

阪神地域の地震環境と地盤の動的応答

工務部 設計課 水元 義久

(前)同部同課 関本 宏

まえがき

構造物の耐震設計ならびに地震応答解析に、どの程度の地震動を見込めばよいかを検討するため、阪神高速道路の立地する阪神地域における地震環境と地盤の動的応答についての基礎的な検討を実施したので、その一部を紹介する。

一般に震源から放出された地震波は、この伝播の途中に存在する境界面（地層境界などその弾性的性質が変化する面）で反射、屈折を繰返しながら、しだいにその波形を変えて伝わっていく。硬い第一の地層から軟らかい第二の地層に地震波が入射する場合、屈折波の振幅が大きくなることはよく知られていることである。また、このとき第二層が第一層に比べて軟らかければ軟らかいほど振幅の増幅度は大きくなる。

特に、S波の速度が $V_s = 50 \sim 400 \text{m/sec}$ となる表層地盤においてこの傾向は著しく、地表付近の各地層における重複反射により予想外の被害をもたらすこともある。ここでいう表層地盤とは概ね沖積層～上部洪積層にあたり、これらの地層の分布とその動的性質を把握することが地盤の地震時挙動を解明する一つの鍵となる。

また、上記の地盤の挙動は入力地震波の震源位置、深度、マグニチュード、地震波形、継続時間などにより左右されるため、ローカルな地域問題として地震環境・入力地震波の性質を把握することが、重要な課題となる。そして、最終的には地盤と入力地震波、ならびに構造物との相互作用が問題となる。

そこで、本調査では、まず既存資料の収集整理により、

- 1) 地震環境
- 2) 入力地震波
- 3) 地質構造
- 4) 地盤の動土質特性

の各事項を把握し、その後、モデル地盤に想定地震波を入力させるシュミレーション計算を行うことにより、地盤の地震時挙動をおさえるという方針を進めた。

調査の全体概要は図-1に示すとおりであり、本稿では主として枠で囲んだ部分について紹介する。

なお、地質構造の把握やS波速度の推定公式、あるいは当公団で今までに実施された地質調査を用いての路線ごとの土質断面コンパイルなどについては整理しているので文献¹⁾を参照されたい。

2. 阪神地域の地震環境および入力地震波

2-1 阪神地域の地震環境

有史以来阪神地域に被害あるいは影響を与えた地震は数多くある。これらの地震のうち、年代の古いものは史料などをもとに、新しいものは地震観測により、その規模（マグニチュード）と震源の位置が、宇佐美・河角氏などにより推定されている。このようにして推定された西暦679年から1975年まで1297年間の807個の地震について、阪神地域に与えた影響と震源の分布などを求めた。

計算地点は阪神地域を緯度・経度ともに5分（約10km）ごとに区切った35のグリッドで実施した。

計算は速度振幅と加速度振幅について実施したが、速度振幅の計算結果については文献²⁾に紹介

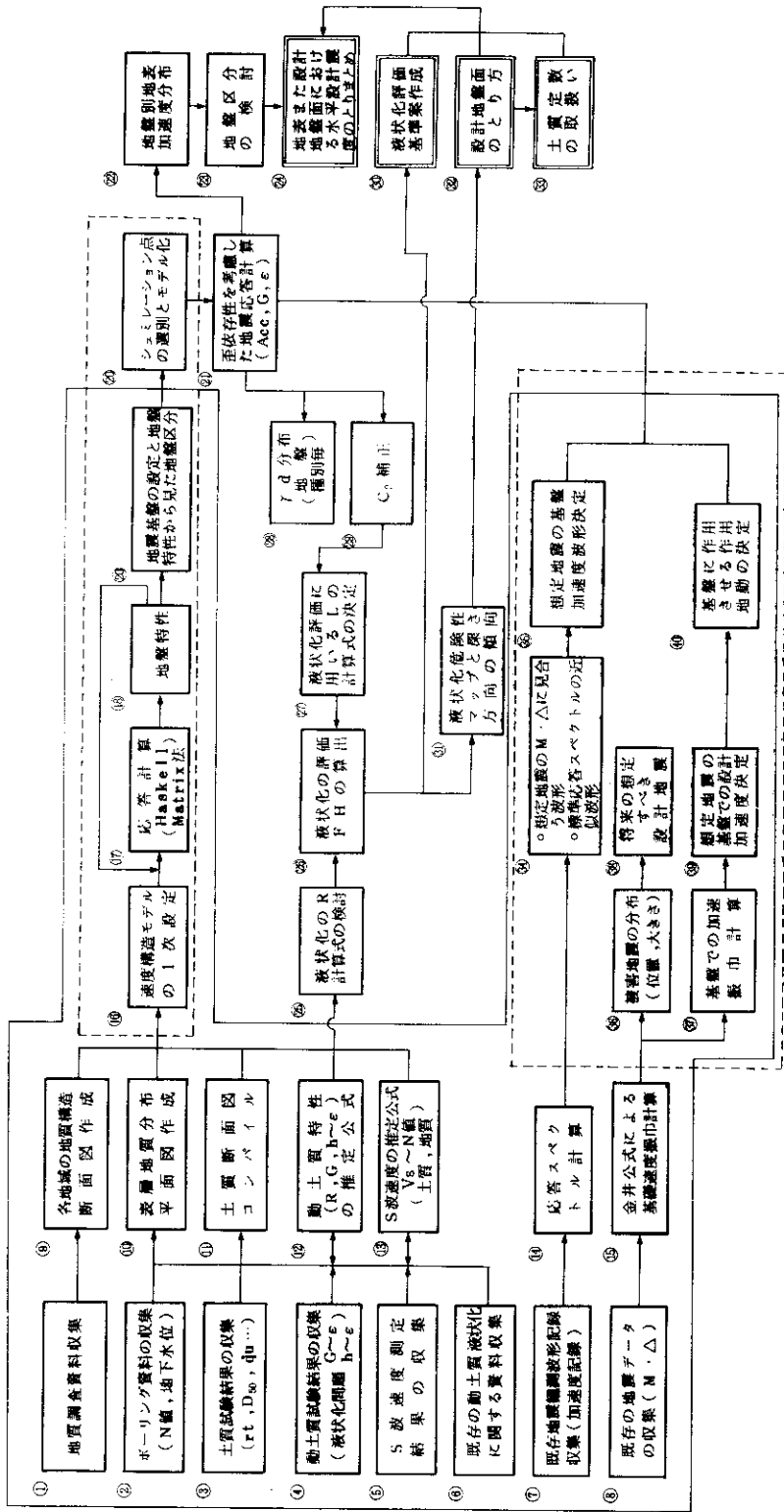


図-1 地震環境と地盤の動的応答に関する検討フローチャート

しているの、ここでは省略する。

基盤の振動加速度の推定式には、Seed & Idisの式、Estevaの式、岡本氏の式などがあり、地表の加速度振幅の推定には、勝又氏の式や建設省土木研究所の式(1977年)などがある。本検討では1978年6月の宮城県沖地震など最近の地震観測を含め、第1種地盤(岩盤地域)で得られた20個の地震の39個の地震記録のデータを最小自乗法により求めて、次式を得たので、これを用いることとした。

$$\alpha = 0.975 \times 10^{0.574 M} \cdot d^{-1.17} \dots\dots (1)$$

ただし α : 基盤の加速度振幅(gal)
 M : マグニチュード
 d : 震源距離(km)

なお、震源の深さは日本における影響地震の平均的な値といわれる30kmを用いた。

図-2は35のグリッドの中から、代表的なポイントとしてNo.17点(浪速区湊町)での式1による計算結果であり、 $\alpha > 25 \text{ gal}$ 以上の影響を与えたと思われる66個の地震について示す。この図から明らかのように、阪神地域において、特に大きな影響を与えている地震は以下の2群に分布しているといえる。

- (1) 東海道沖から南海道沖にかけての $M=8$ 級の巨大地震群
- (2) 生駒山地から琵琶湖にかけての $M=7$ 級の中型地震群である。

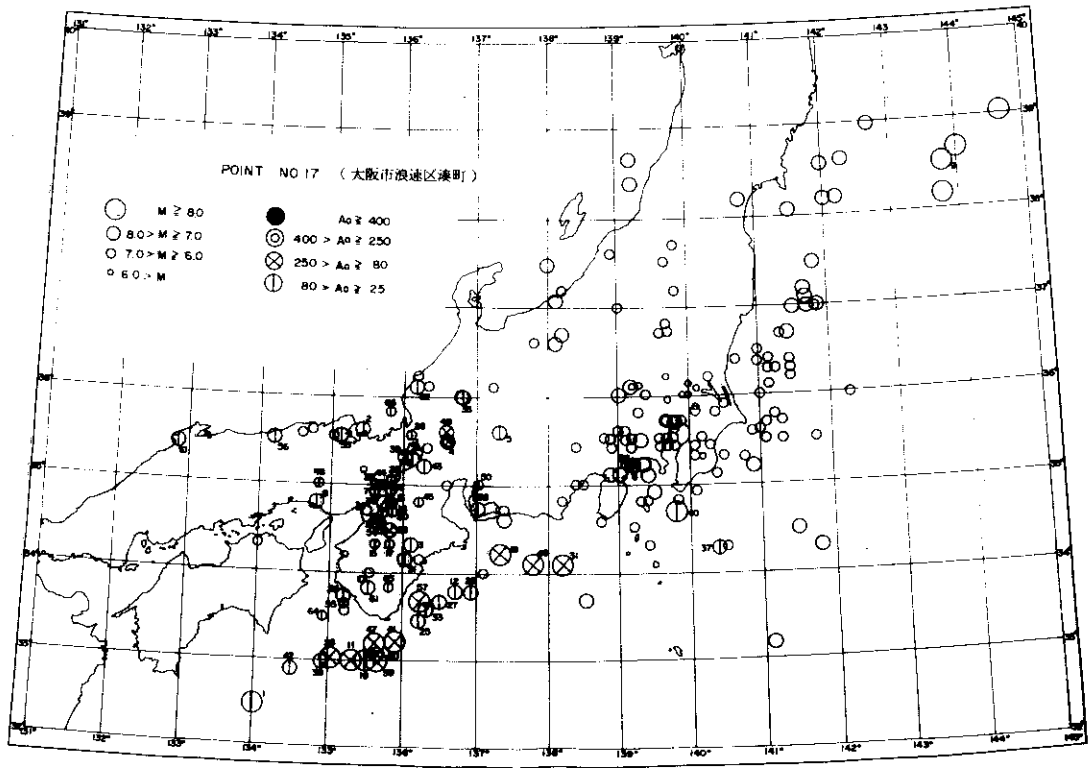


図-2 被害地震の震央位置図(式1による)

2-2 期待値分析

将来、たとえば50年、100年の間に起こるであろう地震の大きさを2.1における計算結果をもとに期待値分析を行った。式1による計算結果のうち図-3に100年期待値および有史以来の最大値の

コンター・マップを例示する。

過去の最大値のコンターによれば、等加速度線は東西に走り、南が大きく泉佐野付近で220gal、北の方で小さくなり宝塚・池田付近で170gal以下となっており、これは、2.1の(1)に示した地震群による影響を受けている。

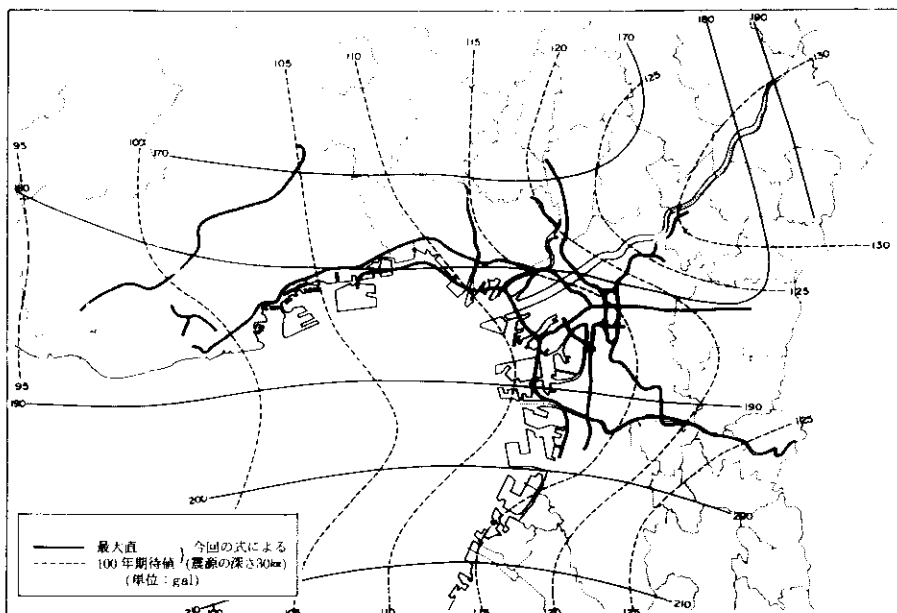


図-3 阪神地域における基盤加速度振幅

これに対し、100年期待のコンターはおよそ南北に走り、東が大きく高槻付近で130gal、西に行くほど小さくなり明石付近では95gal程度となっていて、2.1の(2)に示した地震群による影響を受けている。

以上のことより、最大を与えるような地震は紀伊半島沖の巨大地震群であり、地震発生が単純なポアソン過程に適合する仮定のもとで発生頻度を考慮した100年期待値のような場合には、生駒山系から琵琶湖への中型地震が優勢な影響を示す結果が得られた。

2-3 阪神地域と関東地域との地震環境の相違

有感地震は近年では関東に比較して関西では少なく、一般的に地震に対する関心も低い。また、“東京に比較し大阪では地震が少ない”とよく言われるところであるが、どの程度少ないのかを定量的に把握できるよう検討した。

過去の地震記録を用いて、代表的地点として関西では浪速区湊町（グリッドNo.17）を選び、関東での代表的地点として皇居を選び、両者の位置に対し同一の推計式を尺度として対比した。

両地点の金井公式による速度振幅の比較は文献²⁾に詳述しているが、結果としては東京での期待値は阪神地域に比べおよそ1.3～2.0倍の値を得た。

本稿では、2.1により得られたマグニチュード

・震源距離と基盤の加速度振幅との関係式1を用いて、2.2と同様な方法により、関東における代表地点（皇居）で影響地震を計算したのが図-4である。図-2における浪速区湊町の場合と比較して、 $\alpha > 25$ gal以上の地震の数は90個と5割程度多くなっている。

最大値ならびに100年期待値を比較すると表-1のような計算結果を得た。本表より、東京地方の方が地震の個数や100年期待値などでは、阪神地域より多いあるいは大きい、逆に阪神地域ではより大きな地震 ($\alpha > 80$ gal) の個数に着目すると東京地方より多いことが注目される。

表-1 阪神地域と東京地方の地震環境の比較

代表地点	A) 25galの地震個数	A) 80galの地震個数	最大値 (gal)	100年期待値 (gal)
大阪(浪速区湊町)	66	21	184	114
東京(皇居)	90	16	216	130

検討結果において一般的に言われている傾向より多少異なるこのような結果は、古い時代のものについては、その歴史的な環境などの影響が反映されている面もあり多くの史料があることに起因する面もあるが、一方では東京地方での近年の地震がかなり多いことを示しているともいえる。

また、統計区間のとり方によっても値は大きく変化するので、最適な同質の統計区間で比較すべき点も問題として残されている。

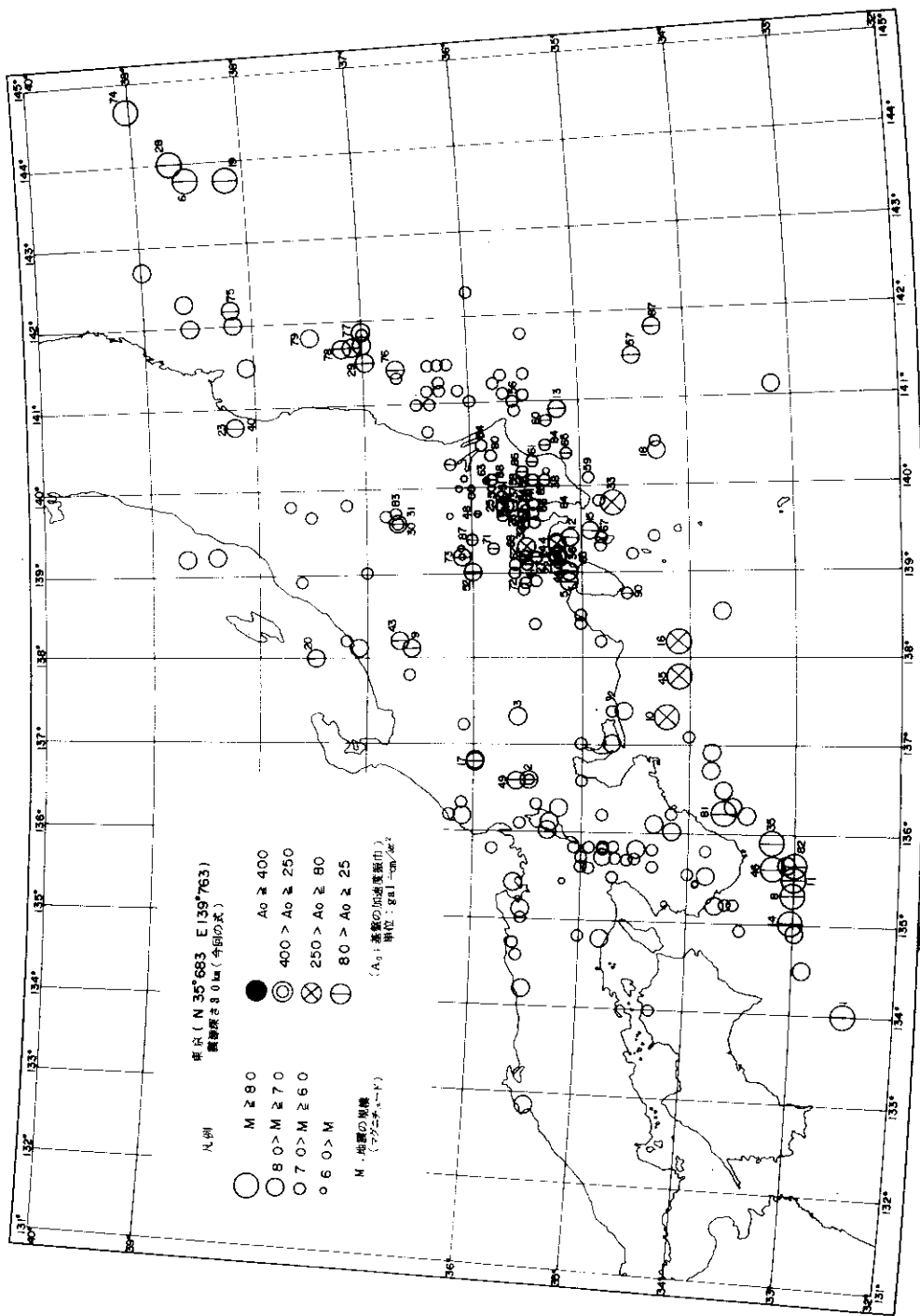


図-4 被害地震の震央位置図(式1による)

3. 地震基盤と地盤の振動特性

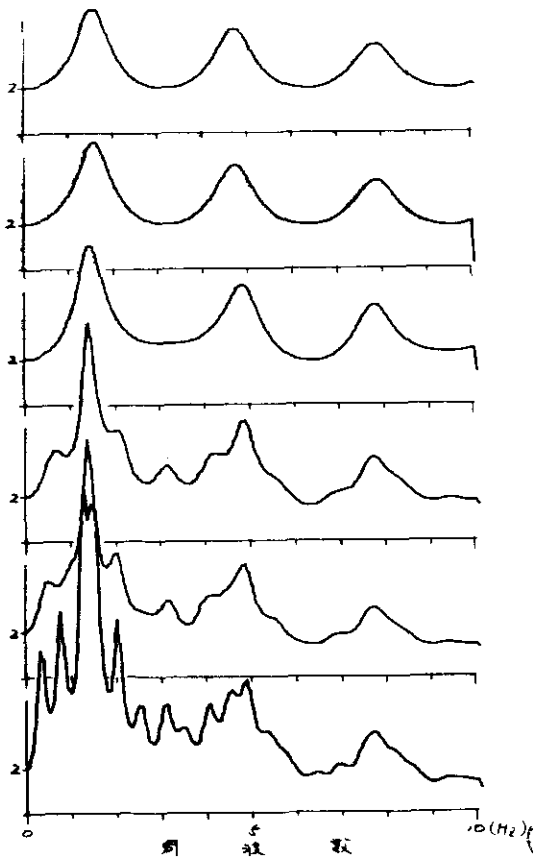
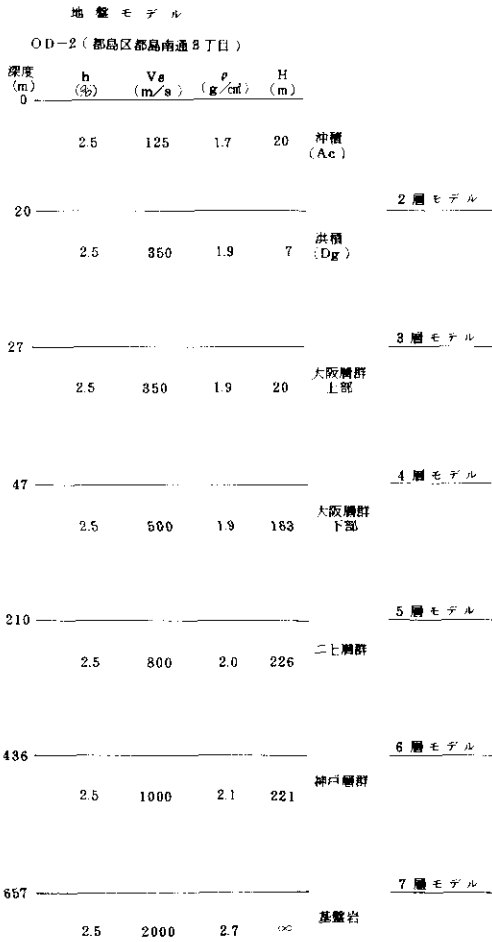
3-1 地震基盤の検討

入力地震波を作用させる地震基盤については、その地層以深から入射した地震波の地表における応答に変化の少ないところとして定義される。ところで、阪神地域での深層の地質資料は不足しており、OD-2（都島区都島南通3丁目）のみが基盤岩まで達している唯一の深井戸資料である。そこで、この資料を用いて白色ノイズによる応答を計算した結果が図-5である。ただし、地盤の物性値（S波速度、密度など）については、深い層は推定値、浅い層は既存資料より阪神地域にお

ける平均的な値を、たとえば、本調査の一環として阪神地域の土質資料より求めたN値とS波速度との関係などを用いている（表-2参照）。

表-2 S波速度の推定公式

整理方法		推定式(回帰曲線)
全データ	今回	$V_s = 102.7N^{0.310}$
	道路橋示方書	$V_s = 91.0N^{0.337}$
地層別	粘性土	$V_s = 99.4N^{0.340}$
	砂質土	$V_s = 92.7N^{0.322}$
	レキ質土	$V_s = 116.7N^{0.273}$
地層別	沖積層	$V_s = 94.4N^{0.258}$
	段丘層	$V_s = 122.9N^{0.241}$
	大阪層群	$V_s = 147.4N^{0.242}$



h : 減衰定数(%)
 V_s : S波速度(m/s)
 ρ : 密度(g/cm³)
 H : 層厚(m)

図-5 深層地質資料による応答スペクトル

図-5から明らかなように、基盤層を変化させても基本的なスペクトルのパターンは変化しない。しかし、深い層から入射させた場合ほど増幅度は大きくなっている。

そこで、基盤層を変化させ、近地地震(和歌山)・遠地地震(十勝沖八戸)の2種の地震波を作用させた場合の増幅度を試算すると表-3のとおりとなった。今後、解明すべき課題として残されている地盤のひずみ依存性の問題あるいは減衰定数設定上の問題もあるが、増幅度は通常の場合3~4倍という応答が常識的であり、かつまた既存の地質資料の質を考慮し、工学的地震基盤としては、洪積砂礫層(天満層)もしくは大阪層群上面を用いることが妥当であると判断した。

3-2 阪神地域の地盤の振動特性

今回調査で阪神高速道路の地質断面コンパイルを作成したが、これを用い路線沿いに各地層構造を代表する75点を選定し振動特性を検討した。

手法は、地震波が地震基盤より入射した後の表層での応答、すなわち、地盤の応答特性を、SH波の重複反射理論により、地層の鉛直下方から白色ノイズを入射させて、各地層境界での屈折・反射をくり返した後の地表での応答をHaskellのマトリックス法で計算した。

地盤の定数としてS波速度、層厚、密度および減衰定数が必要であるが、S波速度および密度は表-3に相関を例示したようなN値からの推定値減衰定数は暫定的に2.5%を用いた。

以上により、阪神高速道路沿いに約2kmピッチの75地点に対し試算した結果をもとに、1次の卓越周数およびその増幅度をもとに、コンター・マップとしたものが、図-6、図-7である。図中には沖積層等厚線もあわせ示しているが、これら1次の卓越周数や増幅度と比較的よい対応を示している。

すなわち、卓越周数が低く、増幅度の大きい地域は、沖積層が20~30m程度以上の深い湾岸線から淀川下流域、いわゆる大和川流域となっており、卓越周数が高く、増幅度の小さい地域は沖積層厚の比較的薄い上町台地から現大和川中流部お

表-3 基盤層と変化させた時の応答

(単位: gal)

	近地地震 (和歌山)	遠地地震 (十勝沖八戸)
2層モデル (洪積)	356(2.50)	295(3.39)
3層モデル (大阪層群上部)	395(2.78)	344(3.95)
4層モデル (大阪層群下部)	381(2.33)	391(4.49)
5層モデル (二上層群)	275(1.93)	427(4.90)
6層モデル (神戸層群)	342(2.41)	618(7.10)
7層モデル (基盤岩)	308(2.17)	629(7.22)
基盤入射加速度	142	87

(注) カッコ内は増巾度

よび空港線北部、神戸西宮線となっている。

なお、北神戸線については、全線が第1種地盤と考えられ、今回の応答計算から除外した。

3-3 地盤区分の検討

地盤種別を判定する方法は通常道路橋示方書により行われている。すなわち、

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^N \frac{H_i}{V_{si}} \dots\dots\dots (2)$$

ここに T_G : 地盤の特性質

H_i : i 番目の地層の厚さ

V_{si} : i 番目の地層の平均せん断弾性波速度

により地盤の卓越周期により分類されている。

この判定方法においては基礎構造物の根入れ、すなわち支持層の設定の仕方により地盤区分が多少変化する問題がある。

たとえば、 $N > 25$ の洪積粘土層があり、この層に貫通させてさらに下層の砂礫層に杭基礎を設置するような場合、どこまでの層を対象として T_G を判定するかにより地盤区分が変化する。すなわち、対象とする地層を深くとればとるほど地盤は悪くなるような矛盾を生ずることもある。

そこで、地盤の応答特性を適確につかむために多面的に検討する必要がある、本検討では、その判定法に「道路橋示方書」だけでなく、建設省の

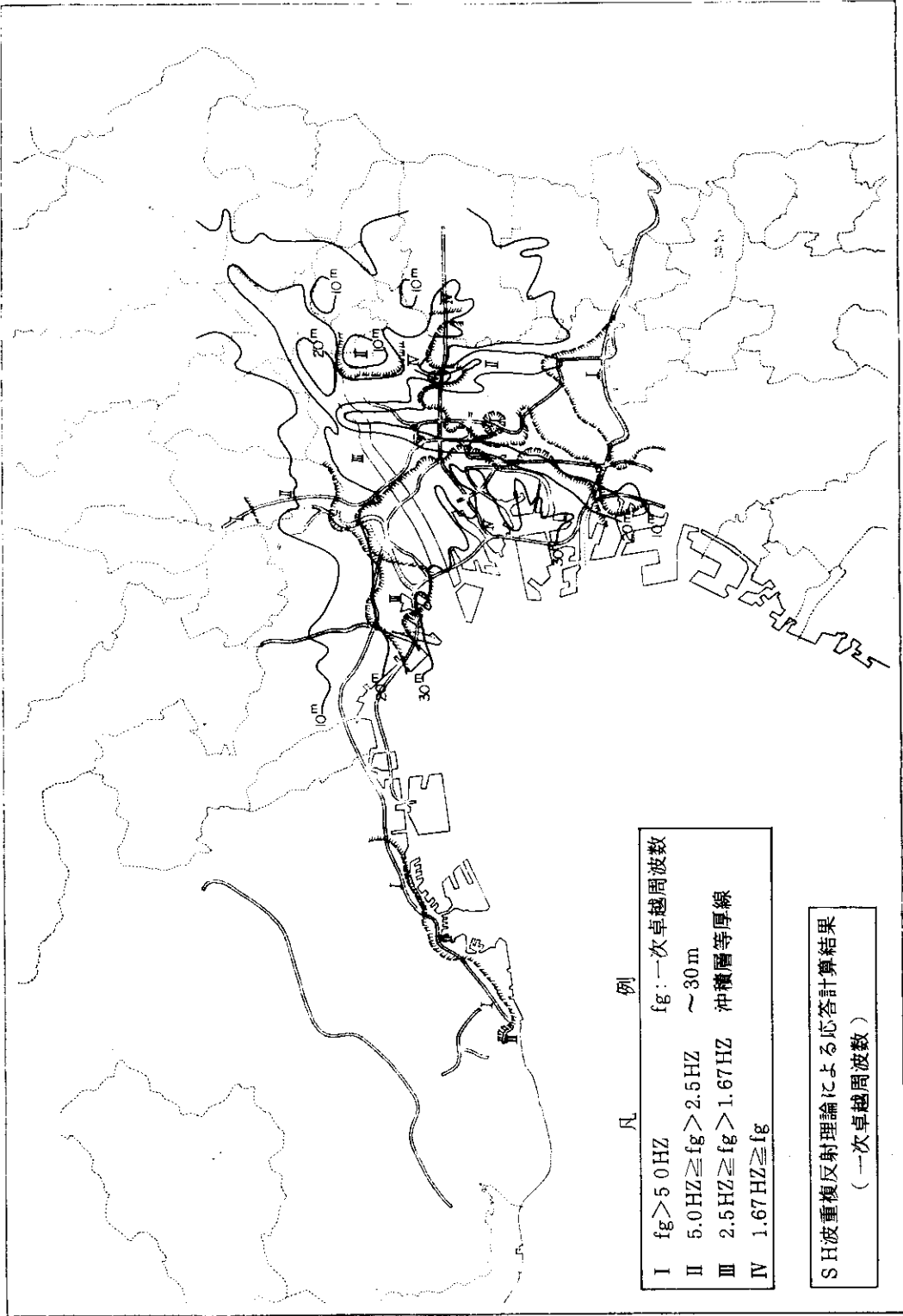
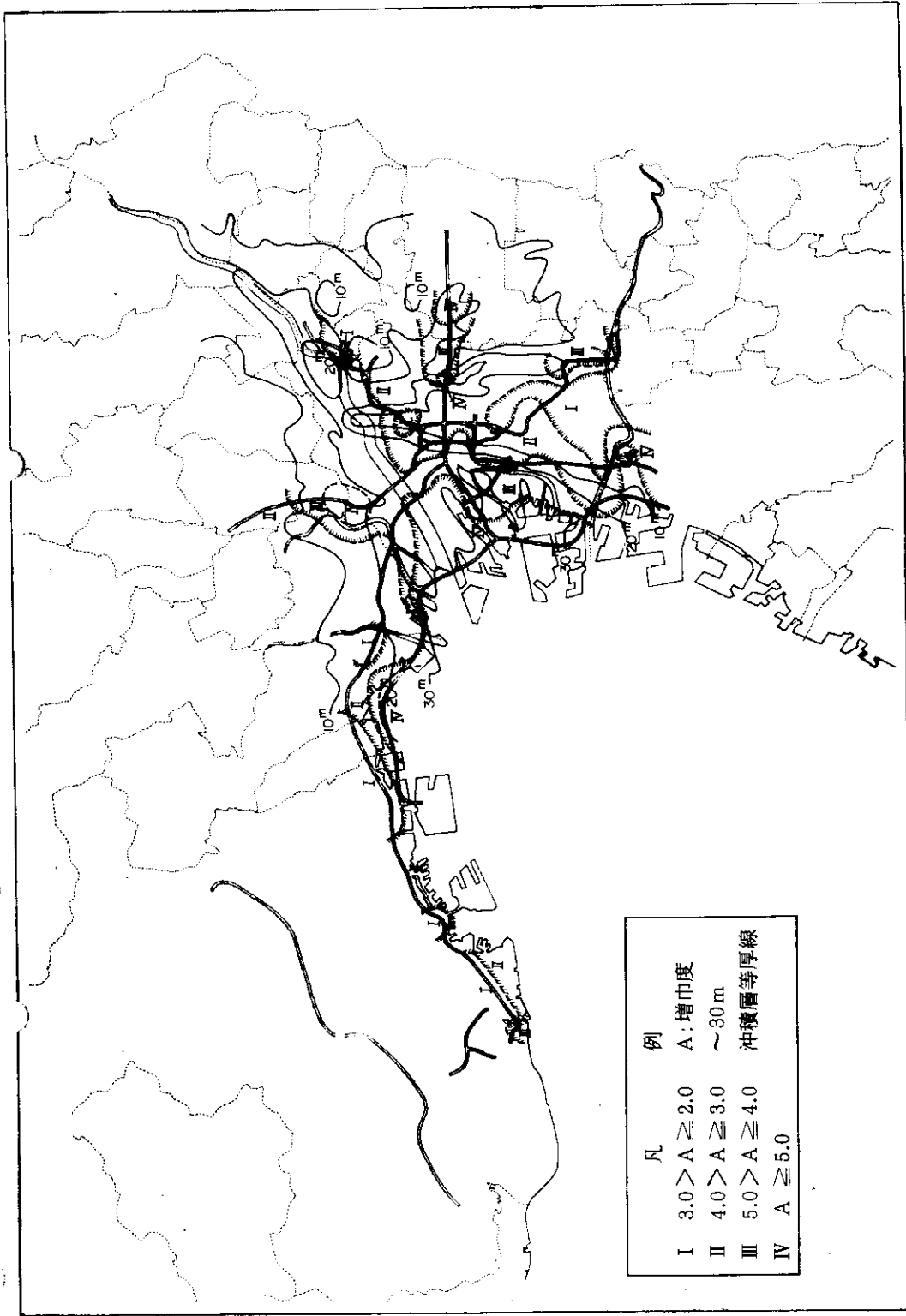


図-6 応答計算による1次卓越周波数



図一七 応答計算による増幅度

「新耐震設計法」あるいは金井氏らによる「常時微動による地盤の卓越周期による分類」（最大変位振幅を考慮に入れて地盤種別を判定する方法）などを用いて比較した。

これらの判定法に対し、3.1による1次卓越周波数・増幅度とこれら地盤種別の判定法を比較したものであるが、その結果が図-8である。「新耐震設計法」による柱状図による方法と、「道路

橋示方書」の表層の卓越周波数による地盤種別とは比較的よい対応を示しているが、さらに今回の結果から卓越周波数と増幅度を加味して図-8のCに示す地盤種別を試みてみた。

これによれば「道路橋示方書」の表層の卓越周波数による方法に比べ、柱状図をもとにした「新耐震設計法」における地盤種別とよりよい対応が得られた。

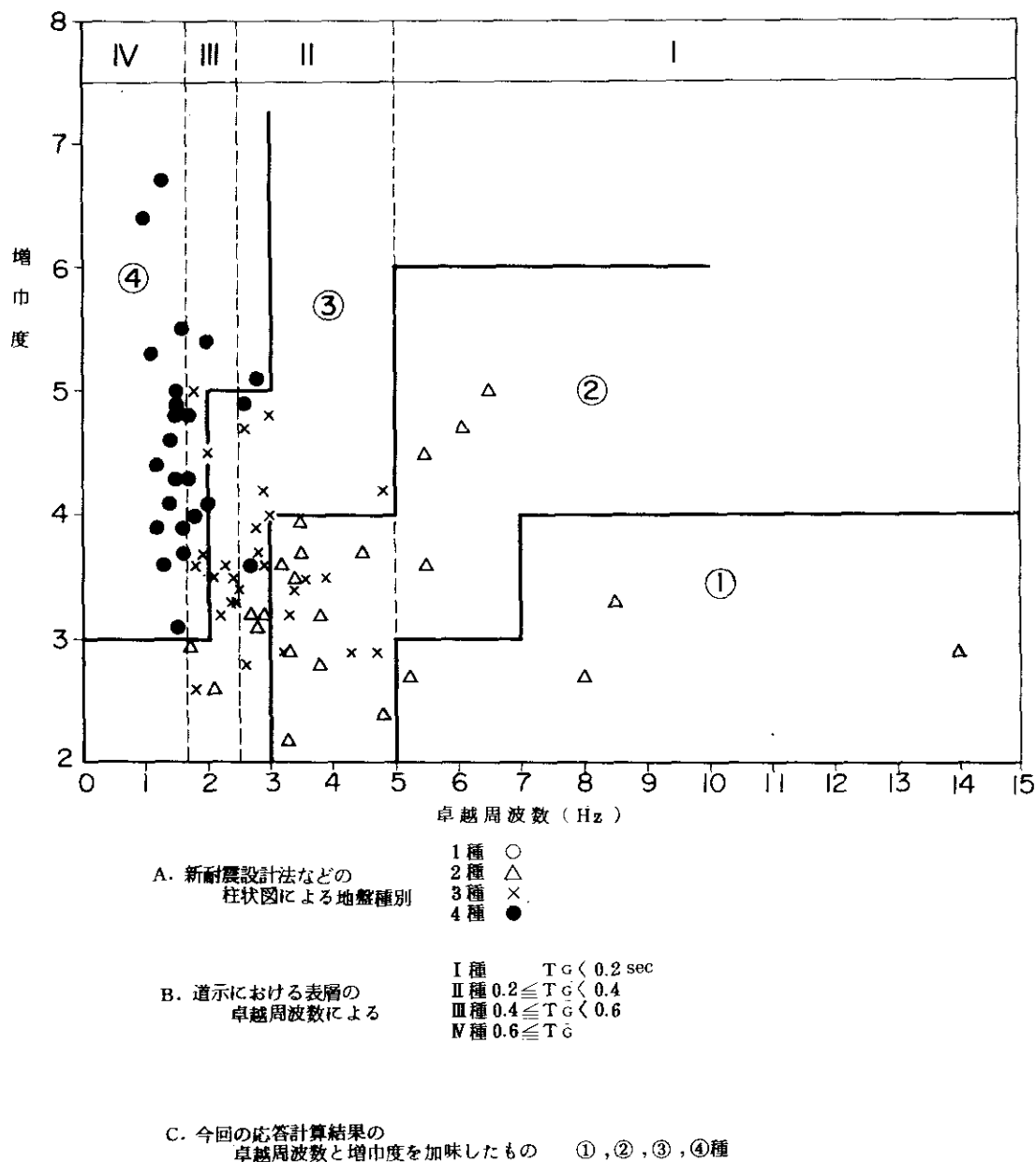
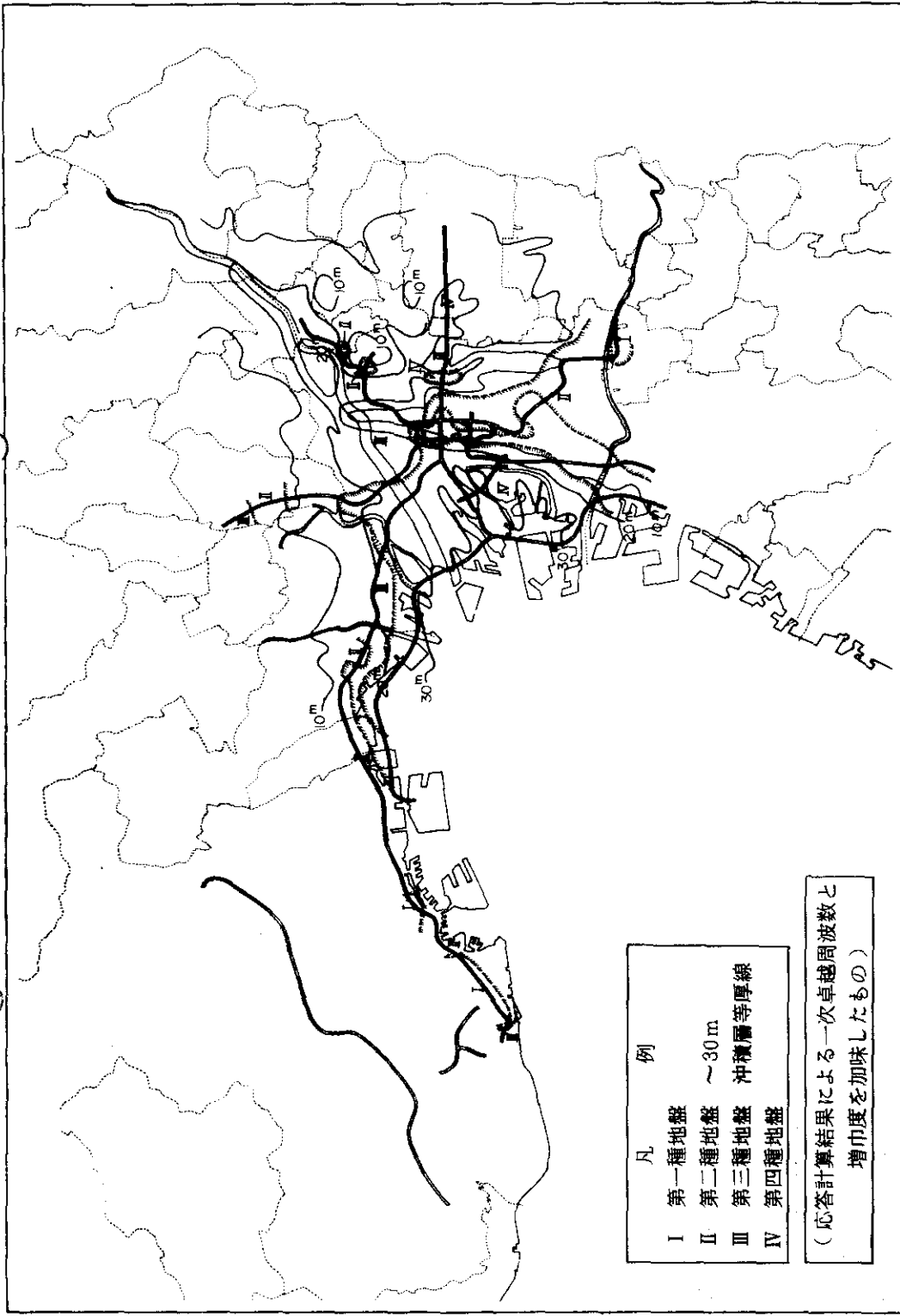


図-8 地盤種別の比較



- 凡 例
- I 第一種地盤
 - II 第二種地盤 ~30m
 - III 第三種地盤 沖積層等厚線
 - IV 第四種地盤

(応答計算結果による一次卓越周波数と増巾度を加味したもの)

図一9 応答計算結果による地盤種別の分布

今回の手法による検討において得られた阪神高速道路の立地する当地域の地盤種別は図-9のとおりである。

あとがき

大型電算機の活用などにより、モデル化された系に対する応答特性は非常に高い精度で得られるようになり、耐震設計の今後は動的解析法の活用とともに、日進月歩の期待は大きい。

一方、「大規模地震対策特別措置法」にも見られるような地震予知の可能性の議論される現状にありながら、設計地震入力特性の設定、地盤の動的応答あるいは構造物と地盤との相互作用問題など、設計における基本となる前提条件の問題については未だ不明な点も多い。

そこで、まず地域固有の構造運動の地質学的現在における反映にはかならず地震に、地域固有の「型」があるように、地盤条件はさらにローカリティーを有するので、当公団高速道路の立地する阪神地盤特性の適確な把握は、合理的耐震設計のための重要課題であると考えた。

今回、既存の地震資料あるいは当公団における過去の建設時に実施されたボーリング調査などを整理し、これらを用い阪神高速道路網全体を対象とし、マクロ的に地震と地盤との相関より、基礎的な評価を実施した。

阪神地域における強震記録の貧弱、深層地質調査の不足、あるいは大阪地盤の動土質特性調査の不足などの問題点もあり、解析にあたっては入力データに多くの仮定を設けざるをえなかった。

しかしながら、建設時における合理的な耐震設計だけでなく、100kmをこえる既存の路線の道路管理上の問題（地震を受けた後の構造物の保守点検のプライオリティーづけや地震計の設置問題など）など当面道路管理者の立場で何らかのとるべき必要措置に対し、1つの尺度あるいは目安を得るべく今回の検討を実施したものである。今後さらに諸データの蓄積ならびに諸検討をもとに、当該地域に適合したより合理的な耐震設計が出来るよう努力すべき点も多く残されている。

また、地震防災という観点からは、阪神都市圏における都市施設の一環としての高速道路の位置づけと役割りを前提として考える必要もある。この点より都市高速道路の地震防災に対する諸検討は、ただ単に高速道路だけの問題に留まらず、波及効果として共通の地盤に立地する当地域に対する地震防災の一資料となり、阪神都市圏の安全へ少しでも貢献することを期待し、調査を実施したところの概要を紹介した。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：大阪地盤の動的応答の検討業務報告書、昭和55年2月
- 2) 水元、南荘、関本：阪神地域の地震環境について、第12回技術研究発表会、昭和55年2月、阪神高速道路公団
- 3) 関本、水元、南荘：阪神高速道路における地震防災の基礎的検討、土木学会第35回年次学術講演会、昭和55年9月
- 4) 水元：都市高速道路の耐震設計、阪神高速道路公団社内報、昭和54年11月、12月号