

8 地盤災害の総合的検討

地盤・基礎分科会では、阪神淡路大震災における各種地盤災害の実態を把握し、その被害原因と地盤条件等との関係を研究するため、第3章～第7章で示したように、埋立地や河川構造物などをはじめとして種々の構造物に分類し、各構造物毎の被害調査と原因究明を行った。その調査結果は各章で整理・検討されたように、構造物毎に特徴ある被害状況が明らかとなってきた。

しかしながら、地盤関係の地震災害においては、地盤の動的挙動の特徴である1)液状化現象の発生や、2)地盤種別の相違による地震動増幅の現象が、各構造物の地震被害の発生規模に大きく影響を及ぼしていると考えられる。これら2つの現象は、今回の地震災害の発生状況を理解するための共通の視準線となるべきものと考えられ、これら2項目に関する研究の現状、あるいはどのような課題が提起されたかを整理することは、今後の阪神地域における地震被害の発生を検討する上で非常に重要であると考えられる。

以下の節では、上述の地盤の液状化問題と、地震動および被害規模との関係に関する問題について整理し、両問題における解明事項の把握と今後の検討が必要な課題を提示する。

8.1 液状化問題

阪神大震災では、地盤の液状化が関与したと思われる被害が広範な地域と様々な構造物について報告されている。それらの被害事例を、対象構造物毎に分類してみると表-8.1.1のようなものが考えられる。

表-8.1.1 地盤の液状化が関与した被害事例

構造物名	被害事例
山地造成地盤	宝塚市仁川における造成斜面の崩壊
平地自然地盤	尼崎築地地区地盤沈下による建物被害
臨海埋立地盤	神戸港域埋立地における噴砂・噴泥現象、地盤沈下
河川構造物	淀川左岸堤防の崩壊
港湾構造物	神戸港全域の重力式ケーソン護岸の崩壊
地下構造物	神戸及び阪神臨海部での上下水道管等の地下埋設管破損
土構造物	西宮ニテコ池中仕切り堤の崩壊
構造物基礎	臨海部高架・建築構造物の杭基礎破断及び水平クラック

これらの被害事例の一部は本編に記載されているが、事例の多くは既に土木学会及び地盤工学会関係の被害調査報告書等により発表されている。本節は、液状化被害事例についての総括を目的とするのではなく、地震以降に急速に整備・改訂されつつある液状化被害に対する工学的対応と研究の現状について整理し、今後検討すべき課題を抽出することを目的とする。多大な地震被害を受けた構造物を管理する機関では、復旧作業にあわせて各種設計指針の改訂作業が急ピッチで行われ、また関西地域の地方自治体においても将来の防災対策としての地震被害想定作業が地震直後から実施されている。これらの作業では、液状化地盤判定のための基準整備やその対応策の確立が必要となる。しかし、地盤関係の被害では調査及び被害結果の分析・公表には時間を要することが多く、広範囲の調査・分析結果に基づく横断的な判断を確立することが困難なためか、進捗が急がれる復旧・復興工事あるいは防災計画に対して、個々の関係機関が液状化被害への独自の対応策を打ち出しているのが現状のようである。その結果、液状化判定に関して、平成8年には道路橋示方書の改訂¹⁾、さらに平成9年には埋立地の液状化対策ハンドブックの改訂²⁾などが実施された。

ここでは、表-8.1.1に示したような液状化に関する多様な諸問題を整理する方法として、調査・設計・施工といった3つの内容に区分することを考える。すなわち、液状化に関する事項を、1)液状化調査および判定に関する問題、2)液状化解析および設計法に関する問題、3)液状化対策工に関する問題のように、調査・設計・施工におおよそ対応するように検討項目を分類して問題の整理を行った。

8.1.1 液状化調査および判定に関する問題

今回の地震による液状化被害では、以下のような問題が提起された。すなわち、今回のような直下型の大規模地震動により、神戸ポートアイランドを代表例として、粗粒分を多く含み粒度が良い材料である、まさ土地盤での液状化発生、さらには、ポートアイランドおよび六甲アイランド周辺護岸ケーソン下部置

換砂の液状化のように、従来の検討深度を超える深い位置での液状化発生が注目視された。このため、建設省土木研究所と、運輸省港湾技術研究所で精力的な液状化調査および判定に関する問題解明が行われ、液状化調査および判定に関して新たな方向性が打ち出された。

液状化の調査・判定法に関しては、前出の3.3節においても議論されているように、震災前後で表-3.3.6のように対象構造物管理者毎に多数の指針が刊行されており、実務技術者においては対象構造物毎に各指針に従って液状化判定法を実施する必要がある。地盤・基礎分科会では活動当初より、震災調査研究の最終目標として第1章に述べたように、関西地域の地盤特性の地域的变化を十分に考慮し、耐震設計に関する地盤・地震工学上の統一的な見解の確立が最も重要であると考えている。そのためには、例えば液状化判定においても、統一的な解釈が必要であると思われるが、構築対象の地盤が同一であるにもかかわらず、対象構造物の違いに応じて、相違の大小が在るとしても、異なった液状化判定指針が存在することに注目すべきであろう。

以下では液状化調査・判定法に関して、地震後に見直しが行われた項目を取り上げ、各項目についての対応策の問題点と研究の現状を整理する。なお、液状化判定においては、基本的に外力としての地震力によるせん断応力(L)と地盤の液状化強度(R)との比較により、液状化の有無が判定される。また、設計指針としては「道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編」¹⁾、「埋立地の液状化対策ハンドブック」²⁾、「建築基礎構造設計指針」³⁾を主に比較・検討した。

(1)直下型及び海洋型地震への対応

直下型と海洋型地震との地震動の違いによる液状化強度の変化については、石原等⁴⁾による研究成果が基礎となっており、衝撃的地震波形からなる直下型地震では液状化強度を約2割程度割増して評価できることが知られている。このような地震波形の違いによる液状化強度の変化については、道路橋示方書では独自の手法で強度増加割合を評価し、液状化対策ハンドブックでは石原等⁴⁾の研究成果をそのまま適用して強度増加の変化を評価している。また建築基礎構造設計指針では地震後の改訂がないため、直下型と海洋型地震波の区別については、明記されていない。

道路橋示方書では土木学会の提言を受けて、検討対象の地震動として、従来型の海洋型地震動に対応するタイプⅠと直下型大型地震に対応するタイプⅡに区別している。具体的には地盤の液状化強度判定において、タイプⅡの衝撃型地震波とタイプⅠの振動型地震波に対する液状化強度の違いを考慮して、下記の式により強度判定を行っている。

$$R = c_w \times R_L$$

ここで、係数 c_w は異方圧密応力に対する補正係数 c_1 と波形の違いに対する補正係数 c_2 とを合成($c_w = c_1 \times c_2$)したものである。このうち補正係数 c_2 は図-8.1.1に示すように地震波のタイプ及び地盤強度の増加に応じて変化するように設定している⁵⁾。また R_L はN値あるいは室内試験から推定された三軸液状化強度比である。

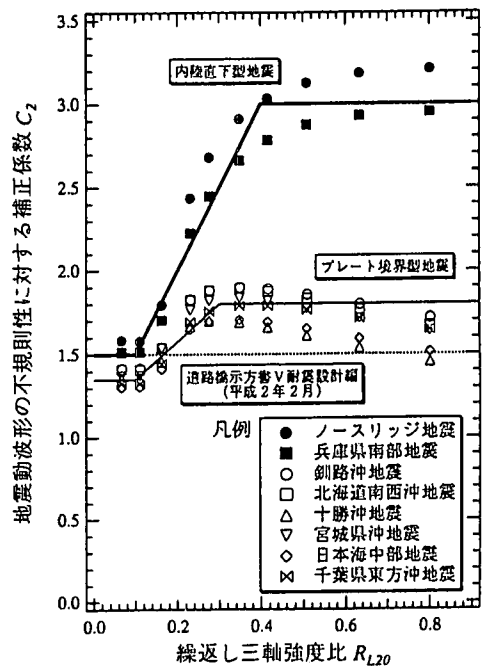


図-8.1.1 地震波形と強度評価の関係⁵⁾

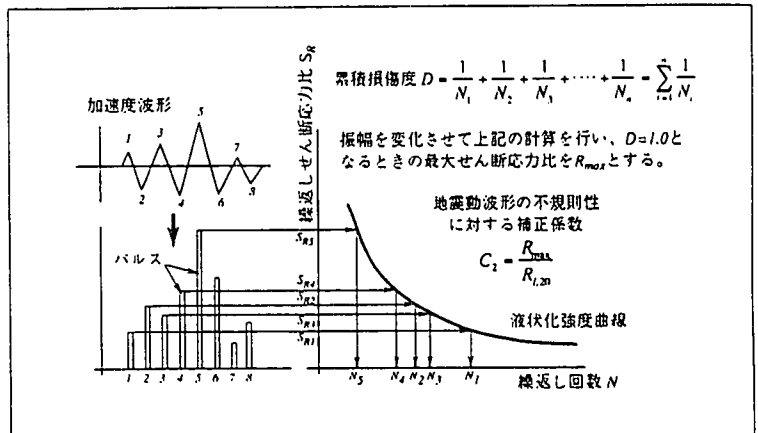


図-8.1.2 累積損傷法を用いた強度評価⁵⁾

図-8.1.1によると、衝撃型波形の場合については係数 c_w を大きくして液状化強度を割増して評価でき、特に強度の大きい密な砂地盤での衝撃型波（直下型地震）に対する液状化強度の増加は振動型（海洋型地震）に比べて顕著なものとなっている。図-8.1.1の結果は、規則波形を基礎とする三軸試験での液状化強度曲線（液状化強度比～繰返し回数との関係）に、累積損傷法を用いて不規則地震波のタイプIとIIの違いを評価¹⁾したものである。具体的な評価方法は図-8.1.2に示すようであり、不規則波の各個別波に対応する損傷度を液状化曲線から求め、各波の損傷度の累積値が1となった時が、その土の液状化強度と等しいと考える方法である。なお、液状化判定の基礎となる液状化曲線としては、相対密度を変化させた豊浦砂についての実験結果を用いており、各種の地震波(図-8.1.1参照)の違いによる液状化強度の変化を、累積損傷法の適用により検討したものである。

一方の液状化対策ハンドブックにおいても、地震波形の違いによる液状化強度の変化は考慮されているが、衝撃型地震波と振動型地震波の強度に及ぼす影響評価においては、石原等⁴⁾の実験結果を直接適用することとしている。すなわち、衝撃型地震波形については一律に繰返し回数20回での液状化強度比 R_{li} を0.55で除した値で評価し、振動型波形については0.7で除した値で評価するとしている。したがって、道路橋示方書のように、地盤強度の増加に応じて衝撃波に対する割増しを与えるものではない。

また、以上のような地震波の違いに対する検討は、基本的にはきれいな砂である豊浦標準砂についての三軸液状化試験を基に得られたもので、道路橋示方書については豊浦標準砂の強度特性と累積損傷法を組み合わせて検討した結果である。従って、結果の誘導過程で2つの仮定、すなわち地盤材料の液状化強度曲線を標準的な豊浦砂で代表するという仮定と、液状化判定への累積損傷法が適用可能という仮定が存在する。このため、粒度が大きく異なる地盤材料について上記の結果を適用するにあたっては、前提条件を考慮するとともに、今後更にデータの蓄積が必要と思われる。

(2)粗粒分・細粒分など粒度分布の違いと液状化強度変化

今回の地震では、先述のように粗粒分を含む材料が液状化したため、従来の指針で粒度分布から非液状化土と判定していた粗粒土についても、検討対象とするように改訂されている。

具体的な粗粒材に対する対応としては、透水性が大きいことを条件に、非液状化土としている。例えば、道路橋示方書では、旧来は D_{50} が0.02~2.0mmであるものが液状化対象土であったが、新規では $D_{50} < 10\text{mm}$ で透水係数が低いもの($D_{10} < 1\text{mm}$)は検討対象の範囲内としている⁶⁾。また、液状化対策ハンドブックでは粒度が従前の液状化可能性範囲(図-8.1.3)の粗粒分側にあっても、透水係数が3cm/s以下のものは検討対象であるとしている¹⁾。後者の規定では、透水性の値は明確であるが、3cm/s程度の透水試験は一般に困難であるとされており、他の物理特性(例えば有効径 D_{10} など)からの推定が工学的に便利であろう。

細粒分を含む材料に関しては、粘性土は液状化抵抗が大きいという知見は一般に認知されているが、細粒分の多い砂質土に対する同一の知見は決定的なものではなく、また、その液状化抵抗増加の因子が塑性指数の値であるのか、細粒分含有率であるのかについても、統一した解釈が得られていないのが現状であろう。例えば、小田等の研究グループ⁸⁾、

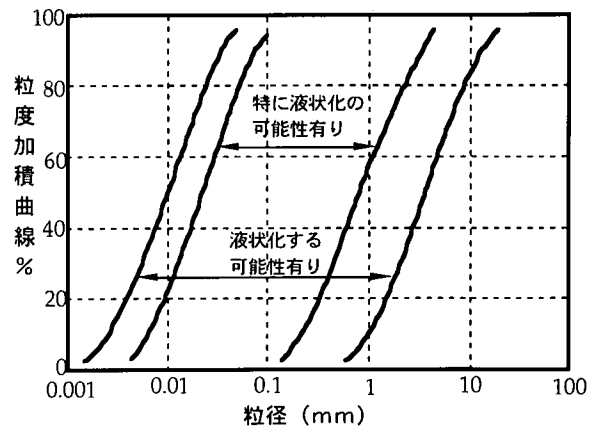


図-8.1.3 液状化可能な砂の粒度分布¹⁾

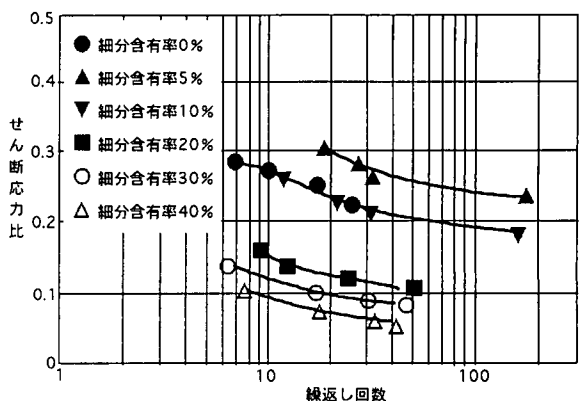


図-8.1.4 細粒分増加による強度低下⁸⁾

3)は DL クレイと豊浦標準砂との混合土、あるいはまさ土についての実験から、相対密度一定の条件下では細粒分の増加が液状化強度の低下を生じたことを示している。図-8.1.4は DL クレイと豊浦標準砂との混合土の実験結果である。一方、桑野等¹⁰⁾は粘土分含有率あるいは塑性指数の増加が液状化抵抗増加に寄与すると報告している(例えば図-8.1.5)。また、松尾等¹⁾は細粒分含有率の増加は、同一液状化強度の条件下では、N 値の増加をもたらすとの実験結果(例えば図-8.1.6)から、細粒分含有率の増加による N 値の補正を採用している。このように、液状化強度評価に対する、細粒分含有率での補正と、塑性指数による補正が主張され、道路橋示方書と液状化対策ハンドブックにおいても別個の補正法が採用される結果を招いている。

なお、粗粒分を含む砂の液状化強度評価についても、まだ解決されていない実験手法上の問題もある。その1つが、室内繰返し三軸試験におけるメンブレン貫入による間隙水圧の補正である。今回の地震では、まさ土地盤の凍結試料採取による強度試験の実施¹¹⁾など、液状化強度を再評価する研究が精力的に進められ、ある程度まさ土の液状化強度が明らかとなったが、実験結果の多くは貫入補正をしていないものである。貫入補正については、時松の研究¹²⁾があるが、繰返し载荷時の間隙水圧上昇傾向からでは精度の良い補正が困難な場合もあり、今後も検討が必要な課題と考えられる。

(3)N 値と液状化強度との関係

原位置での液状化強度の判定には種々の方法が考えられ、阪神大震災関連の調査では凍結サンプリングによる乱さない試料の採取と室内試験による強度の決定などが行われたが、実用的には標準貫入試験結果(N 値)の利用が主体となっている。このため、原位置での液状化の有無を判定するため、N 値により評価された液状化強度と地震時に作用するせん断応力(L)との比較が液状化の簡易判定法として各種の設計指針で採用されている。乱さない試料による室内力学試験の実施は、詳細な液状化判定が必要な場合であり、事前の液状化強度(R)に対する現地調査においては、土性の違いによる N 値の評価が重要検討項目となっている。従って、各設計指針では材料の違いや細粒分・粗粒分の違いによる強度の評価が詳細に検討され、さらに地震波形の違いによる強度差等が検討されている。一方、液状化強度に及ぼす粒子構造の違いや応力履歴の影響が近年注目されている。例えば、後述の液状化対策工としてのプレローディング工法は応力履歴による強度増加を用いている。これらの諸因子が N 値に及ぼす影響については、まだ不明な点もあり今回の震災調査においても問題点が指摘されている。例えば3章3.3.5項において、地盤改良地点の非液状化地点が改訂後の指針で液状化地盤と判定される事例が紹介されている。同様に、液状化対策ハンドブックにおいても図-8.1.7のように非液状化地点が液状化地盤と判定される場合が指摘されている。従って、粒子構造や応力履歴による液状化強度の変化を N 値により評価する方法については、今後更に検討が必要であると思われる。

一方、実務での液状化判定において注意すべ

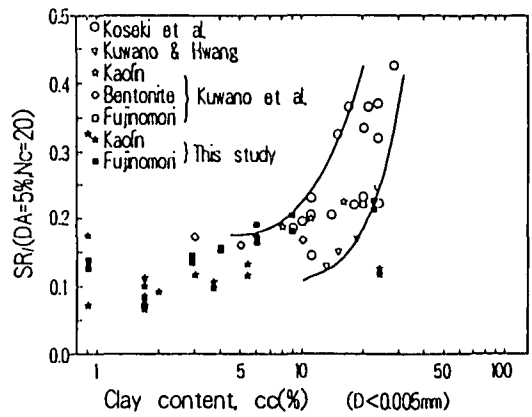


図-8.1.5 粘土分含有率増加による強度増加¹⁰⁾

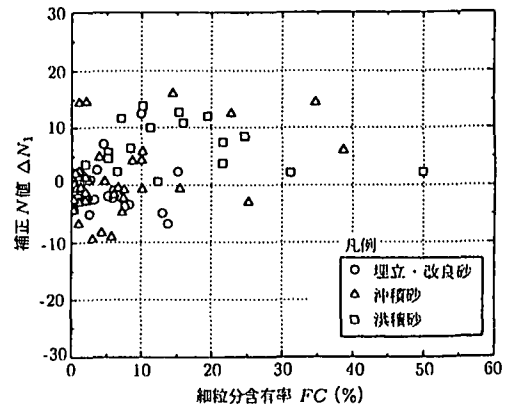


図-8.1.6 細粒分含有率増加による N 値増加¹⁾

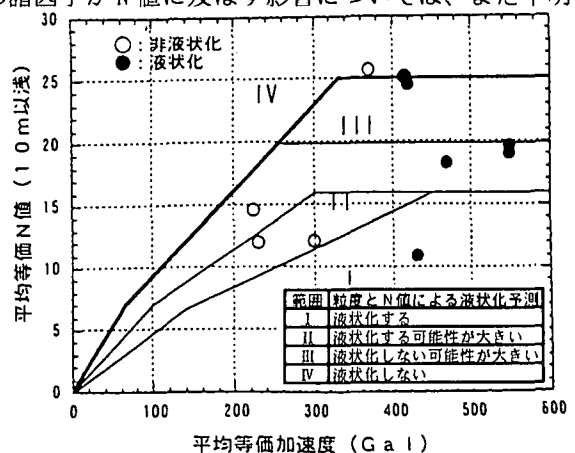


図-8.1.7 改良地盤の N 値と液状化の有無の関係¹⁾

き点は、各管理機関では対象とする構造物に違いがあるためか、地震により発生するせん断応力の評価が設計指針間で異なることである。地震時のせん断応力(L)については、検討地点で地震波を想定して動的応答解析を行うことで評価するのが理想であるが、地域毎に想定断層や地震動を設定することが容易でない現状では、判定指標として与えられた地震力の違いにより設計指針毎に液状化判定結果が異なることがある。震災後に実施された大阪府、大阪市の被害想定では基準となる震源断層と地震動を設定してせん断応力を評価したが、今後は関西地域において基準となる震源断層と地震動を特定し、地盤内のせん断応力を評価すれば、各管理機関の間での液状化判定結果の整合性が得やすいものと考えられる。

8.1.2 液状化解析および設計法に関する問題

(1)液状化解析法

今回発生した大規模な沿岸部での液状化現象による被害を説明するため、数多くの動的解析ならびに液状化解析が実施された。例えば、神戸ポートアイランドにおける鉛直アレー観測を基に、埋立地盤での液状化が等価非線形解析や有効応力解析、鉛直アレー観測記録から地盤内応力～ひずみ関係の誘導、さらに重力式ケーソン護岸の被害についての大型模型実験と有効応力解析との比較など、各種の応答解析が実施された。また、被害解析に引き続き液状化対策工の検証のために、主に対策工模型実験と解析結果との照合が精力的に行われている。一方、沿岸部以外で液状化が関係したと思われる被害(表-8.1.1)について液状化解析が実施された例は少ないが、本文6章6.3節で示されたように、土堰堤構造物の被害が液状化解析によって説明されている。液状化による解析例の中から幾つかを紹介してみると表-8.1.2 のようである。

表-8.1.2 液状化解析例

液状化モデル	解析プログラム	参考文献(例)
等価線形法	FLUSH	國生他 ¹³⁾ (1995)
等価線形法(修正)	FLUSH-L	柴田他 ¹⁴⁾ (1996)
有効応力法	FLIP	井合他 ¹⁵⁾ (1995)
有効応力法	YUSA-YUSA	吉田他 ¹⁶⁾ (1995)
有効応力法	LIQCA	大槇他 ¹⁷⁾ (1997)
有効応力法	BOWL	川瀬他 ¹⁸⁾ (1995)

表中の FLIP を含め有効応力法による液状化解析は、液状化の危険性がある地盤での構造物被害の推定手段として、その使用が地震以降に急速に広まっている。しかしながら、有効応力法においては入力すべき土質及び動的パラメータの数が非常に多く、また直接的に決定が困難なものもある。本文4章4.2.2項でも紹介されたように、容易に実務で利用できる解析法として確立されるまでに、今後検討すべき課題も多いと思われる。

(2)液状化後の変形特性の検討

今回の震災では液状化が生じた地盤において大きな変形量が観測されている。例えば 1) 港湾護岸背後の地盤において規模の大きい側方流動や、2) 液状化後に埋立地において広範囲に地盤沈下が生じ、さらに 3) 側方流動により橋梁基礎に過大な流動圧が作用して、基礎の不安定現象が生じるなどの現象が観測された。これら3つの現象は、液状化後に流体状の地盤が変形するため、あるいは間隙水が排出されるために生じると考えられるが、土の液状化後の変形挙動についてはまだまだ未解明な点が多く、今回の地震を契機に精力的な研究が始まったといえよう。本編の3.2節においても液状化後の地盤沈下について検討を加えており、また、地盤工学会においても研究委員会(地震時の地盤・土構造物の流動性及び永久変位に関する研究委員会)が組織され、側方流動の変形予測についての組織的研究が開始された。

まず液状化による側方地盤の水平流動についての研究としては、1983年の日本海中部地震における現地調査結果に基づき以下の経験式が提案されたのが、側方流動に関する定量的研究の始まりのようである¹⁹⁾。濱田等²⁰⁾は液状化層の厚さ(H)と、地盤の傾斜角度(θ)の2変数を用いて、側方流動による水平移動量(D)を経験的に次式で推定できると提案している。

$$D = 0.75 \sqrt{H} \sqrt[3]{\theta} \quad \text{式(8.1)}$$

このような経験的手法の他に、理論的研究手法として、液状化地盤をモデル化する研究があるが、その際に地盤を粒状体あるいは粘性流体として取り扱うかで、アプローチが大きく異なる。例えば濱田等¹⁹⁾は、阪神大震災での実測を踏まえて、流動後の地盤を粘性流体と仮定することにより、前出の経験的予測式の見直しを行っている。その結果、地盤の粘性係数を平均補正貫入抵抗値(\bar{N})として表現することで、下記の推定式を提案している。

$$D = \alpha \sqrt{H\theta} / \bar{N} \quad \text{式 (8.2)}$$

但し α は流動継続時間等を含む係数である。

一方、粒状体としてのアプローチとしては、中空円筒ねじり試験あるいは三軸試験より、液状化後の非排水せん断条件下の変形特性を把握しようとする方法がある。図-8.1.8 は液状化後の非排水せん断時の応力～ひずみ関係の典型例を示したものであるが、非排水繰返し载荷中に発生した最大せん断ひずみ γ_{max} の値に対応して液状化後の非排水せん断特性が変化していることが分かる。社本等²¹⁾はこのような液状化後の非排水せん断特性の変化を検討する上で、非排水繰返し载荷中の $\sigma=0$ 状態で発生するせん断ひずみ γ_0 の変化(図-8.1.9 参照)が重要であり、 γ_{max} と γ_0 等をパラメータとする構成式を提案している。社本等の研究では、次に述べる液状化後の沈下挙動と液状化後の非排水変形挙動とが関連するものとしており、今後の展開が期待されるアプローチの1つと考えられる。

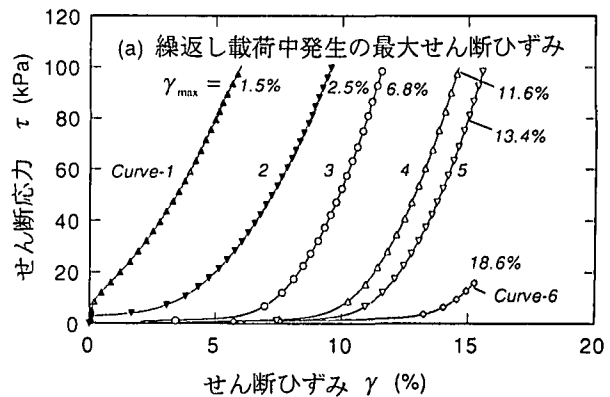


図-8.1.8 液状化後の非排水せん断変形特性²¹⁾

液状化後の地盤沈下予測法としては、本編3.3節においても検討されているように、石原・吉嶺²¹⁾の研究成果である非排水繰返し载荷中の最大せん断ひずみ γ_{max} と液状化後の圧縮ひずみ ϵ_r との関係を利用して、沈下量を推定することが多い。しかしながら、石原・吉嶺²¹⁾の実験結果は富士川砂といったきれいな砂による実験であり、まさ土のように粒度分布が良くて細粒・粗粒分を含む土については、同一の γ_{max} と ϵ_r の関係が存在するかどうか未確定である。さらに、地盤の圧縮性判定の基礎となる相対密度の定義がまさ土では不確実の部分があるため、まだ検討すべき課題が残されているように思われる。

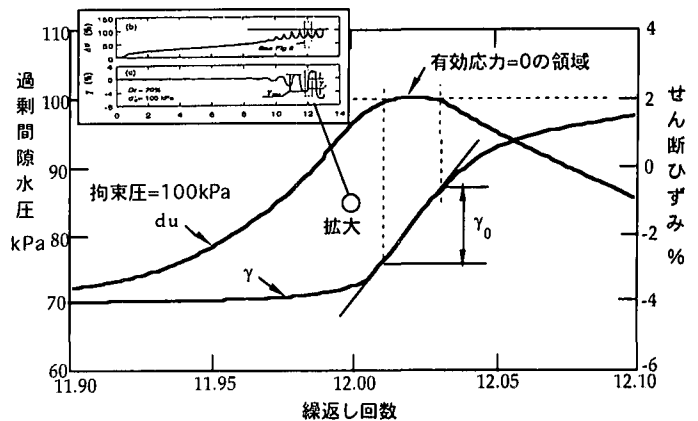


図-8.1.9 有効応力=0でのせん断ひずみ γ_0 ²¹⁾

なお、液状化後の沈下量推定には非排水繰返し载荷中に発生したせん断ひずみが基礎となるが、先に述べたように、液状化後のせん断変形にも繰返し载荷中のせん断ひずみが主要因子として影響するため、社本等が検討したように液状化後の沈下挙動と非排水変形挙動との間には関連性が存在する可能性が大きい。

8.1.3 液状化対策工に関する問題

(1) 液状化に対する地盤改良効果

今回の地震では、埋立地の液状化に対する地盤改良工事の効果について、参考となる幾つかの有益なデータが得られた。例えば、神戸摩耶埠頭の耐震岸壁では液状化の被害が少なかった事実や、埋立層下部の沖積粘土層の圧密促進を目的としたサンドドレーンの打設が、埋立層の締め固め効果をもたらし、サン

ドレーン打設地域においては液状化が少なかったという報告、さらに、ケーソン護岸基礎にサンドコンパクションを使用した場合には、置換砂による護岸基礎より沈下が低減されたという調査結果や、また埋立地の構造物基礎として、従来の杭基礎の代わりに、締め固工法による地盤改良と直接基礎を積極的に取り入れたために、周辺地盤の液状化の影響を受けなかった例などが報告されている。しかしながら、このような液状化対策工の成功例を振り返ってみると、地震による液状化を設計当初から考慮して施工されたものは少なく、むしろ軟弱地盤に対する一般的な安全対策あるいは基礎代替え案として施工されたものが、その液状化対策工としての付加価値性を発揮した場合も少なくない。

従って今回の地震被害調査から、これまで提案されている液状化対策工の効果が定量的に把握されたとは結論し難く、液状化対策工の適切な選択方法ならびに具体的な想定地震に対する設計方法については、まだ検討すべき課題が多く残されていると考えられる。今後も重要構造物などについては、液状化対策工の導入が積極的に図られるであろうが、以下では、液状化対策工についての現状と問題点を整理することで、より効果的な工法の選定について考察してみたい。

(2)液状化対策工法の現状と問題点

液状化対策工を大別すると、1)地盤改良を行い液状化を生じにくい地盤とする地盤改良工と、2)構造物の補強を施し、地盤が液状化した場合にも構造物に損傷が生じないようにする構造物対策工の2つに区分される。前者は単独で施工される場合があるが、後者の構造物対策においては、単独で適用される場合には対策工による構造物の安定性増加または変形量抑制程度を定量的に評価する必要があり、それが困難な場合には地盤改良工との併用が検討される。

まず地盤改良による工法では、地盤の改良程度と液状化強度増加との間に明確な関係が確立されていることが重要である。工法の種類としては、締め固め、排水、固化、プレロードなどがあるが、これらの工法において地盤の液状化強度を増加する方法はそれぞれ異なっており、工法毎の強度増加方法の特徴を一覧にすると、表-8.1.3のようになる。

表-8.1.3 液状化対策工法の比較

地盤改良工法	液状化強度増加の要因	設計に必要な情報	データ検証
締め固め工法	密度増加	砂注入率とN値増加関係	既存資料：有
排水工法	過剰間隙水圧の低減	液状化発生時間、透水係数	時間予測：難
固化工法	固化作用・強度増加	混合率と一軸圧縮強度関係	既存資料：有
プレロード工法	過圧密比の増加	過圧密比と液状化強度関係	試験施工：要

表に示すように、締め固め工法や固化工法については、液状化ハンドブックにおいていくつかの施工実績が報告されており、締め固め工法では細粒分の少ない土についてのサンドコンパクションなどの実績例や、固化工法については、繰返しせん断強度と一軸圧縮強度との関係の例が示されているなど、これらの改良工法については検討手法がある程度確立されている。一方、排水工法の1つであるグラベルドレーンの設計においては、ドレーン径や間隔を最適化して地盤内過剰間隙水圧の発生を十分に抑制する必要があるが、設計過程で最も重要となるのは液状化発生時間の推定である。液状化発生時間の予測は、一般的に想定地震動と液状化強度曲線を基に累積損傷理論を利用して求められるが、液状化強度曲線の誤差などが推定時間に大きく影響を及ぼすため、土の力学定数の変化による設計値の変動について十分注意する必要がある。またプレロード工法では、砂の過圧密比の増加による液状化強度の増加が基本となるが、実験室での過圧密比～液状化強度関係についての検証は多いが、現場での実証データは少なく、現状では工事毎に試験施工を実施し、その効果を確認する必要がある。

以上の比較から分かるように、液状化対策工として締め固め工法の実用性は大きく、今回の地震においても何らかの締め固め作用を受けた埋立層では液状化被害が少なかった。ただし、先述のように改良地盤のN値と液状化強度との関係において、判定基準より低いN値でも液状化を生じなかった例や、細粒分や粗粒分を含む土についての締め固め度と強度の関係に対する実績データが不足しているなど、未知な点も残されているため、締め固め工法による液状化抵抗の効果判定については、今後もデータを蓄積する必要性が高いと考えられる。

一方、構造物対策としては、対象構造物と液状化による周辺地盤の変形を分離することを目的とした変形抑制工法を導入することが多い。例えば、安田等²³⁾の研究のように護岸近傍の構造物基礎対策として、基礎と周辺護岸との間に連続壁を構築することで、液状化による護岸周辺地盤の側方流動の影響を除去することができるといった振動台実験の結果が示されている。この他にも、変形抑止構造物の構築による液状化対策工についての研究は、土木学会や地盤工学会の研究発表会などで震災以降に非常に多くの研究成果が報告されている。これらの研究では、数値解析や振動台の模型実験などを用いて、対策工ならびにその設置位置や地盤改良範囲の最適化などが積極的に検討されている。基礎構造物を含む地盤の液状化に伴う側方流動の解析については、適切な数値モデルがまだ確立されていない状態であるため、模型実験結果と数値解析結果の比較等から、液状化地盤と構造物のインターアクションを解析できる手法の確立が急務であると思われる。

8.2 地盤条件・震度と地盤災害規模との関連

本分科会では、地盤災害の特徴を構造物毎に整理し、阪神大震災における地震動分布、関西地盤の地域的变化、地盤災害の被害分布等を検討する過程から、地震時における関西地域の地盤災害の特徴と発生要因を分析・解明しようとした。しかし、第3章から第7章に示した分析結果からは各構造物毎の被害の特徴が明らかとなってきたが、収集できた被害調査データの範囲は限られたものとなっており、当初の目標である関西地域の地盤特性の変化と被害分布との関係を検討するまでには至らなかった。特に地震災害において重要となる地震動の分布についても、幾つかの地点で計測データは得られているものの、広域的な被害分布と比較・検討するには十分ではない。例えば、臨海部の地震動分布は推定が難しく、本文3.3節や4.2節においても震源距離との関係から経験式を用いて加速度を推定することが行われている。

ここでは、阪神大震災の被害について他の研究者等により報告されている研究成果から、地震動・地盤条件と被害との関係について得られている知見を整理・検討することとした。

8.2.1 ライフライン施設での検討

ライフライン施設の被害と震度との関係については、すでにいくつかの調査報告書が出版されている。例えば、1996年の(社)日本水道協会の報告書²⁴⁾や、1997年の阪神淡路大震災調査報告編集委員会による報告書²⁵⁾で、被害と震度についての検討例が示されている。(社)日本水道協会の調査では、神戸・芦屋・西宮市域での水道管被害から、最大加速度と被害率(件/km)の関係が検討され、図-8.2.1に示すような関係が得られている。ここで、最大加速度は実測値を用いている。図のように、最大加速度が約300gal以上になると被害率が増加し、特に液状化した地盤での被害率が非常に大きいものとなっている。一方、ガス施設の被害調査例として、図8.2.2に示すように被害率と地震動との関係が検討されている。図では地震動を示す指標として、構造物の固有振動周期も加味できるとするSI値(速度応答スペクトル値、Spectrum Intensity)を用いた検討例が示されている²⁶⁾。

以上のように、地震動と被害との関係を検討する上で、地震動の大きさを示す指標とし

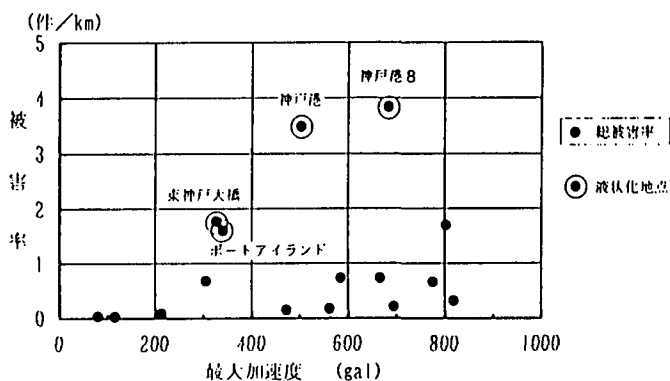


図-8.2.1 最大加速度と総被害率との関係²⁴⁾

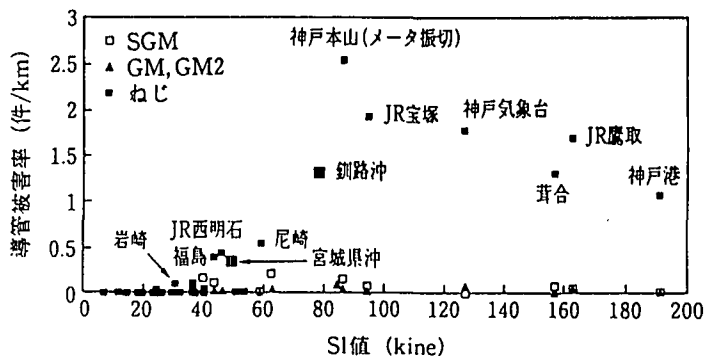


図-8.2.2 SI値と導管被害率との関係²⁵⁾

て、加速度、速度、あるいはSI値のいずれかを用いるべきか、今後さらに検討が必要である。

また、液状化した地盤と非液状化地盤での管路の被害率の相違についても定量的な把握が必要であり、被害予測には欠かせない情報となる。例えば、通信関係の管路では表8.2.1に示すように、液状化地盤と非液状化地盤では6から8倍の相違が報告されている。

表-8.2.1 通信管路の被害と液状化²⁵⁾

地点	最大加速度(gal)			地盤	液状化	全管種での被害率(件/km)
	NS	EW	UD			
福島	180	212	195	II	-	0.09
神戸大学	270	305	446	I	-	0.68
神戸本山	(421)	(775)	(379)	II	-	0.66
宝塚	694	587	411	II	-	0.21
鷹取	642	666	289	II	-	0.73
新幹線新神戸	561*	267	344	II	-	0.18
大阪	80	66	64	II	-	0.03
神戸海洋気象台	818	617	332	II	-	0.32
神戸港8	683	394	334	III	○	3.84
神戸港	(502)	205	283	III	○	3.49
尼崎港	472	321	311	-	-	0.15
東神戸大橋	282	326	396	III	○	1.77
ポートアイランド	341	284	556	I	○	1.60
葦合	687	802	-	-	-	1.70
住吉	108	115	113	-	-	0.02
新神戸SS	511	584	495	-	-	0.73

ライフライン関係の管路の被害に大きな影響を及ぼす要因として、地盤の変位が在り、阪神大震災での管路周辺地盤の変位あるいはひずみについて各種の検討が行われている。例えば、先の(社)日本水道協会の報告では、軸方向のひずみを検討しており、図8.2.3に示すように、ダクティル管で軸方向ひずみが0.2から0.8%で大きな被害を生じている。一方、通信関係の被害調査では、管路周辺地盤の地盤ひずみは被害の有無に大きな関係は無く、むしろ管軸直角方向での変位(横ずれ変位)に着目した検討が行われている。例えば、図8.2.4は液状化を生じたポートアイランドでの管路長約1kmでの、管の横ずれ変位計測であるが、図のよう

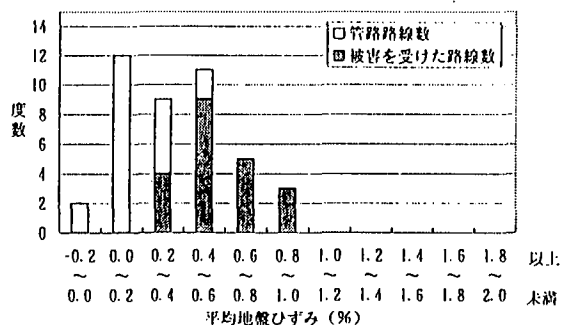


図-8.2.3 ダクティル管被害と平均地盤ひずみ²⁵⁾

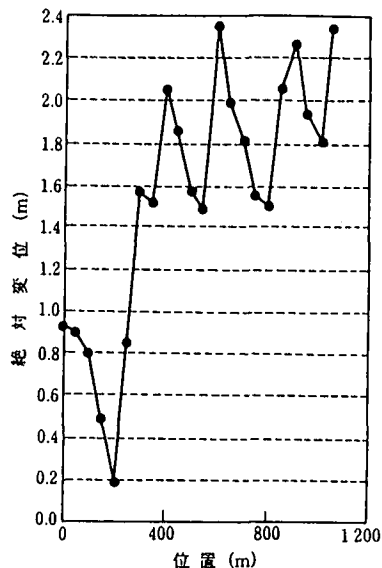


図-8.2.4 埋立地における管軸直角方向変位例²⁵⁾

8.2.2 建築家屋での検討例

建築家屋の被害と地震動の関係についての検討例としては、本文3章3.2節で既に紹介されているように、岩崎等^{27)、28)}により断層距離と家屋被災率、さらに地盤種別との関係が検討されている。解析対象は、西宮及び神戸東部での家屋被害を分析したもので、図8.2.5に示すように4種類に区別した地盤種類に対して、家屋の全壊率を震源断層からの距離で整理している。その結果は図8.2.6に示すようで、岩盤、洪積(硬質)地盤、沖積(軟弱)地盤、液状化地盤の種別に対して家屋倒壊率がある一定の傾向を持って異なってくる。図から明らかなように、震源断層からの距離が約5kmから倒壊率の減少が始まり、約10kmでほぼ被害が無くなるという結果が得られている。同様な震源断層距離と、最大水平加速度の関係を本文3章3.2.3項で西宮地区の家屋被害について検討しており、岩崎等の研究成果と一致する傾向が得られている。

8.2.3 漁港施設での検討例

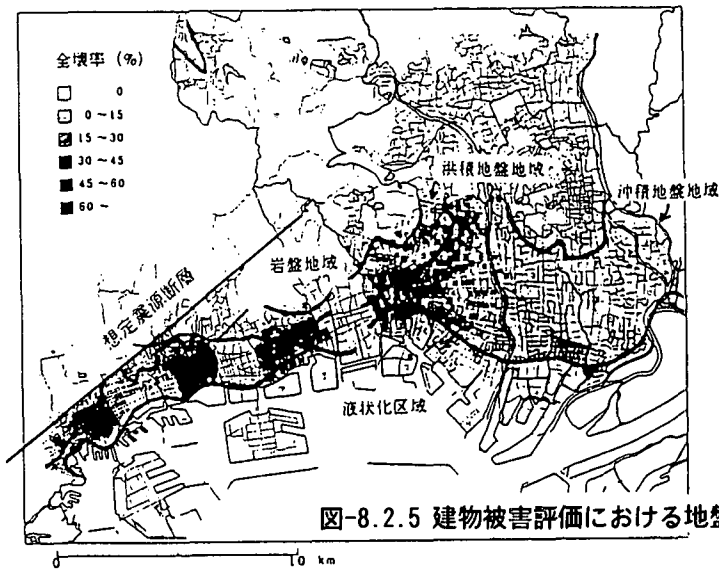


図-8.2.5 建物被害評価における地盤区分²⁸⁾

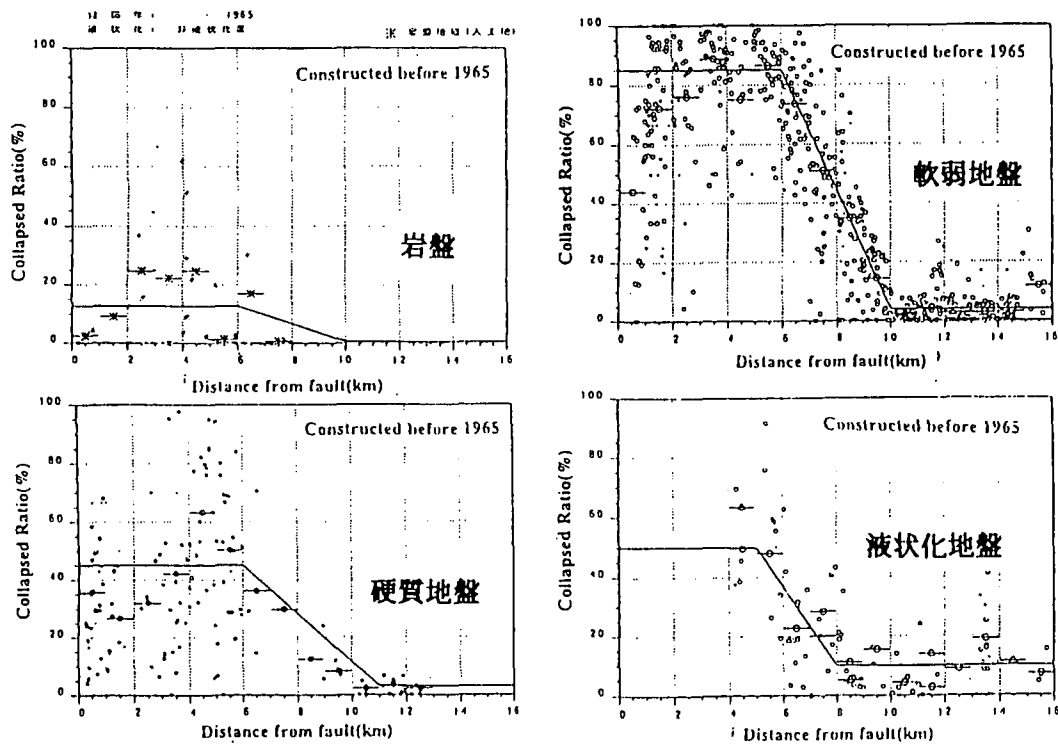


図-8.2.6 地盤区分毎の震源距離と被害率の関係²⁷⁾

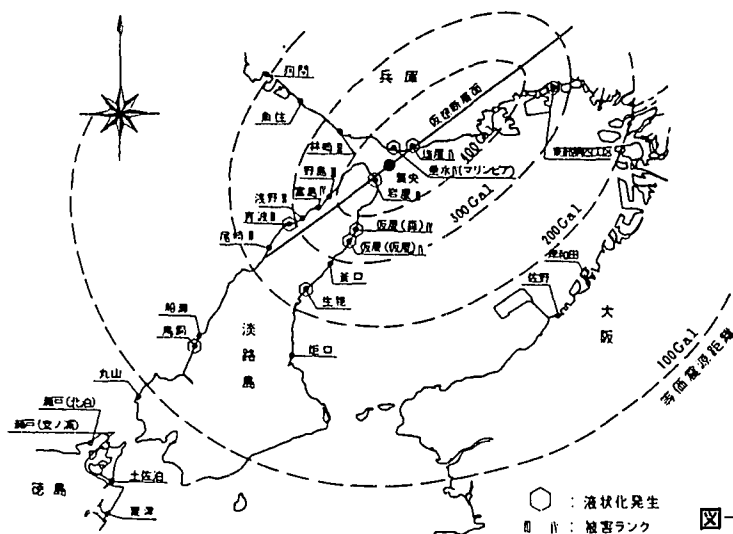


図-8.2.7 調査漁港と被災規模の関係¹⁷⁾

被害ランク	0	I	II	III	IV
最大変位量 (cm)	0	10以下	10~50	50~100	100以上

大槓等¹¹⁾は兵庫県南岸と淡路島、大阪府、さらに徳島県といった、広域での 27 の漁港施設被害について地震動との関係を分析している。調査対象となった構造物の特徴は、大部分が重力式の護岸構造物であり、被害としては構造物が前面に水平移動するといった、前出し機構の被害が支配的であったと報告している。被害施設と地震動の大きさとの関係は図-8.2.7 に示すようであり、200gal 程度以上の範囲の漁港において大きな被害（被害ランクⅢまたはⅣ以上）が生じたとしている。ここで、被害ランクは図中の表で示され、ランクⅢ、Ⅳの被害では 50cm 以上の変位量が生じている。また、地震動が 200gal 程度以上の範囲内でも被害が軽微なものも在るが、これは地震動の方向性が関与したものと推定している。なお図 8.2.7 に示された地震動分布は、等価震源距離の考えを用いて、震央からの距離減衰を基に推定されたものであるが、その地震動の大きさは、神戸港域ならびに阪神間の構造物について本分科会の埋立地盤や港湾構造物のグループが仮定したものとは、かなりその程度が異なったものとなっている。

また研究の中で、図 8.2.7 の地震動分布を入力値として、代表的な地点について液状化解析を実施している。その結果、検討対象とした港湾施設の被害は地盤の液状化によるものが大きいとしている。

地震被害と地盤及び地震動との関係については、上述のように幾つかの研究成果があるが、おおむね地震動の増加は地震被害の増大をもたらす、加速度がある値以上で被害が急増することが示されている。同様な傾向は 4.2.1 項でも港湾施設について示されている。しかしながら、加速度のみが被害規模を直接代表するものではなく、速度、変位、あるいは SI 値等、構造物の震動特性との関係も考慮する必要がある。また、地盤条件については軟弱な場合に被害が顕著になるもの（例えば地下埋設管等のライフライン施設）や、その反対に震災の帯のように、沿岸地域での地盤の非線形応答によって家屋の被害が軽減された場合もある事が分かる。このことより、地層構成や構造本体及び基礎の設置深さとの関係は無視できないであろう。その他、地形の変化や構造物の形態によって震動特性が大きく変化した場合も考えられる。例えば、本文 5 章 5.1.3 項で示された盛土と擁壁の関係のように震動特性が相互に連動する場合もある。

地震被害では、震動特性、地盤特性、構造物応答性の 3 つが複雑に絡み合っており、被害規模の変化がおこる。また、それぞれの項目も独自の空間的な広がりを持って変化する。被害分析の現状としては、各項目についての研究、ならびに相互関係についての研究が鋭意進められており、それぞれの研究成果がまとまり始めた後に、地震被害の総合分析が初めて可能となるものと考えられる。本分科会の成果も、このような研究発展のための一石になるものと期待される。

参考文献

- 1) (社)日本道路橋会(1996)：「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」
- 2) (財)沿岸開発研究センター(1997)：埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版)
- 3) 日本建築学会(1988)：建築基礎構造設計指針
- 4) Ishihara, K. and S. Yasuda (1975): Soil Liquefaction in Hollow Cylinder Torsion under Irregular Excitation, Soils and Foundations, Vol.15, No.1, 45-59
- 5) 東拓生・田村敬一(1997)：地震動波形の繰返し特性を考慮した液状化強度評価法、土木技術資料、39-9、50-55
- 6) 松尾修・東拓生(1997)：液状化の判定法、土木技術資料、39-2、20-25
- 7) 山崎浩之・善功企・前田健一・佐渡篤史(1997)：粒度・N 値法による液状化の予測・判定について、第 32 回地盤工学研究発表会、1059-1060
- 8) 小瀬木克己・佐藤正行・小田匡寛・風間秀彦・柴田昌則(1996)：埋立地盤の液状化特性に及ぼす細粒分の影響(その 1)、第 31 回地盤工学研究発表会、973-974
- 9) 佐藤正行・小瀬木克己・小田匡寛・風間秀彦・柴田昌則(1996)：埋立地盤の液状化特性に及ぼす細粒分の影響(その 2)、第 31 回地盤工学研究発表会、975-976
- 10) 桑野二郎・中野博志・杉原弘一・矢部浩史(1996)：細粒分を含む砂の非排水繰返し強度に影響を与える因子、第 31 回地盤工学研究発表会、989-990
- 11) 石原研而・軽部大蔵・後藤洋三(1997)：改良されたマサ土埋め立て地盤の動的強度の調査、第 24 回地

震工学研究発表会、461-464

- 12) Tokimatsu, K. (1990): System Compliance Correction from Pore Pressure Response in Undrained Cyclic Triaxial Tests, *Soils and Foundations*, Vol.30, 2, 12-22
- 13) 國生剛治・佐藤清隆・松本正毅(1995) : 1995 年兵庫県南部地震での地盤の非線形震動特性、土と基礎、Vol.43、No.9、39-43
- 14) 柴田徹・井合進・木山正明・上園晃・鈴木孝幸・小堤治・兪不(1996) : FL 値による地盤の剛性評価法と構造物被害の予測法 (FLUSH-L 法)、第 2 回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、土木学会、pp.445-452
- 15) 吉田望・中村晋・末富岩雄(1995) : 1995 年兵庫県南部地震における地盤の非線形とその予測、第 23 回地盤震動シンポジウム、建築学会、39-52
- 16) 井合進・一井康二・森田年一(1995) : ケーソン式岸壁の有効応力解析、兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(その 7)、港湾技研資料、No.813、253-280
- 17) 大楨正紀・高木伸雄・藤井照久・若槻好孝(1997) : 阪神大震災における漁港施設の被害分析と液状化解析、土木学会論文集、No.568、III39、67-78
- 18) 川瀬博・佐藤智美・福武毅芳(1995) : 神戸ポートアイランドにおけるボアホール観測記録の非線形地盤応答シミュレーション、ORI 研究報告、94-05、清水建設
- 19) 濱田政則、若松加寿江(1997) : 液状化による地盤の水平変位の研究、土木学会論文集
- 20) 濱田政則、安田進、磯山龍二、恵本克利(1986) : 液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究、土木学会論文集 第 376 号/III-6、221-229
- 21) Shamoto, Y., Zhang, J.M., and Goto, S. (1997): Mechanism of Large Post-Liquefaction Deformation in Saturated Sand, *Soils and Foundations*, Vol.37, 2, 71-80
- 22) Ishihara, K. and Yoshimine, M. (1992): Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction during Earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.32, 1, 173-188
- 23) 安田進・野村博之・寺内哲也・田中宏征・喜田浩・龍田昌毅・原田典佳 (1997) : 液状化による護岸背後地盤の流動とその対策工に関する振動台実験、第 2 回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、121-126、土木学会
- 24) (社)日本水道協会 (1996) : 「1995 年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析」
- 25) 阪神淡路大震災調査報告編集委員会(土木学会他(1997) : 阪神淡路大震災調査報告 (ライフライン施設の被害と復旧)
- 26) 都市防災と環境に関する研究会 (1998) : 「地震と都市ライフライン」、京都大学学術出版会
- 27) 岩崎好規(1997) : 阪神淡路大地震にみる浅発性直下型の被害と震源近傍地震動の特徴、第 24 回地震工学研究発表会講演論文集、93-96
- 28) 岩崎好規・山本浩司・越後智雄(1996) : 兵庫県南部地震における家屋被害と地盤・震源断層距離の関係、第 31 回地盤工学研究発表会、253-254