

5. 埋立地・廃棄物における地震災害と耐震設計

5.1 研究の流れ

図 5.1.1 の研究の流れに示すように、埋立地・廃棄物における地盤災害に関する文献収集とヒアリング結果を整理することから始めている。この過程では、兵庫県南部地震による被害のうち、主として埋立地盤や廃棄物埋立地盤そのものの地震時の挙動とそれに関わる要因の分析に努めることとした。その後の整理データの分析と検証、さらに、これらの結果をまとめた「液状化層と非液状化層の関係」、「沈下の実測値と予測値の関係」、「噴砂率と沈下ひずみの関係」、「微動特性と被害の関係」から得られた知見をもとに埋立地盤・廃棄物埋立地盤における耐震設計への提言を行っている。

調査・研究の対象とした地域は、図 5.1.2 に示す大阪湾沿岸部の埋立地のうち、ポートアイランド・六甲アイランド・関西国際空港島などの人工島を含め、神戸、阪神間、大阪沿岸部の沿岸埋立地であり、廃棄物最終処分場として廃棄物埋立のなされているものも含めて検討した。整理段階において、対象地区を埋立時期・埋立材料のさまざまな種別・立地条件（地震動との関係から震源断層距離との関係を重視した）などを考慮して、対象地域ごとに資料をとりまとめ、比較検討を行っている。

5.2 埋立地における地震動と地盤被害の分析

大阪湾岸部の埋立地毎に、地震動に係わる断層距離、埋立材料、N値、粒度特性などと被害状況を整理し、これらのとりまとめた結果を各埋立地毎に地震動に関わる影響因子、埋立地盤に関わる影響因子、被害状況に分けて整理している。

これらの整理結果をもとに、兵庫県南部地震に伴う埋立地域の地震時の諸挙動と埋立地盤の諸特性を地震動の違いと沈下量の相違に対照させ、影響要因の寄与を分析した。本節では、入力地震動、地表面沈下量、液状化の程度に関して以下に示すような項目を検討し、要因・被害の評価を行っているが、ここではそのうちの主な分析結果を記述する。

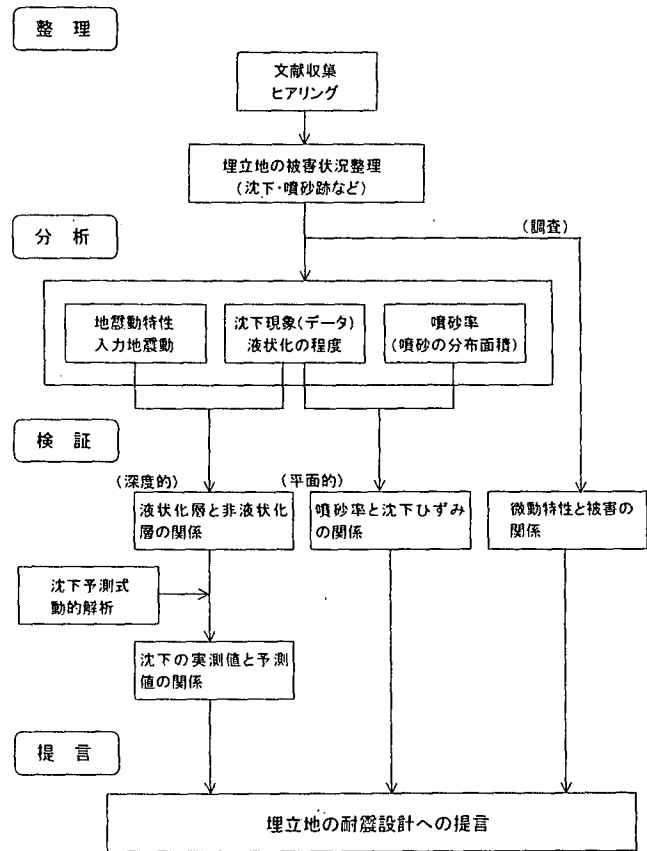


図 5.1.1 研究の流れ

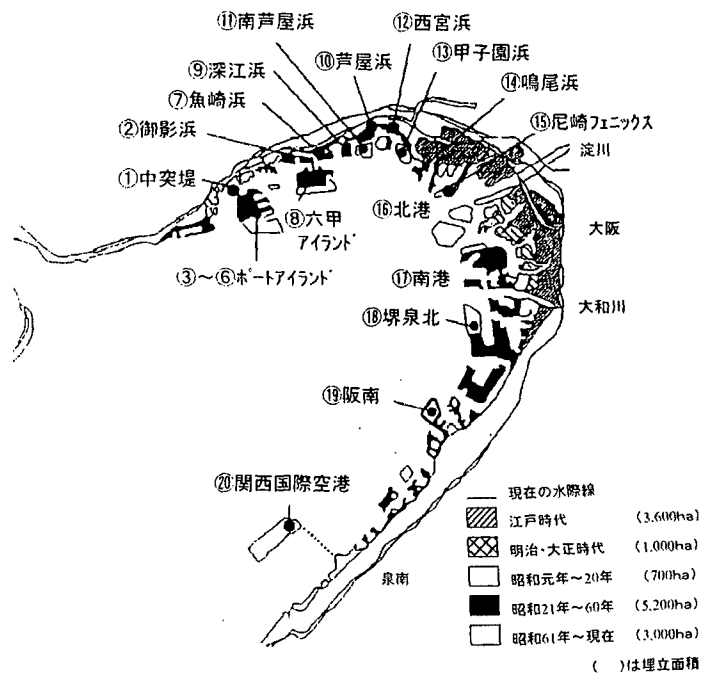


図 5.1.2 調査研究対象地域の位置図

(1) 入力地震動の評価

入力地震動の評価については、Fukushima and Tanaka¹⁾による距離減衰経験式を適用し、各埋立地の推定最大水平加速度を求めた。その結果、図5.2.1に示すように、断層距離が大きい所では、観測値とほぼ同程度の値を示したが、断層距離の近いところでは観測値の方が小さめになり、この要因は、“横揺れ減衰”によるものと考えた。

(2) 沈下現象と液状化の程度

埋立地の内陸部で発生した噴砂の痕跡は、埋立層の液状化現象を裏付けているわけであるが、それに伴って生じる平面地盤の変形は、過剰間隙水圧の消散による鉛直方向の変位である沈下現象である。従って、各埋立地の沈下データに着目し、既往の文献、資料及び調査より地盤特性（N値、細粒含有率等）と地震後の実測沈下量の抽出を行い、各埋立地毎に整理を行った。沈下に関する各埋立地毎の抽出データを表5.3.1に示している。なお、同表に記述してある実測沈下量は、地震前後の水準測量により得られた沈下量と建物との段差の平均値である相対沈下量及びGPS測量に基づく沈下量である。これらの分析結果より、断層距離が近く、比較的加速度が大きい埋立地では、噴砂跡沈下量が大きく、断層距離が遠く加速度が小さい埋立地では、噴砂跡や沈下が小さい傾向にあることがわかった。

(3) 噴砂率と液状化の程度

地中の液状化の有無を間接的に、面的に検討するために液状化の結果として地表に現れた噴砂現象をとらえて、噴砂の発生率で液状化の程度を評価することとした。航空機写真をもとにした Hamada et al²⁾による噴砂の地表面分布は、神戸、阪神間の埋立地域を含み広域におよぶ比較的均質に評価された資料である。これに、1区画100m四方のメッシュをかけ、各区画における噴砂の分布面積の割合を求め、噴砂率として整理した。これは、区画内の液状化の程度や規模に応じて、ある程度地表に現れた噴砂の量が関わっているであろうという仮定のもとで、間接的にその面積の割合から液状化の程度を定量的に評価しようとしたものであり、噴砂率と断層距離との関係がかなり明瞭となった。

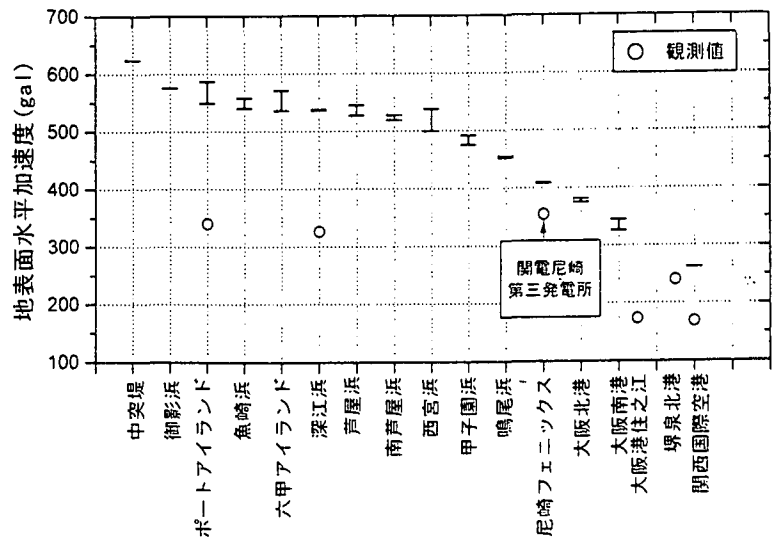


図 5.2.1 距離減衰式より求まる埋立地の最大水平加速度

表 5.2.1 各埋立地の抽出データ

埋立地	実測沈下量(cm)	地表変位の計測方法
中突堤	南側岸壁 50~70 東側岸壁 20~30	水準測量に基づく
御影浜	20~30	相対沈下量
ポートアイランド	平均数+	水準測量に基づく
	約 30	
	20~30	
	21~31	
	18.4~30.0	相対沈下量
	8~23	
	0	
魚崎浜	35~70	GPS測量に基づく
六甲アイランド	0~20	GPS測量に基づく
深江浜	25	GPS測量に基づく
芦屋浜	約 30	相対沈下量
南芦屋浜		水準測量に基づく
	20~55	GPS測量に基づく
西宮浜	35~40	相対沈下量に基づく
		GPS測量に基づく
甲子園浜		GPS測量に基づく
鳴尾浜	0~4	GPS測量に基づく
尼崎フェニックス		GPS測量に基づく
大坂北港	3.3~4.1	水準測量に基づく
大坂南港	0.0~2.0	水準測量に基づく
関西国際空港		

5.3 埋立地における地震動と地盤被害の検証

地震被害の検証においては、地震前後の沈下量を取り上げ、既存の液状化判定法や経験式を用いて推定可能な予測値と地震直後の沈下実測値とを対照させ、各埋立地盤の特性・地盤改良の有無による比較を行ったほか、前述の噴砂率や埋立地盤の常時微動特性（動的特性）と液状化発生の有無や程度との関連性についても検討した。

(1) 地盤被害と地盤沈下

液状化による地盤被害が発生する条件を示した図³⁾に各埋立地の液状化層厚（地下水位以下にある飽和地盤の液状化層厚の合計）と非液状化層厚（地下水位以浅の不飽和層と地下水位以下の非液状化層厚の合計）を安田ら⁴⁾の方法に準じて、各埋立地の液状化層厚（ H_2 ）と非液状化層厚（ H_1 ）の構成比でプロットしたものを図 5.3.1 に示している。ここでいう液状化と非液状化の判定については、道路橋示方書・同解説 耐震編に記載されている指針⁵⁾（以下、

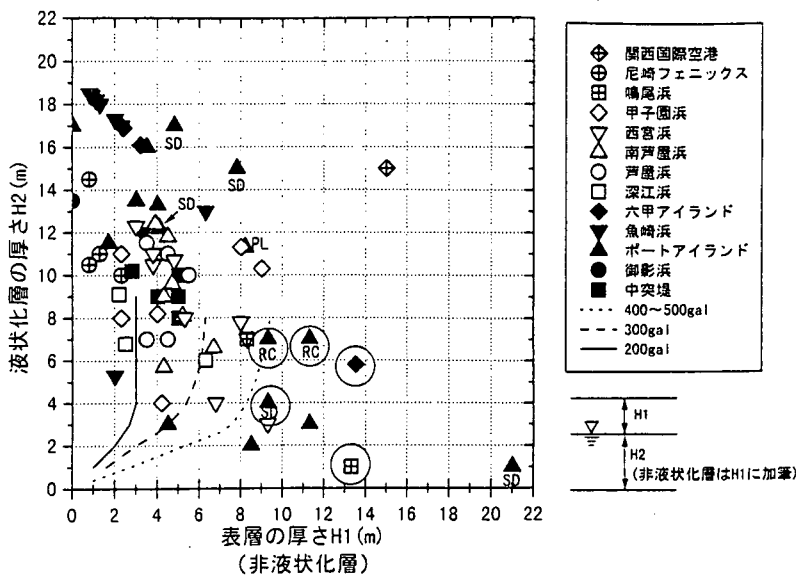


図 5.3.1 液状化層厚と非液状化層厚の関係

新道示指針と呼ぶ)に準じている。図中の文字は改良地盤でのボーリング結果によるもので、○で囲んでいるボーリングデータは、データの整理結果より沈下量が小さく、噴砂跡も確認されなかった地点を示している。断層距離の大きい関西国際空港のデータを除外して考えると、被害が小さかった○で囲んだ点については、ほぼ想定加速度 400~500gal のラインの外側にプロットされている。このように、地下水位が深い場合や地盤改良によりN値が比較的高く液状化層厚が薄いと判定される箇所については、概ね、被害が少なくなっており、地盤被害発生の有無を予測する目安になるものと考えられる。

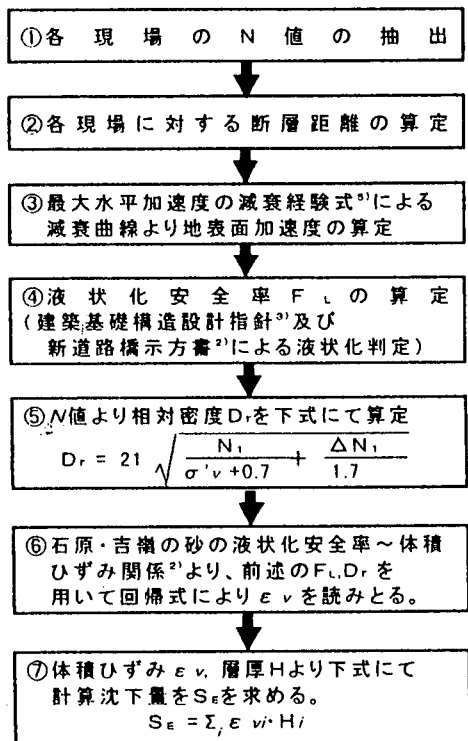


図 5.3.2 検討フロー

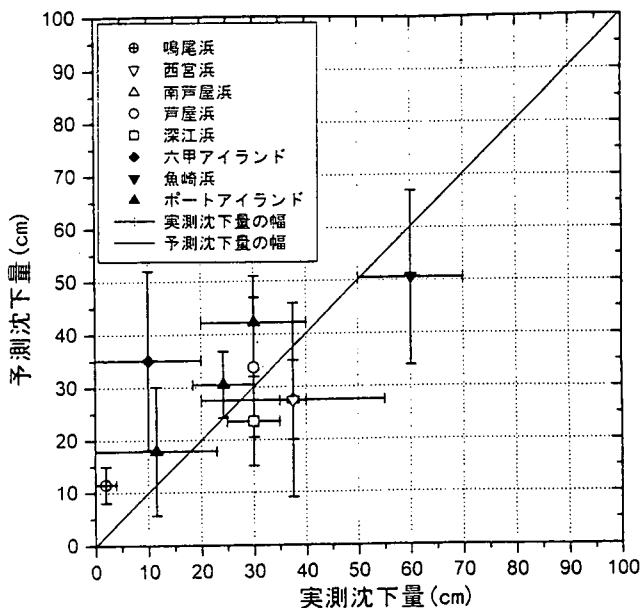


図 5.3.3 実測沈下量と予測沈下量（新道示）

地盤沈下を定量的に推定するには深さ方向の地盤の液状化判定をすることが必要となるが、表 5.2.1 における地震後の実測沈下量と対比させ、実現象を踏まえて地震の大きさ、粒度、N値や層厚などより簡易的方法で地震に伴う地盤の沈下量の定量的な把握を試みた。この検証の手順は、図 5.3.2 のフローに示すとおりであり、最大水平加速度の減衰経験式¹⁾、石原・吉嶺の砂の液状化安全率～体積ひずみ関係⁶⁾を用いている。

図 5.3.3 でみるように、新道示指針による液状化安全率 F_L から算出された予測沈下量と実測沈下量は、ほぼ同じになる結果が得られており、地盤沈下の簡易予測法の適用性をある程度示しているといえる。なお、動的解析による沈下予測も実施しているが、ここでは割愛する。

(2) 噴砂率

表 5.2.1 で示した実測沈下量と噴砂の発生率(噴砂率)の関係を見るために、それぞれの調査地点での両者の関係を調査した。この点に関して、報告書⁷⁾によればポートアイランド2期を除いたポートアイランド1期と六甲アイランドにおいては「地盤沈下の大きい地域は、一般的に噴砂の発生が大きい地域である」ことを指摘している。両人工島を除いた埋立地盤の噴砂率と実測沈下ひずみ(実測沈下量/埋立層厚)の関係を示したものが図 5.3.4 である。同図のデータはばらついてはいるもののやや右上りの傾向がみられ、上記の指摘事項は埋立層全体にある程度当てはまりそうであり、定量的な被害の推定に繋がる可能性がある。

(3) 微動特性

常時微動は、その測定方法が簡便であることから、地盤の卓越周期を求める手法として多用されている。また、最近では、地盤の液状化地点の

判定方法としての適用性についても検討されてきている。ここでは、ポートアイランドと六甲アイランドを対象として液状化発生の有無と地盤の常時微動との関係について検討するとともに、埋立地の動的特性を一次元動的応答解析により考察した。ポートアイランドの常時微動測定地点 8 ヶ所の地点を図 5.3.5 に示している。

液状化発生の有無と常時微動との関係については、スペクトル比が 0.5～1.6 秒付近で卓越周期を持ち、その比の値が 2 以上になるものが液状化発生地点によく対応している。また、一部地点で比較した地震前後の常時微動の卓越周期には、ほとんど違いが見られなかった。地盤改良地点付近の H/V スペクトル比特性(図 5.3.6 参照)は、未改良地点のものと比較してやや異なっていた。こ

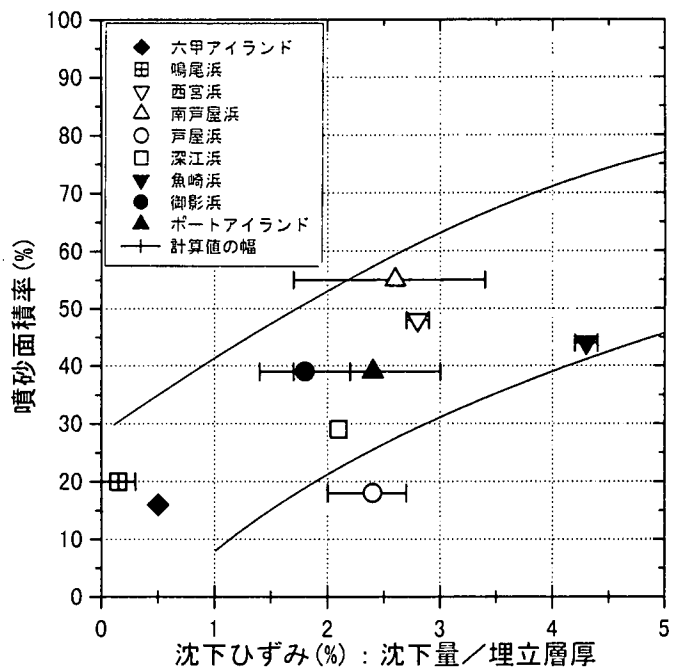


図 5.3.4 噴砂率と実測沈下ひずみの関係

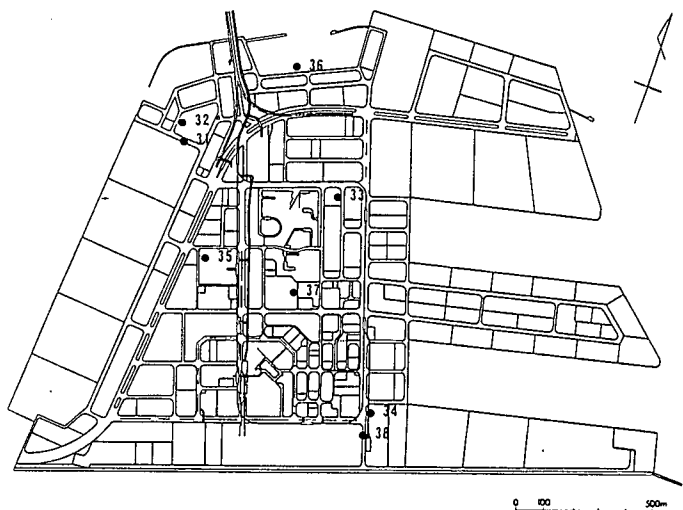


図 5.3.5 調査地域 (ポートアイランド)

これらの結果は、微動特性が調査段階で定性的な液状化の発生、ひいては被害の予測において有効な手段となりうることを示唆している。

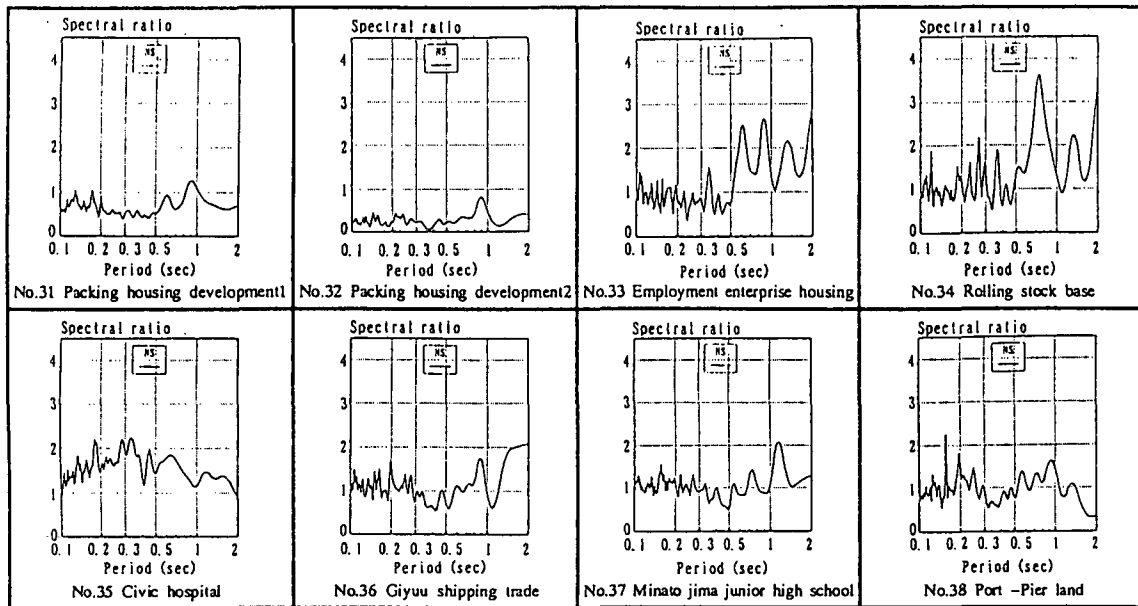


図 5.3.6 ポートアイランドのH/Vスペクトル比

5.4 埋立地盤における耐震設計への提言

本研究においては、以上の検討結果と耐震設計の考え方が変化している現況を踏まえて、埋立地盤の耐震問題に関する総合的な考察を行った。以下には、埋立地・廃棄物における地盤災害のメカニズムを耐震設計に反映させるための提言と課題を述べる。

①簡便な調査・予測法による被害の程度の予測

今のところ、液状化に伴って生じる地盤や構造物の変形を予測する手法は確立されていない。しかしながら、埋立地盤における耐震設計を考える場合、埋立地盤上の構造物の重要度により地盤の受け持つ耐震性もおおのずとそれに応じたものが要求されることが考えられる。特に、土木学会第2次提言⁸⁾においては、レベル2地震動について“復旧可能な変形の許容”が提言されており、地震後の変形予測が重要なポイントとなる。従って、本研究により得られた液状化層と非液状化層の関係、噴砂率と沈下ひずみの関係及び微動特性と被害の関係から埋立地における被害の程度を予測することが必要である。また、5.3.1 (3) で示した定量的な予測として簡便な沈下予測式を用いることも有効であると考えられる。簡易沈下法に関する課題は、基となる石原・吉嶺のチャートがきれいな砂を対象としており、すべての土（細粒土や粗粒土）について適用するには実験データが揃っていないことである。細粒土や粗粒土の変形・強度特性については伊東ら⁹⁾や永瀬ら¹⁰⁾により研究されており、細粒土の強度は塑性指数に支配的であること、粗粒土の密度の新しい定義（等価砂礫密度など）が提案されている。今後は、これらの知見を総合的に判断し、砂、中間土、粘性土の密度とN値（離散的）、コーン値（連続的）及び液状化強度との関係に展開していくことが必要と考えられる。

②レベル2地震動における地盤改良効果の評価

地盤改良の有効性は、過去の巨大地震に遭遇した埋立地においても数多く示されおり¹¹⁾、埋立地における地盤の耐震化を図る上では地盤改良が有効な手段である。この有効性を定量化するために、直下型のレベル2地震動が襲ったポートアイランド、六甲アイランドにおけるボーリングデータを新道示で示されている液状化判定に従って分析し、兵庫県南部地震の際の非改良・改良地盤の沈下における実測値と関連させて統計的なアプローチを試みた結果¹²⁾が示されて

いる。図 5.4.1 にその結果を示しており、レベル2地震動を受けた際に改良地盤では改良目標N値に達していないデータが何割か含まれていても有意な地盤沈下は生じていないことがわかる。同様な結果は論文¹³⁾にも示されており、以上の知見は、土木学会の2次提言にあるような「レベル1地震動に対する構造物の機能

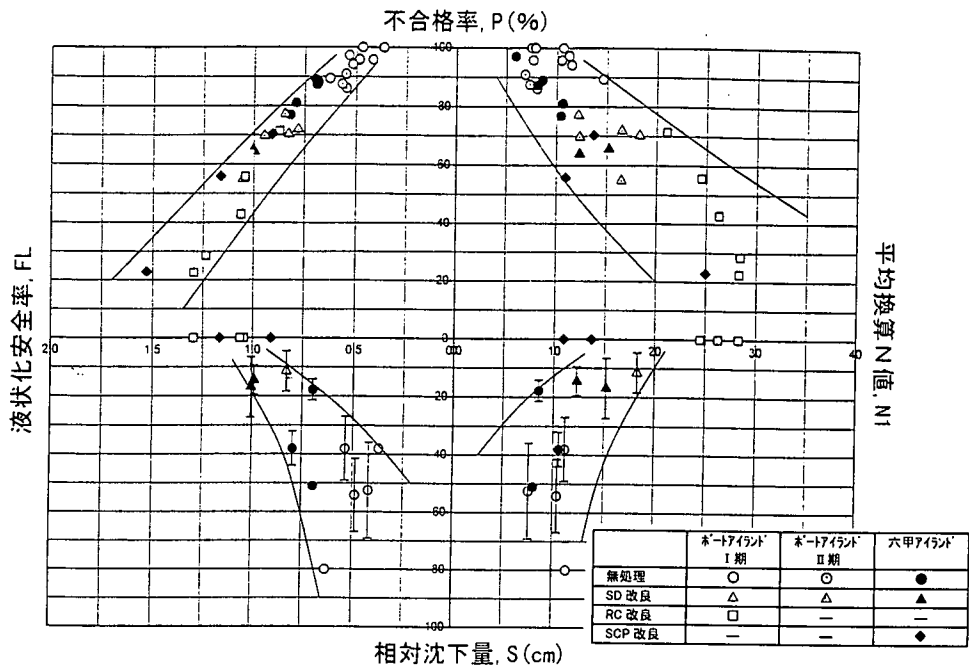


図 5.4.1 換算N値, 不合格率, 液状化安全率, 相对沈下量の関係

の維持, レベル2地震動に対する復旧が可能な範囲内での損傷の許容」といった考え方に照らし合わせると、レベル2地震に対する設計と管理において基準値を満足しない点を許容する不合格率の考え方の導入も検討に値すると考えられる。これに関連する最近の知見としては、篠原ら¹⁴⁾が検討しており、PL (液状化指数) に結びつけて、レベル2地震動におけるPL値の引き上げ (15 から 25) を示唆している。

参考文献

- 1) Fukushima, Y. and Tanaka, T. : A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 80, pp. 757-783, 1990.
- 2) Hamada, M., Isoyama, R. and Wakamatsu, K. : Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake -Liquefaction, Ground Displacement and Soil Condition in Hanshin Area, 1995.8.
- 3) Ishihara, K. : Stability of Natural Deposits during Earthquakes, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.321-376, 1985.
- 4) 安田・坪田・西川・浅香・内藤：兵庫県南部地震による液状化発生層の推定，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.201-208, 1996年1月。
- 5) 道路橋示方書・同解説-V耐震設計編，社団法人日本道路協会，平成8年12月
- 6) 石原・吉嶺：地震時の液状化に伴う砂地盤の沈下量予測に伴う沈下量予測，第26回土質工学研究発表会，pp.767-770, 平成3年7月。
- 7) 神戸市開発局：兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査報告書，119p., 1995年8月。
- 8) (社)土木学会：土木構造物の耐震基準に関する「第二次提言」，1996.1.10
- 9) 伊藤・兵頭：不攪乱塑性粘性土の繰返しせん断特性，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.1421-1426.,1998.
- 10) 永瀬・廣岡・持永・宮下・田上：礫を含む砂の液状化特性，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.1433-1438.,1998.
- 11) 大林・原田・山本・佐々木：締固め地盤の液状化抵抗に関する評価，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.1411-1416.,1998.
- 12) 松尾・安田・山本・原田・橋本：レベル2地震動における改良地盤の評価に関する実証的研究，第24回地震工学研究発表会，pp.273~276, 1997年7月。
- 13) 山崎浩之：港湾施設の耐震設計，地質と調査，pp.27~33, 1996年第3号。
- 14) 篠原・山本・稲垣：液状化被害を表す指標の検討，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.1475-1480.,1998.