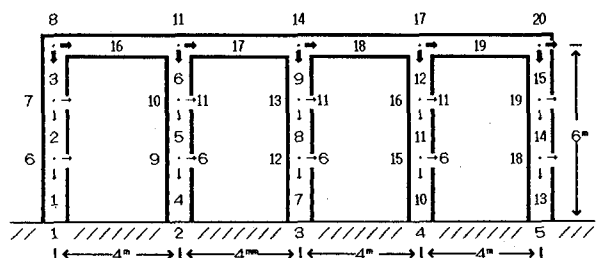


図-4 構造2 (4スパン2層)

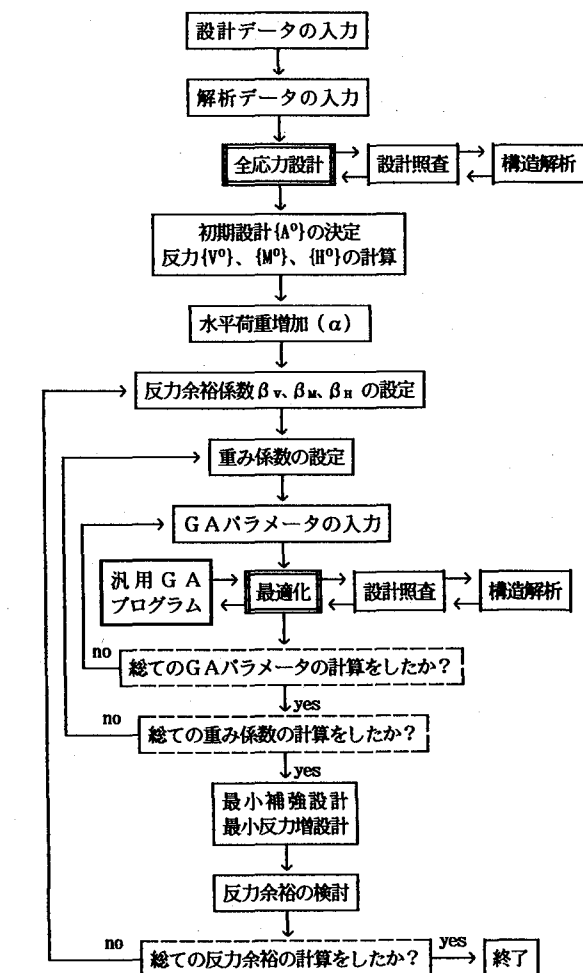


図-2 設計計算の流れ図

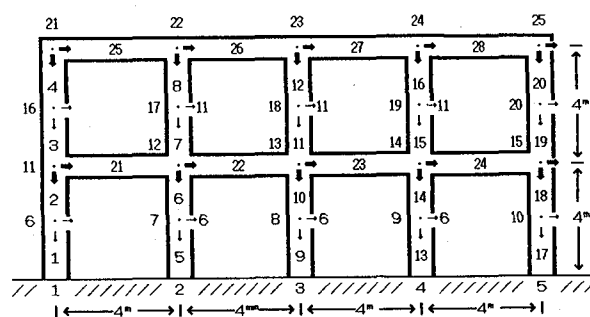


図-3 構造1 (4スパン1層)

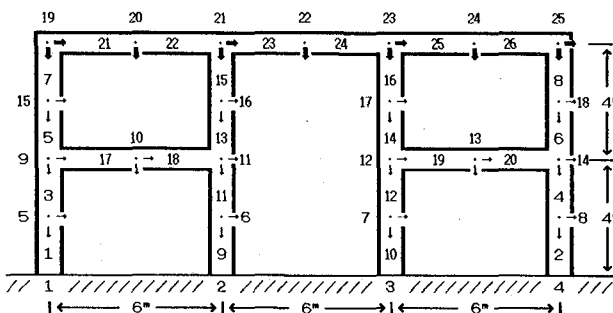


図-5 構造3 (3スパン1層+2層)

表-3 各構造の設計変数と部材リンク

構造1			構造2			構造3		
初期設計変数	補強設計変数	部材番号	初期設計変数	補強設計変数	部材番号	初期設計変数	補強設計変数	部材番号
1	1	1 13	1	1	1 17	1	1	1 2
	2	2 14		2	2 18		2	3 4
	3	3 15		3	3 19		3	5 6
2	4	4 10	2	4	4 20	2	4	7 8
	5	5 11		5	5 13		5	9 10
	6	6 12		6	6 14		6	11 12
3	7	7	4	7	7 15	4	7	13 14
	8	8		8	8 16		8	15 16
	9	9		9	9		9	17 18
4	10	16 17	5	10	10	5	10	19 20
		18 19		11	11		11	21 22
				12	12		12	23 24
			6	13	21 22	6	13	25 26
				23	23 24		23	27 28
				24	24		24	
			7	14	25 26	7	14	27 28
				25	25 26		25	
				26	26 27		26	
			8	27	27 28	8	27	
				28	28		28	

表-5 構造2の補強総量と最大反力の値

設計	余裕量	余裕量			
		40%	50%	60%	100%
V	最小補強*	128(1.516) ^M	128(1.516) ^M	128(1.516) ^M	128(1.516) ^M
	最小反力増	260(1.502) ^M	260(1.502) ^M	260(1.502) ^M	260(1.502) ^M
	最小補強**	なし	なし	なし	なし
M	最小補強*	128(1.512) ^M	128(1.512) ^M	128(1.512) ^M	128(1.512) ^M
	最小反力増	181(1.501) ^M	181(1.501) ^M	181(1.501) ^M	181(1.501) ^M
	最小補強**	なし	なし	なし	なし
H	最小補強*	128(1.516) ^M	128(1.516) ^M	128(1.516) ^M	128(1.516) ^M
	最小反力増	390(1.095) ^V	390(1.095) ^V	390(1.095) ^V	390(1.095) ^V
	最小補強**	なし	なし	なし	なし
V	最小補強*	128(1.512) ^M	128(1.512) ^M	128(1.512) ^M	128(1.512) ^M
	最小反力増	181(1.501) ^M	181(1.501) ^M	181(1.501) ^M	181(1.501) ^M
	最小補強**	なし	なし	なし	なし
M	最小補強*	128(1.516) ^M	128(1.516) ^M	128(1.516) ^M	128(1.516) ^M
	最小反力増	299(1.074) ^M	410(1.003) ^M	442(0.981) ^M	442(0.981) ^M
	最小補強**	なし	379(1.004) ^M	330(1.002) ^M	330(1.002) ^M
H	最小補強*	128(1.083) ^M	128(1.080) ^V	128(1.078) ^V	128(1.078) ^V
	最小反力増	220(1.074) ^M	201(1.048) ^V	258(1.040) ^V	241(1.023) ^V
	最小補強**	なし	なし	なし	なし
V	最小補強*	128(1.083) ^M	128(1.007) ^M	128(0.948) ^M	128(0.758) ^M
	最小反力増	185(1.073) ^M	174(1.001) ^M	172(0.938) ^M	200(0.751) ^M
	最小補強**	なし	170(1.002) ^M	128(0.948) ^M	128(0.758) ^M

表-4 構造1の補強総量と最大反力の値

設計	余裕量	余裕量			
		40%	50%	60%	100%
V	最小補強*	64(1.550) ^M	64(1.550) ^M	64(1.550) ^M	64(1.550) ^M
	最小反力増	82(1.501) ^M	82(1.501) ^M	82(1.501) ^M	82(1.501) ^M
	最小補強**	なし	なし	なし	なし
M	最小補強*	64(1.550) ^M	64(1.550) ^M	64(1.550) ^M	64(1.550) ^M
	最小反力増	87(1.500) ^M	87(1.500) ^M	87(1.500) ^M	87(1.500) ^M
	最小補強**	なし	なし	なし	なし
H	最小補強*	64(1.543) ^M	64(1.543) ^M	64(1.543) ^M	64(1.543) ^M
	最小反力増	227(1.103) ^V	279(1.089) ^V	279(1.089) ^V	279(1.089) ^V
	最小補強**	なし	なし	なし	なし
V	最小補強*	64(1.550) ^M	64(1.550) ^M	64(1.550) ^M	64(1.550) ^M
	最小反力増	87(1.500) ^M	87(1.500) ^M	87(1.500) ^M	87(1.500) ^M
	最小補強**	なし	なし	なし	なし
V	最小補強*	64(1.543) ^M	64(1.543) ^M	64(1.543) ^M	64(1.543) ^M
	最小反力増	267(1.074) ^M	352(1.004) ^M	352(0.955) ^M	352(0.955) ^M
	最小補強**	なし	325(1.005) ^M	327(0.999) ^M	327(0.999) ^M
M	最小補強*	64(1.107) ^M	64(1.053) ^V	64(1.053) ^V	64(1.053) ^V
	最小反力増	116(1.072) ^M	102(1.035) ^V	105(1.020) ^V	108(1.001) ^V
	最小補強**	なし	なし	なし	102(1.003) ^V
V	最小補強*	64(1.107) ^M	64(1.034) ^M	64(0.969) ^M	64(0.775) ^M
	最小反力増	129(1.072) ^M	87(1.000) ^M	98(0.938) ^M	101(0.750) ^M
	最小補強**	なし	79(1.003) ^M	64(0.969) ^M	64(0.775) ^M

表-6 構造3の補強総量と最大反力の値

設計	余裕量	余裕量			
		40%	50%	60%	100%
V	最小補強*	100(1.618) ^M	100(1.618) ^M	100(1.618) ^M	100(1.618) ^M
	最小反力増	194(1.504) ^M	194(1.504) ^M	194(1.504) ^M	194(1.504) ^M
	最小補強**	なし	なし	なし	なし
M	最小補強*	100(1.618) ^M	100(1.618) ^M	100(1.618) ^M	100(1.618) ^M
	最小反力増	206(1.501) ^M	206(1.501) ^M	206(1.501) ^M	206(1.501) ^M
	最小補強**	なし	なし	なし	なし
H	最小補強*	100(1.592) ^M	100(1.592) ^M	100(1.592) ^M	100(1.592) ^M
	最小反力増	302(1.121) ^M	304(1.118) ^V	308(1.118) ^V	308(1.118) ^V
	最小補強**	なし	なし	なし	なし
V	最小補強*	100(1.618) ^M	100(1.618) ^M	100(1.618) ^M	100(1.618) ^M
	最小反力増	206(1.501) ^M	206(1.501) ^M	206(1.501) ^M	206(1.501) ^M
	最小補強**	なし	なし	なし	なし
V	最小補強*	100(1.592) ^M	100(1.592) ^M	100(1.592) ^M	100(1.592) ^M
	最小反力増	376(1.106) ^M	356(1.072) ^M	356(1.072) ^M	356(1.072) ^M
	最小補強**	なし	なし	なし	なし
M	最小補強*	100(1.156) ^M	100(1.079) ^M	100(1.073) ^V	100(1.073) ^V
	最小反力増	130(1.079) ^V	192(1.048) ^M	184(1.034) ^V	176(1.016) ^V
	最小補強**	なし	なし	なし	なし
V	最小補強*	100(1.156) ^M	100(1.079) ^M	100(1.011) ^M	100(0.809) ^M
	最小反力増	214(1.075) ^M	160(1.002) ^M	190(0.939) ^M	158(0.752) ^M
	最小補強**	なし	160(1.002) ^M	110(0.960) ^M	100(0.809) ^M

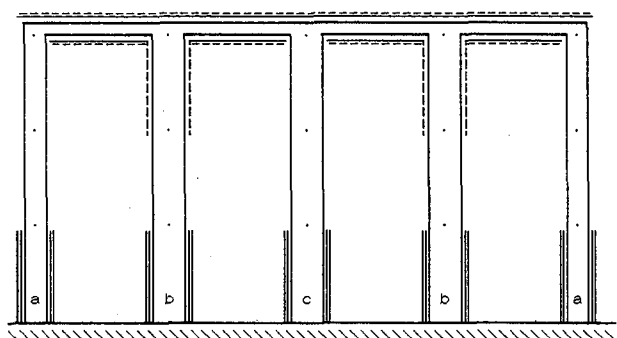


図-6 構造1の最小補強*の補強図

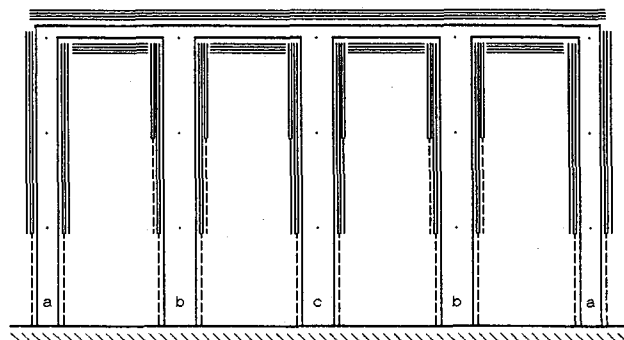


図-7 構造1の最小補強**の補強図

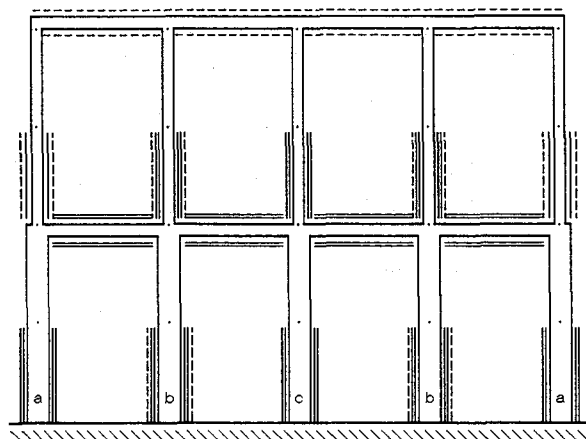


図-8 構造2の最小補強*の補強図

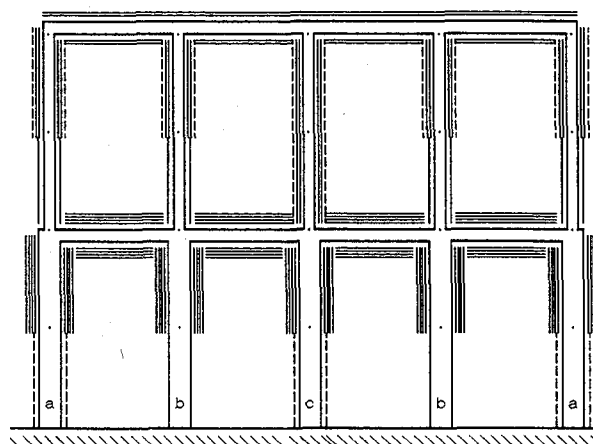


図-9 構造2の最小補強**の補強図

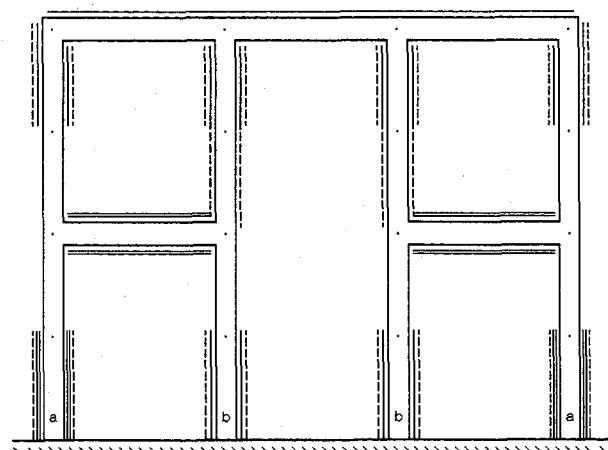


図-10 構造3の最小補強*の補強図

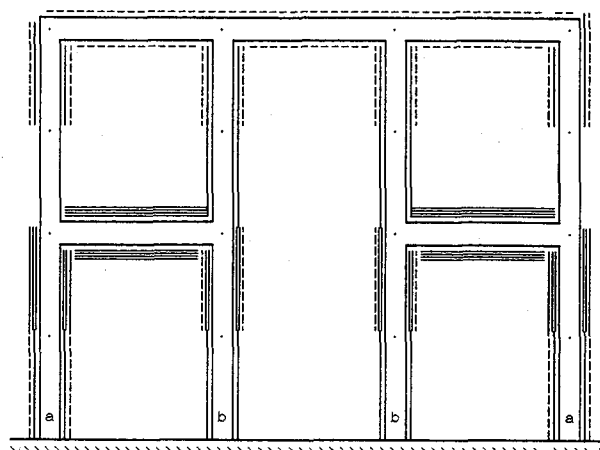


図-11 構造3の3方向に余裕がある場合の補強図

増加割合の最大値を見ると、3方向すべてに余裕がある以外はすべて1より大きくなっている。これは、余裕のある反力の方向、および余裕量を考慮しなければ総てに許容量を満足する設計は得られないことを示す。

上部構造が許容値を満足しながら反力の値も許容値に入る設計は、垂直と水平、及び曲げと水平の組合せで得られた。特に垂直と水平の組合せでは、50%の余裕量で反力の値が許容値に入る設計が得られた。更に試行錯誤的に検討すると、垂直15%、水平50%の余裕で反力の値が許容値に入る設計が得られる。

得られた補強量の分布の内、最小補強*の結果を図-6に、50%の余裕がある垂直と水平の組合せの結果の内最小補強**の結果を図-7に示した。最小補強*の補強は橋脚の基部の補強が目につくのに対し、反力の許容値も満足する最小補強**の結果は上部の梁との結合を強化している点が特に目に付く。

4-2 構造2

表-5に、構造2の場合の余裕がある反力の方向と余裕量のそれぞれの組合せに対する結果を構造1の場合と同様に示している。

構造1と同様に表全体からは、水平方向の反力余裕がない場合は、目的関数の種類、余裕量に関係なく、反力の増加割合は1.5より大きいことに気がつく。

また、最小補強*の補強総量は、余裕がある反力の方向、および余裕量に関係なく 128cm^3 であった。この場合の反力増加割合の最大値を見ると、3方向すべてに余裕がある以外はすべて1より大きくなっている。これは、構造1の場合と同様に余裕のある反力の方向、および余裕量を考慮しなければ総てに許容量を満足する設計は得られないことを示す。

上部構造が許容値を満足しながら反力の値も許容値に入る設計は、垂直と水平の組合せで得られた。50%の余裕量で反力の値が許容値に入る設計が得られている。更に試行錯誤的に検討すると、垂直15%、水平50%の余裕で反力の値が許容値に入る設計が得られた。

得られた補強量の分布の内、最小補強*の結果と、50%の余裕がある垂直と水平の組合せの結果の内最小補強**の結果を図-8と図-9に示した。最小補強*の補強はそれぞれの層の柱基部の補強が目につくのに対し、反力の許容値も満足する最小補強**の結果は、1、2層とも梁と柱との結合を強化している点が目につく。

4-3 構造3

表-6に、構造3の場合の余裕がある反力の方向と余裕量のそれぞれの組合せに対する結果を構造1、2の場合と同様に示している。

最小補強*の補強総量は、余裕がある反力の方向、および余裕量に関係なく 100cm^3 であった。この場合の反力増加割合の最大値を見ると、3方向すべてに100%の余裕がある以外は、すべて1より大きくなっている。これは、単純に補強量を最小にするという補強方法では、基

礎構造を含めた構造全体のバランスの取れた構造は得たいことを示す。

表-6の計算の範囲で、上部構造が許容値を満足しながら反力の値も許容値に入る設計は、3方向すべてに60%以上の余裕がある以外は得られなかった。この結果を参考にして更に試行錯誤的な検討を加えた結果、垂直15%、曲げ15%、および水平55%の余裕で反力の値が許容値に入る設計が得られている。この結果と最小補強*の結果の補強の分布図を図-10と図-11に示した。最小補強*の結果は橋脚基部の補強が目につくのに対し、図-11の反力の許容値も満足する補強の結果は、中間梁と柱との結合を強化している点が目につく。

5. まとめ

設計荷重の増加には上部構造の補強だけで対応し、それに伴う反力の増加は基礎構造の設計上の余裕の中で処理することが可能かどうかについて数値計算的な検討を加えた。

作用力と許容力を近づける設計が必ずしも良い設計とは言えないが、基礎構造が、上部構造よりは作用力に対して相対的に比較的大きな許容力で設計されている場合は、その余裕の中に設計荷重の増加に伴う上部構造による反力を再配分出来れば、構造全体として安全を保つことができる補強は可能である。

数値計算の結果は厳しく、余裕を持つ反力の組合せは限定され、設計水平荷重の増加に対応して、少なくとも水平方向の反力に設計荷重の増分と同程度の余裕をもっていなければ、基礎構造の反力まで安全な設計はできないことが分かった。しかし逆に、水平方向の反力さえ同程度の余裕があれば、残りの方向の反力の若干の余裕により、反力増加割合を1以下に抑えることは可能であることが得られた。

単純な補強総量最小の補強設計の結果は、橋脚基部及び頭部の補強を行うという答が得られ、一般にラーメン橋脚で行われる補強と同傾向の補強形態となった⁸⁾。その意味で極めて常識的な補強分布となったが、一方、ほとんどの場合で反力増加割合が1よりかなり大きくなっている。これはつまり、このような補強では上部構造と基礎構造の安全性のバランスが崩れることを意味する。

構造によっては、基礎構造の反力の余裕の分布をまず調べ、その余裕の中に設計荷重の増加に伴う反力の再配分を吸収させる補強設計も1つの選択肢になり得ると思われる。

また、目的関数に対する感度がない変数を扱う場合、見当違いな解が出る可能性を実例を上げて説明し、本研究の範囲での対応策としての目的関数を示した。GA特有の問題であるが、今後更なる検討が必要と思われる。

さらに、基礎構造の実設計における余裕量の程度を調査し、橋脚断面を構成する種々のパラメータをより実際に近い形で設計モデルを構築し更に検討を加えたいと考

えている。

参考文献

- 1) 西川・山本・名取・寺尾・安波・寺田：既設鋼製橋脚の耐震性能改善方法に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.42A、pp.975-986、1996.
- 2) 矢作・五十嵐：よくわかる杭基礎の設計、山海堂、1996.
- 3) 矢作・和田・五十嵐・五瀬：よくわかる橋梁下部構造物の耐震設計、山海堂、1994.
- 4) SUGIMOTO & LU:FULLY-STRESSED DESIGN OF FRAMED STRUCTURES WITH DISCRETE VARIABLES AND APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS, ADVANCES IN STRUCTURAL OPTIMIZATION, ASCE, pp.180-191, 1997.
- 5) 鹿・杉本：組合せ問題のための汎用GAシステムの構築に関する基礎的研究、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集 I-A、pp.928-929、1996.
- 6) SUGIMOTO & LU:BASIC RESEARCH ON OPTIMUM REINFORCEMENT OF BRIDGE PIER, Inter. Symp.on Optimization and Innovative Design,JSME, 1997.
- 7) 杉本：橋脚の補強最適化に関する基礎的研究、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集 I-A、pp.326-327、1997.
- 8) 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、研友社、1996.

(1997年9月26日受付)