

◆ 耐震・危機管理技術特集 ◆

社会基盤施設の耐震性水準の合理的な設定法に関する基礎的研究

野崎智文* 杉田秀樹**

1. まえがき

高齢化の進展による人的資源の制約、環境問題等に代表される資源の有限性が明らかになるにしたがって、限られた条件下での効率的な社会基盤施設整備のあり方が問題となっている。たとえば素朴な問い合わせは、「その施設はどの程度の性能を持てばよいのか」、「それにはどの程度の費用がかかるのか」といったものである。このような問い合わせるためには、施設の計画・設計段階で性能を明らかにするとともに、施設の性能とそれを確保するために対して支払わなければならないコストなどを勘案した意思決定の考え方を示すことが必要となる。

一方、市場の規制緩和、国際的な市場の開放、コスト縮減といった社会・経済の流れの中にあって、施設構築において性能を明示した設計に基づくべきとの考えが高まっている。性能規定化の定義や導入の枠組みについては今まさに論議がなされているところであるが、性能による設計内容の表示は少なくとも今後の技術分野の重要課題となるものである¹⁾。さらに明示された性能に基づいて、社会基盤施設の整備水準を複数の施設間でも整合させながら、地域にとって必要な施設整備を進めることができるものである。

このような背景を受け、建設省土木研究所においては、平成10年度より重点研究プロジェクト「耐震設計の体系化に関する研究」として、活断層等を考慮した設計地震動の設定法、複数の施設に関する耐震性水準の横断的整合法、施設の地震時性能に立脚した耐震設計基準など総合的な体系のもとに研究を開始したところである。

本稿においては、このような体系の根本思想ともなる耐震性水準設定のあり方に関して、以下のような視点から検討を行った結果を報告する。

(a) 施設の耐震設計を行うにあたって、入力地震レベル、地震時の要求性能を明示した設計の概

念を整理する。

(b) 想定される地震レベルに対して複数の施設の性能を最適化する手法を提案する。

(a) については、合衆国カリフォルニア州のSEAOC (Structural Engineering Association of California) によって組織されたVision 2000会議²⁾において提案されている「パフォーマンス・マトリックス」の概念に基づき、それをさらに発展させる方法について検討を加える。

(b) については、(a)の結果を応用し、複数施設の耐震性水準を合理的に設定する方法を提案し、簡単なモデルによってその妥当性を検討する。

2. 施設の性能に立脚した設計思想

(1) パフォーマンス・マトリックスとは

SEAOCが組織したVision 2000会議においては、建築物の設計ガイドラインの性能規定による表示など、一般建築物設計に関するトピックスについて論議されているが、そこで提案された考え方の一つに「パフォーマンス・マトリックス」がある²⁾。

その考え方とは、構造物の重要度に応じて、その耐震性能を明示した上で設計内容を選択しようとするもので、図-1に文献中のパフォーマンス・マトリックスを引用する。すなわち、一般的な重要度(Basic Objective)の構造物の場合、地震規模が小さいときには平常時と同じ完全な状態を保つことを要求するが、地震規模が大きくなるとある程

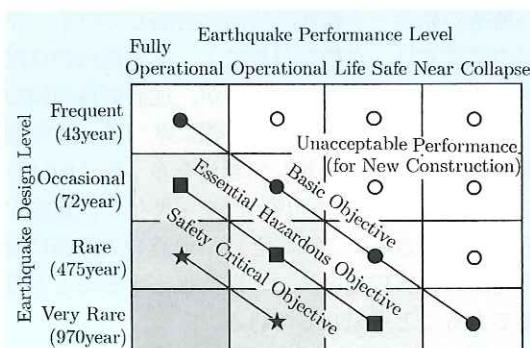


図-1 VISION 2000におけるパフォーマンス・マトリックスの概念²⁾

度の被災が起り、性能が低下することを許容する。一方、特に重要な(Safety Critical Objective)構造物については、大規模な地震動に対しても高い性能を確保することが要求される。

Vision 2000においては、地震の軸については規模と逆の関係にある超過確率で、また性能の軸については、Fully Operational(完全に機能)、Near Collapse(大被害)といった施設の機能、安全性などを複合した形で示している。ここでの考え方は、施設の重要度に応じたラインをマトリックス中に描いておき、それに応じた地震規模と目標性能に対して設計内容を規定しようというものであり、いわばこのラインは、施設の重要度に応じて確保することが推奨される耐震性水準を表現したものといえる。なお、同報告においては、大規模な施設になるほど設計細目よりも性能面で規定した設計方法にシフトさせることを提案している。

Vision 2000においては、このように施設の性能に立脚したアプローチに基づき、施設の耐震性能の明示、重要度に応じた段階的な設計の性能規定化の導入を提案している。具体的には、性能(Performance)に関する施設の限界状態を設定し、各入力地震レベルを設定したのち、詳細な設計内容を検討することになろう。

(2) 社会基盤施設への適用

一方、このような考え方を道路等の社会基盤施設に適用すれば、単に施設を提供する側(あるいは設計者)に対する利点のみならず、施設の建設費用を負担する納税者、施設のユーザーを含む地域の市民の施設性能に関する意思決定においても、非常に有効な資料となる。

ただし現時点でのパフォーマンス・マトリックスは概念的な表示に留まり、具体的な設計法とは未だリンクしていない。また、設計内容を直接決

定する施設の重要度の設定方法についても、一般的な建築物についてはユーザーの選択に任せることが可能であるが、社会基盤施設のように多数の人々に関わる施設の重要度(すなわち設計内容)の決定に関しては、一部の理論的検討³⁾を除いては未着手であると言ってよい。

3. パフォーマンス・マトリックスの再構築

(1) 等設計線の定義

前述のような課題に対応するため、まず現状のパフォーマンス・マトリックスの考え方を発展させる。例として道路橋を考える。

まず、ある特定の橋梁を考え、それを特定の設計内容で構築すると、与えられた地震動入力に対して一定の性能が発現する。たとえば図-2の点A1は、地震動レベルE1が発生したときにP1の性能が発現することを意味する。ただし、材料特性や施工時のばらつきについては考慮していない。ところが、同じ設計内容の橋に異なるレベルの地震動が作用した場合には異なる性能が発現するため、図中にA2、A3などの複数の点を描くことができる。

地震動レベルが連続に与えられ、ある設計条件下で各地震動レベルに対する性能が連続的に変化するすれば、同一設計内容の点列は一本の曲線を描くと考えられ、これが図-2中の曲線で示されている。これはある設計内容で設計された施設に対して、様々なレベルの地震動が作用した場合の施設の性能を表す線で、「等設計線」と呼ぶことにする。

このような等設計線は、設計内容を変化させることによって、多数描くことが可能であり、その様子が図-3に示されている。

重要な施設については、非常に強い地震動に対しても高い性能を満足することが要請されるため、横軸に対して垂直に近い等設計線で設計し(l_1)、それ

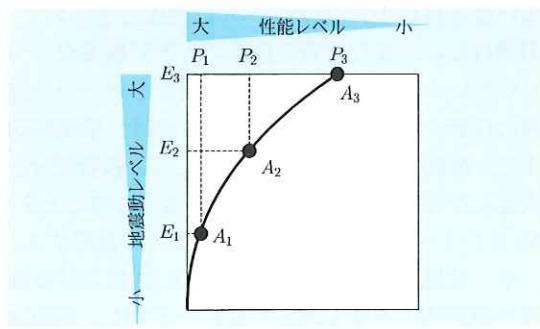


図-2 等設計線

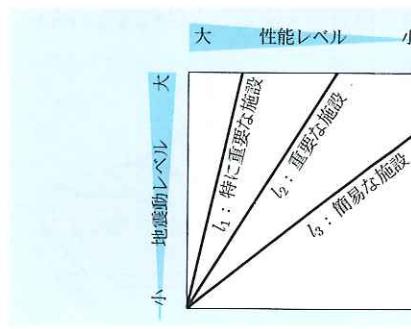


図-3 耐震性水準に応じた等設計線

ほど高い性能が要求されない施設については傾きが小さい等設計線の水準で設計することになる(l_3)。

さて、図-1 中の重要度を示すライン(Basic Objectiveなどと示された線)は、地震動に対する要求性能に基づいてあらかじめ外部的に定められ、その水準を確保するために必要な設計内容が規定される。したがって、ある地震レベルに対して要求性能を満足した場合に、他の地震レベルでは要求性能を超えることもある。一方ここで定義された等設計線とは、任意の一つの設計内容について様々な地震動レベルに応じて発現する性能を示したもので、構造物の耐震性水準そのものを表現したものであり、「等耐震性水準線」とも言い換えることができる。

ここでさらに考えを一步進めると、この等設計線に基づき施設の重要度自体を何らかの方法で選択・最適化することも可能ではないかと予想される。

(2) IOC 曲面(Input-Output-Cost Surface)の定義

等設計線上においては、当然のことながら設計条件は同一であり、したがってこの線上で施設構築の費用は一定となる。この設計費用の考え方には、耐震設計分を含んだ施設の総構築費用、総費用のうち耐震設計分のみを切り出した費用、耐震補強(retrofit)に必要な費用など異なる捉え方があるが、それは定義の問題であり、ここでは任意の入力地震レベルと性能のセットに対して、その状態を実現するためのコストが一意的に定義されるとする。この入力地震レベル-要求性能-所要コストで構成される曲面を、ここでは「IOC 曲面/関数(input-output-cost surface/function)」と呼ぶことにする(図-4)。

さて、施設計画あるいは費用負担等に関わる意思決定者は、費用の制約と要求する性能のトレード・オフの間で投資額を決定しなければならない。

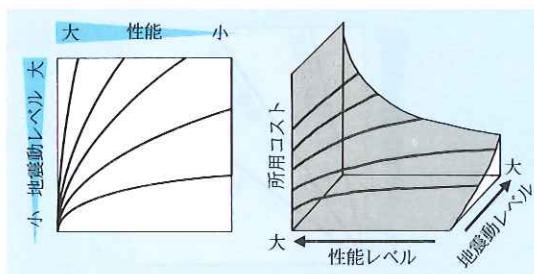


図-4 IOC 曲面の概念

いま、その施設を計画しているサイトで地震のレベルが表示されている場合、IOC 曲面を用いて、要求性能と費用を比較しながら判断の参考とすることができる。

本検討は、誰が意思決定をすべきか、どのような方法で意思決定をすべきかといった政策的な事項については対象としていない。少なくとも、この段階での IOC 曲面の表示のみでも、従来の設計に比して、①施設の設計内容とそれに対する耐震性能が明示される、②地域で想定される地震動に対して、施設の性能を吟味しながら設計水準を選択することが可能である、といった利点がある。ただし、そのためには、地域において地震レベルが把握しやすい形で(たとえば確率的に)表示されていること、施設の耐震性能が人の判断に容易な形で示されており、それが工学的な現象・設計内容と結び付けられていること、といった条件が課せられる。

4. 投資配分の最適化問題

(1) 課題提起

前節までで、IOC 曲面は意思決定の際の有用な判断材料となることを論じた。しかしながら、異なる地震動レベルが想定される複数のサイトに施設が存在する場合には、各施設の IOC 曲面のみに基づいて合理的な意思決定を行うことは困難になる。

ここでは、複数の施設の IOC 関数が与えられた場合に、複数想定される地震レベルに対して、計画論・経済論的な手法によって最適な投資配分を決定する方法を提案する。

(2) 問題設定

施設の耐震性水準に関する意思決定問題は、「複数施設の耐震対策に関する、費用制約下での投資配分問題」に置き換えることができる。たとえば費用制約がないならば、施設の水準は必要なだけ(あるいはそれ以上)任意のレベルに確保できるので、問題はない。また、費用制約のもとで施設が一つしかないのであれば、最大の費用をその一つの施設に投資すればよい。問題となるのは、費用制約下で、複数の施設の耐震対策に対して、投資配分を決定しなければならない場合である。このことを、図-5 のような簡単なイメージによって説明する。

今、地域の二つのサイト($s = 1, 2$)における施設の耐震性の水準を決定するものとする。両地域において、二つのレベルの地震が想定されており、

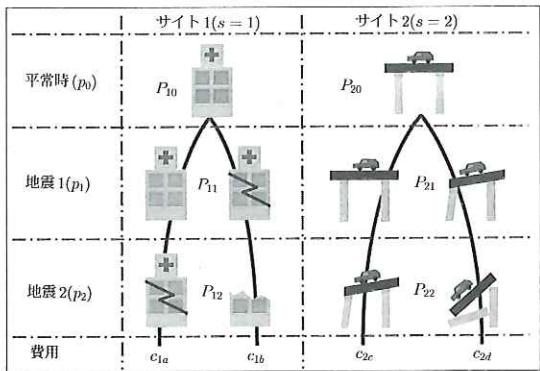


図-5 複数施設間の投資配分のイメージ

それらの生起確率 p_1, p_2 で与えられている。地震レベル e に対するサイト s の施設の性能は P_{se} で表示されているが、その性能は耐震対策に投資する費用によって変化する。たとえばサイト 1 の施設に対して費用 c_{1a} を投資した場合、地震 1 に対してはほぼ正常時と変わらない性能を持つが、地震 2 に対してはある程度の被害が生じる。また費用 c_{1b} を投資した場合には、地震 1 である程度の被害が生じ、地震 2 で大きな被害が生じる。サイト 2 の施設についても同様の考え方である。このケースの場合には、サイト 1 の費用 (c_{1a}, c_{1b}) とサイト 2 の費用 (c_{2a}, c_{2b}) の組み合わせを選択することになるが、一般には耐震対策に多くのバリエーションがあり、問題は複雑になる。

ここで費用にまったく制約がないなら考えうる最高の性能を發揮する設計を行えばよいが、現実問題としては制約された費用のもとでサイト 1 と 2 の施設間に耐震対策費用を配分しなければならない。この問題設定をマトリックスで表現したのが表-1である。

すなわち、二つの施設が各々サイト 1 と 2 で計画されており、各施設の IOC 関数が $C_i(P, p)$ ($i = 1, 2$) で与えられている。また、正常時および地震 1、2 が発生した場合の発現性能を P_{se} ($s = 1, 2 : e = 1, 2$) で表している。たとえば、地震 1 に対して、施設 1 の性能があるレベル P_{11} と要求する場合には、 C_1

表 1 投入コストに対する発現性能

| 地震レベル | 確率 | 費用 | |
|-------|-----------------------|-------------|-------------|
| | | サイト 1 | サイト 2 |
| | | $C_1(P, p)$ | $C_2(P, p)$ |
| 正常時 | $p_0 = 1 - p_1 - p_2$ | P_{10} | P_{20} |
| 地震 1 | p_1 | P_{11} | P_{21} |
| 地震 2 | p_2 | P_{12} | P_{22} |

(P_{11}, p_1) の費用が必要となる。ちなみにここでは、平常状態に関する確率および施設のパフォーマンスを考慮している。したがって、IOC 関数の費用は、耐震対策以外の費用を含むものと考えていることになる。

(3) 定式化

さて、費用制約化において、最適な解を得るためにには、何らかの適切な目的関数を費用制約条件のもとで最大化(あるいは最小化)すればよい。

$$\begin{aligned} & \max_{P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{20}, P_{21}, P_{22}} \\ & \pi(P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{20}, P_{21}, P_{22} : p_1, p_2) \\ & \text{s.t. } C_1(P_{11}, p_1) + C_2(P_{21}, p_1) = c^* \\ & C_1(P_{11}, p_1) = C_1(P_{12}, p_2) \\ & C_2(P_{21}, p_1) = C_2(P_{22}, p_2) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで π は目的関数を表す。この場合 π は想定される地震の生起確率をパラメーターとし、平常状態および各地震状態の性能レベルを独立変数とする関数である。また、式中の制約条件の一つ目は、両施設へ投資する費用の制約を、残りの二つは、各施設において、異なる地震に対しても費用が同じ(すなわち等設計線上にある)ことを意味する。また、 c^* は費用制約額であり、定数である。

ここで、目的関数 π としては様々なものが考えられる。たとえば、施設の資産価値、各性能によって定まる便益(あるいは社会的損失額や損失回避のための支払い意思額)もその例であるが、それらは施設整備の効果を定量評価するものであればよい。

式(1)を解くことによって、制約条件を満足しながら目的関数を最大化(最小化)する性能レベル P_{se} の組み合わせが求められる。

(4) 期待効用関数の導入

本検討では、目的関数として期待効用関数を考える。ここで効用関数(utility function)とは、たとえば施設の性能レベルや貨幣の保有量に対する満足の度合いを数値で表したものと考えてよい。図-6 に変数が一つの場合の効用関数のイメージを示す。

ここでは、二つのサイトの施設の性能 P_{1e}, P_{2e} と投資額 c を実現されるひとつの状態として、その状態に対して効用 $U(P_{1e}, P_{2e}, c)$ が決定されるとする。ところが発生しうる状態は、この場合地震 1、地震 2、平常状態の三種類であり、各々の生起確率は $p_1, p_2, 1 - p_1 - p_2$ である。ここでは、三

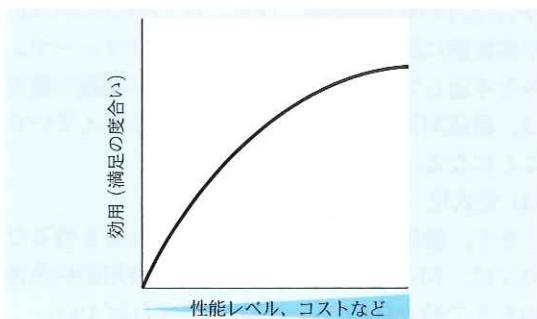


図-6 効用関数の概念

つの状態を統一して、以下のような効用の期待値 EU で表現できるものとする。もちろん、この目的関数は、期待効用でなくとも、期待便益、期待支払い意思額などを用いてもよい。

$$\begin{aligned} EU &= p_1 U(P_{11}, P_{21}, c) + p_2 U(P_{12}, P_{22}, c) \\ &\quad + (1 - p_1 - p_2) U(P_{10}, P_{20}, c) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、問題が次式のように定式化できる。

$$\begin{aligned} \max_{P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{20}, P_{21}, P_{22}} \quad &EU = p_1 U(P_{11}, P_{21}, c^*) \\ &+ p_2 U(P_{12}, P_{22}, c^*) \\ &+ (1 - p_1 - p_2) U(P_{10}^*, P_{20}^*, c^*) \\ \text{s.t.} \quad &C_1(P_{11}, p_1) + C_2(P_{21}, p_1) = c^* \\ &C_1(P_{11}, p_1) = C_1(P_{12}, p_2) \\ &C_2(P_{21}, p_1) = C_2(P_{22}, p_2) \end{aligned} \quad (3)$$

ただしここで、平常時の性能レベル P_{10}^* , P_{20}^* は一定値と考えている。すなわちここでは、両施設の平常時の性能は耐震設計内容によって変化しないと考えている。もしこの性能に橋梁の車線数や建築物の敷地の広さといった平常時の性能も含めるとすれば、これらは変数として扱われることになる。

(4) 関数形の特定および解析解

式(3)を解析的に解くために、以下のように関数形を特定する。

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

ここで効用関数中の指数については、発揮される性能が高いほど性能レベル P_{se} の値が大きいと定義されていれば、 α_1, α_2 は正であり、支出が大きいほど効用が小さくなるとすれば β は負となる。

また IOC 関数の指標については、性能レベルが高いほど、また地震の発生確率が小さいほど（地震の規模が大きいほど）費用が高くなることから、 η_1, η_2 は正、 ξ_1, ξ_2 は負となる。

以上のように特定された関数形を式(3)に適用し、Lagrange の未定乗数法によって目的関数を最大とする性能レベルを計算すると、次式のような解を得る。

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

また式(5)を変形し、総予算額 c^* が与えられた場合の各施設の費用配分額 $C_s^* = C_s(P_{se}, p_e)$ を計算すると、それらは α_s / η_s に比例する形となる。 α_s, η_s は各々性能レベル P に対応する効用と費用の感度に相当する値であり、費用の感度に対して効用の感度の方が高い場合、より多くの投資配分がなされることが表されている。

関数形がさらに複雑な場合や数値で与えられた場合、施設数が多い場合には、式(3)は多次元の非線型連立方程式となり、これを数値的に解くことになる。

5. 研究遂行にあたって留意すべき点

本課題は平成 10 年度に着手したものであり、現在までの検討によって、性能主体の設計方法に関する研究動向、耐震性水準の問題に適用する際の留意点、最終的な手法の枠組みイメージを整理した。ただし、このように政策・意思決定に関する技術は新しい分野のものであり、解決すべき課題は多い。現在認識しているそれらの課題と、それらに対するアプローチをまとめておく。

① 地震動レベルの確率的な表現は可能なのか？

単一の特性値たとえば最大加速度について、その超過確率によって表示することは可能であり、合衆国 USGS 等においてはそのようなハザード・マップが提示されている。しかしながら、施設の地震時性能には地震動の最大加速度、SI やピーク周波数などさまざまな要因が関連している。このような場合は、たとえば地震動のタイプごとにハザード・マップを作成し、それらの同時生起確率は低いとして、期待効用の計算時に和事象として計算すればよい。

② 性能レベルの具体的な内容は何か？

施設の性能として一般的に提唱されているのは、施設の安全性(safety)、機能(serviceability)、修復の容易性(reparability)である。安全性は施設のユーザーやその周辺の市民に対するリスクを、機能は施設の提供するサービスの満足度を、修復容易性は、被災後の機能回復・復旧の容易さの程度を意味する。

③ そもそも性能レベルは連続的な数値で表示することが可能なのか？

先の三つの性能レベルをその事象のままで統合化し、性能レベルとしてひとつの指標とするのは、各性能指標の重み等に恣意性があるため望ましくない。ただし、各性能のレベルがたとえば構造部材の挙動を規定する応力-ひずみ関係上の点に対応しているとすれば、それらを統一した一つの指標として表現することが可能である。

④ 有意な精度でIOC関数を導くことが可能なのか？

地震レベル、性能レベルおよびそれらに基づいた解析の精度を考えれば、パフォーマンス・マトリックスは高々4~5程度の分割数になると予想される。このためIOC関数は離散化された形状で得られるが、それを内挿することで計算可能である。

⑤ 目的関数として効用関数を用いることの妥当性は？

目的関数が純便益であれ、効用であれ、それが測定可能ならば何を用いてもよい。純便益を用いる場合には、施設の被災に伴う直接・間接のさまざまな効果を算入しなければならない点に困難があり、支払い意思額や効用関数を用いる場合には、アンケート方法、パラメーター同定方法等に問題がある。

効用関数には、それが正しく測定されていれば、個人なり地域の満足度を直接表現するものとして有利性がある。

⑥ 効用関数はどのようにして特定するのか？

単一の変数に対する個人の効用関数は、アンケート等によって測定可能であり、多変数の場合には多大な労力と注意を伴う。複数の個人から構成される地域などの効用の表現方法に関しては、さらに難しくなる。たとえば土地価額などを参考にしながら式形を定める方法や、一般的に効用関数に用いられる関数形のパラメーターを同定する方法を考えられる。

⑦ 最適解の用いられ方は？

本手法で得られた解は、地域の効用と施設の耐震対策費用から内生的に得られるものである。その解に対して、一定の合理性があるとしても、意思決定者が必ずそれに従わなければならないというものではない。ただし、意思決定の際に、まったく根拠なく耐震性水準を設定するのではなく、一定の仮定のもとで合理的な手法に基づいて得られた定量的なデータを参照することには大きな意義がある。

6. あとがき

意思決定の際に、何をもって最適と考えるかを論することはイデオロギーの問題にまで発展することになるが、少なくともどのような方法で意思決定がなされるにしても、その判断を支援する代替案を合理的な方法によって示すことには意義がある。社会基盤整備の必要性が問われ、公共事業のアカウンタビリティが叫ばれる中、耐震対策を含めた公共事業においても、より科学的なアプローチが必要になるだろう。本研究はそのようなアプローチの一つを提案し、それを実用に耐える形で提示しようとするものである。

参考文献

- 1) Ronald O. Hamburger : "The Development of Performance - based Buildings Structural Design in the United States of America", International Workshop on Harmonization of Performance - based Building Structural Design in Countries Supporting the Pacific Ocean, December 1-4, 1997.
- 2) VISION 2000 - Performance Based Seismic Engineering of Buildings, Structural Engineers Association of California Vision 2000 Committee, April 1995.
- 3) 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), p.17, 1996.11

野崎智文*



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
Tomofumi NOZAKI

杉田秀樹**



同 防災技術課長
Hideki SUGITA