

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

松尾 修¹・安田 進²・山本 実³・原田 健二⁴・橋本 隆⁵

¹正会員 工修 建設省土木研究所 (〒305 茨城県つくば市大字旭1)

²正会員 工博 東京電機大学教授 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

³正会員 不動建設(株)ジオエンジニアリング事業本部 (〒110 東京都台東区台東1-2-1)

⁴正会員 工博 不動建設(株)ジオエンジニアリング事業本部 (〒110 東京都台東区台東1-2-1)

⁵正会員 不動建設(株)ジオエンジニアリング事業本部 (〒110 東京都台東区台東1-2-1)

1995年兵庫県南部地震において、ポートアイランド、六甲アイランドの埋立地盤内の改良地盤は非改良地盤に比べて地盤沈下量が小さく、かつN値も相対的に高めであったことが報告されている。このようなレベル2地震動が実際に襲った両人工島での非改良・改良地盤を対象に、地盤の評価指標としてのN値や液状化安全率 F_L と地盤沈下量の関係について統計的な分析を行った。その結果、改良地盤では、改良目標N値に達し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判明した。また、このことから、レベル2地震動に対しては、改良目標基準や品質管理基準の見直しの必要性があることを示唆した。

Key Words : large scale earthquake, liquefaction, subsidence, ground improvement, statistical analysis, evaluation, standard for quality control

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震において、ポートアイランド、六甲アイランドの埋立地盤内の改良地盤は非改良地盤に比べて地盤沈下量が小さく、かつN値も相対的に高めであったことが報告されている¹⁾。従来のL1地震動(中規模地震動)における地盤液状化対策として締固め工法で改良を行う場合には、設計地震動に対して液状化判定を行い、改良目標N値や液状化安全率 F_L などにより改良仕様が決定される。その際には、複雑な地盤に対して改良対象層(液状化対象層)のほとんど全点で目標値を満足させることが一般に行われている。また、施工後には、事後ボーリングによる品質の確認が設計時と同様の基準でなされることが多いが、このような基準をそのままL2地震動(大規模地震動)に適用した場合に、“土木構造物に対して機能は維持するが変形をある

程度許容する”とする立場にたつ思想との整合性を照査する必要があると考えられた。

本報においては、このような観点に立って、直下型のL2レベル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1996年12月に刊行された「道路橋示方書・同解説V耐震設計編」²⁾(以下、新道示と呼ぶ。)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・改良地盤の沈下の実測値と関連させて統計的なアプローチを試みた結果について報告する。

2. 現状の地盤の評価

現状の地盤の評価は、一般的には標準貫入試験によるN値で行われ、締固め改良が行われる場合には、原地盤(事前)のN値により設計時の改良仕様が決定される。また、施工後の品質の確認においては、

図-1下の平面図に示すように、地盤の評価は、地盤全体からみると最も安全側の評価箇所である杭間で行われており、地盤を構成する杭間と杭芯のN値は、細粒分含有率の増加に伴って乖離していく傾向にあることが報告されている³⁾。このため地盤のN値がある分布でばらついていると仮定すると、N値の頻度分布は、同図上に示すように、あるエリアの非改良地盤では地盤全体のN値の平均とエリア内の何点かのボーリングによるN値の平均はほぼ一致するのに対し、あるエリア内の締固め改良地盤では、ボーリングによるN値の平均の方が小さく、頻度分布も図のようになっているものと推察される。

また、従来のL1地震動による改良仕様を決定するための設計や改良地盤の品質の確認は、同図上に

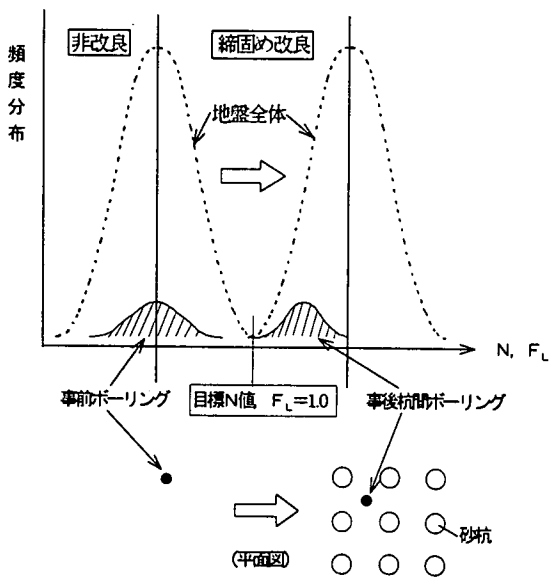


図-1 事前・事後N値の頻度分布の模式図

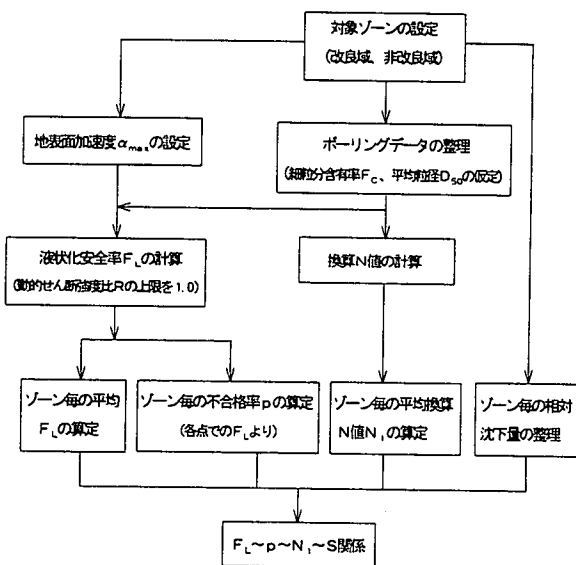


図-2 分析フロー

示すように目標値をほとんど全点クリアするように実施されており、L2地震動の場合に、ばらつきをもって分布している地盤のN値の目標値を満足する割合と被害がどのような関係にあるのかを分析することとした。

3. 分析方法

分析は、兩人工島の対象地域を地盤改良の有無・種類に応じてゾーン分けし、それぞれのゾーンについての地盤沈下量とボーリングからのN値のデータを整理することから開始し、地盤のN値については、新道示の方法に従って、液状化抵抗率 $F_L < 1$ となる割合（不合格率）を求めた。以下、図-2に示すフローに従って詳述する。

(1)対象ゾーンの設定(改良域、非改良域)

表-1に示す、それぞれの非改良域・改良域に応じてポートアイランドI期、ポートアイランドII期、六甲アイランドについてそれぞれ10、4、6地域にゾーン分けした。

(2)ボーリングデータ、相対沈下量の整理

(細粒分含有率 F_c 、平均粒径 D_{50} の仮定)

新道示により動的せん断強度比 R を算定するにはN値の情報以外に、砂質土については細粒分含有率 F_c 、礫質土については平均粒径 D_{50} の情報が必要であるが、それらの情報が不足しているため文献1)などにより、まさ土は $D_{50} = 2 \text{ mm}$ 、それ以外は $F_c = 15\%$ （ポートアイランドI期、六甲アイランド北部）、神戸層群は $F_c = 30\%$ （一部50%）（六甲アイランド、

表-1 分析に使用したデータ数と設定値

ゾーン ()はゾーン数	ポートアイランド				六甲アイランド (6)				
	I期(10)		II期(4)		非改良	SD	SCP		
データ数と設定値	非改良	SD	RC	非改良	SD	非改良	SD	SCP	
データ数	ボーリング数(本)	53	15	39	12	12	72	50	18
	ボーリング計(本)	107		24		140			
	N値データ数(個)	659	158	409	203	199	744	748	177
	N値データ計(個)	1,226		402		1,669			
設定値	細粒分含有率 F_c (%)	15		30		30 (一部50)			
	平均粒径 D_{50} (mm)	砂質土: 1.0 (mm)							
		砂質土、まさ土: 2.0 (mm)							
	地表面最大加速度 α_{max} (gal) ()は設計水平震度	500 (0.5)		400 (0.4)		400 (0.4)			

SD: サンドドレーン } 排水工法
RC: ロッドコンパクション }
SCP: サンドコンパクション/バイル } 締固め工法

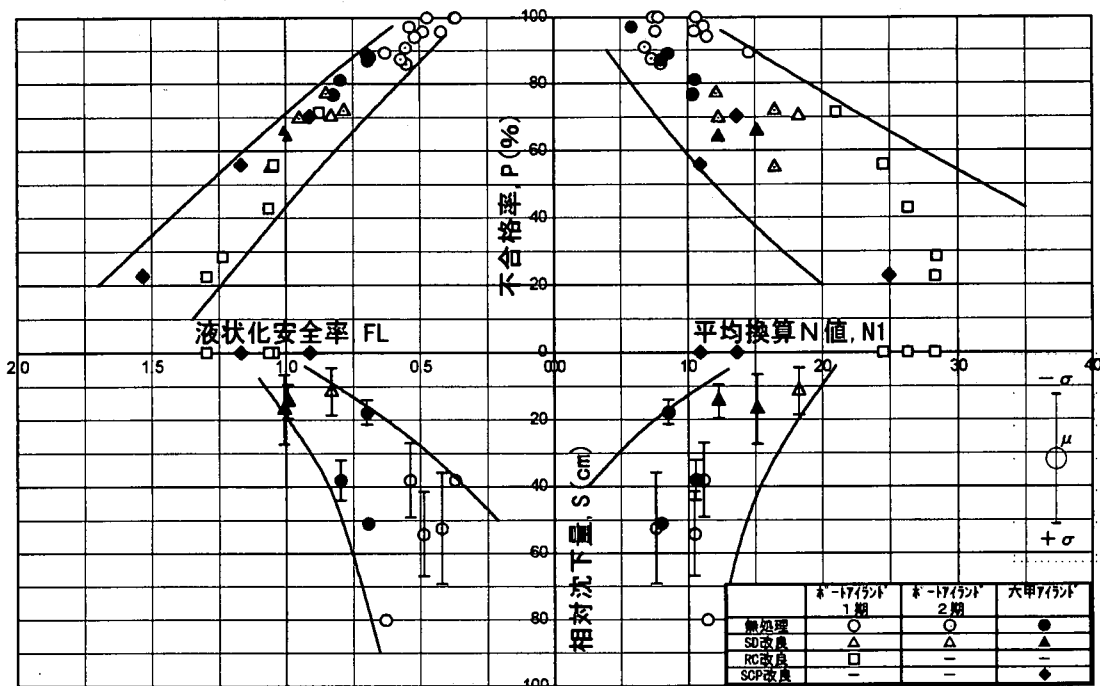


図-3 換算N値 N_1 、不合格率 p 、液状化安全率 F_L 、相対沈下量 S の関係

ポートアイランドⅡ期)と仮定した。整理したボーリング全本数とN値のデータ数も併せて表-1に示している。

地盤沈下量もそれぞれのゾーンで文献1)を基にして求めた。ただし、ここでいう相対沈下量とは地震後調査した建屋との段差の平均であり、圧密沈下量なども含んでいる可能性があることを断っておく。

(3)地表面最大加速度 α_{max} の設定

設計水平震度 $k_{h,0}$ (地表面最大加速度/重力加速度に相当)の設定にあたっては、地表面水平最大加速度分布を示した文献4)により、ポートアイランドⅠ期は500gal、ポートアイランドⅡ期及び六甲アイランドは400galと推定した。(表-1参照)

(4)換算N値、液状化安全率 F_L の計算

N値のデータより換算N値 N_1 ($N_1 = 1.7N / (\sigma_v' + 0.7)$; σ_v' は有効土被り圧)を求め、(2)、(3)で仮定した条件から新道示の液状化判定に従い、各ボーリングデータにつき各層における F_L を計算した。なお、この時、N値が30程度より大きくなると、動的せん断強度比 R が非現実的な大きな値となるため、 R の上限を1.0とした。

(5)ゾーン毎の平均液状化安全率 F_L 、不合格率 p 、平均換算N値の計算

(4)の液状化安全率 F_L の算定結果をもとに、各ゾーンの改良域と非改良域内のボーリングからのすべてのN値を使って不合格率 p ($p = (F_L < 1)$ の度数)

/(全度数)を算定した。

(6)液状化安全率 F_L ～不合格率 p ～換算N値 N_1 ～相対沈下量 S の関係

(2)におけるゾーン毎の非改良・改良域における相対沈下量 S の整理結果と各ゾーンにおける F_L 、 p 、 N_1 の平均値を対応させてプロットし、実測相対沈下量 S との相互関係について整理した。

4. 換算N値、不合格率、液状化安全率と相対沈下量の相互関係

地盤の評価としてのN値・液状化安全率と被害としての相対沈下量の間を目標値を満足していない割合である不合格率を介して概観できるように、各ゾーンの改良・非改良域毎のプロット値を4象限に整理したものが図-3である。

同図の第1象限は、平均換算N値と不合格率の関係のプロットであり、第4象限は、平均換算N値と相対沈下量の間を示している。第1、4象限の図を併せてみるとわかるように、まさ土を主な埋立材料としたポートアイランドⅠ期では、締固めによって平均換算N値20～25以上に改良された地盤において F_L が1.0以下である不合格率が20～70%であるにもかかわらず、液状化による沈下の被害がほとんどみられていないことがわかる。また、非改良地盤と比べて改良地盤の相対沈下量と不合格率はともに

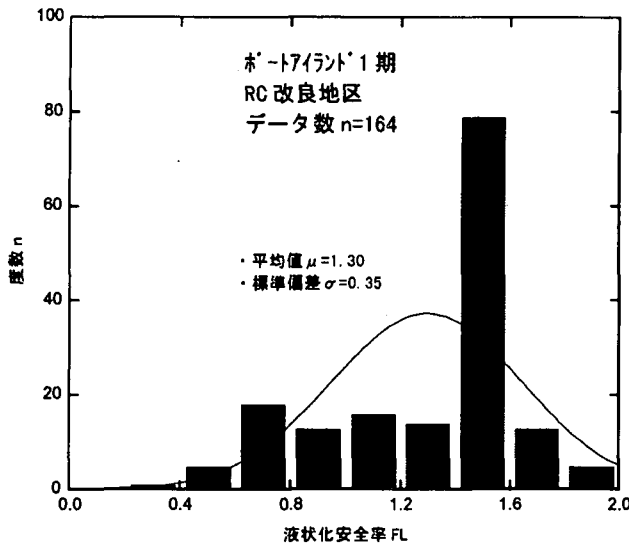


図-4 液状化安全率 F_L の頻度分布の例

小さくなる傾向にある。

第2象限には平均液状化安全率と不合格率の関係をプロットしてあり、平均液状化安全率が1.0である地盤の不合格率は40~70%とばらついている。これは、 F_L の分布型が完全な正規分布と仮定すれば、平均 F_L が1.0をきる確率は50%となるが、図-4に示すように頻度分布が完全な正規分布でないためである。第2, 3象限を併せれば、各平均液状化安全率 F_L に対する不合格率 p と相対沈下量 S の関係が一見でき、平均液状化安全率が1.0程度を上回っていれば、地盤沈下が生じていないことがわかる。ただし、締固め改良であるRC工法やSCP工法で締固められたゾーンでは、平均 F_L が1.0を下回っても沈下は生じていない。

なお、これらの液状化安全率 F_L や不合格率 p の結果は、用いた液状化判定法や地表面最大加速度、地盤の粒度分布の仮定等により変わり得るものであることを断っておきたい。

5. まとめと考察

本報においては、L2地震動が実際に襲ったポートアイランドと六甲アイランドでの改良・非改良地盤でのボーリングデータを基に、新道示による液状化判定法を用いて換算N値や液状化安全率及び $F_L < 1$ である不合格率と地震による地盤の相対沈下量の関係を調べた。その結果、改良地盤では目標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った。

前述したようにL1地震動における改良目標N値や事後N値による管理の基準では、ほとんど全点(各

層)のN値や F_L が目標値を満足するように設計・管理されることが多い。しかしながら、地震動と土木構造物の保有すべき耐震性の関係については、土木学会の「第二次提言」⁵⁾にあるように、レベル1地震動に対する“構造物の機能の維持”とレベル2地震動に対する“復旧が可能な範囲内での損傷の許容”という点を地盤の液状化からいえば、「レベル1地震動に対しては液状化を防ぎ、レベル2地震動に対しては、一部液状化したとしても土木構造物としての機能を保持する。」との解釈もできる。このように地震動の大きさによる土木構造物が持つべき耐震性能の考え方を照らし合わせると、液状化対策としての地盤改良においてレベル2地震動を考慮する場合には、前述した改良目標標準や品質管理基準などの評価を見直す必要があるものと考えられ、兵庫県南部地震のようなL2地震動においては、例えば平均N値や平均液状化安全率で設計・管理する方法も検討に値すると考えられる。特に、締固め改良地盤では、ほとんど地盤沈下が生じておらず、ドレーン改良と同じ平均N値や平均 F_L であっても、地盤沈下に相違が見られており、これには締固め地盤全体(杭間・杭芯)としての強度の評価の問題³⁾や静止土圧係数 K_0 増加の問題⁶⁾などに起因していることも考えられる。

今後は、これらの要因を検討して、締固め改良地盤の改良効果をより適切に評価していきたいと考えている。

謝辞：今回の検討にあたり、ご指導いただいた東京理科大学石原研而教授に感謝いたします。

【参考文献】

- 1) Yasuda, S., Ishihara, K., Harada, K. and Shinkawa, N. : Effect of soil improvement on ground subsidence due to liquefaction, *Soils and Foundations*, Special Issue, pp.99-107., 1996.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，平成8年12月
- 3) 山本実，桑原正彦，原田健二，鈴木亮彦：液状化対策としてのSCP改良地盤の事後評価に関する一考察，第51回土木学会学術講演会論文集，pp. 588-589, 1996.
- 4) 大林組技術研究所：平成7年(1995)兵庫県南部地震調査報告書，1995.3
- 5) (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
- 6) 木村保，奥村一郎，三沢久詩，川鍋修：コンパクションパイル打設地盤の K_0 値について，第21回土質工学研究発表会，pp. 1863-1866, 1986.