

高速道路の地震防災のための リスクマネジメントシステムについて

本村 均¹・濱田 達也²・谷口 雅信³

^{1,2,3}正会員 日本道路公団 試験研究所 交通環境研究部 保全研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

JH試験研究所では、高速道路の地震防災計画の効率的な立案、リアルな防災訓練、危機管理意識の向上を目的とした地震被害の事前評価システムを開発した。このシステムは、パーソナルコンピュータを使用し、地震データベースに登録された過去の歴史地震や内陸起震断層の中から任意に地震動を選定することにより、距離減衰式と地盤増幅度から地表面の地震動（最大加速度、S I 値）を推定し、地盤の液化化危険度評価、橋梁の被害形態別の評価、盛土・切土のすべり安全率と破壊規模による被害評価を行う。また、この被害結果から、復旧に要する通行止めの期間及び復旧額の算定を行い、これらの結果をデータ出力できるものである。

Key Words: Express Way, damage estimation, earthquake disaster prevention, earthquake resistant, earthquake ground motion, maintenance

1. はじめに

1995年の阪神・淡路大震災を契機として、道路構造物の耐震性向上、危機管理体制の改善の必要性が認識された。この認識のもと、既存の構造物は、順次耐震補強工事が実施されている。また、今後の危機管理体制への支援として災害に関するリスクマネジメントシステム開発の期待が高まっている。

そこで、過去における大規模地震をコンピューター上で再現し、高速道路への影響（地震被害）を全体評価し、地震防災対策の計画立案に活用できるよう地震防災システムを開発したものである。

このシステムは、道路線形データ、地盤データ、地震断層データ、構造物諸元データ及び影響評価基準データを入力した数値地図データと地理情報システム（GIS）を基に、対象路線に影響を与える地震を任意に想定し、等価震源距離を用いた距離減衰式により、基盤面地震動の評価を行い、地盤増幅特性を用いて基盤面地震動から地表面地震動を算定する。その結果から道路構造物

への地震時被害評価を行うものである。

本システムを構築するため、東名高速道路東京～御殿場の約80km（図1）について試行した結果、任意に想定した大規模地震に対する影響についての予測が可能であり、効果的な地震防災対策の計画立案に活用できることがわかった。以下にシステムの内容について報告する。

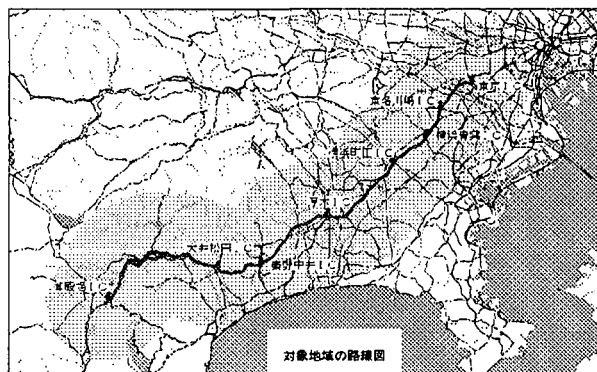


図1 位置図

2. 地表面地震動の算定

(1) 想定地震の選択

過去の歴史地震（点震源）、歴史地震（面震源）、内陸

起震断層の地震情報を各データベースに登録しており、その中から想定地震を任意に選択し、断層パラメータを設定する。(図2)

(2) 等価震源距離の算定

対象地域を 500m×500mのメッシュに分割し、各メッシュ中心点から断層面までの等価震源距離(距離の-2乗で重み付けした平均的な距離)を座標値の相対関係から計算する。なお、震源領域の破壊強度は断層面で一定と仮定している。

(3) 基盤面加速度応答スペクトルの算定

地震動の距離減衰特性を考慮して、基盤面での加速度応答スペクトルを算定する。

距離減衰式として電共研式^{1) 2)} または大野式^{3) ~6)}を用いる。

a) 電共研式

電共研式は、日本の東北地方南部及び関東地方の観測記録に基づいて構築された距離減衰式であり、せん断波速度が3 km/s 相当の地震基盤における減衰定数5%の加速度応答スペクトルは、以下のように表される。

$$\log S_{ab}(T, 0.05) = a(T)M - b(T)X_{eq} - \log X_{eq} + c(T) \quad (1a)$$

$$X_{eq} = \frac{R}{\sqrt{\ln \left(1 + \left(\frac{R}{X} \right)^2 \right)}} \quad (1b)$$

$$R = 10^{0.5M - 2.28} \quad (1c)$$

$S_{ab}(T, 0.05)$: 減衰定数5%の地震基盤加速度応答
スペクトル (cm/s²)

M : 気象庁マグニチュード

$a(T), b(T), c(T)$: 周期 T に関する既知の係数

X_{eq} : 等価震源距離 (km)

R : 気象庁マグニチュードから換算される円震源の
半径 (km)

X : 震源距離 (km)

この式は、地震基盤(せん断波速度3 km/s 程度)にお

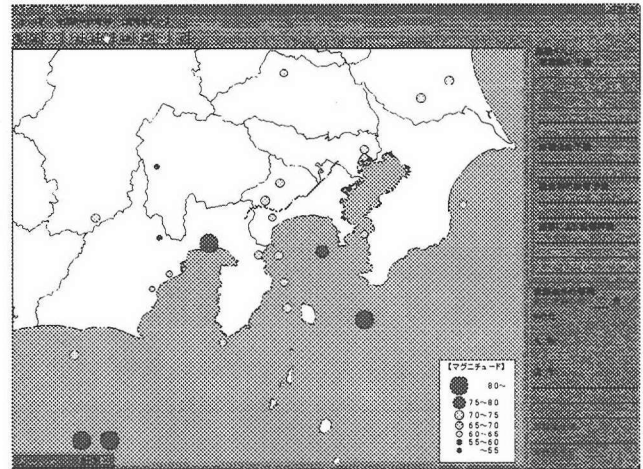


図2(1)歴史地震(点震源)データの一覧

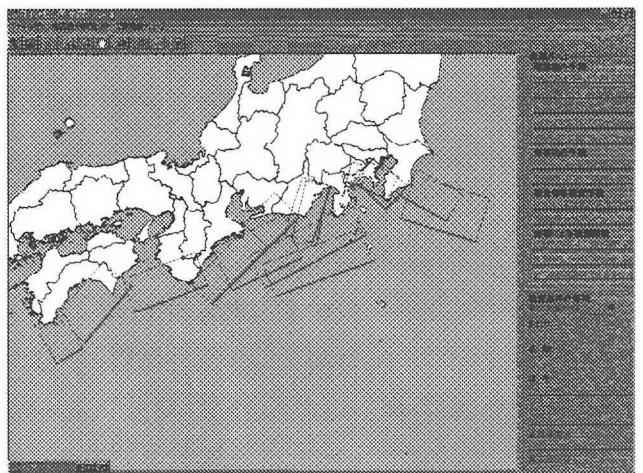


図2(2)歴史地震(面震源)データの一覧

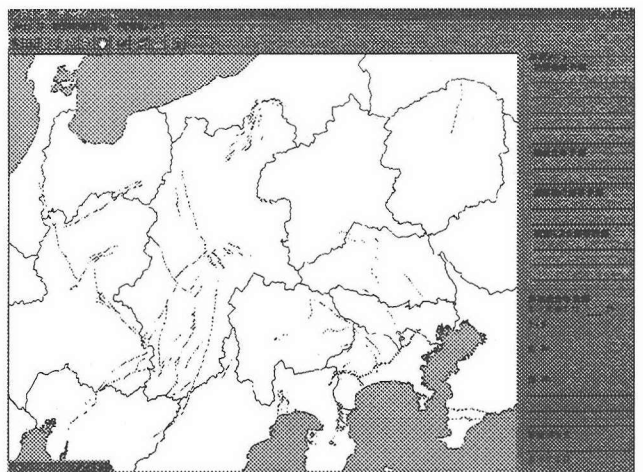


図2(3)内陸起震断層データの一覧

ける予測式であるので、せん断波速度400~600 km/s 程度の工学基盤距離減衰式 $S_{ah}(T, 0.05)$ へ変換する必要がある。地震基盤から工学基盤への増幅効果については、高橋克也他による研究成果⁷⁾を用いて算定している。

b) 大野式

大野式は、米国カリフォルニア州で得られた496の観測記録に基づいて構築された距離減衰式であり、せん断波速度が500～600km/s 相当の工学基盤

における減衰定数5%の加速度応答スペクトルは、以下のように表される。

$$\log S_{ab}(T, 0.05) = a(T)M_w - b(T)X_{eq} - \log X_{eq} + c(T)$$

(2 a) ここに、 S_v : 速度応答スペクトル (cm/s),

S_a : 加速度応答スペクトル (cm/s²),

h : 減衰定数, ω : 円振動数

なお、応答スペクトルの減衰補正 (5%→20%) は、川島一彦他による経験式⁹⁾に基づいて行う。

図3に地震動評価方法の概要を模式的に示す。

$$X_{eq} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_{oj}^2}{\sum_{i=1}^n M_{oj}^2 \cdot \sum_{j=1}^m X_{ij}^{-2}}} \quad (2 b)$$

$$M_w = \frac{1}{1.5} (1.17 M + 1.62) \quad (\text{内陸地震}) \quad (2 c)$$

$$M_w = \frac{1}{1.5} (1.17 M + 0.1) \quad (\text{プレート境界型地震}) \quad (2 d)$$

$S_{ab}(T, 0.05)$: 減衰定数5%の工学基盤加速度応答スペクトル (cm/s²)

X_{eq} : 等価震源距離 (km)

$a(T), b(T), c(T)$: 周期 T に関する既知の係数

n : 起震断層を構成する断層面数

m : 断層面 i を小断層 j に分割したときの分割数

M_{oj} : 小断層 j の地震モーメント (dyne-cm)

X_{ij} : 小断層 j から対象地点までの震源距離 (km)

M_w : モーメントマグニチュード

(4) 地表面の加速度応答スペクトルの算定

基盤面の加速度応答スペクトルに石井晃他の研究成果による応答スペクトル比⁸⁾を乗じて、地表面の加速度応答スペクトル (5%減衰) を求める。応答スペクトル比は地表面と基盤面の加速度応答スペクトルの比を表し、想定地震のタイプ2種類と基盤面の地震動レベル7区分、各メッシュの固有周期6区分に応じて設定する。

(5) 地表面地震動の算定

地表面の加速度応答スペクトルから最大加速度及び地震動による揺れの速さである $S I$ 値 (Spectrum Intensity) を算定する。

最大加速度は、最短周期 (0.02秒) の加速度応答値で規定する。

$S I$ 値は0.1秒から2.5秒までの平均的な速度応答値を表し、次式で算定する。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_v(t, h = 0.2) dt = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_a(t, h = 0.2) / \omega dt \quad (3)$$

ここに、 S_v : 速度応答スペクトル (cm/s),

S_a : 加速度応答スペクトル (cm/s²),

h : 減衰定数, ω : 円振動数

なお、応答スペクトルの減衰補正 (5%→20%) は、川島一彦他による経験式⁹⁾に基づいて行う。

図3に地震動評価方法の概要を模式的に示す。

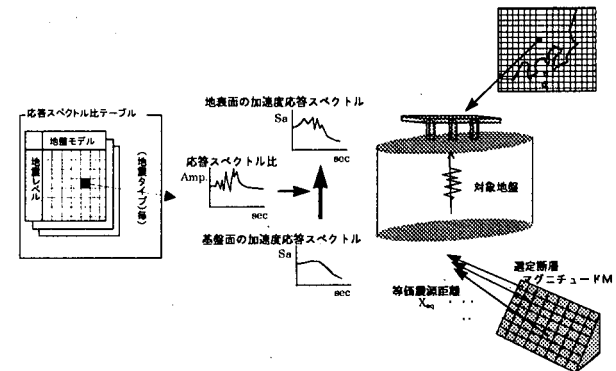


図3 地震動評価の模式図

3. 道路構造物の被害評価手法

(1) 地盤の被害評価 (液状化危険度の評価)

デジタルデータとして構築した地盤 (ボーリング) データを用い、道路橋示方書 (平成8年度版)¹⁰⁾に基づく簡易式により、対象路線に沿った地震時の地盤被害を液状化危険度により評価した。

- 対象路線上の500mメッシュ区間毎に液状化危険度の有無を地形特性から事前判定する。
- 想定された地表面最大加速度から各ボーリング地点の液状化指数 P_L を算定する。
- 500mメッシュ区間毎にボーリング地点の P_L を平均し、各区間の液状化危険度を判定する。

P_L 値と液状化危険度及び構造物の被害との関係は、岩崎らの結果¹¹⁾を基に表1のように設定した。

表1 P_L 値と液状化危険度及び構造物の被害との関係

P_L 値	液状化危険度	構造物被害
$P_L = 0$	なし	なし
$0 < P_L \leq 5$	小 (ほとんどなし)	なし
$5 < P_L \leq 15$	中 (中程度の液状化)	可能性あり
$15 < P_L$	大 (激しい液状化)	被害発生

(2) 橋梁の被害評価

橋梁の被害評価の検討方針は、以下のとおりである。

a) 下部工形式の分類

対象区間の橋脚について下部工の構造形式(以下、「下部工形式」という。)ごとに分類した。

対象下部工形式は、耐震設計上1基の下部構造とそれが支持している上部構造からなる比較的単純なモデルに置換可能な構造形式とし、JHが保有のデータベースに基づき複柱式、角柱式、角柱(中空)式、円柱式、円柱(中空)式、壁式、ラーメン(一層)式、ラーメン(二層)式の8形式に分類した。

b) 代表橋脚の抽出

各下部工形式ごとに、橋脚高Hと上部工重量Wの関係を整理し、解析対象となる代表橋脚を抽出する。

c) 非線形動的解析の実施

代表橋脚に対し、非線形動的解析を実施し、各地震種別(3波形)の地震動強さ(5段階程度)における応答値(M:曲げモーメント、S:せん断力、 δ :移動量、 α :応答加速度)を算出する。

解析モデルの1例を図4に示す。入力地震動は、Ⅰ種地盤:神戸海洋気象台、Ⅱ種地盤:JR鷹取駅、Ⅲ種地盤:東神戸大橋を用いた。

d) 被害ランク判定表の作成

各被害形態に応じた被害ランクを判定するため、表2に示す被害評価指標を設定した。

非線形動的解析の結果から求められる最大応答値(M, S, δ , α)と地震動強さ(SI値)で断面性能曲線を作成する。この断面性能曲線を用いて、各被害形態および被害ランクにおける被害評価指標に相当するSI値を

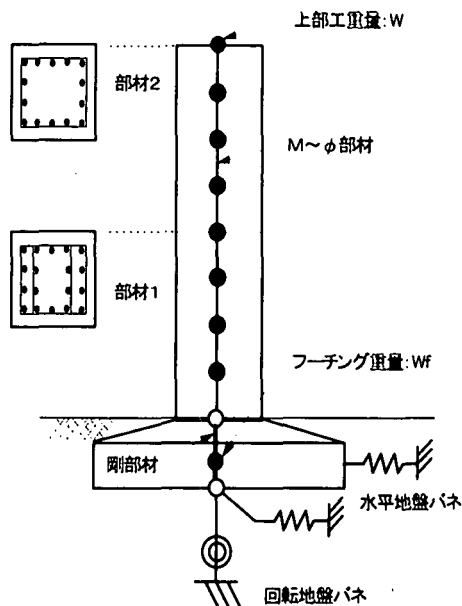


図4 解析モデル図(複柱橋脚の例)

設定し、被害ランク判定表を作成する。被害ランク判定表は、下部工形式別、適用道路橋示方書別、橋脚高区分別、上部工重量区分別に作成する。

表2 被害形態に応じた被害評価指標

被害形態	被害ランク			
	A (大)	B (中)	C (小)	D (なし)
RC橋脚の曲げ破壊	終局状態 $M \geq M_u$	終局前 $M_u > M \geq M_{10}$	降伏状態 $M_{10} > M \geq M_y$	降伏前 $M_y > M$
RC橋脚のせん断破壊	破壊 $S \geq P_s$	破壊前 $P_s > S \geq S_{50}$	せん断クラック $S_{50} > S \geq S_c$	せん断クラック無 $S_c > S$
固定支承の破壊	落橋 $\delta > \delta_A$	破壊 $k_{ny} \geq k_{ny}$		軽微な損傷 $k_{ny} > k_n$
可動支承の破壊	落橋 $\delta > \delta_A$	破壊 $\delta_A > \delta > \delta_B$		軽微な損傷 $\delta_B > \delta$
液状化による基礎の損傷	-	$P_L > 15$	$15 \geq P_L > 5$	$5 \geq P_L$

M_u : 終局曲げ耐力

M_y : 降伏曲げ耐力

S_{50} : 残存耐力50%のせん断耐力

δ_A : 落橋に至る移動量

k_{ny} : 降伏靱度

M_{10} : 残存耐力10%の曲げ耐力

P_s : 終局せん断耐力

S_c : コンクリートが負担するせん断耐力

δ_B : 可動支承の破壊移動量

P_L : 液状化指数

(3) 盛土・切土の被害評価

盛土・切土の被害評価の検討方針は以下のとおりである。

a) 盛土・切土の分類

いくつかの解析モデルを作成しすべり計算を試行し、Fsに与える影響を考慮し盛土・切土ののり面形状、地盤物性値の区分を設定することにより、盛土、切土の分類を行う。

b) すべり安定解析の実施

分類を行った盛土、切土に対しすべり安定解析を実施し、すべり安全率 $F_s = 1.0$ となる降伏震度 K_{hy} を算定する。

検討法面の解析モデル概念図を図5に示す。

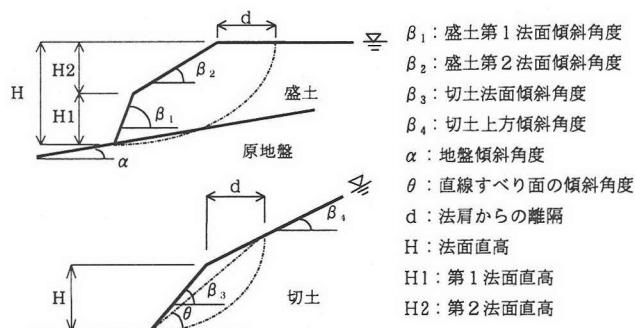


図5 解析モデル概念図

c) 被害評価の判定

降伏震度 K_{hy} を算出し、想定地震強さ K_h と比較した結果、 $K_h > K_{hy}$ となる場合を被害発生とする。地表面最大加速度を震度換算した値 K_h は、建設省土木研究所他による研究結果^{1,2)}に基づき以下のとおり算定した。

$$K_h = A_{smax} / g \quad (A_{smax} < 200 \text{ cm/s}^2) \quad (4)$$

$$K_h = 1/3 \cdot (A_{smax} / g)^{1/3} \quad (A_{smax} \geq 200 \text{ cm/s}^2) \quad (5)$$

d) 被害ランクの判定

被害ランクは、降伏状態における臨界すべり線の位置（法肩からの離隔 d ）が、道路交通に支障をきたす範囲に到達するか否かによって判定した（図6）。

なお、切土においても d が大きい場合、路面上に堆積するすべり土塊は、同様の通行障害を発生させるものとして判定した。

(4) トンネルの被害評価

トンネルは崩壊に至ることはないものとし、直下を横断する断層の有無により被害の有無を判断した。

(5) カルバートボックスの被害評価

カルバートボックスは崩壊に至ることは無いものとするが、支持地盤及び周辺盛土に被害が発生した場合、目地部のズレや段差が生じるなどの被害が起こることから、盛土に準じた被害評価を行うものとした。

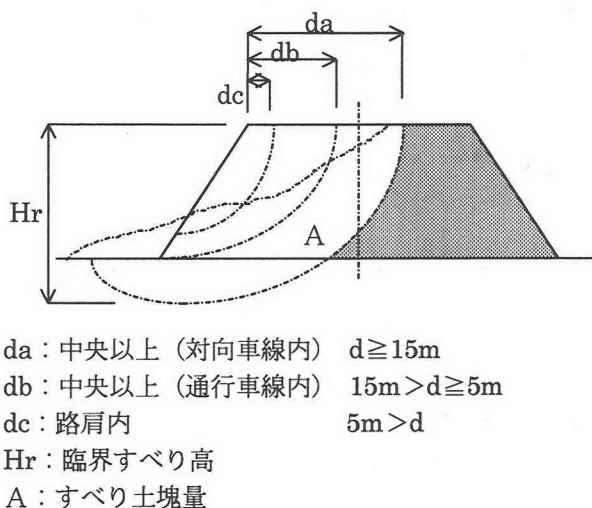


図6 被害ランクの判定

(6) 跨道橋の被害評価

跨道橋の内、橋脚を有する柱式橋は橋梁の被害評価に準ずる。橋脚を設けることのない斜π橋などは、橋台が設置されている切土の被害ランクがA（大）の場合のみ、跨道橋の被害ランクもA（大）とした。

4. 高速道路の震災時の評価

想定地震による道路構造物の被害評価結果（図7）から、必要なデータ項目を抽出し、データをファイル出力することにより、ユーザーが目的に応じてデータを自由に集計・分析することが可能となる。このことから、重点点検箇所となる地域や構造物を特定し、重点防災箇所の選定を行うことが可能となる。また、被害評価結果から通行止めによる料金収入の減や復旧額の算定を行うことができ、経済性の観点から災害リスク

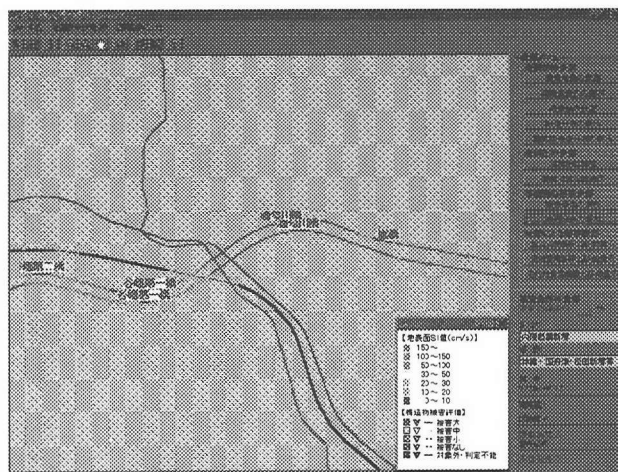


図7 地震動による被害評価結果図

を考慮した耐震補強などの事前予防対策の計画立案の参考とすることが可能となる。

5. まとめ

任意に選定した大規模地震に対する影響について予測を行い、効果的な地震防災対策の計画立案に活用できるプロトタイプ（試行）が構築できた。しかし、より使い勝手や精度を向上するために今後も次のような検討を行っていく必要がある。

①震源の面的な広がりを考慮して地震動を評価する際に電共研式、大野式は有効な方法の1つと考えられるが、さらに影響評価システムの地震動評価式として有効な評価式を取り入れる必要がある。

②被害評価判定手法については、各分野の最新研究成果を取り入れていく必要がある。

③道路構造物等の被害評価判定については、被害ランク判定基準の全体的な合意形成が必要である。

④実際の被害地震による検証が必要である。

⑤耐震補強等のデータ更新の手法を検討する必要がある。

なお、本システム上を活用するにあたっては、本システムでは路線全体の相対的な評価は可能であるが、個々の構造物の被害を評価するには、精度が十分ではない。よって、実際に耐震対策を実施する場合は、個々の構造物について詳細な設計検討を行う必要がある。

6. おわりに

このシステムは大規模地震の影響を事前評価するために構築されたが、構築された数値地図データ等は、地震の影響評価以外の検討に使用できると考えられる。例えば、交通、気象、降雨障害なども含めた多機能的防災システムとしても活用することが可能である。

将来的には、観測された実地震動を入力する事により、リアルタイムに地震動分布を算定し、被害想定に基づき、状況把握点検を行うなどの初動体制の支援システムとしての活用も可能と考えられる。

本システムの構築にあたって、鹿島建設㈱の協力により、貴社所有の地震データベースを使用させていただいたことを申し添える。

参考文献

- 1) 高橋克也他：硬質地盤における応答スペクトルの距離減衰式 その1 水平動，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.363-364，1994.
- 2) 高橋克也他：硬質地盤における応答スペクトルの距離減衰式 その2 上下動，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.365-366，1994.
- 3) 大野晋他：兵庫県南部地震の岩盤における地震動強さの推定，第23回地震工学研究発表会，pp.201-204，1995.
- 4) S.Ohno, Intensity of strong motion on pre-Quaternary stratum and surface soil amplifications during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake
- 5) 武村雅之他：日本列島及びその周辺に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係，地震2，Vol.43，pp.257-265，1990.
- 6) 佐藤良輔編著：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック，鹿島出版会，1995.
- 7) 高橋克也他：様々な岩盤上での強震動応答スペクトルの予測式，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，第1分冊，pp.547-552，1998
- 8) 塩崎信久他：加速度応答スペクトルの地盤増幅特性に関する検討，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，第1分冊，pp.1053-1058，1998
- 9) 川島一彦他：減衰定数に対する地震応答スペクトルの補正法，土木学会論文集，第344/I-1号，1984.4
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，1996.12.
- 11) 岩崎敏男、龍岡文夫、常田賢一、安田進：地震時液状化の程度の予測について、土と基礎、28-4、pp.23-29、1980.4.
- 12) 建設省土木研究所他：液状化対策工法の開発に関する共同研究報告書，1996，1997