

(21) 支承と橋脚の相互作用を考慮した耐震設計へのGAの適用に関する研究

APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS TO THE SEISMIC DESIGN BASED ON THE INTERACTION PIER AND BEARING

大西陽子* ・ 園田佳巨** ・ 柚辰雄*** ・ 彦坂熙****

Youko OONISHI, Yoshimi SONODA, Tatsuo SOMA and Hiroshi HIKOSAKA

* 九州大学大学院修士課程 工学研究科 建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

** 九州大学大学院助教授 工学研究科 建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

*** 中央コンサルタンツ株式会社 福岡支店 (〒810-0062 福岡市中央区荒戸 1-1-6)

**** 九州大学大学院教授 工学研究科 建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

This paper presents an analytical study on the application of genetic algorithms to the seismic design of the road bridges. After the Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Japanese design code of road bridge was revised and current design code requires the consideration of the elastic-plastic behavior. Thus, it is very difficult to control design process and so it takes quite long time to get the results which satisfy the designer's concept. Therefore, an application of Genetic Algorithm to ultimate strength seismic design is proposed and examined the effect of it in this study. In this analysis, the reinforcement ratio of RC piers and the stiffness of bearings are decided on the conditions that the load shearing ratio of each bearing is the same as the prescribed value and the natural period of overall motion becomes longer in order to decrease the seismic load. It is confirmed that this numerical analysis by Genetic Algorithm give good solutions with a little trial, and it is regarded as very useful method for the ultimate strength seismic design of road bridges.

KeyWords: Genetic Algorithm, Ultimate Strength Seismic Design, Interaction between RC piers and Bearings

1. 緒言

兵庫県南部地震以後、道路橋の設計は従来の震度法から塑性域を想定した地震時保有水平耐力法へと大きく変化した。この改訂にともない、橋梁の設計には弾塑性応答を考慮した計算が必要となり、終局時の損傷状態を想定した断面設計が採用されるなど、従来に比べて複雑なものとなった。一方、連続桁橋等の設計において、架設位置の地形や地盤特性が急変するような場合には、設計者が意識的に各橋脚や支承の荷重分担率の設定を試みることも少なくない。しかし、現行の地震時保有水平耐力

法を用いて、設計者が意図する荷重分担率を可能とする合理的な橋梁を設計するには、橋梁全体系の弾塑性応答に対する各部材の力学特性の影響のみならず、部材間の相互作用等も把握した試行を行う必要がある。

本研究は、設計者が意図する荷重分担を容易に実現するために、地震時保有水平耐力法に基づく耐震設計にGAを適用した解析を試みたものである。その結果、支承と橋脚の相互作用等の影響をGAにより解析的に考慮することで、弾塑性応答時の荷重分担を所定の割合に制御することが容易に行えることが明らかとなり、設計実務

に有用な支援を行えることが確認された。

2. 地震時保有水平耐力設計法へのGAの適用

本研究では、地震時保有水平耐力レベルの地震動に対する連続桁橋の支承および橋脚の断面設計にGAを適用し、設計者の意図を容易に実現しうる手法の開発を試みた。

2.1 目的関数

地震時保有水平耐力法に基づく連続桁橋の設計にGAを適用するために、以下の考えをもとに式(1)、(2)に示す2種類の目的関数を用いることとした。

1) 橋梁全体系の応答をできるだけ長周期化し、設計水平震度の低減を図る。

$$z_1 = k_{hc}(T) \rightarrow \min \quad (1)$$

ここで、設計水平震度 k_{hc} には道路橋示方書で示されている地震時保有水平耐力法¹⁾に用いるタイプIIの式を用いた。

2) 架設位置の地形や地盤条件等を考慮して設定された各橋脚の荷重分担率にできるだけ近づける。

$$z_2 = \sum_{i=1}^n \left(K_i - k_{cei} / \sum_{i=1}^n k_{cei} \right)^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

ここに、 n : 橋台および橋脚基数、 K_i : i 番目の橋脚に設定された荷重分担率、 k_{cei} : i 番目橋脚位置における支承・橋脚・基礎の直列剛性で式(3)で求められる。

$$1/k_{cei} = 1/k_{bi} + 1/k_{pi} + 1/k_{si} \quad (3)$$

ここで、 k_{bi} : i 番目橋脚位置における基礎の剛性、 k_{pi} : i 番目の橋脚剛性、 k_{si} : i 番目橋脚の支承水平剛性

ただし、(2)の条件を地震時保有水平耐力レベルで満たすには、支承や橋脚の剛性が相互に影響を及ぼす橋梁全体系の非線形応答の制御を行わねばならず、現実には必ずしも容易ではない。

2.2 制約条件の設定

設計における制約条件として、以下の項目を与えた。

1) 各橋脚の耐力が規定値を上回ること。

$$g_1 = k_{he} \cdot W_i - P_{ai} \leq 0 \quad (4)$$

ここに、 $k_{he} = k_{hc} / \sqrt{2\mu_a - 1}$: 塑性率を考慮した等価水平震度、 P_{ai} : i 番目の橋脚の保有水平耐力、 W_i

($=W_{ui} + 0.5W_{pi}$) : i 番目の橋脚に作用する曲げ変形時の等価重量、 W_{ui} : i 番目橋脚に作用する上部工分担重量、 W_{pi} : i 番目の橋脚の重量

なお、各橋脚の保有水平耐力は、道路橋示方書に示される鋼・コンクリートの応力度-ひずみ曲線、および終局状態の定義に基づき、断面分割法により求めた許容塑性率 μ_a をもとに決定した。

2) 各支承の変位、応力度が規定値を満たしていること。

$$g_2 = u_{si} - u_a = \frac{k_{he} \cdot W_{ui}}{k_{si}} - u_a \leq 0 \quad (5)$$

$$g_3 = \gamma_{si} - \gamma_a \leq 0 \quad (6)$$

ここに、 u_{si} : i 番目の支承水平変位、 u_a : 支承の許容水平変位、 γ_{si} : i 番目の支承に生じるせん断ひずみ、 γ_a : 許容せん断ひずみ

$$g_4 = \sigma_{pi} - \sigma_{pa} \leq 0 \quad (7)$$

$$g_5 = \sigma_{pi} - \sigma_{cra} \leq 0 \quad (8)$$

ここに、 σ_{pi} : i 番目の支承に作用する支圧応力度、 σ_{pa} : 許容支圧応力度、 σ_{cra} : 座屈に関する許容応力度

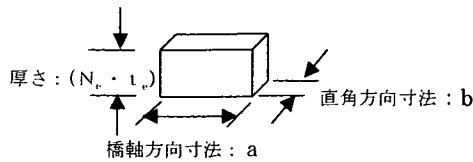
2.3 遺伝子データの選定

上記の目的関数と制約条件のもとで、橋脚および支承の断面諸元を設計変数とした解析を行った。すなわち、支承に関する遺伝子データは、図-1に示すような水平反力分散ゴム支承を想定した各支承の寸法(橋軸方向 a 、橋軸直角方向 b 、1層当りのゴム厚 t_e 、ゴム層数 N_e)およびゴム材のせん断弾性係数 G の計5種類とし、橋脚に関する遺伝子には、図-2に示すような一般的な矩形断面を有するRC構造を対象に、主鉄筋量 $As1$ 、横拘束筋量 $As2$ の2種類を選定した。なお、RC橋脚の断面寸法は既定値とした。以上の遺伝子データをもとに、式(3)中の支承水平剛性 k_{si} (1個当り)は式(9)で求められ、橋脚の剛性 k_{pi} は主鉄筋量と横拘束筋量等の遺伝子データをもとに計算される $M \sim \phi$ 関係から、バイリニア型の非線形バネ特性でモデル化した。

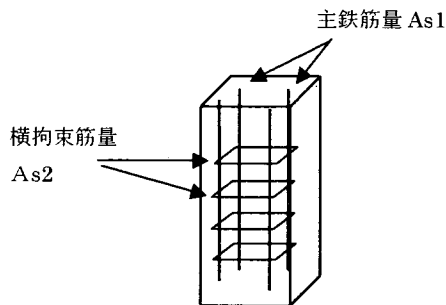
$$k_s = \frac{a \cdot b \cdot G}{N_e \cdot t_e} \quad (9)$$

2.4 GAによる最適断面の探索

式(1)~(9)を用いて、表-1に示す範囲から各遺伝子データを選択しながら図-3に示すフローに基づくGAによる解析を行い、合理的な橋脚および支承の断面諸元



図－１ 支承に関する遺伝子データ



図－２ 橋脚に関する遺伝子データ

表－１ 各遺伝子の選択範囲

遺伝子	選 択 範 囲
a	40～70cm (2cm 間隔：16 種類)
b	40～70cm (2cm 間隔：16 種類)
N_e	1～16 層 (16 通り)
t_e	1.0～4.0cm (0.2cm 間隔：16 種類)
G	6,8,10,12kgf/cm ² (4 種類)
A_{s1}	1000～1750cm ² (50cm ² 間隔：16 種類)
A_{s2}	6～36cm ² (2cm ² 間隔：16 種類)

の探索を行った。なお、各個体の適応度はペナルティ関数を用いた以下の式で与え、エリート保存方式による単純GAを適用した。

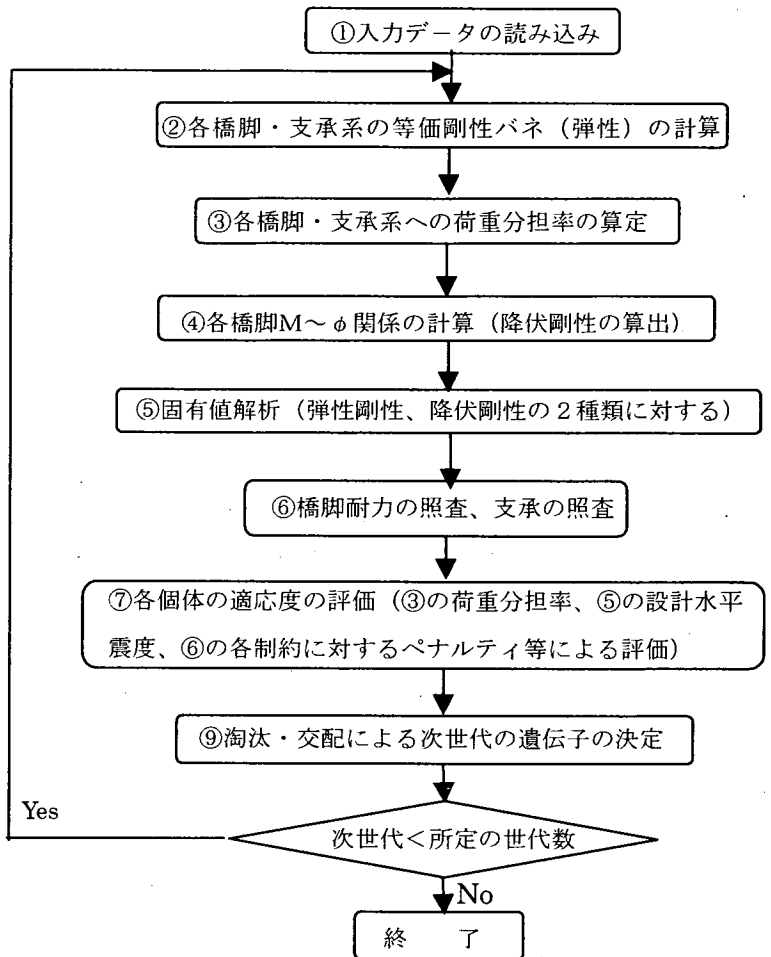
$$z_i = \alpha_1 \frac{z_{1i}}{\sum_{i=1}^{N_p} z_{1i}} + \alpha_2 \frac{z_{2i}}{\sum_{i=1}^{N_p} z_{2i}} + \lambda \sum_{j=1}^5 \max[g_j, 0] \quad (10)$$

ここに、 z_i ：i 番目の個体の適応度、 α_1, α_2 ：式(1)、(2)の目的関数に対する重み、 N_p ：世代人口、 λ ：式(4)～(8)に対するペナルティ係数

3. 数値計算例および考察

3.1 解析モデル

図－４に示すような高さの異なるRC橋脚を有する3径間PC連続桁橋を対象とした検討を行った。橋脚1および2の断面寸法および配筋状況を図－５に示す。本解析では遺伝子データである鉄筋量に応じて、図－５と同一ピッチで鉄筋径のみを変更しながら、RC橋脚の剛性



図－３ 解析フローチャート

の変化を考慮した。桁および橋脚は、曲げと軸力を考慮した骨組要素とみなして解析を行った。なお、各支承位置の荷重分担率は橋脚高の相違等を考慮して、支承1～4に対してそれぞれ10%、30%、40%、20%の値を設定した。

3.2 支承の変位に関する制約を設けないケース

実際の設計では、各橋脚の支承水平剛性と全体系の応答性状には密接な関連があり、また支承の変位に厳しい制約が課されているため、その設計には試行を繰り返すことが多い。したがって、支承に関する設計変数の解が存在しうる空間が非常に狭く、単純GAでは良好な解を得るのが困難であることが懸念される。ここでは本法の適用可能性を検討するために、支承の変位制約条件式(5)、(6)を考慮しない場合の検討を最初に行った。図－6(a)および(b)は、それぞれ式(10)により求められる個体の適応度について、世代全体の平均と最適解の推移を各世代毎に示したものである。この図より、

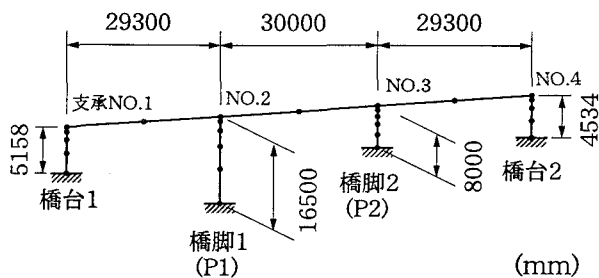
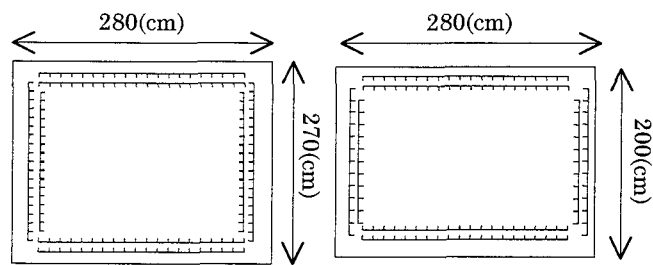


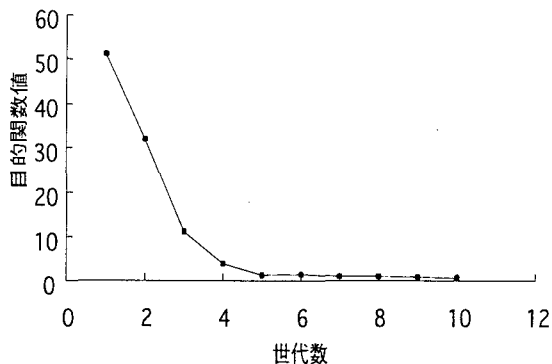
図-4 解析モデル（3径間PC連続桁橋）



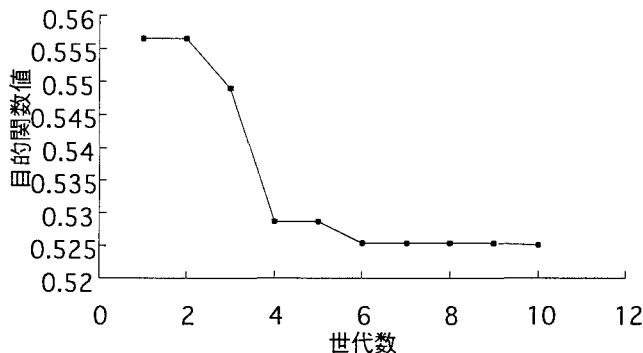
(a) 橋脚1

(b) 橋脚2

図-5 橋脚の背筋図



(a) 世代平均の推移



(b) 最適解の推移

図-6 個体の適応度の推移

表-2 各支承の分担率の推移

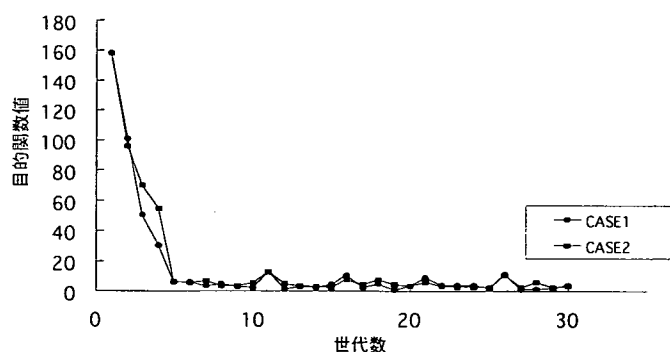
世代	支承1	支承2	支承3	支承4
1	0.09101	0.2489	0.405	0.2551
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
5	0.1298	0.2839	0.4044	0.1819
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	0.1118	0.2934	0.4068	0.188

世代全体の平均値は顕著な低減を示しており、世代全体の遺伝子の質が確実に向上していることが認められる。また各世代における最適解についても、10 世代までの間に5 %程度の改善が見られ、本法により合理的な断面が探索されつつあることが推察される。表-2は、最適解が示す各世代の支承の分担率の変化を示したものである。この表より、初期の最適解では支承2と4の荷重分担率が設定された値と5 %ほど異なるのに対して、10 世代後には全支承が設定された荷重分担率を満たしていることがわかる。したがって、支承の変位制約を考慮しない場合にはわずか10 世代程度の簡易な探索で良好な解を得ることが可能であり、本法の有効性が確認された。

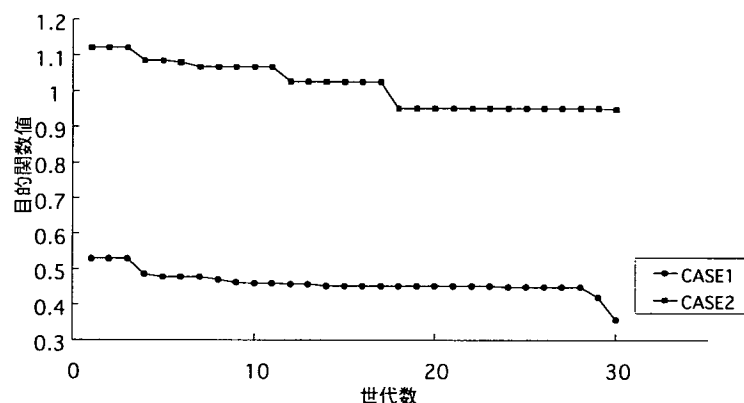
3.3 全制約条件を考慮したケース

次に、全制約条件を考慮した場合の検討を試みた。なお、式(10)中の2つの目的関数（式(1),(2)に示した）に対する重み付けとして、ケース1: $\alpha_1, \alpha_2 = 0.2 : 0.8$ を与えて各支承の荷重分担率を制御することに重点を置いた場合、ケース2: $\alpha_1, \alpha_2 = 0.8 : 0.2$ を与えて固有周期の長期化を図り、設計水平震度の低減に重点を置いた場合の2通りの解析を行い、比較検討した。

図-7(a)は、2ケースで世代全体における適応度の平均値の推移を示したものである。この図より、どちらも5 世代までに適応度の平均値は急激に低下していることがわかる。表-3は、制約条件を満たす個体数の変化を示したもので、この表から初期値には制約を満たす個体が非常に少ないが、世代の交代とともに急増していることが認められ、その結果として図-7(a)に示される適応度の平均値の急速な改善が得られていることが確認された。一方、図-7(b)は最適解の推移を示したものである。この図より、ケース1は世代交代とともに着実に最適値が小さくなっているのに対して、ケース2は5～25 世代に殆ど改善が見られない停滞期が存在することがわかる。最終的には、ケース2においても25 世代目以降に大きな改善が認められ、いずれの場合も本法が有効



図－7(a) 個体適応度の世代平均の推移



図－7(b) 個体適応度の最適解の推移

表－4(a) 荷重分担率の変化（ケース1）

世代	支承1	支承2	支承3	支承4
1	0.09101	0.2489	0.4050	0.2551
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	0.1007	0.3143	0.3614	0.2235
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20	0.0916	0.2845	0.3955	0.2284
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	0.09056	0.3193	0.3877	0.2024

表－4(b) 荷重分担率の変化（ケース2）

世代	支承1	支承2	支承3	支承4
1	0.09101	0.2489	0.4050	0.2551
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	0.09546	0.3093	0.3392	0.2561
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20	0.09574	0.2976	0.3717	0.2349
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	0.09666	0.3005	0.3656	0.2372

に機能していることが認められた。2 ケースともに、最適解は初期値から比較すると約 20～30%改善されているが、やはり全制約条件を課すことで、良好な解の改

表－3 制約条件を満たす個体数

世 代	ケース1	ケース2
1	4	4
3	8	7
5	30	28
7	49	45
10	54	53

表－5 遺伝子データの変化

遺伝子	1 世代	30 世代
支承1	a	48
	b	48
	te	11
	Ne	1.2
	G	8
支承2	a	64
	b	64
	te	3
	Ne	2.2
	G	10
支承3	a	66
	b	66
	te	5
	Ne	1.2
	G	10
支承4	a	54
	b	58
	te	5
	Ne	1.6
	G	10
橋脚1	As1	1500
	As2	18
橋脚2	As1	1500
	As2	18

善を得るには 3.2 の支承の変位制約を考慮しない場合に比べてより多くの試行が必要であり、本ケースの場合には 3 倍の 30 世代を要していることがわかる。したがって、支承の変位制約が解の選択可能な範囲を大きく制限していることが推察される。

表－4(a)および(b)は、2つのケースで得られた最適解による各支承の荷重分担率の変化を示したものである。この表より、当然の結果として各支承の荷重分担率を制御することに重点を置いたケース1の方が、設定された分担率（支承1：10%，支承2：30%，支承3：40%，

支承4：20%)により近い値を示していることがわかる。

表-5は、ケース1における最適解が有する遺伝子データの変化を示したものである。この表より、各支承のデータに小さな変化は見られるが、明瞭な傾向はつかみづらい。一方、橋脚1のデータは主鉄筋を減らし横拘束筋を増加することで、明らかに粘りをもたせた断面が選択されていることがわかる。このことから、橋梁全体系の応答の長周期化を図るとともに、支承条件の細かい変更で荷重分担率の制御を行うことで、設計者の意図に合致した断面諸元の決定がなされているものと考えられる。

結 論

本研究で得られた成果を要約すると、以下のようになる。

- 1)各橋脚の配筋状況と支承の寸法等を遺伝子データとしたGAによる数値解析で、支承と橋脚の相互作用を考慮した合理的な断面諸元の決定が可能であることが確認された。
- 2)本法により、地震時保有水平耐力法の設計手順に従い、予め設定された各支承位置の荷重分担率を簡易に実現できることがわかった。

3)連続桁橋を想定した今回の解析例では、支承の変位制約が非常に厳しく、解の選択範囲に大きな制限を加えていることが明らかとなった。

4)3)の事実より、初期の世代中に制約条件を満足する個体の占める割合が非常に小さく、その対処については今後の検討が必要である。今回は、ペナルティ係数による処理で、世代交代とともに制約条件を満たす個体数が急増し、解の改善も認められたが、大局的な最適解の探索は果たせていないものと考えられる。

なお、ここで得られた最適解をより合理的な断面諸元と判断するには動的解析による照査も必要である。今後、今回の解析と動的解析による照査を併用した地震時保有水平耐力法に基づく設計計算支援の手法を確立していく予定である。

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，平成8年12月
- 2)古田均、杉本博之：遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用，森北出版，1997年