

多目的 GA を用いた道路ネットワークの最適耐震設計支援システムの構築

Optimal Seismic Design of Road Network Using Multi Objective Genetic Algorithm

古田 均*, 小山 和裕*, 片岡 宏文***, 堂垣 正博****

Hitoshi Furuta, Kazuhiro Koyama, Hirofumi Kataoka, and Masahiro Dogaki

*	工博	関西大学教授	総合情報学部	(〒569-1095 高槻市霊仙寺町 2-1-1)
**	修士 (情報)	関西大学大学院	総合情報学研究科	(〒569-1095 高槻市霊仙寺町 2-1-1)
***	学士 (工学)	関西大学大学院	工学研究科	(〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)
****	工博	関西大学教授	工学部都市環境工学科	(〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

In this study, an attempt is made to develop an optimal seismic design system of road network by using multi-objective genetic algorithm and introducing reliability index and Life-Cycle Cost (LCC.) The reliability index and LCC can not be optimized simultaneously, because both of them have a trade-off relation. In this study, multi objective optimization is introduced to obtain several Pareto-solutions. Furthermore, LCC is calculated by introducing the user cost due to the occurrence of earthquake. Through a numerical analysis, the following conclusions were derived: 1) The user cost was more dominant to the seismic loss than the repair cost of bridge, 2) It is possible to reduce a great amount of loss by introducing the user cost, 3) Importance levels of bridges were decided by using the reliability indices as their measure.

Key Words: Optimal Seismic design, Reliability Index, Life-Cycle Cost, MOGA, Steel Bridge Piers,

Road Network

キーワード: 最適耐震設計, 信頼性指標, ライフサイクルコスト, 多目的遺伝的アルゴリズム,
鋼製橋脚, 道路ネットワーク

1. まえがき

近年, わが国の耐震設計法は急速に進歩を遂げている。特に, 兵庫県南部地震以降の耐震設計法の進歩は目覚ましいものがある。兵庫県南部地震を経験し, 構造物の設計理念は許容応力度設計法から限界状態設計法へと移行しつつある。また, 構造物の性能が明確に規定された性能照査型設計法の導入が検討されている。しかし, 現状では, 性能照査は容易でなく, 時間的にも多大な労力が必要なため, 構造物に要求される性能が十分に検討は行われていない。このような中で, 時間的労力を軽減して構造物を合理的に設計するためには, 性能照査を満足させる合理的な設計案を提示する設計システムの構築が必要である。

性能照査型設計では, 目標とした構造物の性能を供用期間中保持することを必要条件とする。その結果を供用期間中のライフサイクルコスト (Life-Cycle Cost : LCC) により評価することで, 構造物の信頼性は高く, かつ費用は少なくといったトレードオフの関係にある両者を満たす設計案の提示が可能となる。

杉本ら^{1)~3)}は, 非線形スペクトル法および地震時保有水平耐力法による耐震性能照査を取り入れ, 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) による最適化を目指した鋼製橋脚の最適耐震設計システムを構築した。彼らは,

RCラーメン高架橋の最適耐震補強システムも構築した。佐藤ら⁴⁾はGAの収束過程を利用した鋼製ラーメン橋脚の最適設計支援システムを構築した。香月ら⁵⁾は部分安全係数による鋼製ラーメン橋脚の耐震信頼性設計を行った。この他にも最適耐震設計に関する研究が行われている。いずれの研究も構造物の性能と費用に注目しているが, LCC分析における目的関数に初期建設費用, 地震時補修費用などの確定値のみを考慮した研究がほとんどで, 地震のような不確実性は考えられていない。地震の発生は構造物の損傷のみならず, LCCにも影響を及ぼす。耐震設計において, 地震動の影響を考慮することは当然のことである。

そこで, 本研究では地震発生によって生じる損失をLCCに加え, 鋼製橋脚の耐震信頼性とLCCを満足する最適設計支援システムの構築を試みる。本システムは, 鋼製橋脚の信頼性理論に基づく耐震性能照査と多目的遺伝的アルゴリズム (Multi Objective Genetic Algorithm : MOGA)⁶⁾による最適探索法を用いる。

2. 最適耐震設計支援システム

本最適耐震設計支援システムは, 信頼性理論に基づいた鋼製橋脚の最適な耐震設計案をMOGAによって求めた後, その耐震性能が弾塑性有限変位動的応答解析によ

て照査できるシステムである。本システムのフローチャートを図-1に示す。

本システムでは、信頼性理論に基づく耐震性能照査とMOGAによる最適耐震設計案を一次設計とし、その設計案が弾塑性有限変位動的応答解析による照査から所要の耐震性能を満足しておれば、終了となる。

ところで、大地震がある地域で発生すれば、広範囲な被害の生じる可能性がある。兵庫県南部地震では、事実、広範囲にわたって橋梁の倒壊や損傷が生じた。その結果、緊急車両などは、通常時に比べ、長時間の運転を余儀なくされた。このように、一つの橋梁が機能しなくなった場合、それにリンクする道路網が直接的損失のみならず間接的な損失も被る。

以上のことを勘案し、本研究では道路ネットワークを想定し、地震の発生によって機能しなくなった場合の損失を考慮した鋼製橋脚の耐震設計を提案する。

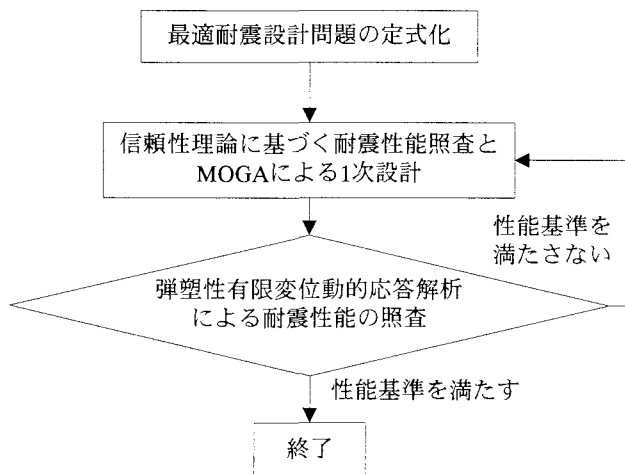


図-1 最適耐震設計支援システムのフローチャート

3. 信頼性理論に基づく鋼製橋脚の耐震性能照査

本研究では、井面らの研究⁷⁾を参照し、信頼性理論に基づいて構造物の耐震信頼性を評価する。

3.1 必要降伏強度の確率モデル

構造物の耐震設計では、地盤種、地動最大加速度、目標塑性率を初期値として構造設計される。その結果、構造物の固有周期は、その構造諸元によって異なる。構造物の必要降伏強度は、当然、その固有周期によって変動する。ただし、設計の簡便さを考えれば、必要降伏強度の確率モデルが構造物の固有周期によって変化することは好ましくない。ここでは、必要降伏強度の確率モデルを構造物の固有周期によらず一定と仮定し、地盤種と目標塑性率ごとに作成する。ここに、必要降伏強度とは「地震力を受ける構造物の損傷を許容値内に押さえるために必要な構造物の最小強度」である。

必要降伏強度の確率モデルにさまざまな分布型を当て

はめた結果、つぎの対数正規分布が最もよく適合した。

$$f_{\rho_c}(x) = \frac{1}{\sigma_{\ln(x)} \sqrt{2\pi}} \frac{1}{x} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \mu_{\ln(x)}}{\sigma_{\ln(x)}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

ここに、 $\mu_{\ln(x)}$ は必要降伏強度スペクトルを回帰分析して得られる標準値に相当する。すなわち、確率変数 $\ln(x)$ に対する標準偏差 $\sigma_{\ln(x)}$ がわかれば、必要降伏強度の確率モデルは算出できる。表-1に、地盤種と目標塑性率ごとに標準偏差 $\sigma_{\ln(x)}$ の算定結果を示す。

3.2 限界状態関数の設定

本研究では、つぎの限界状態関数を仮定する。

$$Z = H_{\max} - H_{ny} \quad (2)$$

ここに、 $H_{\max}$ は構造物の地震時保有水平耐力、 H_{ny} は対数正規分布で表される必要降伏強度である。

(1) 使用限界状態

構造物の使用限界状態を弾性限界とする。すなわち、塑性率 $\mu=1.0$ の場合を式(2)に適用する。

表-1 確率モデルに対する計算結果

塑性率	地震動	地盤種	$Var_{\ln}$	$\sigma_{\ln}$
1	I	I	0.0030	0.0551
		II	0.0029	0.0537
		III	0.0052	0.0722
	II	I	0.0049	0.0699
		II	0.0054	0.0736
		III	0.0044	0.0662
2	I	I	0.0333	0.1488
		II	0.0343	0.1852
		III	0.0287	0.1649
	II	I	0.0306	0.1749
		II	0.0361	0.1900
		III	0.041	0.2025
3	I	I	0.0256	0.1599
		II	0.0287	0.1696
		III	0.0339	0.1842
	II	I	0.0372	0.1927
		II	0.0457	0.2140
		III	0.0576	0.2401
4	I	I	0.0286	0.1691
		II	0.0302	0.1736
		III	0.0388	0.1970
	II	I	0.0383	0.1956
		II	0.0413	0.2030
		III	0.0523	0.2287
5	I	I	0.0302	0.1739
		II	0.0337	0.1834
		III	0.039	0.1974
	II	I	0.0372	0.1930
		II	0.0397	0.1990
		III	0.0498	0.2232

(2)終局限界状態

鋼製橋脚の終局限界状態を塑性率 μ によって定義する。すなわち、塑性率 $\mu > 1.0$ の場合を式(2)に適用する。

3.3 耐震信頼性の評価法

本研究では、構造物の耐震信頼性を式(2)の限界状態関数で評価する。地震荷重モデルの確率分布を必要降伏強度の分布と同様、対数正規分布に仮定した。なお、信頼性の評価に信頼性指標 β を用いた。

非正規分布の地震荷重モデルを仮定するため、性能関数 Z は非正規分布となる。それゆえ、 Z を正規分布に変換する必要がある。すなわち、

$$F_z(z^*) = \Phi\left(\frac{z^* - \mu'_z}{\sigma'_z}\right) \quad (3)$$

$$f_z(z^*) = \frac{1}{\sigma'_z} \varphi\left(\frac{z^* - \mu'_z}{\sigma'_z}\right) \quad (4)$$

ここに、 μ'_z と σ'_z は近似された正規分布の平均値と標準偏差で、未知量である。上式を μ'_z と σ'_z に対して解けば、信頼性指標 β がつぎのように求められる。(図-2参照)

$$\beta' = \frac{\mu'_z}{\sigma'_z} \quad (5)$$

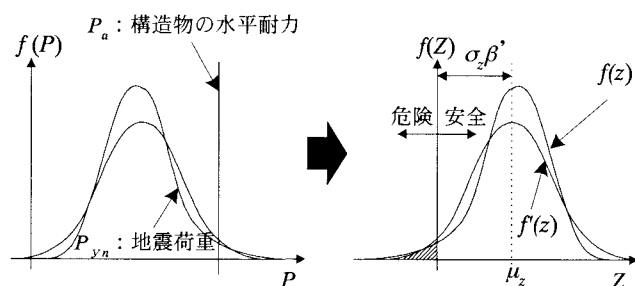


図-2 非正規分布の評価法

4. 地震発生に伴う損失を考慮したLCC算定法

橋梁のLCCは、一般に、初期建設費、維持管理費、更新費からなる。わが国のような地震多発国において、構造物の維持管理にLCC分析を取り入れる場合、構造物の破壊の危険性とその社会的・経済的影響の考慮は重要で、それをLCCに含めるのが望ましい。以下、地震発生に伴う損失を含めたLCCの算定法について述べる。

4.1 ライフサイクルコストの定式化

上述したように、構造物のLCCは一般に、初期建設費、維持管理費、更新費からなる。ここでは、構造物のLCCを初期建設費と地震時損失費用の和

$$LCC = C_i + P_d(\mu/a) \cdot C_d \quad (6)$$

$$P_d(\mu/a) = P_h(a) \cdot P(\mu/a)_f \quad (7)$$

で定義する。ここに、

C_i : 初期建設費

$P_d(\mu/a)$: 地震被害の発生確率

C_d : 地震被害による損失費用

$P_h(a)$: 地震の発生確率

$P_f(\mu/a)$: 地震による破壊確率

なお、橋梁の経年劣化に伴う維持管理費用は考えない。その理由は、経年の維持管理を考慮すれば、橋梁の劣化と地震発生の関係を明らかにする必要がある、本研究の特質が変わってしまうからである。

4.2 地震の発生確率

地震発生確率 P_h を地震ハザード曲線で評価する。地震ハザード曲線とは、震源距離分布および水平最大加速度推定式を考慮して歴史地震および活断層データからある地点における地震動の年間超過確率を算定したものである。地震ハザード曲線として、図-3に示す曲線を用いる。0.84フラクタイルハザード曲線は、各加速度に対し84%の地点のハザードレベルがそれ以下になるようなレベルを結んで得られる曲線である。

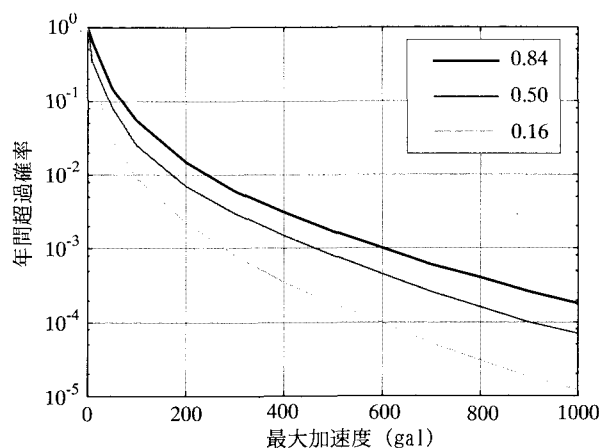


図-3 地震ハザード曲線⁸⁾

4.3 地震による構造物の損傷

橋梁を対象とした場合、地震の発生によって生じる損失は、一般に、橋梁の損傷に伴う復旧費用である。しかし、地震損傷を受けた橋梁の復旧作業期間には、橋梁にリンクする道路ネットワークの利用者は交通規制や通行止めなどの影響を受ける。特に損傷程度が大きい場合、復旧作業は長期にわたるため、その影響が大きいことは容易に想像できる。この場合、橋梁にリンクする道路ネットワークの利用者は、目的地に到達するまでに余分な時間や費用を費やす。

以上のことを踏まえ、地震発生に伴う損失を以下の様に定義する。

①橋梁の損傷に伴う費用。(C_b)

②ユーザーコスト。すなわち、地震損傷の回復に要する交通規制や通行止めなどを伴った復旧作業が発生した場合に、道路ネットワークの利用者が消費する費用。(C_u)

なお、地震発生に伴う損失を次のように定義する。

$$C_d = C_b + C_u \quad (8)$$

4.4 ユーザーコストの定義

本研究で扱うユーザーコストは、交通規制や通行止めによって、利用者が迂回することによる走行時間増加コストおよび燃料費の増加などによる走行費用増加コストからなる。

走行時間増加コストC_{UT}は、道路ネットワーク全体を対象に、復旧時の交通規制による走行時間費用C_{Tw}と通常時走行時間費用C_{T0}の差として、次式で算定する。

$$C_{UT} = D \cdot (C_{Tw} - C_{T0}) \quad (9)$$

$$= D \cdot \left\{ \sum_{l=1}^{N_L} (a \cdot Q_{wl} \cdot T_{wl}) - \sum_{l=1}^{N_L} (a \cdot Q_{0l} \cdot T_{0l}) \right\} \quad (10)$$

走行費用増加コストC_{UL}は、道路ネットワーク全体を対象に、復旧時の交通規制による走行費用C_{Lw}と通常時走行費用C_{L0}の差として、次式で算定する。

$$C_{UL} = D \cdot (C_{Lw} - C_{L0}) \quad (11)$$

$$= D \cdot \left\{ \sum_{l=1}^{N_L} (b \cdot Q_{wl} \cdot L_{wl}) - \sum_{l=1}^{N_L} (b \cdot Q_{0l} \cdot L_{0l}) \right\} \quad (12)$$

ここに、D : 復旧工事による交通規制日数

N_L : 道路ネットワークのリンク数

a : 時間価値原単位

b : 走行費用原単位

Q_{wl}, T_{wl}, L_{wl} : 通行止め時の迂回路の交通量, 走行時間, リンク長

Q_{0l}, T_{0l}, L_{0l} : 通行止め時の迂回路の交通量, 走行時間, リンク長

ここでは、小型貨物車と普通貨物車の混入率を10%、時間価値原単位aと走行費用原単位bを、文献[9]を参考に、それぞれ82 (円/台・分)と表-2とした。また、地震の発生による橋脚の損傷に対する復旧期間は2ヶ月とした。

表-2 走行費用原単位

速度 V (km/h)	走行費用原単位 b (円/台・km)
5	35
10	28
20	21
30	18
40	18

5. 信頼性理論とMOGAによる最適耐震設計支援システム

信頼性理論とMOGAを用いた最適耐震設計支援システムを構築する。本支援システムの簡易的なフローチャートはすでに図-1で示した。ここでは、本支援システムにおけるMOGAの進化計算の過程、信頼性理論に基づく耐震性能照査および動的解析による耐震性能照査について述べる。

5.1 GAによる多目的最適化

GAは、生物界における進化の過程を真似て作られたアルゴリズムで、さまざまな分野で派生する最適化問題の解を効率的に探索するために考案されたものである。GAの重要な処理プロセスは、選択、交叉、突然変異であるが、多目的最適化問題にGAを適用する場合、単目的最適化問題と異なる点は選択方法であり、パレート最適解を適切に評価・選択し、次世代に残すことが鍵となる。具体的な手順として、交叉・突然変異を行い、パレート保存戦略によって個体群の中からパレート最適解をすべて次世代に残す。ただし、パレート最適解が個体群のサイズよりも多い場合、パレート最適解の中から並列選択する。

5.2 最適耐震設計支援システムのフローチャート

一般に、不確実な事象をGAの進化過程に組み込むことは難しく、その最適解を得ることは困難である。本研究では、信頼性理論に基づいて地震動の不確実性に伴うばらつきを信頼性指標で評価する。すなわち、GAの評価計算に信頼性理論を適用する。図-4に本支援システムの詳細なフローチャートを示す。

本支援システムは、図-4に示すように、

- ① MOGAによる最適化
- ② 信頼性理論に基づく耐震性能照査
- ③ 動的照査法による耐震性能照査

からなる。MOGAの評価計算において、遺伝子をデコーディングして設計断面を決定する。はじめに、この断面に対して信頼性理論に基づく耐震性能照査を行う。このとき、あらかじめ定めた目標信頼性指標β_Tを満足しない場合には、ペナルティを与える。満足する場合には、動的照査法による耐震性能照査に移る。この照査では、道路橋示方書¹⁰⁾に準拠して以下の条件を満たすようにする。

- ① 動的応答解析によって算出される鋼製橋脚の最大応答変位が許容値以下になる。
- ② 動的応答解析によって算出される上部構造の慣性力の作用位置における最大応答変位が、

$$\delta_R = C_R (\mu_r - 1) (1 - r) \delta_y \quad (13)$$

の許容残留変位以下になる。ここに、

δ_R : 橋脚の残留変位

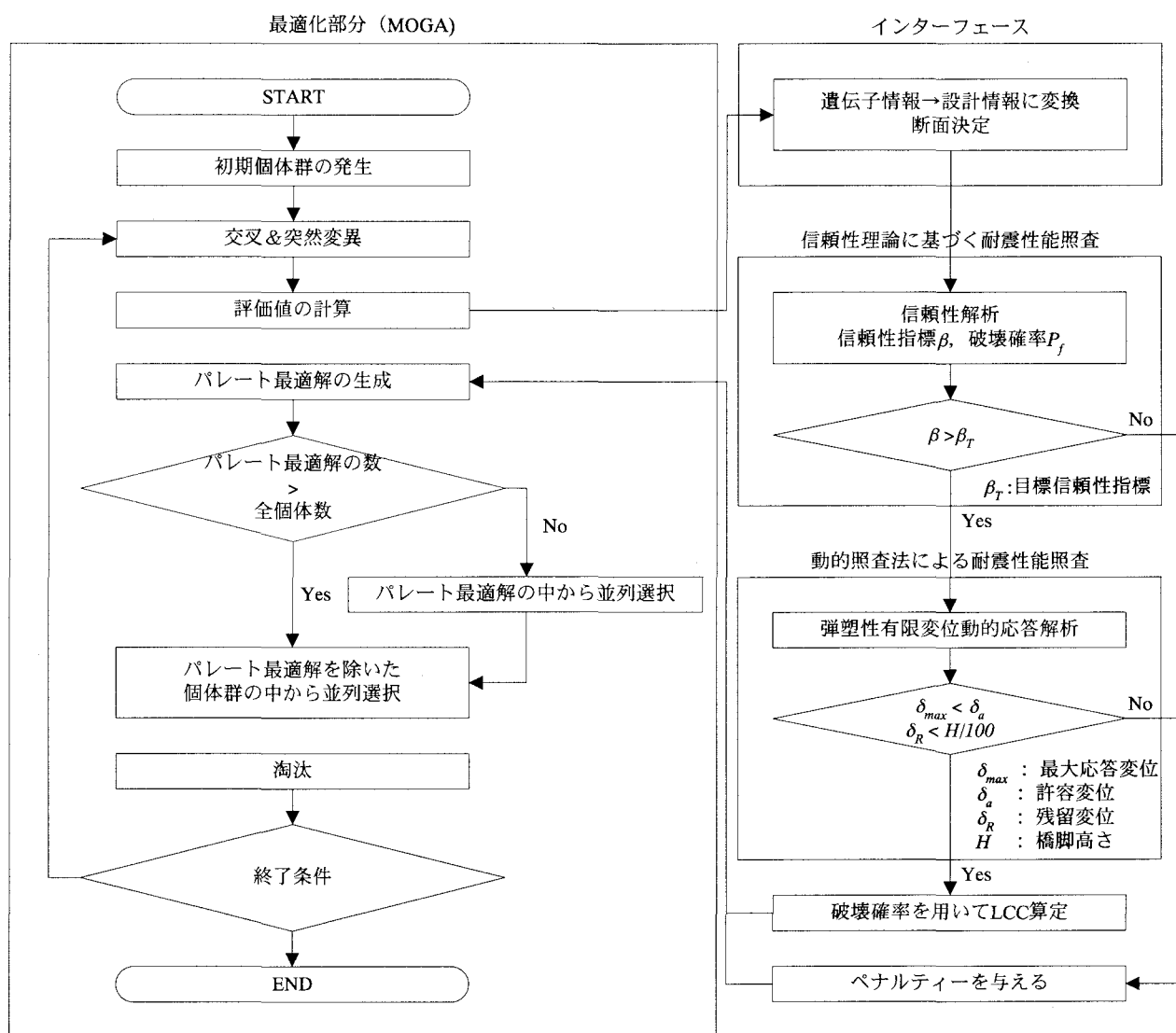


図-4 最適耐震設計支援システムの流れ

C_R : 残留変位の補正係数

μ_r : 橋脚の最大応答塑性率

r : 橋脚の降伏剛性に対する降伏後の二次剛性比

照査の結果、満足されれば、算定した破壊確率を用いてLCCを算定する。一方、満足しなければ、ペナルティーを与える。

6. 最適設計問題の定式化と対象構造物

最適耐震設計システムは、信頼性理論に基づく耐震設計解を最適化手法MOGAによって求め、弾塑性有限変位動的応答解析によって耐震性能の照査を行う設計システムである。ここでは、最適化手法MOGAにおける最適設計問題の定式化について述べる。

6.1 目的関数と制約条件

本研究では、目的関数として、信頼性指標とLCCの2つを設定し、以下に示す。

$$\text{OBJ1} : \beta = \sum \beta_i \rightarrow \max \quad (14)$$

$$\text{OBJ2} : LCC = \sum LCC_i \rightarrow \min \quad (15)$$

ここに、 i は道路ネットワーク上の橋梁番号を示す。

構造物の耐震設計を行う際、構造物の信頼性を評価する信頼性指標 β に対して制約条件を設ける。ここでは、兵庫県南部地震レベルの地震動を想定し、鋼製橋脚の耐震設計を行う。そのため、対象地震動をタイプⅡ地震動、その地動最大加速度を800galとする。ただし、構造物の損傷は $\mu_r=2.0$ とし、その損傷に対して信頼性指標 $\beta=2.0$ を確保する設計とする。

6.2 対象構造物と初期建設費用

ここでは、図-5(a)に示す単柱形式の鋼製橋脚を解析対象とする。鋼柱の断面を図-5(b)に示す正方形の無補剛箱形断面とする。設計変数をフランジ幅 b_f 、フランジ厚 t_f 、腹板高 b_w 、腹板厚 t_w とする。ただし、設計の簡単化のためフランジ厚 t_f と腹板厚 t_w は等しいものとした。また、道

路橋示方書¹⁰⁾を参考に最小板厚は、

$$\frac{b_f}{t_f} = \frac{b_w}{t_w} \leq 48 \quad (16)$$

を満足するものとした。なお、使用鋼種はSM490Y材である。

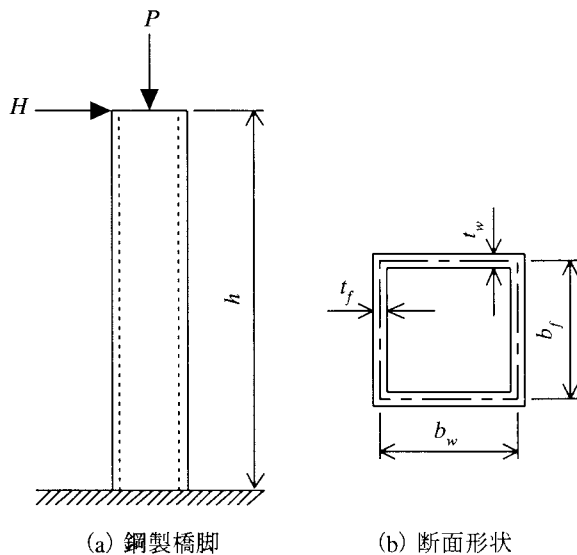


図-5 単柱式鋼製橋脚

上部構造にRC床版を有する鋼製2主箱桁橋を想定し、支間長が40m程度の連続高架橋を支える鋼製橋脚とした。これをもとに、橋脚に作用する鉛直荷重を上部構造の反力に相当する荷重 $P=10.84\text{MN}$ とした。

鋼製橋脚の初期建設費用を、材料費、塗装費、輸送費とした(表-3参照)。また、地震発生後橋脚が損傷を復旧するのに要する補修費には、橋脚を再構築するものとし、初期建設費用の1.2倍と仮定した。

表-3 初期建設費用

種類	単位	費用(円)
材料費	t	97,585
塗装比	m^2	1,700
輸送費	t	9,000

7. 数値計算結果とその考察

ここでは、大阪市北東部の道路ネットワークをモデル化し、当エリアに存在する橋梁を選定し、その最適耐震設計を行う。

7.1 道路ネットワークの設定

解析対象モデルとして、図-6のような道路ネットワークを設定した。対象エリアの大きさは、東西で6km、南北で9km程度である。橋梁数は20で、このエリアには4車線道路(片側2車線)、2車線道路(片側1車線)、

および1車線道路(片側通行)が混在している。また、道路区間の交通量と速度の関係には、図-7に示すQ-V曲線を用いる。ここに V_1 、 V_2 、 Q_1 は、

$$V_1 = 0.1 \times V_{\max} \quad (17)$$

$$V_2 = 0.3 \times V_{\max} \quad (18)$$

$$Q_1 = Q_c / 3 \quad (19)$$

で表される。各リンクの可能交通容量 Q_c と自由走行速度 $V_{\max}$ は、2車線の場合にはそれぞれ36,000台/日、50km/h、

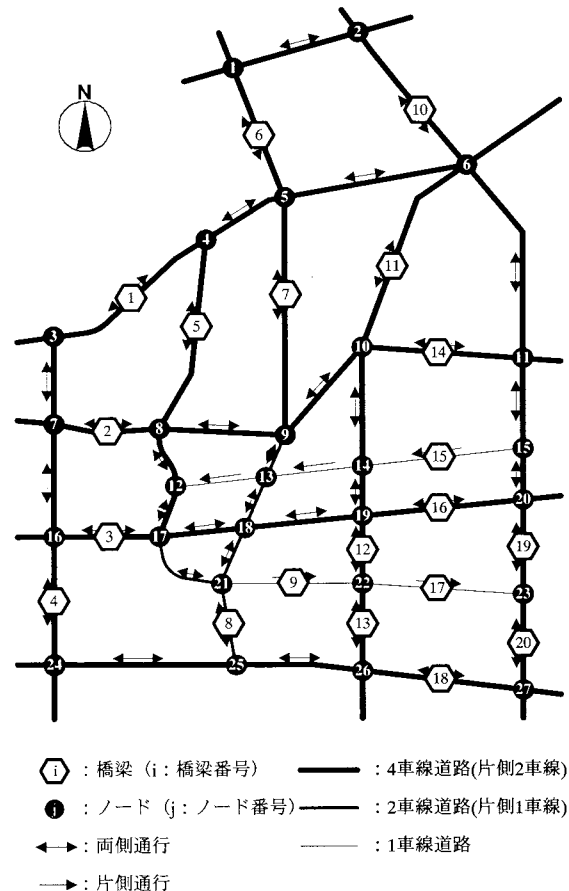


図-6 対象道路ネットワーク

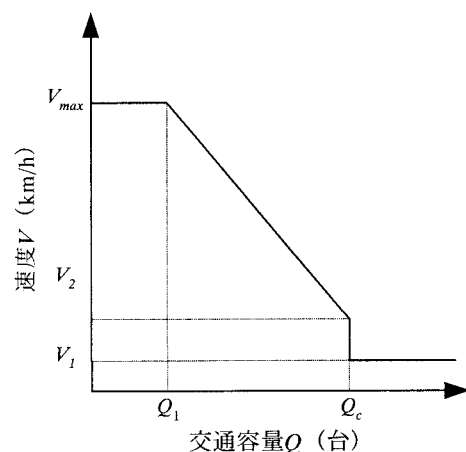


図-7 Q-V曲線

1車線の場合にはそれぞれ12,000台/日、40km/hと仮定した。

ユーザーコストを算定するには、橋梁の復旧に伴う交通規制による交通量の変化を推測する必要がある。本研究では、道路ネットワークでの交通量を分割配分法¹¹⁾で推定する。その際、最短経路の探索にはダイクストラ法¹²⁾を用いる。

7.2 数値計算結果

本研究では、最適耐震設計案の探索にMOGAを用い、図-8のように遺伝子をコーディングした。MOGAの各パラメータは、世代数：500、個体数：200、交叉率：0.6、突然変異率：0.02とし、一様交叉を用いた。以上の条件のもと、本支援システムによって数値計算した。その結果の一例を表-4に示す。

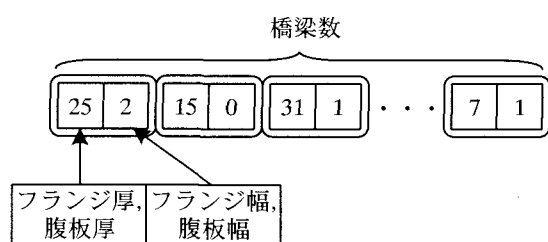


図-8 遺伝子のコーディング

LCCが最小となる設計案に注目すると、LCCが982,694億円、各橋梁の信頼性指標は橋梁3、10を除いてすべてが制約より大きな値 ($\beta > 2.0$) を示しており、最大で4.63である。橋梁単体の場合は地震時の損失にユーザーコストを考慮せずに期待総費用最小化に基づく設計法によって $\beta = 2.0$ となる。しかし、 $\beta = 2.0$ となる設計案をすべての橋梁に適用すると、LCCは約1,200,000億円となり、LCC最小の設計案のみでなく、本支援システムで提示したすべての設計案よりLCCが大きくなる。これは、地震時の損失にユーザーコストを考慮するか否かでLCCが最小になる信頼性指標 β が大きくなるためである。すなわち、道路ネットワークを想定した際、ユーザーコストの影響で設計案は大きく異なることがわかる。また、ユーザーコストは橋脚の再構築の費用に比べて極めて大きいため、信頼性指標 β の値が同じであっても、莫大な損失を削減することができている。 $\beta = 2.0$ の設計案とLCC最小の案と

比較すると、対象エリア全体で約217,000億円、また、LCC最大（安全側に設計した場合）の案と比較すると、約113,000億円の損失を削減することができる。すなわち、耐震設計において道路ネットワークを想定することで、莫大な損失を削減できる可能性がある。

本支援システムで提示した設計案は、従来の設計法よりも損失を削減できるだけでなく、道路ネットワークにおいて重要な橋梁を決定できる可能性がある。本支援システムで設計案を多数提示した結果、約80%の設計案で橋梁6の信頼性指標 β が4以上となった。橋梁6は他の橋梁が破壊した時に比べてユーザーコストが極めて大きい。それゆえ、橋梁6の耐震性能を高くすることで損失を削減することができる。すなわち、提示された信頼性指標 β の値は、道路ネットワーク上における橋梁の重要性を示すことができる。また、耐震設計のみでなく道路ネットワーク上の橋梁の耐震補強および地震後の復旧などの計画を、信頼性指標を尺度として優先順位を決定することもできるであろう。

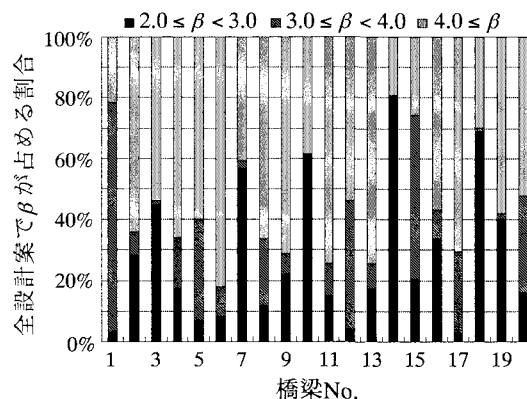


図-9 全設計案における各橋梁の信頼性指標の割合

7.4 動的弾塑性有限変位解析結果

本研究では、遺伝子をコーディングし、信頼性理論に基づいて設計された鋼製橋脚に対して動的解析による照査を行った。本支援システムを用いて得られた設計案のうち、信頼性指標 $\beta = 2.0$ 、幅 $b_f = b_w = 2,000\text{mm}$ 、板厚 $t_f = t_w = 66\text{mm}$ の断面からなる単柱形式の鋼製橋脚に対する動的解析結果を図-10に示す。図中の δ は応答変位、 δ_y は降伏変位である。また、動的解析に用いる入力地震波と

表-4 最適耐震設計支援システム数値計算結果の一例

LCC (億円)	信頼性指標																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
982,694	3.39	3.76	2.00	4.63	4.13	4.56	2.29	3.22	3.95	2.00	3.12	4.21	3.12	2.29	3.30	2.22	3.22	4.63	2.22	4.47
990,940	3.76	2.00	4.63	3.48	4.39	2.29	4.63	3.95	2.00	3.12	4.21	4.13	2.08	3.76	2.22	4.56	2.22	2.22	2.08	3.25
991,148	2.29	2.00	2.22	2.29	2.00	2.29	3.22	4.39	4.39	2.15	4.71	4.47	2.08	3.57	4.63	4.71	2.22	2.15	2.08	3.06
1,026,542	2.29	4.39	4.63	4.13	4.47	4.63	2.00	2.00	4.13	4.71	3.48	4.30	2.29	3.76	2.22	4.04	2.00	2.15	4.47	3.51
1,046,813	4.71	4.39	4.63	3.57	4.47	2.29	4.39	4.63	2.00	4.56	3.30	4.47	2.29	4.39	2.22	4.04	2.22	4.47	4.47	3.75
1,087,009	4.71	4.47	4.63	4.71	4.56	4.71	4.56	4.63	2.00	4.56	4.71	2.08	4.71	3.30	4.63	4.04	4.39	2.08	4.56	4.08

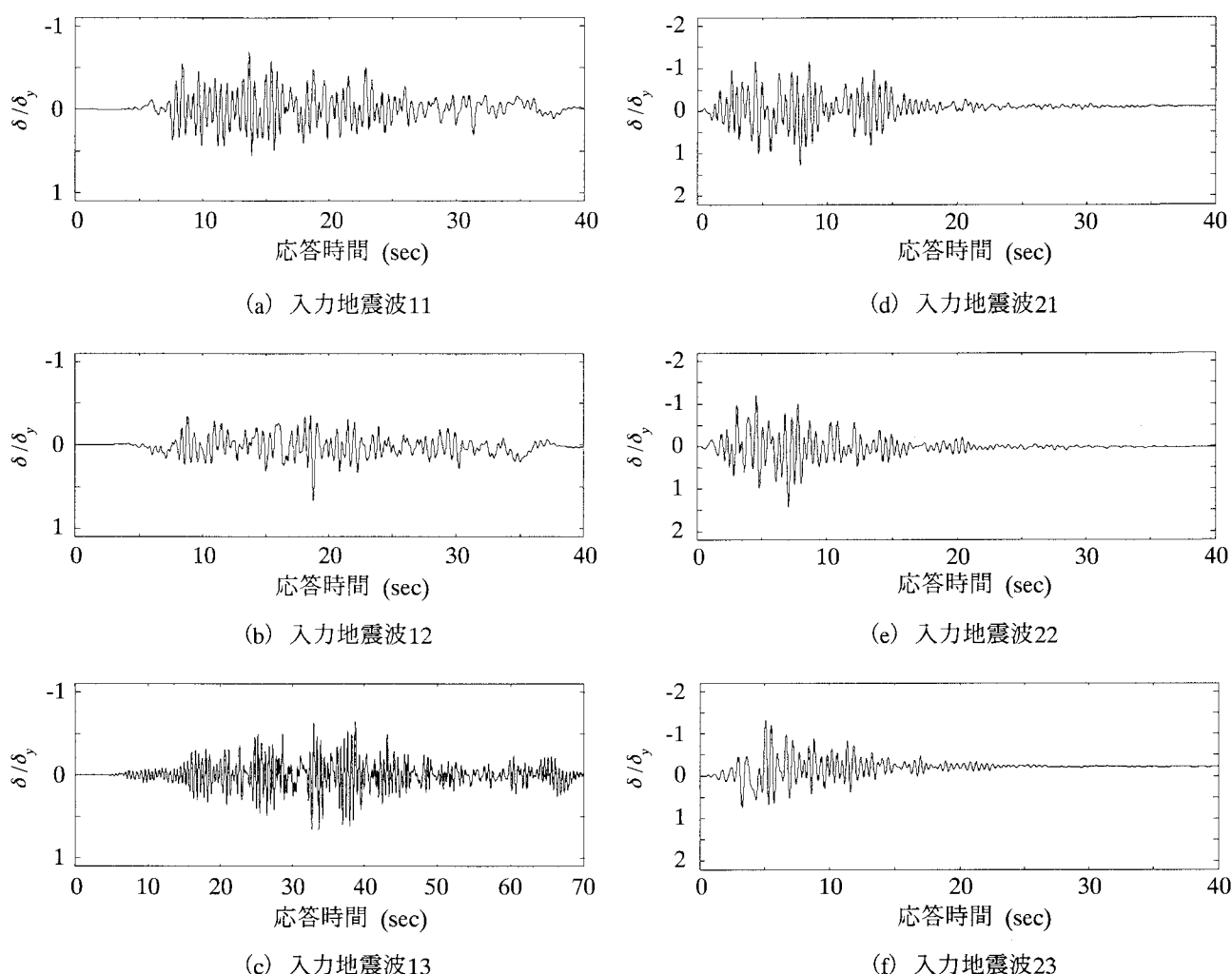


図-10 鋼製橋脚の柱頭での応答変位

表-5 入力地震波

地震動	地震名	マグニチュード	記録場所	成分	番号
タイプⅠ	1968年日向灘沖地震	7.5	板島橋周辺地盤上	LG	11
				TR	12
	1994年北海道東方沖地震	8.1	温根沼大橋周辺地盤上	TR	13
タイプⅡ	1995年兵庫県南部地震	7.2	JR西日本鷹取駅構内地盤上	N-S	21
				E-W	22
			大阪ガス葺合供給所構内地盤上	N27W	23

して、道路橋示方書⁹⁾に記載の標準入力例のうち、表-5に示す2種地盤のタイプⅠ、タイプⅡ地震動の入力地震波を用いた。その地動最大加速度を800galとし、それぞれを振幅調整した。

図から明らかなように、すべての地震動に対して、構造物の挙動が既定値以内に収まっていることがわかる。紙面の都合上、その他の動的解析の結果は載せることができなかったが、提示した設計案はすべて許容値以内に収まっている。ちなみに、 $\beta=2.0$ は破壊確率 $P_f(2.0/800)=0.023$ に相当する。

7.4 数値解析結果の考察

LCCを勘案した設計法の一つに期待総費用最小化に基づく方法がある。この方法は、供用期間中の構造物のLCCに注目し、それが最小になるように設計しようとする方法である。しかし、この設計法は安全性より費用が重視された設計法であり、社会的に認められるためには確実な安全性の指標が定義されない限り困難である。

本支援システムでは、構造物の安全性と費用との間にあるトレード・オフの関係を勘案した計画案が提示できる関係上、信頼性指標が大きくLCCが小さい設計案、あるいはその逆の設計案も得られた。そして、両者が妥協

した設計案も提示することができた。多目的最適化問題として1次設計を行ったことで、期待総費用最小化に基づく設計法で問題となっているLCCを重視した箇所を解決できた。

また、地震時の損失にユーザーコストを付加したLCCに注目して、道路ネットワークにおける橋梁の重要度を決定できる可能性を示した。しかし、重要度は、人命・生存、避難・救援・救助活動と2次災害防止活動、地域の生活機能と経済活動に与える影響を考慮して定めるべきである。今後、ユーザーコスト以外にも上記の内容を考慮して検討を行えば、より精度の高い重要度を決定できるであろう。

8. あとがき

兵庫県南部地震以降、構造物の耐震設計法が大幅に見直され、動的解析による耐震照査法が道路橋示方書に規定された。しかし、動的照査法はコンピュータの計算時間を勘案すると、多くの設計案に対して行うことは非合理的である。

本研究では信頼性理論と多目的遺伝的アルゴリズムによる道路ネットワークレベルの合理的な最適耐震設計支援システムを構築した。本支援システムは、MOGAの評価計算に信頼性理論に基づく耐震性能照査法を応用して1次設計解を求め、弾塑性有限変位動的応答解析によって耐震性能の照査をした。また、目的関数に地震発生に伴う損失を付加したLCCを考慮した。

本研究で得られた結果は以下のである。

- (1) 目的関数にLCCと信頼性指標を設定した多目的最適化問題として最適耐震問題を検討した結果、各目的関数に特化した設計案、および、両者が妥協した設計案を提示することができた。
- (2) 地震時の損失にユーザーコストを考慮するか否かで設計案が異なることを明らかにした。これは、地震時の橋梁の損傷に対する再構築費用と比較して、ユーザーコストが極めて大きく、耐震設計においてユーザーコストの影響が強いためである。
- (3) 期待総費用最小化に基づく設計法によって提示された設計案と、本支援システムによって提示された設計案を比較すると、道路ネットワーク全体で最大で約217,000億円、最低で113,000億円の損失を削減できた。すなわち、道路ネットワークを想定して耐震設計をすることで、莫大な損失を削減できる可能性を示した。
- (4) 道路ネットワークを想定し、地震時の損失にユーザーコストを含めたことで、断面設計レベルから橋梁の重要度を決定できる可能性を示した。また、耐震設計

と同時に、道路ネットワーク上の橋梁の重要度を用いて、耐震補強優先順位などを計画できる可能性を示した。

本研究では、鋼製橋脚のフランジ幅と厚さ、腹板幅と厚さを設計変数に、耐震設計を試みた。今後、さらに多くの条件下での最適設計を行い、より有益な最適耐震設計支援システムの構築を目指したい。また、橋梁の重要度についても、検討要素を増やしより精度の高いものを提示していきたい。

参考文献

- 1) 杉本博之・村部剛・朝日啓太・古川浩平・高久達将・渡辺忠明：鋼製橋脚の最適耐震設計法について，構造工学論文集，土木学会，Vol.47A，pp.239-247，2001-3.
- 2) 杉本博之・渡辺忠明・斉藤裕俊：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，土木学会，Vol.46A，pp.385-394，2000-3.
- 3) 杉本博之・渡辺忠明・満尾淳：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，土木学会，Vol.45A，pp.423-432，1999-3.
- 4) 佐藤尚次・高橋祐幸：GAの収束過程を利用した対話型設計システムの最適設計の一考察，土木学会第57回年次学術講演会，Ⅰ-220，pp.439-440，2002-9.
- 5) 梶田幸秀・香月智・白木渡・松島学：鋼製ラーメン橋脚の耐震設計における部分安全係数決定方法に関する一考察，土木学会第57回年次学術講演会，Ⅰ-812，pp.1623-1624，2002-9.
- 6) システム制御情報学会編：システム制御情報ライブラリー17，遺伝アルゴリズムと最適化，朝倉書店，1998-4.
- 7) 井面仁志・後藤秀典・白木渡・堂垣正博：信頼性理論に基づく鋼製橋脚の耐震性能照査法，構造工学論文集，土木学会，Vol.49A，pp.207-215，2003-3.
- 8) 土木学会地震工学委員会・レベル2地震動研究小委員会編：レベル2地震動研究小委員会の活動成果報告書，2000.
- 9) 道路投資の評価に関する指針検討委員会編：道路投資の評価に関する指針(案)，日本総合研究所，1998-6.
- 10) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，丸善，1996-12.

11) 交通ネットワーク分科会編：第18回土木計画学講習
会テキスト，土木学会，平凡社，1987.

12) 土木計画学研究委員会編：交通ネットワークの均衡
分析，土木学会，丸善，1998.

(2003年9月12日受付)