

凍結試料を用いた地盤の液状化予測・判定 に関する事例解析

前田健一¹・山崎浩之²・小池二三勝³・善 功企⁴

¹正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 土質部 (〒239 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

²正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 土質部

³運輸省港湾技術研究所 土質部

⁴正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 土質部

本報告では、実際に地震を被った地点で、非液状化地盤から採取された凍結不攪乱試料について室内要素試験を実施するとともに、“SHAKE”による地震応答解析を行い、地盤の液状化予測・判定に関する事例解析を行っている。全試料について通常の正弦波を用いた繰返し三軸試験と、応答解析から得られた不規則波を用いたねじり試験とを実施し、予測・判定を行った結果と現地の液状化発生状況とを比較している。

その結果、応答解析で得られた最大発生せん断応力比と正弦波載荷試験から得られる液状化強度とを用いる現行の方法では、液状化安全率を過小評価し得ることを示している。また、不規則波を直接用いることで、地盤の液状化の予測・判定の精度を高め得ることを報告する。

Key Words: Liquefaction, Frozen Samples, Irregular Wave, Shear strain, Excess pore water pressure

1. はじめに

地震時における地盤の液状化の予測・判定を行う詳細な検討方法として、土の液状化強度と地震により発生が予測されるせん断力とを比較する「繰返し三軸試験結果に基づく方法」が、港湾をはじめ多くの基準などに採用されている¹⁾。最近では、砂質土の不攪乱サンプリング技術や室内試験技術の向上、地震応答解析手法の普及していることなどから、液状化予測の精度向上が期待される。

しかし、実際に地震を被ったが液状化が観察されなかった地点の事例解析^{2), 3)}や設計事例などから液状化安全率が過小評価されるケースがあることが報告されている。

そこで、本報告では液状化した地点が隣接し、基盤において実際に地震動が観察された非液状化地点について、凍結試料を用いて液状化予測の適用性について検討する。また、地震応答計算で得られたせん断応力波を直接載荷したときの変形挙動を観察し、現地観測・予測解析結果との比較を行う。

2. 用いた試料

試験に用いた試料は、図-1に示す釧路市西港区内における埋め立てによって形成された地点の深度4～9mから凍結サンプリングされた不攪乱試料である。

この地点は、1993年1月に釧路沖地震(M7.8)を被ったが液状化が観察されなかった箇所である。また、隣接する地点では液状化が観察されており、この地域の基盤において地震動が観測されている⁴⁾。

凍結試料は、図-2の粒径加積曲線が示すように均等係数が1.6～4.7の細砂または礫混じり細砂で、10%前後の細粒分を含んでいる。さらに、主な地盤調査結果を地震応答解析のためにモデル化した層区分に従って、表-1に示す。対象地盤は中位から密な地盤に相当する。

3. 試験概要と地震応答解析

実施した室内要素試験の概要を表-2に示す。地震応答解析に用いるパラメータを決めるための動的変形試

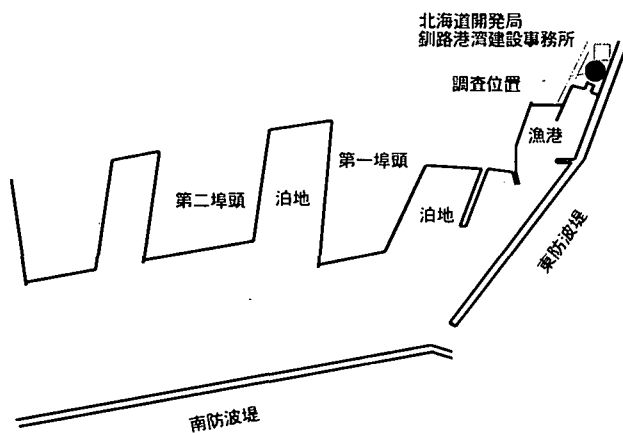


図-1 凍結試料採取位置および調査位置

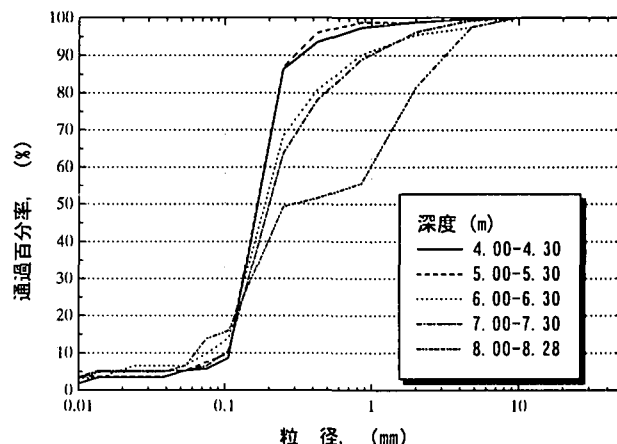


図-2 凍結試料の粒度分布

表-1 SHAKE に用いた主な地盤特性と解析結果

Layer No.	層下部の深度 (m)	主な土質名	主な地盤特性				SHAKE による計算結果 (NS 成分) と安全率		
			単位体積重量 (tf/m ³)	N 値 (回)	相対密度 Dr%	せん断波速度 Vs(m/sec.)	最大せん断応力比 L _{max}	せん断波形パターン分類 (換算係数 C _k)	繰返し三軸法液状化安全率 F _L =R _{max} /L _{max}
1	1.60	礫混じり	1.820	26	—	260	0.418		
2	2.70	細砂	1.820	60	—	260	0.452		
3	4.35		1.800	12	63.7	160	0.413		
4	5.75		1.800	14	—	160	0.438	振動型 (0.70)	0.87
5	6.50	細砂	1.850	36	77.2	260	0.440	振動型 (0.70)	1.31
6	7.55		1.850	33	—	260	0.430	振動型 (0.70)	1.42
7	8.38		1.900	53	—	420	0.435	衝撃型 (0.55)	1.59
8	9.60		1.900	60	66.8	420	0.462	衝撃型 (0.55)	1.34
9	11.67	礫	1.900	64		420	0.462		
10	13.87	混じり	1.850	26		330	0.443		
11	16.57	細砂	1.850	71		430	0.420		
12	17.97		1.850	55		370	0.428		
13	19.72		1.850	47		370	0.427		
14	20.27		1.850	38		290	0.403		

地下水位: 深度 2m (No.1 層と No.2 層境界), 凍結試料採取深度: 4m~9m

表-2 試験種類と試験条件

試験種類	試験内容	載荷初期拘束圧 $\sigma'_{c'}$	載荷に用いた応力波形
動的変形試験	G/Go, h~ひずみ	$\sigma'_{c'} = \sigma'_{m} = (1+2K_0)/3 \sigma'_{v'}$	正弦波 (試験基準に準拠)
繰返し非排水三軸試験	液状化	$\sigma'_{c'} = \sigma'_{v'}$	正弦波 (試験基準に準拠)
中実ねじり非排水試験	液状化	$\sigma'_{a'} = \sigma'_{v'}, \sigma'_{r'} = K_0 \sigma'_{v'}$	SHAKE で得られた不規則波
全ての試験において, $K_0=0.5$ と仮定			

験, 液状化強度を求めるための繰返し非排水三軸試験, 地震応答計算で得られた各層のせん断応力波を直接載荷するねじり試験を実施している。供試体はいずれも凍結試料をストレートエッジ等で成形し, 直径 50mm, 高さ 125mm の中実とした。また, 解凍はセル内で行い, 飽和化は B 値=0.95 以上で終了とした。

原位置の応力状態をなるべく再現するために, 有効鉛直応力 $\sigma'_{v'}$ を表-1 から算定し, 半無限地盤を想定することから静止土圧係数を $K_0=0.5$ と仮定した。三軸試験では平均有効主応力 $\sigma'_{m'}$ で等方圧密し, ねじり試験では軸応力を $\sigma'_{v'}$ に有効側方応力を $K_0 \sigma'_{v'}$ で異方圧密した後, 所定の載荷を行っている。また, ねじり試験では, 中実供試体断面の載荷トルクに寄与する面積の効果を考慮して, 面積の重みつき単純せん断ひずみ γ_s を採用している³⁾。

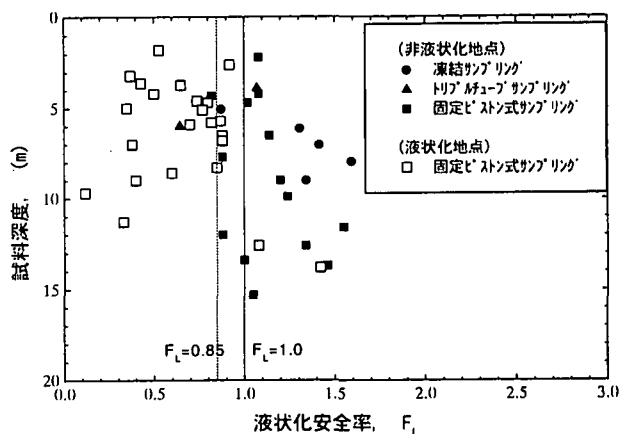


図-3 液状化安全率 F_L の深度分布

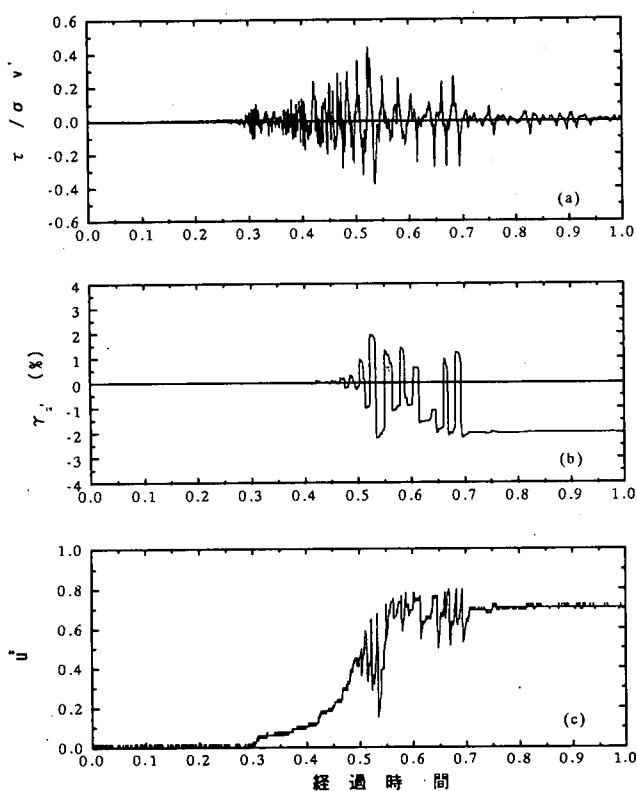


図-4 (a-c) 不規則波形下における変形挙動 (Layer No. 4)
(a. せん断応力, b. せん断ひずみ, c. 過剰間隙水圧比)

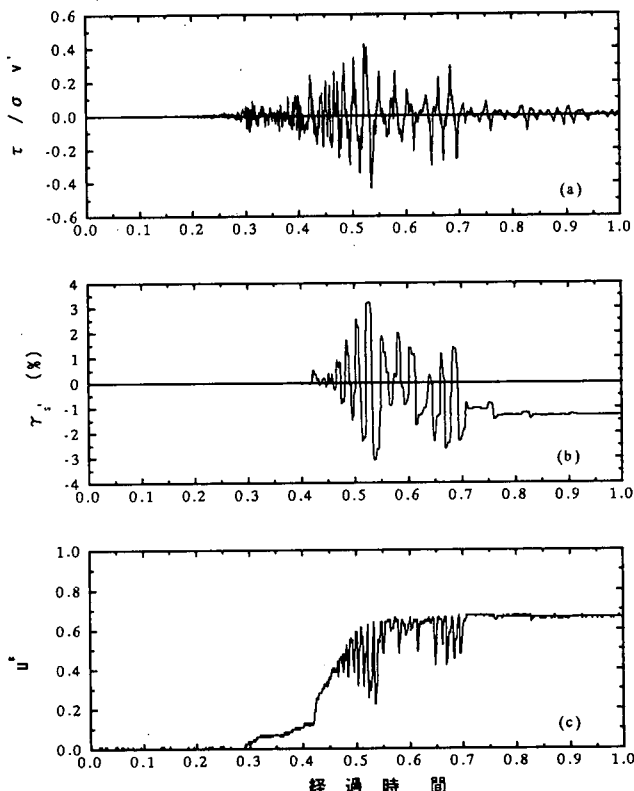


図-5 (a-c) 不規則波形下における変形挙動 (Layer No. 7)
(a. せん断応力, b. せん断ひずみ, c. 過剰間隙水圧比)

地震応答解析は現行の予測・判定法¹⁾で用いられ、広く使われている“SHAKE”を用い、基盤加速度は1993年の釧路沖地震で実際に観測された波形を使用する。

4. 結果と考察

(1) 現行法による液状化予測・判定

現行法によって求めた、凍結サンプル採取各層の液状化安全率 $F_L = R_{\max}/L_{\max}$ を表-1 に付記してある。ここで、最大せん断応力比 $L_{\max} = \tau_{\max}/\sigma'_v$ は、解析によって、各層に発生した最大せん断応力 $\tau_{\max}$ を有効上載圧 σ'_v で除して求められる。対象地盤の液状化強度比 $R_{\max}$ は、次式で与えられる。

$$R_{\max} = 0.9 \cdot \frac{(1+2K_0)}{3} \cdot \frac{1}{C_k} \cdot \frac{\tau_l}{\sigma'_c}$$

各層の液状化強度 τ_l/σ'_c に、地震波の多軸性に関する補正 (0.9) と、三軸試験の応力条件と原位置と

の応力条件の違いに関する補正を行う。また、せん断波の不規則性に関する補正を換算係数 C_k を用いて行い、 C_k は発生せん断波の波形分類から振動型で0.70、衝撃型では0.55とする。この波形の分類⁶⁾は、最大せん断応力が発生する前の波頭に着目し、 $\tau_{\max}$ 側で、 $\tau_{\max}$ の6割以上の振幅をもつ波が2つ以下しか存在しない場合を衝撃型の波とし、3つ以上存在する場合を振動型と定義している。

図-3に、同位置における既報文献^{2), 3)}の事例解析結果もあわせて F_L の深度分布を示す。凍結試料が各深度で他の試料に比べて大きな F_L 値を示している。また、深度5m付近 (層4: 表-1) で F_L が1未満になり液状化すると予測・判定されるが、その他の深度では1以上の値を示している。全プロットから判断すると、 F_L 値が0.85程度で液状化・非液状化の境界があり現行の予測・判定方法は安全率 F_L を過小評価している可能性があるといえる。

(2) 不規則波載荷による液状化予測・判定

前節では、「地震応答計算から得られた不規則せ

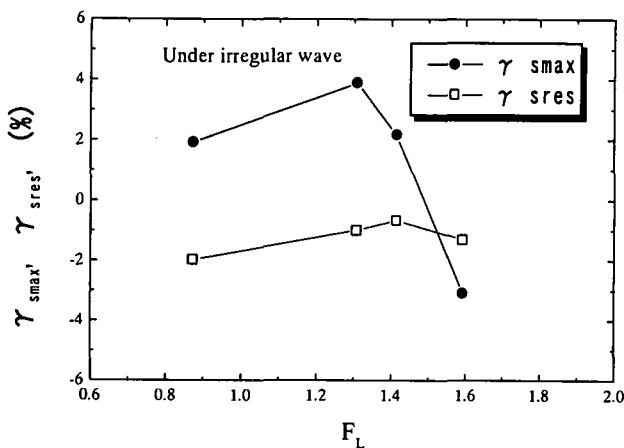


図-6 最大せん断ひずみ γ_{smax} 、残留せん断ひずみ γ_{sres} と液状化安全率 F_L

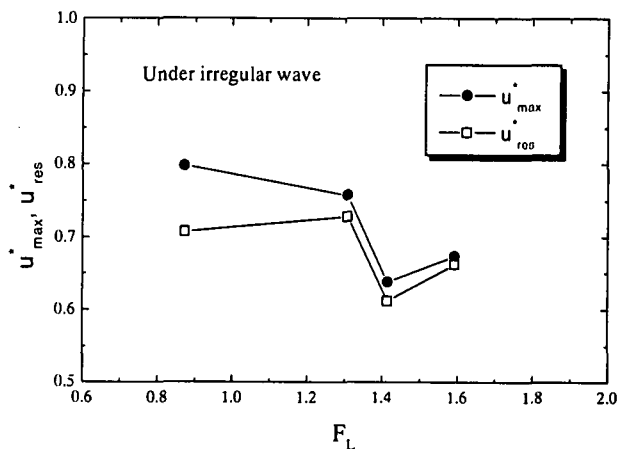


図-7 最大過剰間隙水圧比 u_{max} 、残留過剰間隙水圧比 u_{res} と液状化安全率 F_L

ん断応力波の最大値」と「規則波から得られた液状化強度」とを比較することで、液状化の予測・判定を行う方法について検討した。本節では、異方圧密後 ($K_0=0.5$) に、各層の供試体に直接、不規則波を載荷した際の変形挙動について検討する。

図-4, 5に、それぞれ、層4, 7 (表-1参照) の供試体の変形挙動を示す。経過時間は載荷継続時間で正規化してある。いずれも最大せん断応力の発生に伴い、ほぼせん断ひずみ γ_s も最大値を示すが、初期平均有効主応力で正規化した過剰間隙水圧比 u^* のピークはそれにやや遅れて発生している。

図-6は、発生した最大せん断ひずみ γ_{smax} および残留せん断ひずみ γ_{sres} と F_L 値との関係を示しており、生じたひずみ量は大きいもので4%程度である。また、図-7は最大発生過剰間隙水圧比 u_{max}^* および残留水圧比 u_{res}^* と F_L 値との関係を示している。図から、 F_L 値が0.87の層4においても、ひずみは生じているものの、最大値 u_{max}^* が0.80未満で完全な液状化には至っていない。また、 F_L 値の増大に伴って水圧比 u_{max}^* 、 u_{res}^* は減少していることが分かる。

以上のことから、不規則波を直接載荷した結果から、原位置の観測結果と同様、この解析対象層はいずれも非液状化と予測される。

5. 結論

凍結試料を用いた液状化の事例解析を行った結果、以下のような結論が得られた。

- 1) 本報告で用いた液状化予測・判定方法では、液状化安全率 F_L 値が0.85程度以上であれば液状化していないことから、安全率を過小評価している可能性がある。
- 2) 地震応答計算で得られたせん断応力の不規則波形を供試体に直接載荷することによって、精度良く非液状化地盤の予測・判定を行うことができた。さらに液状化地盤の事例解析の実施、不規則波下における液状化の明確な定義を行う必要があると思われる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、北海道開発局をはじめ関係各方面の方々、現運輸省第一港湾建設局の佐渡氏、また、本研究室の成田氏の協力を頂き、末筆ながら謝意を表します。

参考文献

- 1) 「埋立地の液状化対策ハンドブック」、運輸省港湾局、(財)沿岸開発技術研究センター。
- 2) 善 功企, 山崎浩之, 館下 徹, 佐渡篤史: 凍結サンプルを用いた液状化予測のケーススタディ, 第30回土質工学研究発表会, pp.985-986, 1995。
- 3) 善 功企, 梅原靖文, 山崎浩之: 振動三軸法による液状化・非液状化地盤の事例解析, 港湾技研資料, No.623, 1988。
- 4) 上田 茂 他: 1993年釧路釧路沖地震港湾施設被害報告, 港湾技研資料, No. 766, 1993。
- 5) 香川和夫, 福島伸二, 望月美登志: 中空及び中実供試体を用いた砂の非排水繰返しねじり単純せん断試験, 土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム, 土質工学会, pp. 75-78, 1988。
- 6) Ishihara, K. and Yasuda, S.: Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation, Soils and Foundations, Vol.15, No.1, pp.45-59., 1975。