

## ◆ 報文 ◆

# トータルコストに基づく土木構造物の要求耐震性能の設定法に関する一検討

大住道生\* 運上茂樹\*\*

## 1. はじめに

土木構造物の耐震設計では、想定する設計地震動に対して所要の耐震性能を発揮できるように構造部材等の設計を行う。構造物が建設される地点において将来予測される地震動が精度良く推定できれば、この地震動に対して必要最小限の耐震性能を付与することにより全体として合理的な耐震設計が可能となるが、将来起こりうる地震動の予測には非常に大きな不確定性が存在する。どこまでも強い構造物を作ることも技術的には可能であると考えられるが、限られた資源の中で投資を行うことを考えると現実的とは言えない。このため、大きな不確定性を有する地震動に対して耐震設計を行わなければならないと言う条件で、土木構造物に対して選択すべき耐震性能レベルの合理的な評価方法については多くの議論があるところと考える。

例えば、野中ら<sup>1)</sup>は道路橋の地震被害率と設計水平震度選択に関して、ある地域の道路橋の新設費用に対する復旧費用の和として平均被害率を定義し、設計水平震度と気象庁震度階の関数として表わした。これを用いて総費用と総便益の観点から最適設計水平震度を算出する方法を提案している。ここでは、間接被害の大きさを直接被害の係数倍と仮定して計算を行い、評価を行っている。また荒川ら<sup>2)</sup>は、設計水平震度が道路橋の初期建設費に及ぼす影響について検討し、各種設計条件が建設費に及ぼす影響度を定量的に比較している。野崎ら<sup>3)</sup>は、道路橋の耐震性レベルの設定に際して、実設計の結果有する各入力に対する性能値を結んだ線である等設計線の概念と損傷に応じた保有性能レベルから評価するという方法を提案している。

一方、システムの最適化という観点から、朱牟田ら<sup>4)</sup>は、費用便益分析に基づいて変電設備の耐震補強コストと企業損失コストの関係を求めてい

る。企業損失コストの期待値は地震により損傷した電力機器の修復総額期待値、供給支障により生じた収益減少額の期待値、供給支障が生じたことによる補償額の期待値の和としている。また、市東ら<sup>5)</sup>は、上水道システムに対して地震リスクマネジメント手法を提案している。ある上水道ネットワークとある地震レベルを仮定し、その地震が発生する確率から構造リスク、機能リスクの和である期待損失を求める方法を提案し、これに様々な地震対策に対する費用を併せて考えることで、対策案選択の意志決定手法を提案している。

本研究は、大きな不確定性を有する地震動に対し、土木構造物に対する合理的な要求耐震性能の設定法の検討を目的として、道路システムを対象に、これを構成する道路橋の初期建設コスト、震災時の影響コストなどを考慮したトータルコストの観点から見た要求耐震性能の評価法の考え方について検討した。

## 2. 地震危険度に応じたトータルコストの算出方法

### 2.1 道路システム

道路構造物の地震時損傷に伴う各種コストを算出するためには、解析の対象とする道路システムを想定しておく必要がある。道路システムをモデル化する際には、道路システムを構成する道路構造物の種類、立地条件、道路システムの利用者、および被害が生じた場合の影響の連鎖についてモデル化する必要がある。しかし、これらの要因は属地的な要素が強いため、システムの機能損傷を詳細に評価するためには、評価の対象となる地域を明確にし、道路システムの構成、道路システムの利用者と交通量、地震による構造物の損傷を起因とするシステムの機能喪失の内容を詳細に調査し、分析する必要がある。

本研究の目的は、都市の規模と要求耐震性能の一般的な関係を把握することとし、道路システムを簡素化し、以下の仮定を設定した。

- ・道路システムの構成要素としては、土工部、橋梁部、トンネル部などの道路構造物があるが、地震による損傷は橋梁部に限る。
- ・特定の道路ネットワークは考慮せず、地震被害を受ける道路システムが存在する地域の経済規模を道路システムのモデル化における支配的なパラメータとする。
- ・対象とする地域は行政区画によるものとし、地震により直接被害が発生する領域として超大都市(人口1,000万人程度)、大都市(人口100万人程度)、小都市(人口10万人程度)、過疎地域(人口1万人未満かつ人口密度100人/km<sup>2</sup>未満)の4種類の領域を想定し、遠隔地間の交通に対する影響は評価の対象とはしない。
- ・対象地域内の道路システムを構成する構造物数は道路統計年報から推計し、表-1のように定める。ただし、システムを構成する構造物の特性は全て同一とする。

表-1 対象地域内の道路システムを構成する構造物数

対象地域	構造物数(個)
超大都市	1,500
大都市	300
小都市	100
過疎地域	40

## 2.2 コスト関数

本研究では、橋梁の公共性を鑑み、橋梁に要求される耐震性を決定する際に、ある耐震性能を有する橋梁を建設するために必要な初期建設コストだけでなく、供用開始後に要求される耐震性が増加した場合に必要となる補強コスト、保有する耐震性能を越える地震力を受けた場合に損傷した構造物を復旧するための復旧コスト、構造物が被災したことによりこれを使用出来なくなることによる社会経済的コストを考慮した。これらのコストと発生確率を考慮したトータルコストを式(1)で定義した。

$$C_T = \sum_{j=1}^m (C_1 + C_s + C_R \cdot P_2 \cdot P_1) + C_E \cdot P_3 \cdot P_1 \quad (1)$$

ここで、 $C_T$  : トータルコスト

$C_I$  : 初期コスト

$C_S$  : 補強コスト

$C_R$  : 復旧コスト

$C_E$  : 社会経済コスト

$P_1$  : 地震発生確率

$P_2$  : 構造物損傷確率

$P_3$  : システム損傷確率

$m$  : システムを構成する構造物の個数

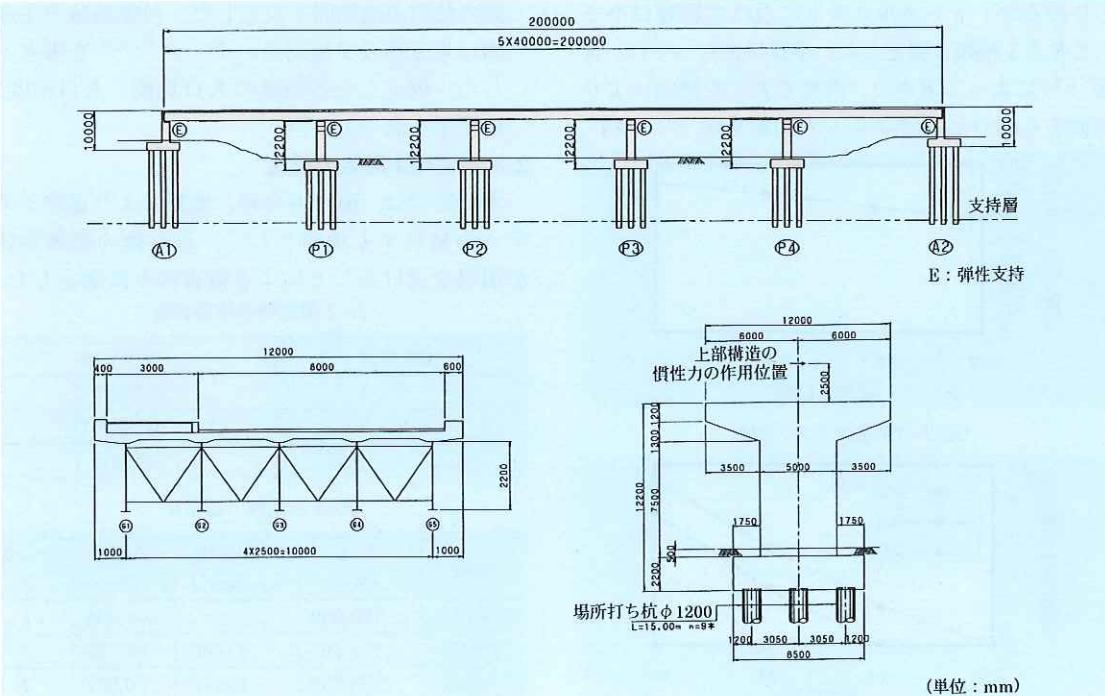


図-1 検討対象橋梁

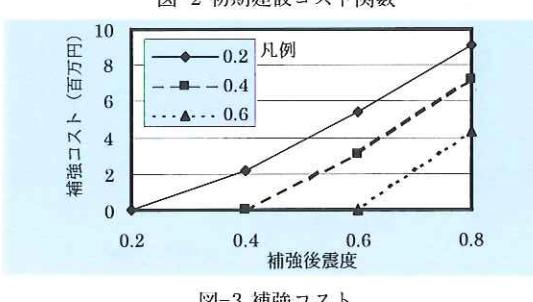
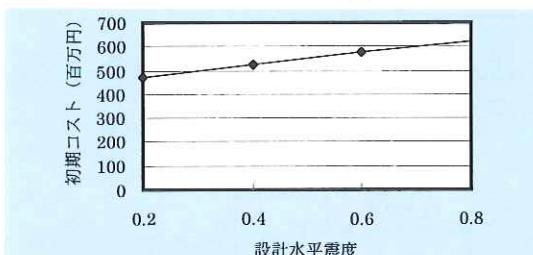
以下に、各コストの設定方法を示す。

### 2.2.1 初期建設コスト

本研究では、初期建設コストの設定方法として、標準的な形状および構造物に対する設計条件を設定し、積算を行うことにより建設コストを算出した。標準的な橋梁として、道路橋の耐震設計に関する資料<sup>6)</sup>をもとに、図-1に示すように、5径間連続鋼桁橋を仮定した。初期建設コストは、設計水平震度により変化するため、設計水平震度0.2, 0.4, 0.6の3種類について試設計を行うとともに建設コストの積算を行い、その他の点は線形補完した。積算にあたっては、建設物価<sup>7)</sup>、土木コスト情報<sup>8)</sup>によった。求めた設計水平震度と初期建設コストの関係を図-2に示す。

### 2.2.2 補強コスト

本研究で考慮する補強の定義は、設計基準の変更や、防災対策の強化により、構造物に要求される耐震性能が向上した場合に、鉄筋コンクリート巻立て工法により行う橋脚基部の補強とする。すなわち、構造物はその供用期間や供用環境により経年劣化が生じ、耐震性能が低下することも考えられるが、その効果は考慮しない。また、補強方法については、いくつかの方法が考えられ、また構造形式や元の耐力分布によっては補強部位が変わることもあり得るが、トータルコストに及ぼす影響は小さいと考え1種類に限定した。積算にあたっては、文献<sup>7), 8)</sup>によって求めた。震度で表した補強により増加する耐力と補強コストの関係を図-3に示す。



### 2.2.3 復旧コスト

本研究で考慮する復旧の定義は、地震により構造物が損傷した場合に、構造物の耐力を受けた地震のレベルに耐えられるようにすることとし、復旧コストは、表-2に示すように、小、中程度の損傷の場合は鉄筋コンクリート巻立て工法により橋脚基部を復旧する場合のコストとした。大規模な損傷の場合は架け替えを想定し、撤去費用、および上部構造、基礎を含めた新設コストがかかるものとした。

### 2.2.4 社会経済的コスト

社会経済的コストは、道路システムの機能損傷に起因する社会経済的損害で、評価の対象とする道路システムの利用状況、属地環境に支配される。また、道路システムの復旧の進捗速度という時間項にも影響を受ける。しかし、前章で示したように、本研究で考慮する社会経済的コストは、対象地域をモデル化し、損害コスト関数を設定する方法を使用することとし、以下の2点の仮定を設けた。

- ・社会経済的コストは対象地域における地震の影響による物流の停滞に起因する。
- ・地震発生後の対象地域の生産額は、生産額と地震による道路システムの損傷率の積で表される。ただし、小規模損傷では道路の使用制限はなく、中規模損傷で1ヶ月、大規模損傷で1年間の使用不能期間を設定した。対象地域の生産額は東京都及び福岡県のデータ<sup>9), 10)</sup>を参考とした。仮定した各地域の人口規模、人口密度、総生産を表-3に示す。

### 2.3 損傷確率関数の設定

本研究では、簡単のため、地震により道路システムが被災する状態として、道路橋の橋脚軸体が損傷を受けることによる被害のみに限定した。

表-2 構造物の損傷分類

損傷規模	復旧工法
小	RC巻立て
中	RC巻立て
大	架替え

表-3 各地域の総生産

地域	人口(人)	人口密度(人/km <sup>2</sup> )	総生産(億円)	データ数
超大都市	11,770,000	—	841,294	1
大都市	1,152,197	2,959	52,115	2
小都市	189,759	1,830	6,027	2
過疎地域	3,742	64	78	7

コスト関数に含まれる構造物損傷確率関数、およびシステム損傷確率関数の算出方法を以下に示す。

### 2.3.1 構造物損傷確率関数

構造物損傷確率関数の設定方法には、構造物の設計にかかる各種ばらつきを考慮して作用力が耐力を上回る確率を算定する方法と、実被害による統計データを元にマクロ的に確率関数を仮定する方法があるが、本研究では後者の方法に従った。構造物損傷確率関数の設定に際しては、以下の条件を仮定した。

- ・ 設計時に想定した設計水平震度以下の地震では、構造物にはいかなる損傷も発生しない。
- ・ 設計時に想定した設計水平震度以上の地震では、構造物の損傷確率は設計水平震度を下限とする正規分布の累積確率で表される。

以上の仮定を定式化すると式(2)で表される。

$$P_2(x)=0 \quad (x \leq \alpha) \quad (2a)$$

$$P_2(x)=\int_{\alpha}^x N(\mu, \sigma) dx \quad (x > \alpha) \quad (2b)$$

ここで、 $x$ ：地震の震度

$\alpha$ ：設計水平震度

$N$ ：正規確率分布関数

$\mu$ ：正規分布の平均値

$\sigma$ ：正規分布の標準偏差

構造物損傷確率関数の各変数を算定する上で、構造物の損傷状況、作用した震度、および設計水平震度の3つの情報が必要となる。本研究では、兵庫県南部地震における阪神高速3号神戸線を対象とし、被害調査資料<sup>11)</sup>をもとに、構造物の損傷規模を大中小の3レベルとした。また、対象構造物に作用した震度は、近傍において観測された最大加速度が600gal前後であったため、全域にわたって地表面震度で0.6であったと仮定した。また、対象構造物の設計水平震度は、設計時の道路橋示方書に示される標準的な設計水平震度である0.2であったと仮定した。ただし当時の設計は弾性設計であり、設計水平震度とは橋梁上部構造の位置に作用する降伏震度であることに注意する必要がある。従って、本研究において用いている設計水平震度は、弾性設計における設計水平震度である。

以上の仮定の下に設定した構造物損傷確率関数を図-4に示す。なお、これらの変数は設計水平震度により異なると考えられるが、本解析では設計水平震度によらず一定であると仮定した。

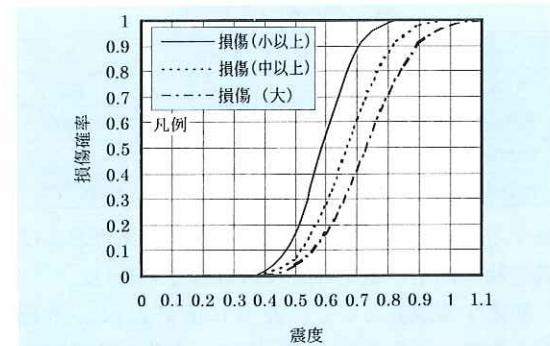


図-4 構造物損傷確率関数

### 2.3.2 システム損傷確率関数

システムの損傷確率関数  $P_3$  は、地震の震度の関数で震度に対して単調増加であると考えられる。本研究では具体的なシステムは想定せず、対象地域の人口を指標とし、そこに含まれる径路及び地震による損傷の評価対象となる構造物の個数を想定した。

そこで、道路システムの損傷に伴う社会経済的コストを式(3)に示す手順で算定した。本解析では、構造物が中程度以上の損傷を被った場合に、損傷規模に応じた期間、径路の使用が不可能となり、これにより社会経済的コストが発生するものとした。ただし、モデルの単純化のため、道路橋の重要度は一様で、地域の総生産に対する各径路の寄与は等しいとし、個々の道路橋が機能することにより平時の総生産が達成されたとした。

$$C_E \cdot P_3 \cdot P_1 = \sum_{j=1}^2 \left\{ \sum_{i=1}^2 C_{pi} \cdot (1 - P_{2ij} \cdot t_j) \right\} \cdot P_1 \quad (3)$$

ここで、 $C_E$ ：社会経済的コスト

$C_{pi}$ ：i番目の道路橋の平時の生産額

$n$ ：対象地域に含まれる道路橋数

$j$ ：損傷規模（中規模、大規模）

$P_{2ij}$ ：i番目の道路橋の損傷確率

$t_j$ ：損傷規模毎の道路橋の使用不能期間

$P_1$ ：地震発生確率

## 3. 信頼性に基づく道路橋の耐震設計水準の最適化の試算

### 3.1 解析条件

2章においてトータルコスト算出のための方法について検討したが、実際にトータルコストを算

表-4 地震動の発生確率

段階	1	2	3
震度	0.3	0.5	0.7
再現期間(年)	150	500	1,000
供用年数(年)		50	
地震発生確率	$2.84 \times 10^{-1}$	$9.52 \times 10^{-2}$	$4.88 \times 10^{-2}$

出するためには想定する地震に関する条件および構造物の供用年数を与えなければならない。

想定する地震として、表-4に示すように、3種類の震度、発生確率を設定した。発生する地震の規模、およびその発生確率は地域に固有のものである。しかし、本研究では特定の地域をモデル化していないので、想定関東地震や兵庫県南部地震で考えられている震度、および再現期間を参考に仮定した。また、構造物の供用期間としては50年を仮定した。

なお本試算は、補強コストはかからなかったという条件で行った。

### 3.2 トータルコスト解析

以上のような条件で、トータルコスト解析を行った。図-5に震度0.3、再現期間150年の地震を想定したときの各地域のトータルコストを示す。ここで、地域ごとにシステムを構成する橋梁数が異なるため、1橋当たりのトータルコストで比較した。ただし、設計水平震度は0.2を最小としている。この結果、過疎地域、小都市では設計水平震度0.2のときにトータルコストが最小となった。しかし、大都市、超大都市では設計水平震度0.3のときにトータルコストが最小となった。このことは、震度0.3程度の地震を想定した場合、地域の経済規模が大きくなると橋梁に被害を及ぼさないことが重要となることを示している。トータルコストの内訳をみると、全ての地域において初期コストは等しく、復旧コストは初期コストに比較して無視できるほど小さい。そのため、設計水平震度の増加に伴う初期コストの増加と、被害があった場合の社会経済的コストの相対的な大きさによりトータルコストが最小となる設計水平震度が異なってきている。

また、図-6、図-7にそれぞれ震度0.5、再現期間500年の地震、および震度0.7、再現期間1,000年の地震を想定したときのトータルコストを示す。震度0.5の場合は、過疎地域で設計水平震度0.3、小都市、大都市で設計水平震度0.4、超大都市で

設計水平震度0.5のときにトータルコストが最小となった。そして、震度0.7の場合は、過疎地域で設計水平震度0.4、その他の地域で設計水平震度0.6のときにトータルコストが最小となった。ただし、どちらの場合も設計水平震度をトータルコストが最小となる値より上げてもコストの上昇勾配は非常に小さい。

以上まとめると、本研究において仮定した解析条件の下では、必ずしも設計水平震度と想定する地震の震度が等しいときにトータルコストが最小となるのではなく、多少の被害は許容する設計水平震度の方がトータルコストが小さくなるケースがあり、この傾向は対象地域の経済規模が小さくなればなるほど強くなることがわかった。

ここまで、単一の地震に対してそのときの最適設計水平震度を算出していたが、実際には同一の地域に様々な規模の地震動とそれに対する再現期間が想定されるので、上記全ての場合を想定し、震度0.3の地震の再現期間が150年、震度0.5の地震の再現期間が500年、震度0.7の地震の再現期間が1,000年として、全ての可能性が想定される場合のトータルコストを算出した。その結果を図-8に示す。この場合、過疎地域では設計水平震度0.4、その他の地域では設計水平震度0.6のときにトータルコストが最小となっており、最適設計水平震度の組合せとしては震度0.7のみを考えたときと等しくなった。このことは、複数の地震を考慮すると、特に影響の大きな地震による効果で最適設計水平震度が決まる可能性があることを意味しており、可能性のある全ての地震を考慮することが重要である。

### 4. まとめ

本研究をまとめると以下のことがわかった。

- ある地域の道路ネットワークを構成する土木構造物が、地震により損傷することにより発生する各種コストを考慮したトータルコスト関数を定義した。
- 地震により損傷を受ける道路構造物を橋梁に限定し、社会経済的コストを地域の生産額から仮定するという条件で、対象とする地震動の震度、再現期間に従って、トータルコストを最小とする設計水平震度を求めた。
- 想定される地震の震度より小さい設計水平震度

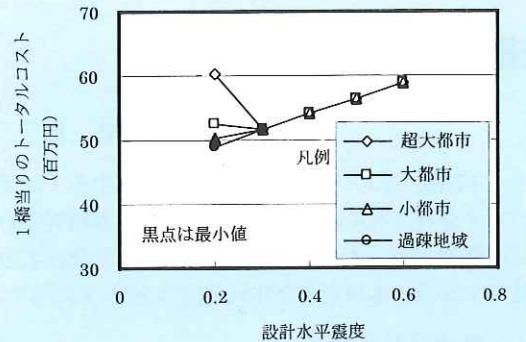


図-5 震度 0.3、再現期間 150 年の地震を想定したときのトータルコスト

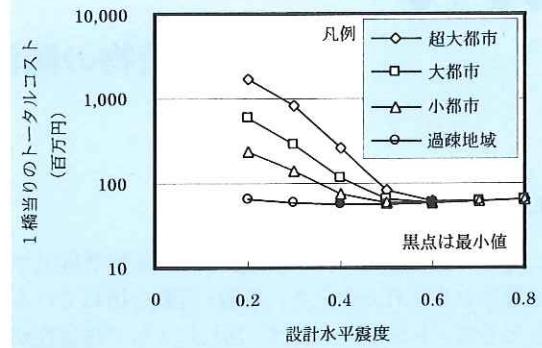


図-7 震度 0.7、再現期間 1000 年の地震を想定したときのトータルコスト

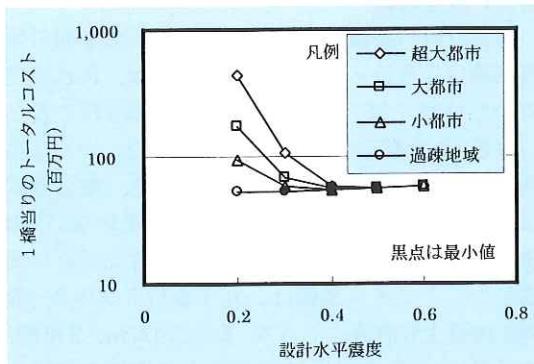


図-6 震度 0.5、再現期間 500 年の地震を想定したときのトータルコスト

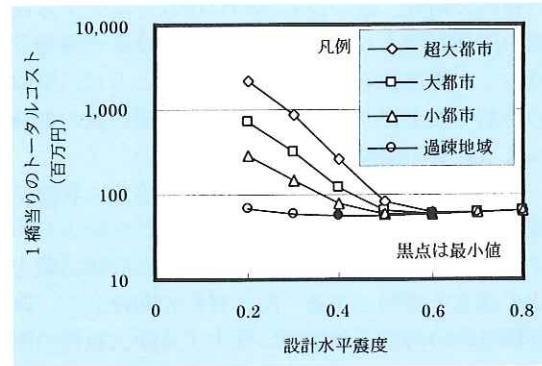


図-8 3種類の地震動を想定したときのトータルコスト

- で設計した方がトータルコストが小さくなることがあり、この傾向は、地域の経済規模が小さいほど強くなった。
- ・本研究における解析条件では、複数の地震を同時に想定した場合、特に影響の大きな地震による効果で最適設計水平震度が決まった。

### 参考文献

- 1) 野中昌明、猪熊康夫、片山恒雄：道路橋の地震被害率と設計水平震度選択に関する基礎的資料、土木学会論文報告集第 340 号、1983.12
- 2) 荒川直士、川島一彦：設計水平震度が道路橋建設費に及ぼす影響、土木技術資料 28-2、1986.2
- 3) 野崎智文、杉田秀樹：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、第 25 回地震工学研究発表会、1999.7
- 4) 朱牟田善治、石田勝彦、当麻純一：費用便益分析による変電設備の耐震補強計画法、土木学会論文集、No.584、1998.1
- 5) 市東哲也、星谷勝：上水道システムの地震リスクマネジメント、土木学会論文集、No.584、1998.1
- 6) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料、1997.3
- 7) (財)建設物価調査会：建設物価、1998.1

- 8) (財)建設物価調査会：土木コスト情報、1998.1
- 9) 東京都総務局統計部：平成 7 年度都民経済計算年報、1997.4
- 10) 福岡県総務部地方課、他：福岡県市町村要覧（平成 9 年度版）、(財)福岡県市町村ふるさと交流センター、1997.8
- 11) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告—土木構造物の被害 橋梁、1996.12

大住道生\*



建設省土木研究所  
耐震技術研究センター  
耐震研究室研究員  
Michio OHSUMI

蓮上茂樹\*\*



同 耐震研究室長、工博  
Dr. Shigeki UNJOH