

地震工学における地盤の扱い

山崎文雄¹⁾

1. はじめに

地震工学の分野における研究課題は、色々な地域や地盤・地形条件下での地震動の種々の特性を評価することと、そのような地震動が構造物に作用した時に構造物がどのように応答するかを把握することの2つに大別できよう。前者において地盤特性は、その地点の地震動を説明するための最も大きな要因であり、これまで数多く行われてきた地震動観測の結果からも、このことは実証されている。また後者において、地盤は構造物を支持する役割を果たすとともに、地震力を構造物に伝達する媒体でもあり、地盤と構造物は相互に影響し合う。埋設管などのライフライン構造物を考えた場合は、地盤の地震時変位がほぼそのまま構造物に変形として作用すると見なししてよい。

このように地盤は、地震工学において考慮すべき非常に重要なファクターであり、本文においては主として、地盤による地震動と違いと耐震設計における地盤分類の方法、各種の地盤における地震動観測の現状、さらには地震応答解析における地盤のモデル化の方法などについて解説する。

2. 地盤種別と基盤

種々の構造物の耐震設計においては、対象地点に共通する広がりを持ち、十分に堅固な「基盤」を設定する必要がある。この基盤の上面を基盤面と呼び、この面以下の地盤は、構成ならびに力学的性質の変化が小さいことが要求される。具体的な基盤面の条件は、耐震設計を行う構造物ごとにそれぞれの示方書や指針で定められている。たとえば道路橋示方書（日本道路協会，1990）では、S波速度300m/s程度以上もしくは、粘性土層については標準貫入試験によるN値が25以上、砂質土層についてはN値50以上の剛性の高い地層の上面と規定されている。一方、原子力発電所の耐震設計指針（日本電気協会、

第1表 耐震設計上の地盤種別

地盤種別	地盤の特性値 T_G (s)
I 種	$T_G < 0.2$
II 種	$0.2 \leq T_G < 0.6$
III 種	$0.6 \leq T_G$

（道路橋示方書より）

1987) においては条件はより厳しく、S波速度700m/s以上の硬質地盤（概ね第三紀層およびそれ以前の堅牢な岩盤であって著しい風化を受けていないもの）の表面を、その上の表層や構造物がないものと仮定した上で、解放基盤表面と名付け、この面上で耐震設計の基準となる地震動スペクトルを規定している。以上は地震工学における基盤の定義であるが、地震学の分野では、地盤の上層に相当するS波速度が3 km/s、P波速度が6 km/s程度の地層を地震基盤と考えることが多い。

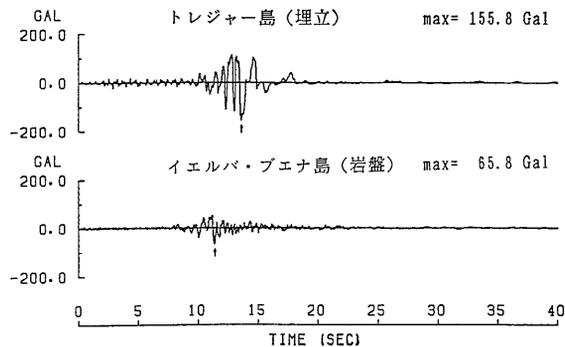
通常の構造物の耐震設計に話を戻すと、基盤面と地表面との間の地層が、増幅などを考慮すべき地盤ということになる。最近改訂された道路橋示方書では、この地盤をその特性値（推定した1次固有周期）によって第1表のように3種に分類している。ここでI種地盤は岩盤、III種地盤は沖積地盤のうち軟弱地盤、II種地盤はI種およびIII種のいずれにも属さない洪積および沖積地盤にほぼ相当する。震度法に用いる設計水平震度は、地盤別補正係数としてそれぞれ0.8（I種）、1.0（II種）、1.2（III種）を乗ずるよう定められている。すなわち軟弱地盤上に建設される橋は、岩盤上に建設されるものの1.5倍の水平力を考慮する必要がある。また橋の固有周期に応じた補正係数においても、地盤種別による地震動の振動数特性の違いが取り入れられている。

3. 地盤による地震動の違い

地層構成、層厚、弾性波速度などの地盤の特性によ

1) 東京大学 生産技術研究所 〒106 東京都港区六本木7-22-1

キーワード：地盤種別、地震動、アレー観測、地震被害、地震応答解析



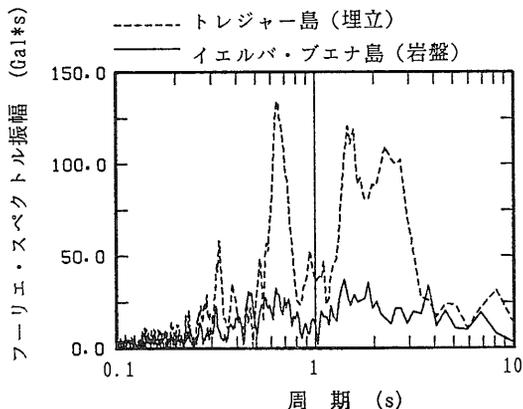
第1図 ロマブリエタ地震で観測された加速度波形の埋立地盤と岩盤上での比較

て、各地点で観測される地震動の振幅や振動数特性に差異があることは以前より指摘されている。昨年10月に発生したロマブリエタ地震の際、カリフォルニア州鉱山地質局 (CDMG) によって観測された地震記録 (SHAKAL ほか1989) の中に、その典型的な例を見ることができる。第1図は、震央の北北西約100 km に位置するサンフランシスコ湾に浮かぶ2つの島で得られた加速度波形である。イエルバ・ブエナ島は、岩盤で構成されており、この地震で一部落橋したベイブリッジの橋脚を支持していることで知られている。一方、その約1.5 km 北西のトレジャー島は、ベイマッドと呼ばれる軟弱層上に埋立によってできた島で、現在は海軍基地となっている。観測された最大加速度は、イエルバ・ブエナ島が約0.06 g、トレジャー島が約0.16 g と大きな差異を示しており、埋立層および軟弱層によって地震動が大きく増幅されたことが推定される。

この2つの記録のフーリエ・スペクトルを第2図に比較する。これを見るとほぼ全ての周期帯域において、トレジャー島のスペクトル値がイエルバ・ブエナ島のものを上回っており、特に周期約0.7秒と約2秒付近に非常に高いピークを持っている。これらの波形の非定常スペクトルを計算してみたところ、分散性が余り見られないことから、トレジャー島におけるこの高いスペクトル値は、主として鉛直下方から入射したS波が、前述した局所的な地盤特性の影響によって増幅したものと考えられる。なおこのロマブリエタ地震の強震記録の特徴として、震源のごく近傍においても、0.8秒程度の比較的周期の長い成分が卓越しており、震源から遠く離れた軟質地盤地域における地震動の大きな増幅の原因となっているものと思われる。

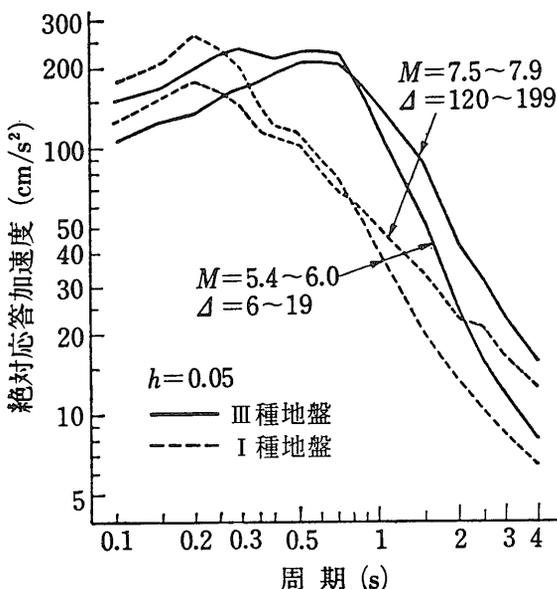
次に、多くの強震記録による加速度応答スペクトルを統計解析して、平均的なスペクトル特性と地盤種別との関係を求めた例を紹介する。応答スペクトルは、主とし

1990年8月号

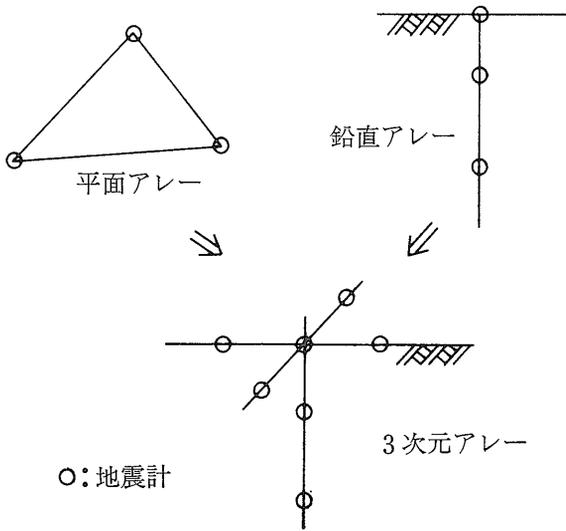


第2図 埋立地盤と岩盤上の加速度波形のフーリエ・スペクトルの比較

て地震のマグニチュードM、観測地点からの震央距離 Δ 、および地盤条件の影響を受ける。ここではまず地盤条件の影響を見るために、同じ範ちゅうのMと Δ の組合せに対して、2種類の地盤上での応答スペクトルの予測値 (片山・岩崎・佐伯, 1978) を第3図に比較した。これより平均的に、約0.25秒以上の周期帯域では軟弱地盤 (Ⅲ種) の方が岩盤 (Ⅰ種) よりスペクトル値が高く、約0.25秒以下ではこれが逆転している。したがって、地震動の各周期成分のうち、周期の長い方のは軟弱地盤中で増幅し、短周期のものは減衰する傾向にあると読み



第3図 統計解析によって予測された岩盤 (Ⅰ種) と軟弱地盤 (Ⅲ種) での加速度応答スペクトルの比較 (片山・岩崎・佐伯, 1978)



第4図 アレー観測における地震計の典型的な配置

取れる。

ここまでの議論は、ある範囲のMと Δ の組合せについて、すなわち基盤において同じ強さの地震動を想定していたが、たとえば震央距離 Δ を変化させることにより地震動レベルを変えると、各種地盤上におけるスペクトル特性はどうなるであろうか。軟質地盤に強い地震動が入射すると地盤に大きなせん断ひずみが生じ、これによってせん断剛性の低下と履歴減衰の増加で代表される地盤の非線形性が、顕著に現れるようになる。この非線形性の影響によって、特に地震動の短周期成分が相対的に小さくなるという傾向があり、このようなことも考慮して基盤におけるスペクトル値から沖積や洪積地盤表面でのスペクトル値を推定するモデル(杉戸・亀田・廣瀬, 1986)も提案されている。

4. 地震動のアレー観測

色々な地点における地震動の諸特性を調べることや、耐震設計・耐震解析に用いるための地震動を得ることなどを目的として、地震動の観測は古くから行われてきているが、その多くは地表の1点における観測であった。しかし、近年建設されるようになった大規模建築や長大橋、さらに沈埋トンネルや埋設管などの地中構造物では、構造物の各部に入力する地震動の波形の違いや位相差を考慮する必要も生ずるようになってきた。また石油タンクや超高層ビルなどの周期の長い構造物に対しては、地震動のやや長周期成分が問題となり、表面波などの特性の解明が急務となってきた。このような背景か

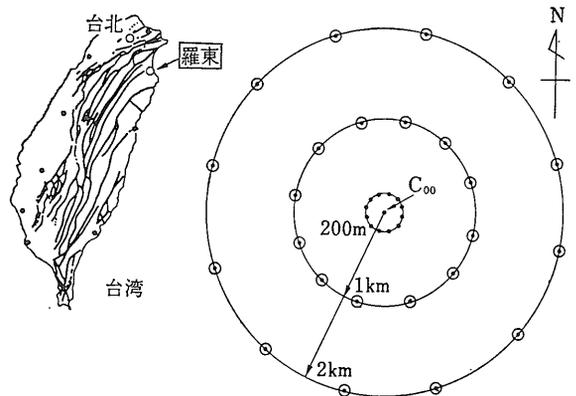
ら、地震動を構成する各種の実体波・表面波の波群の識別・分離や、これらの波の伝播特性や空間変動特性を調べるために、計画的に配列された多数の地震計による多点同時観測、すなわちアレー観測が、近年各地で盛んに行われるようになった。

アレー観測における地震計の典型的な配置の例を第4図に示す。平面アレーは、主として水平方向への波動伝播や地形・地盤による地震動の違いなどを調べるために設置される。また鉛直アレーは、主として深さ方向への波動伝播や地盤による増幅特性の違いなどを見ることを目的としている。さらに3次元アレーは、これらの2つを組合せたもので、特に局地的な地震動のばらつきを把握するのに適しているといえよう。

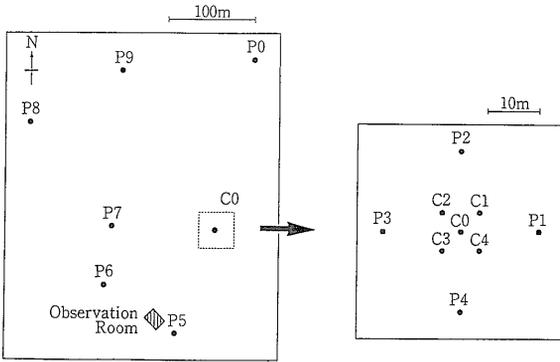
平面アレーの代表的なものとしては、台湾北東部の羅東に設置されたSMART 1アレー(BoLTほか, 1982)が世界的に有名で、第5図に示すように中心点の周りの半径200m, 1km, 2kmの3つの同心円上に、各々12個の地震計が配置されている。台湾は世界でも有数の地震多発地帯であることから、これまでに数多くの地震がこのアレーで観測されており、多くの研究者によって記録の解析が行われている。

軟弱な埋立地や沖積地盤に構造物を建設することが多い我が国では、鉛直アレーによる地震動観測が世界でも例をみないほど盛んである。ただし蓄積された地震動記録は、大部分がアレー所有者とその関係者のみで使用され、一般に公開されない場合が多い。しかし、地震工学の発展のために、このような貴重な財産を共同で利用できるような体制を構築しようという動きも最近起こりつつある(土木学会耐震工学委員会, 1988)。

次に3次元アレーであるが、局地的な地形・地盤条件が地震動に及ぼす影響を把握することを目的として、建設省土木研究所や運輸省港湾技術研究所などでも行われ



第5図 台湾の羅東に設置された SMART 1アレーの地震計配置



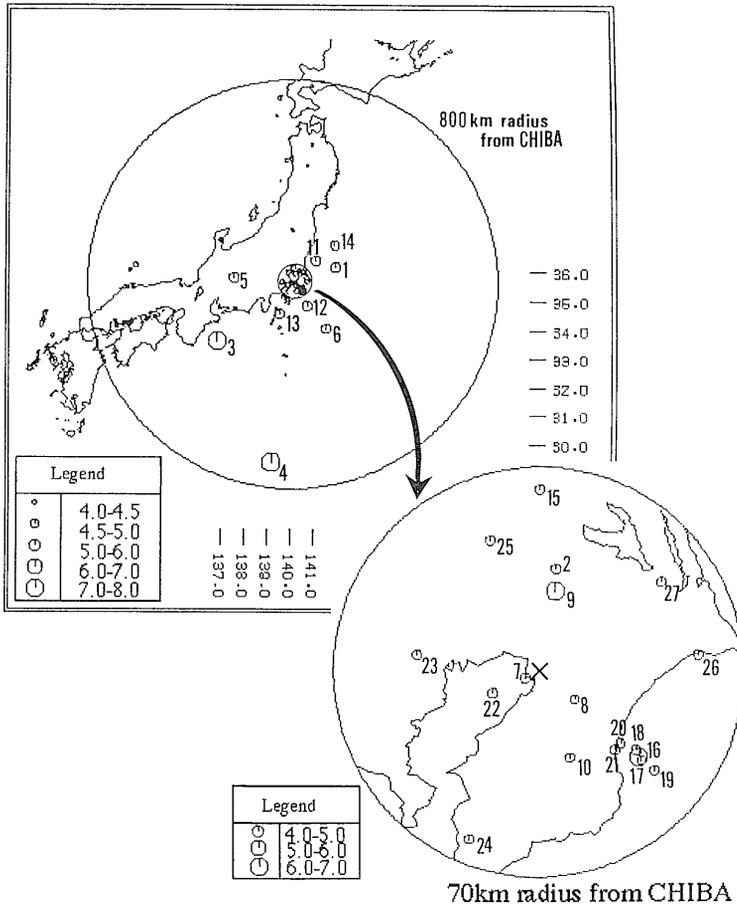
第2表 千葉実験所における高密度アレー観測の地震計埋設深さ

Depth (m)	Borehole															
	C0	C1	C2	C3	C4	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P0	
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
5	○	○	○	○	○											
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○					
20	○					○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
40	○									○						

ろで地震計が水平距離わずか5mの間隔で配置されていることにあり、近距離における地震動のばらつきを調べるのに適しているといえよう。1982年より開始したこのアレー観測により、これまでに小さなものも含め約160個の地震が記録されている。この中から主要な27地震を選択して、千葉アレーの地震動データベース（山崎・永田・片山, 1990）が構築され、一般にも公開されている。第7図はこの地震の震央位置を示したもので、記号の大きさはマグニチュードを表しており、千葉に震源が近い

第6図 東京大学生産技術研究所の千葉実験所に設置した3次元高密度アレーの平面配置

ているが、ここでは東京大学生産技術研究所の千葉実験所構内に設置されているものを例として紹介する。第6図に地震計を埋設したボーリング孔の平面的な配置を、また第2表に各ボーリング孔における地震計の埋設深度を示す。この千葉アレーの最大の特徴は、最も密なとこ



第7図 千葉アレーの地震動データベースに収録された27地震の震央分布

マグニチュードの小さい地震と、遠方のマグニチュードの大きな地震によって構成されていることが分かる。この中で最大の記録は、1987年12月17日に発生した千葉県東方沖地震によるもので、地表付近における最大水平加速度として0.4 gに近い値も得られている。このような記録を用いた地震動の空間変動特性や増幅特性の検討を現在進めており、その結果については別の機会に紹介したいと考えている。

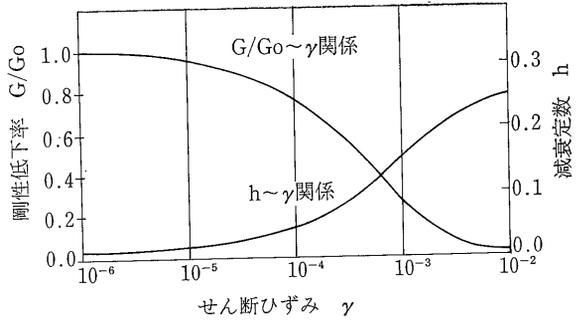
5. 地震応答解析における地盤のモデル化

地盤や地盤一構造物系の地震応答解析において、地盤がどのようにモデル化されているかについて考えてみよう。地盤のモデル化は解析手法と深く関係しており、ある条件下での厳密解(解析解)を用いる場合には、連続体として扱われ、数値解法による場合には、有限要素や質点・バネ系などに離散化される。厳密解が比較的簡単に求まるケースは、成層地盤や三角形堤体に実体波が鉛直下方から入射した場合などに限定される。一方、電子計算機の発達にともなって急激に盛んになった数値解法では、地盤や構造物の形状・材料定数の分布などの設定はかなり自由で、材料非線形性や一部の幾何学的非線形性なども考慮できるようなモデルが提案されている。

地盤材料の動的変形特性は、生じているせん断ひずみの大きさに依存することがよく知られており、ひずみが 10^{-5} 程度以下ではほぼ弾性的挙動を示すのに対し、ひずみが大きくなると次第に弾塑性的な性質を示すようになる。このような土の動的性質をモデル化や応答解析手法との対応を含めてまとめたものが、第8図である。成層地盤へのS波の鉛直下方から入射に対する問題を例にとると、余震などの小さな地震に対しては線形解析を行

ひずみ	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
	微小ひずみ	中ひずみ		大ひずみ		破壊ひずみ
弾性	[線形領域]			[非線形領域]		
弾塑性	[弾性]			[弾塑性]		
破壊	[弾性]			[弾塑性]		
繰返し効果	[弾性]			[弾塑性]		
速度効果	[弾性]			[弾塑性]		
モデル化	弾性モデル		粘弾性モデル	履歴追跡モデル		
応答解析法	重複反射法		等価線型解析法	逐次積分解析法		

第8図 ひずみの大きさによる土の動的性質の変化とそれに対応するモデル化と応答解析法の分類(石原(1980)より引用)



第9図 せん断剛性低下率と減衰定数のひずみ依存関係

い、強震動に対しては等価線形解析や履歴型非線形解析を行なうことが多い。

等価線形解析や履歴型非線形解析では、土のせん断ひずみに依存する特性を第9図のように、剛性低下率と減衰定数を用いて表現する。すなわち、ひずみレベルが大きくなると土は変形しやすくなり、またその繰返し载荷により描かれるループの面積(損失エネルギー)の弾性エネルギーに対する割合が大きくなる。等価線形解析では、剛性低下率と減衰定数がひずみに適合した値になるまで繰返し計算を行い、収束した物性値を持つ線形系で非線形応答を近似的に計算する。一方、履歴型非線形解析では、指数関係などで表される骨格曲線に Masing 則と呼ばれる履歴法則を組み合わせて、土の応力-ひずみ挙動を時間領域で逐次追跡し応答計算を行う。

このような等価線形解析や非線形解析は、提案されてからかなりの年月を経ており、数多くの適用事例がある。しかし、軟弱地盤に強震動が入射した場合など、非線形性が顕著に現れる時の観測記録は余り得られていないため、手法の検証は今も課題として残されている。適当な観測記録の数が少ないので断定的なことは言えないが、どうも一般に行われている応答解析、特に等価線形解析は、軟弱地盤での地震応答を過小評価しているように思われる。この点については、同様の指摘を行う人も多く、考えられる幾つかの要因について考察を加えた結果、どうも従来の室内土質試験で求められる減衰定数に一番の問題がありそうだと著者は考えた(山崎, 1990)。最近、東京大学生産技術研究所の龍岡文夫助教授の研究グループにおいて、高精度に応力とひずみを測定する試験法が開発され、これを用いた室内試験も行われており(加藤ら, 1990)、この問題に対する結論が出る日も近いものと期待している。

ここまで述べた地震応答解析では、地盤が水で飽和しているのが乾燥状態であろうが、応答に及ぼす水の影響は考慮されず、単位体積重量の違い程度しか解析上考慮されていなかった。しかし近年、水で飽和した砂質地

盤の液状化現象が注目されるようになって、地震による繰返しせん断载荷によって発生する過剰間隙水圧を考慮するような解析、すなわち有効応力解析が開発されている。有効応力解析と対比する意味で、間隙水圧を考慮しない従来の計算法は、全応力解析と呼ばれる。有効応力解析では、ひずみの進展にともなう土の剛性低下に加えて、有効拘束圧の低下にともなう土の軟化現象が考慮され、液状化に至る直前までの土要素の応力-ひずみ挙動や地盤系の動特性の変化を、計算で追従することが可能である。

ここで有効応力解析と呼ばれるものの中には、水と土粒子骨格に別々の自由度を与えて、間隙水の移動・消散までを追従する手法と、これらは短時間には無視できるものとして、間隙水圧の発生のみを考慮するものがある。成層地盤を対象にした解析によれば、通常の透水係数を持った土に対しては、後者の方法で前者と殆ど変わらない結果が得られている。特に2次元以上の問題では、後者の方法による定式化の方が格段に容易であり、これらを考え合わせると、通常は後者の方法を採用してもよいであろうと思われる。なお有効応力解析による応答値と全応力解析によるもの間に有意な差が生ずるのは、過剰間隙水圧が初期有効拘束圧の3~4割程度以上に発生する場合で、それ以下のレベルではほぼ大差無いと見なしてもよからう。

6. ま と め

耐震設計、地震動観測、地震応答解析などの面から地震工学における地盤の扱いについて、現状を概述した。地震動が地盤条件に影響されることは、古くより知られているが、具体的な影響の仕方や程度については、今日もなお議論が続いている。大地震の記録はめったに得ら

れないことから、この実証には今後とも時間がかかるものと思える。我が国では、数多くの地震動アレー観測が行われており、これらによって蓄積された記録が、その過程で必ずや大きな役割を果たすものと期待される。

参 考 文 献

- BOLT *et al.* (1982): Earthquake Strong Motions Recorded by a Large Near-Source Array of Digital Seismographs, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **10**, 561~573.
- 土木学会耐震工学委員会 (1988): 地震動アレー観測記録データベース開発に関する研究調査報告, 強震動アレー小委員会.
- 石原研而 (1980): 土質力学, 土木工学大系8, 彰国社.
- 片山恒雄・岩崎敏男・佐伯光昭 (1978): 地震動加速度応答スペクトルの統計解析, 土木学会論文報告集, **275**, 29~40.
- 加藤祐之ほか (1990): 砂の低拘束圧繰返しねじりせん断変形特性, 第25回土質工学研究発表会.
- 日本電気協会 (1987): 原子力発電所耐震設計技術指針, JEAG 4601.
- 日本道路協会 (1990): 道路橋示方書・同解説V耐震設計編.
- SHAKAL *et al.* (1989): CSMIP Strong-Motion Records from the Santa Cruz Mountains (Loma Prieta), California Earthquake of 17 October 1989, California Dept. of Conservation, Div. of Mines and Geology.
- 杉戸真太・亀田弘行・廣瀬憲嗣 (1986): 工学的基盤面と沖・洪積地盤面の地震動の変換係数-表層地盤の非線形特性を考慮した推定モデル-, 構造工学論文集, **32A**, 789~799.
- 山崎文雄・永田茂・片山恒雄 (1990): 千葉アレー地震動記録のデータベース化, 生産研究, **42**, 3号, 23~26.
- 山崎文雄 (1990): 軟弱地盤はよく揺れるか揺れないか? 実測とSHAKEの矛盾を考える, 土木学会第45回年次学術講演会, 第I部門.

YAMAZAKI Fumio (1990): Roles of soil in earthquake engineering.

<受付: 1990年5月31日>