

社会基盤施設の耐震性水準の合理的な設定方法に関する基礎的研究

野崎智文¹・杉田秀樹²

¹正会員 工修 建設省土木研究所耐震技術研究センター防災技術課 主任研究員 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番)

²正会員 工博 建設省土木研究所耐震技術研究センター 防災技術課長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番)

道路、河川管理施設等の社会基盤施設の耐震設計にあたっては、地域で想定される地震動に対する地震時性能が国・地域の要求を満たし、リスクが最小化される必要がある。しかしながら、現在のところ各施設の設計には異なる基準が用いられており、またそれらにおいては構造物の重要度等が与件として与えられた上で設定されているため、地域全体として耐震対策投資が最適化されているかどうか不明確である。本研究は、構造物の耐震性水準を合理的に設定するための手法について検討することを目的としているが、本稿では、複数の構造物の耐震対策内容を比較し、選択するための、耐震性水準、性能レベルの表示法を提案するほか、地域における耐震対策効果を最大にする耐震対策内容を設定する計算法を紹介する。

Key Words : Earthquake, Disaster prevention, Risk management, Optimization

1. 序 論

地震災害は、その発生頻度の低さと発生時の被害規模の大きさの点で際立った特徴を有する。このことから、特定の地域において多数の施設の耐震性水準の整合を取りながら妥当な水準を確保するための投資の考え方が重要となる¹⁾。本研究は、地域に存在する複数の社会基盤施設の耐震性水準を、合理的な方法により設定する手法を検討するものであり、その内容は大きく分けて①施設の耐震性水準の表示方法、②複数施設の耐震性に対する地域の満足度を表す目的関数の設定、③目的関数の最大化による耐震性水準の設定手順からなる。

本稿では、特に施設の耐震性水準の表示方法に焦点を当て、第2章においては、現在示されている性能表示の考え方を整理し、これを拡張する。第3章では、拡張した耐震性水準の表示方法を実際の道路橋の計画に適用した試算結果を示す。さらに第4章において、複数施設の耐震性水準の合理的な設定法の手順について例示する。なお、本稿では、以下のように用語を定義する(図1)。

(入力)地震動：施設に作用する地震動で、設計に用いられる最大加速度(peak ground acceleration: PGA)

等の値とその発生確率で表現される。

(地震時)性能：構築された施設に地震動が作用した場合に発現する利用性、安全性、修復性などの状態。

耐震性水準：施設が特定の設計内容で構築された際に持っている耐震性の水準で、入力地震動と地震時性能の対で表現される。

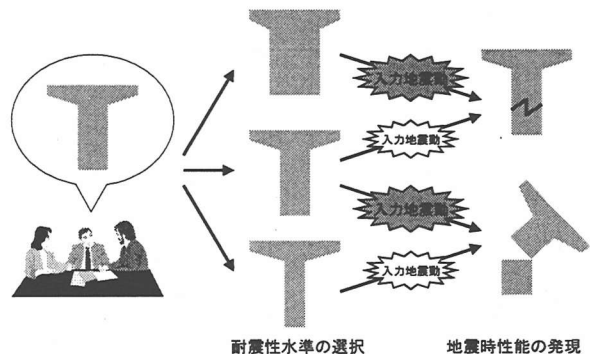


図1 耐震性水準、地震時性能の概念

2. 耐震性水準の表示方法

(1) 既往の耐震性表現法

性能を基盤とした耐震設計の考え方は先進各国で

検討されているが、その概念をわかりやすく表したものに、合衆国カリフォルニア州 SEAOC の VISION 2000 committee によるパフォーマンスマトリックスがある³⁾ (図2)。

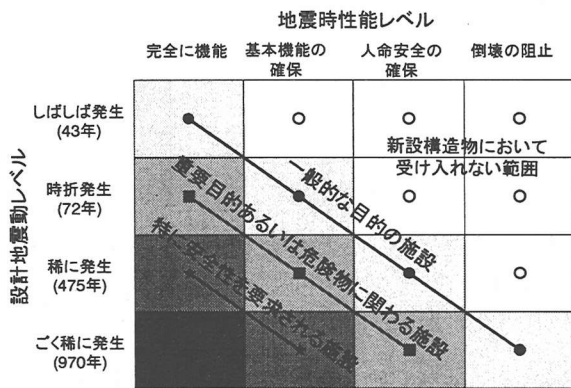


図2 VISION 2000 report のパフォーマンスマトリックス

このパフォーマンスマトリックスは建築物の設計における地震動、地震時の性能を表したもので、行に地震動のレベル、列に建築物の地震時性能を示し、各地震動レベルに対して要求される地震時性能をマトリックス中の線として表している。なお、この線は施設の重要度に応じて複数描かれている。

(2) パフォーマンスマトリックスの拡張

図2に示されるような従来のパフォーマンスマトリックスは、想定される地震動に対して施設が満足すべき性能を示すものであり、要求レベルのパフォーマンスマトリックス(demanded performance matrix: DPM)と呼ぶことができる(図3左)。これに対し、実際の施設を設計する際には、ある地震動レベルに対して所定の性能を満足するように設計すると、他の地震動レベルに対して発現する性能も定まってしまうため、耐震性水準を表す曲線が設計内容ごとに一本ずつ描かれる(図3右)。この曲線は設計内容ごとに一本定まることから、「等設計線」と呼ぶことができる。あるいはある設計内容の耐震性水準を表すことから、「等水準線」とも表現できる。この等水準線で示されたパフォーマンスマトリックスを、実現レベルのパフォーマンスマトリックス(realized performance matrix: RPM)と呼ぶことにする。

DPM は、施設の重要度を与件として、一般的な施設に要求される耐震性水準を示したものであり、要求された水準線と実現される水準線は必ずしも一致しない。これに対して、RPM は個別の施設ごとに一つずつ作成され、その中に水準の異なる複数の設計内容に対する等水準線が描かれる。したがって、

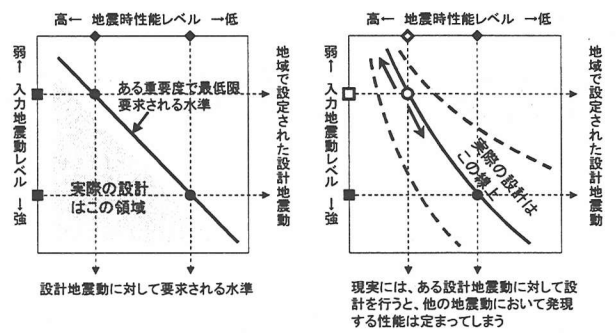


図3 DPM と RPM の比較

地域で想定される地震動と RPM に基づいて対象となる施設の耐震性能を吟味しながら、意志決定者が当該施設の耐震性水準すなわち設計内容を選択することができる。

(2) IOC カーブ

意志決定者が施設の耐震性水準をより綿密に検討したり、複数施設の耐震性水準を比較するためには、各水準を確保するために必要なコストを表示する必要がある。そこで、RPM の等水準線を実現するために必要なコストを第3の軸とし、以下のような関数を考える。

$$c = C(P, p) \tag{1}$$

ここで、 P : 実数で表示された施設の性能、 p : 地震動レベルに対応する地震の発生確率、 c : p で表されるレベルの地震動に対して性能が P となるような施設の構築に必要なコスト。

ここで関数 C を、入力としての地震動に対して出力としての性能が発現するようなスループットの関数として、input-output-cost 関数 (IOC 関数) と名づける。その形状は図4のような形状になると考えられ、この曲面を IOC カーブと呼ぶことにする。

RPM に対してさらにコストが追加された IOC 曲面は、意志決定者が施設の耐震性水準を検討するのにより有用な根拠となる。

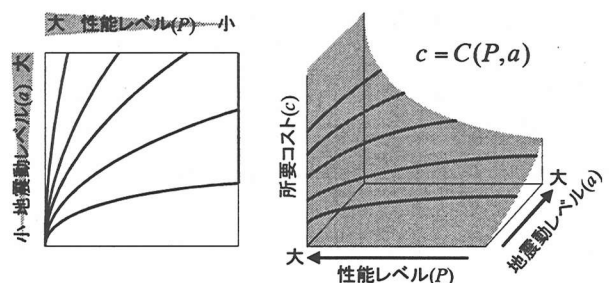


図4 IOC カーブの例

3. 試算例

(1) 試算条件

第2章で示したRPM及びIOCカーブを実際に想定される施設について試作成した。対象としたのは高架の道路橋であり、3径間連続、RC床版鋼桁橋（上下線分離の4車線）などの与件を設定した。対象橋梁の概要を図5に示す。このほかにも、地層構成等の土質条件を設定している。

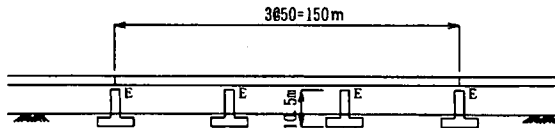


図5 対象橋梁の諸元概要

一方、これらの与件に対して、設計耐震性水準を変化させた11ケースを設定した（表1）。これらは主として橋脚の断面を変化させて設定した。なお、ここでは上部構造及び支承は損傷を受けないものとし、死荷重の反力をすべて下部構造に伝達する。また基礎の水準については、各地震動レベルに対して基礎の損傷程度が橋脚の損傷程度に卓越しないように設計することとした。

(2) 地震動レベル及び地震時性能の表現

表1 耐震性水準ケース設定

設計ケース	橋脚躯体断面 直角方向×橋軸方向 (mm)	躯体主鉄筋	基礎
D1	6700×6700	D32(2段)/D32	ケーソン
D2	4900×4500	D32(2段)/D32	杭(12本)
D3	4500×3500	D32(2段)/D32	杭(8本)
D4	4000×3000	D32(2段)/D32	杭(6本)
D5	3500×2900	D32(2段)/D32	杭(6本)
D6	4300×2800	D29(2段)/D29	杭(8本)
D7	3900×2500	D29(2段)/D29	杭(6本)
D8	3500×2300	D29/D29	杭(6本)
D9	2300×2100	D22/D22	杭(6本)
D10	2100×2100	D22(2段)/D22	杭(4本)
D11	2100×2100	D25/D25	杭(4本)

ケーソン断面は10000×10000
場所打ち杭の杭径は1200(鉄筋はD25)

表2 想定地震動レベル

地震動レベル	PGA (gal)	再帰年	年超過確率	50年超過確率	備考
1	100	10	0.1	99.5%	耐用年限中における発生確率が高い地震、道示の震度法レベル
2	250	100	0.01	39.5%	
3	700	1000	0.001	4.9%	既往最大、道示のタイプIIレベル
4	1100	10000	0.0001	0.5%	既往最大以上の地震

対象橋梁のサイトにおいて、表2のような地震動が想定されているとした。実際にRPMを計算するにあたっては、各施設の計画サイトにおいて確率年と地震動の強さが結び付けられたハザードマップが準備されていることを前提としている。

一方、本試算における橋梁の地震時性能は、式(2)のようなパラメータλによって評価することとした。

$$\lambda = \frac{\delta - \delta_y}{\delta_u - \delta_y} \quad (2)$$

ここで、 δ : 橋脚天端の応答変位、 δ_y : 同降伏変位、 δ_u : 終局変位であり、ここでは仮にλを塑性状態率と呼ぶ。通常用いられる応答塑性率μは、特に橋脚断面が小さいケースにおいて δ_y から δ_u までの間隔が δ_y の絶対値に近くなった場合に過大な値を示すため、橋梁としての性能を表すのに適切ではないため、ここで上記のパラメータを用いた。λの値と言語表現された地震時性能としては表3のように設定した。

表3 塑性状態率λと性能表現の対応

λ	損傷程度	性能表現
0以下	被災なし(弾性範囲内)	完全に機能
0~0.25	軽微な損傷	使用可能
0.25~0.6	中規模な損傷	補修後に使用可能
0.6~0.9	大規模な損傷	使用不可
0.9~	倒壊の可能性	倒壊の可能性

(3) 試算結果

設定した条件のもとで、各設計ケースに対して複数のレベルの地震動を作用させた場合のλを計算し、RPMとして表現したのが図6である。予想される一般的なRPMの形状と一致していることがわかる。

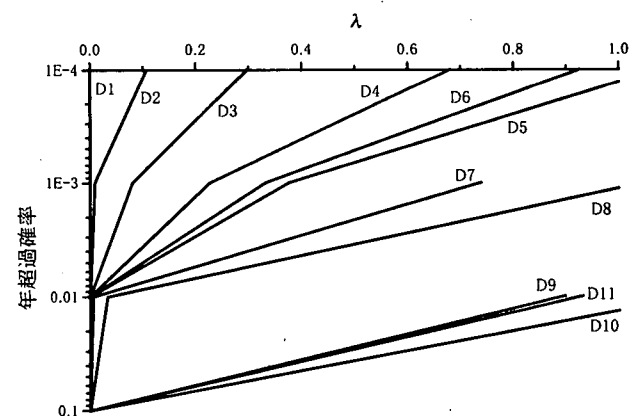


図6 RPMの試算結果

また、これに各設計ケースの初期構築コストを加えて三次元空間内の等設計線としてプロットしたのが図7である。

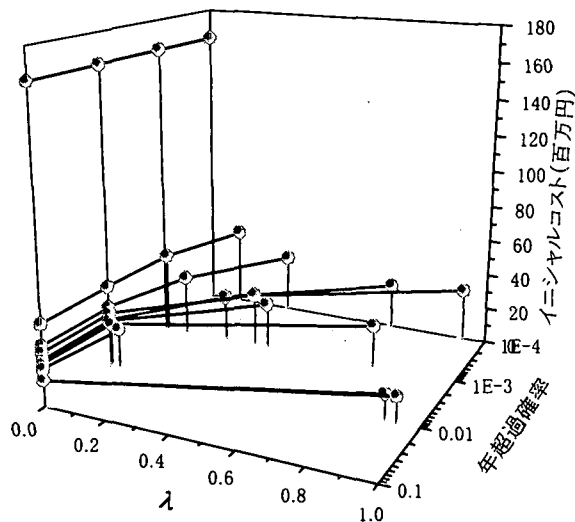


図7 IOCカーブにおける等水準線の試算結果

4. 耐震対策投資の最適化

(1) 問題設定

いま、二つのサイトにおいてそれぞれ構造物が計画されており、その耐震性水準を設定することを考える(表4)。

表4 耐震性水準の問題設定

Eq-level	sites		site-1	site-2
	prob. \ cost		$C_1(P, p)$	$C_2(P, p)$
normal	$p_0 = 1 - p_1 - p_2$		P_{10}	P_{20}
eq-1	p_1		P_{11}	P_{21}
eq-2	p_2		P_{12}	P_{22}

ここで、 s : サイト(すなわち施設)を表すパラメータ、 e : 地震動レベルを表すパラメータ、 p_e : レベル e の地震動が当該地域で発生する確率、 P_{se} : レベル e の地震動に対して発現する施設 s の性能、 C_s : 施設 s のIOC関数。このような設定の後、与えられた投資制約のもとで地域の満足度を最も高くするような $P_{se}(s, e = 1, 2)$ を決定することにより、各施設の耐震対策費用 C_s すなわち耐震性水準を決定することができる。

(2) 定式化と解

たとえば、二つの施設の性能 P_1, P_2 が与えられた場合の地域の満足度が効用 $U(P_1, P_2)$ で測定できるとする。このとき、想定される地震動に対する期待効用を目的関数とし、これを最大化する問題は式(3)のように書くことができる。

$$\begin{aligned} & \max_{P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}} p_1 U(P_{11}, P_{21}) + p_2 U(P_{12}, P_{22}) \\ & \text{s.t.} \quad C_1(P_{11}, p_1) = C_1(P_{12}, p_2) \\ & \quad \quad C_2(P_{21}, p_1) = C_2(P_{22}, p_2) \\ & \quad \quad C_1(P_{11}, p_1) + C_2(P_{21}, p_1) = c \end{aligned} \quad (3)$$

制約条件の第1式、2式は性能レベル P_{se} が施設ごとに同一水準線上にあることを保証し、第3式は予算制約を示す。式(3)を解くことにより、施設 s ごとに地震動レベル e に対する性能 P_{se} が求まり、各施設の耐震性水準が決定される。

たとえば効用関数、IOC関数が次式のように同定されているとする。

$$\begin{aligned} U(P_{1e}, P_{2e}) &= P_{1e}^{\alpha_1} P_{2e}^{\alpha_2}, \\ C_1(P_{1e}, p_e) &= P_{1e}^{\eta_1} p_e^{\xi_1}, \quad C_2(P_{2e}, p_e) = P_{2e}^{\eta_2} p_e^{\xi_2} \end{aligned} \quad (4)$$

このとき、式(3)の解は次式のように得られる。

$$P_{se} = \left(\frac{\alpha_s / \eta_s}{\sum_s \alpha_s / \eta_s} p_e^{-\xi_s} c \right)^{\frac{1}{\eta_s}} \quad (s, e = 1, 2) \quad (5)$$

式(5)において、全体コストが高いほど同じ地震に対する各施設の地震時性能は高くなり、また性能上昇に対するコストの感度(η_s)よりも効用の感度(α_s)が高い施設ほど高い地震時性能が求められるなど、一般的に予想される結果が得られる。

5. 結論

本研究では、発生頻度が非常に小さく、被害規模が甚大な地震災害について、投資制約を考慮しながら施設の適切な耐震性水準を設定する手順を検討するものである。通常、設計論においては構造物の性能を所与として与え、また計画論においては、各施設の設計論に立ち入らないことが多いが、本研究ではその両者を融合させることを試みている。今後、施設の性能のより適切な表現方法や、地域の満足度を表す効用関数あるいは純便益の同定方法等について検討を進める。

参考文献

- 1) 上田孝行: 防災投資の便益評価 - 不確実性と不均衡の概念を念頭に置いて -, 土木計画学研究・講演集 No.19(2), pp17, 1996年11月
- 2) 水谷守・中村孝明・下野正人・亀村勝美: 確率論的アプローチによる地震リスクマネジメント(SRM)手法の提案, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, pp738-739, 1996年9月
- 3) VISION 2000 - Performance Based Seismic Engineering of Buildings, Structural Engineers Association of California Vision 2000 Committee, April 1995