

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.49 No.3 September 2010

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 49 卷 第 3 号 (Vol. 49, No. 3), 2010年9月 (September 2010)

目 次 (CONTENTS)

微小溶存酸素分布を比較対象とした摩擦速度推定手法の評価 —底面境界層における乱流と溶存酸素の同時観測— ……………井上徹教・Ronnie N. GLUD・Henrik STAHL・Andrew HUME …… 3 (Assessment of shear velocity determinations referring DO microprofiles - Simultaneous field observation of turbulence and DO in the benthic boundary layer - …………… Tetsunori INOUE, Ronnie N. GLUD, Henrik STAHL, Andrew HUME)	
アマモ分布域の拡大とそれを支える種子散布 ……………細川真也・仲岡雅裕・三好英一・桑江朝比呂 …… 31 (Seed dispersal supporting areal expansion of meadow in the seagrass, <i>Zostera marina</i> L. …………… Shinya HOSOKAWA, Masahiro NAKAOKA, Eiichi MIYOSHI, Tomohiro KUWAE)	
網チェーン把持装置によるブロック撤去及びその把持モデルの開発 ……………野口仁志 …… 51 (Block Removal Using Holding Device with a Chain Net and its Modeling ……………Hitoshi NOGUCHI)	
地震動波形の影響を考慮した液状化の予測・判定に関する提案 ……………山崎浩之・江本翔一 …… 79 (Study on Liquefaction Prediction Method Considering Wave Forms of Seismic Motions …………… Hiroyuki YAMAZAKI, Shouichi EMOTO)	
波形インバージョンにより推定された最近のわが国における内陸地殻内地震の震源過程 ……………野津厚 ……111 (Rupture Process of Recent Crustal Earthquakes in Japan Estimated by Waveform Inversion ……………Atsushi NOZU)	
多チャンネル型表面波探査に基づいた干潟土砂堆積構造の評価 ～せん断波速度構造の考察と人工干潟安全管理手法の提案～ ……………渡部要一・佐々真志・桑江朝比呂・梁順普・田中政典 ……157 (Evaluation of intertidal flat stratigraphy by MASW technology — Interpretation of shear wave velocity structure and safety assessment of artificial intertidal flats — ……………Yoichi WATABE, Shinji SASSA, Tomohiro KUWAE, SoonBo YANG, Masanori TANAKA)	

地震動波形の影響を考慮した液状化の予測・判定に関する提案

山崎 浩之*・江本 翔一**

要 旨

砂の液状化現象は地盤の密度や作用する繰返しせん断応力の大きさおよびその波形に影響される。本研究では地震波形の違いが液状化抵抗にどの程度影響するかを、11種類の不規則波形を用いて、ねじりせん断試験、単純せん断試験により調べている。そして、不規則波に関して有効波数というものを定義し、荷重の不規則性が液状化抵抗におよぼす影響を調べている。特に、正弦波載荷から得られる液状化抵抗を不規則波載荷における液状化抵抗に換算するために用いられている不規則波に対する補正係数について考察し、有効波数を用いて補正係数を求める実験式を提案している。さらに、港湾基準における粒度・N値法による液状化の予測判定法において荷重の不規則性の影響を考慮するために波形補正係数を提案し、これについて液状化・非液状化事例を用いた事例解析を行い、波形補正を行った粒度・N値法の適用性を確認している。

キーワード：液状化抵抗，不規則波，粒度・N値法，液状化試験，事例解析

* 地盤・構造部地震防災研究領域長

** 地盤・構造部地震防災研究領域動土質研究チーム研究員

Study on Liquefaction Prediction Method Considering Wave Forms of Seismic Motions

Hiroyuki YAMAZAKI *
Shouichi EMOTO **

Synopsis

Liquefaction resistance is influenced by the waveform of cyclic stresses as well as the magnitude of the stresses. In this study the effect of the waveform on the liquefaction resistance is investigated by the torsion shear test and the simple shear test using 11 kinds of waveforms. The effect of the waveform on the liquefaction resistance is analyzed by the number of effective waves N_{ef} which is newly defined to quantify the irregular waveform. The empirical equation to obtain the correction factor c_2 which converts the liquefaction resistance under sinusoidal wave loads to that under irregular wave loads is proposed using the N_{ef} . And the correction factor for wave forms c_a is also proposed using the N_{ef} in order to consider the waveform effect in the liquefaction prediction which is the grain distribution and N-value method in the port and harbour facility design code. The proposed method is validated with the liquefaction and non-liquefaction cases in past earthquake events.

Key Words: liquefaction resistance, waveform, liquefaction prediction, case study, liquefaction test.

* Director of Earthquake Disaster Prevention Engineering Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Member of Soil Dynamics Group, Earthquake Disaster Prevention Engineering Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-8445054 Fax : +81-46-8440618 e-mail:yamazaki@pari.go.jp

目 次

要 旨	79
1. まえがき	83
2. 液状化試験の方法	83
2.1 試料と試験装置	83
2.2 中空ねじり試験	83
2.3 単純せん断試験	83
2.4 载荷波形	83
3. 試験結果	85
3.1 液状化の定義	85
3.2 液状化抵抗	85
3.3 不規則波に対する補正係数	87
4. 考察	88
4.1 有効波数	88
4.2 不規則波に対する補正係数と有効波数, 相対密度の関係	89
4.3 粒度・N値法への波形の影響の導入	91
4.4 波形補正係数についての考察	93
5. 波形補正係数の検証	94
5.1 1983年日本海中部地震（秋田港）	95
5.2 1993年釧路沖地震（釧路港）	98
5.2 1995年兵庫県南部地震（神戸ポートアイランド）	99
5.4 2003年十勝沖地震（十勝港）	100
5.5 2009年駿河湾地震（御前崎港）	101
5.6 事例解析のまとめ	102
6. 結論	103
7. あとがき	103
参考文献	103
付録A	104
付録B	104

1. まえがき

液状化抵抗は、繰返しせん断応力の大きさだけでなく、波形（不規則性）に影響されることが示されている^{1)~6)}。港湾基準では地震動が港湾ごとに設定されることになり、港湾ごとに地震波形は異なるものとなった⁷⁾。しかし、液状化の予測判定で用いられている、粒度・N値法には波形の影響は考慮されておらず、外力については地震応答計算結果から得られる最大せん断応力比のみで液状化発生の有無が判断される⁸⁾。このような背景から本研究では、繰返しせん断応力の波形がどの程度液状化の発生に影響するかを、ねじりせん断試験と単純せん断試験を行って調べている。そして、波形の影響を定量化し、粒度・N値法に波形の影響を考慮する方法を提案することを目的としている。

そこで、以下のような流れで検討を行った。

- ①室内要素試験（中空ねじり試験，単純せん断試験）により，11種類の不規則波を用いた液状化試験および正弦波を用いた液状化試験を実施した。
- ②正弦波載荷と不規則波載荷での液状化抵抗を関連付ける係数として研究されてきた不規則波に対する補正係数について，①での試験結果を用いた考察を行った。
- ③不規則波載荷での液状化抵抗と各波形との関係を定量的に表現するために，不規則波の波形を定量化する有効波数というものを②の結果を利用して提案した。
- ④そして，有効波数を用いて波形補正係数を新たに提案し，粒度・N値法で用いている判定チャートを波形に応じて補正する方法を提案した。
- ⑤実際の地震での液状化・非液状化事例のケーススタディを行い，④で提案した方法の検証を行った。

2. 液状化試験の方法

2.1 試料と試験装置

試料は相馬砂6号で，土粒子密度は $\rho_s=2.64\text{g/cm}^3$ ，最大間隙比 $e_{\max}=1.20$ ，最小間隙比 $e_{\min}=0.71$ である。また，粘土についても1ケースだけ試験を行っており，試料は川崎粘土で， $w_L=50.8\%$ ， $w_p=27.0\%$ ， $I_p=23.8$ ， $\rho_s=2.662\text{g/cm}^3$ ，粘土分37.3%，シルト分49.4%である。

試験装置は，中空ねじり試験装置，単純せん断試験装置の2種類を用いた。

2.2 中空ねじり試験

用いた中空ねじり試験装置は，高さ7cm，外径7cm，内径3cmの供試体に対して試験が出来る小型と，高さ10cm，

外径10cm，内径6cmの供試体に対して試験が出来る中型の2台である。小型装置を用いて，相馬砂を用いたシリーズT-1と粘土を用いたシリーズT3，中型装置を用いてシリーズT-2の3シリーズが行われた。

シリーズT-1では，まずモールド内に所定の密度となるように空中落下法で試料の落下高さを調整して供試体を作製している。その後，供試体を浸潤させ，乱さないために凍結を行い，供試体を装置にセットし解凍した。密度は相対密度が $D_r=50, 65, 80, 90\%$ の4種類である。

シリーズT-2では，試験装置にセットされたモールド内に乾燥砂をスプーン等で投入し，モールド側面を打撃して，所定の密度の供試体を作製している。供試体の相対密度は $D_r=50\%, 65\%, 80\%$ の3種類である。

両シリーズとも，間隙係数B値が95%以上になるまで供試体の飽和化を行い，その後圧密圧力が $\sigma_{m0}'=98\text{kN/m}^2$ で等方圧密を行った。圧密終了後，非排水状態でねじりせん断応力を所定の波形で載荷した。

シリーズT-3では，まず，スラリー状にした初期含水比が65%の川崎粘土を，直径30cmの予備圧密試験装置の中で初期高さ約25cmの状態から圧密した。予備圧密は，ロッド自重，10，20，50kN/m²の4段階の上載圧力で最終的に50kN/m²で圧密を行っている。圧密終了の確認は3T法で行っている。圧密終了時間は荷重段階で異なり，100～3000minであった。予備圧密終了後，直径10cmの粘土試料を切り出し，外径7cm，内径3cm，高さ7cmの供試体に成形した。成形後，供試体を装置にセットし，圧密圧力が $\sigma_{m0}'=98\text{kN/m}^2$ で等方圧密を行った。圧密終了後，非排水状態でねじりせん断応力を所定の波形で載荷した。

2.3 単純せん断試験

単純せん断試験装置は高さ4cm，直径10cmの供試体に対して試験が出来るものである。供試体は，1枚4mmのアルミ製リングを10枚積み重ねた，層状のリング内に作製される。この装置によりシリーズSが行われた。

シリーズSでは，リング内に乾燥状態の試料をスプーン等で投入しながらリング側方を打撃し，所定の密度の供試体を作製した。密度は相対密度が $D_r=40, 50, 65, 80\%, 90\%$ の5種類である。供試体作製後，鉛直応力が $\sigma_{v0}'=98\text{kN/m}^2$ の K_0 状態の圧密を行った。圧密終了後，鉛直変位が発生しないように鉛直載荷板を固定し，等体積条件で所定の波形を載荷した。

2.4 載荷波形

表-1の試験ケース一覧で示すように，試験で使用した波形は正弦波と，相対密度により異なるが，シリーズT-1

では不規則波1~5, シリーズT-2では不規則波6~10, シリーズT-3では不規則波1~4, シリーズSでは不規則波6~11で, 11種類の不規則波形を用いた. 用意した不規則波形は継続時間が大幅に異なるものであるが, 実際の地震での現象は基本的には非排水せん断であると考え, 前述の試験も非排水条件あるいは等体積条件で行っている. したがって, 後述の試験結果の整理も载荷時間に関してではなく, 载荷波数に着目して行っている.

図-1には不規則波1~11の波形を示す. なお, 試験では荷重の制御を正確に行うために, 载荷波形の時間軸を長くして行ったが, 载荷波形は必ずしも正確に供試体にはかからず, 供試体で計測された波形は試験ごとに若干異なっていた.

表-1 試験ケース一覧

シリーズ	試験法	供試体作成	試料	相対密度・Dr, 塑性指数: Ip		RL ₂₀	载荷波形
				Dr	Ip		
T-1	中空ねじり非排水	空中落下→浸潤→凍結→装置にセット	相馬珪砂	Dr=50%	0.163		不規則波1~4, 正弦波
				Dr=65%	0.186		
				Dr=80%	0.220		
T-2	中空ねじり非排水	乾燥砂投入打撃	相馬珪砂	Dr=50%	0.178		不規則波1~5, 正弦波
				Dr=65%	0.242		
				Dr=80%	0.348		
T-3	中空ねじり非排水	スラリー→予備圧密	川崎粘土	Ip=23.8	0.321		不規則波1~4, 正弦波
S	単純せん断等体積	乾燥砂投入打撃	相馬珪砂	Dr=40%	0.117		不規則波6~8, 正弦波
				Dr=50%	0.123		
				Dr=65%	0.155		
				Dr=80%	0.176		
				Dr=90%	0.283		不規則波6~10, 正弦波

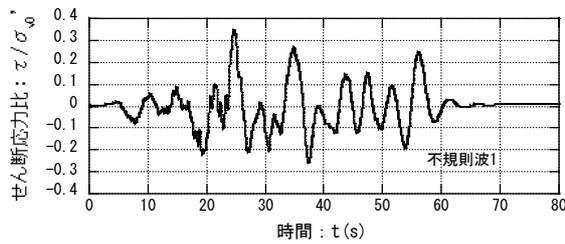


図-1(a) 不規則波 1

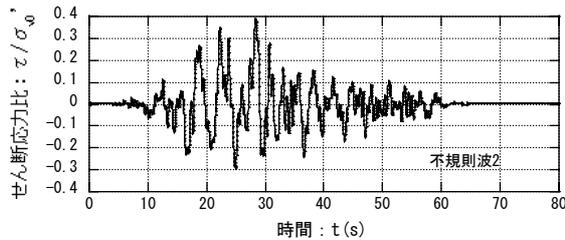


図-1(b) 不規則波 2

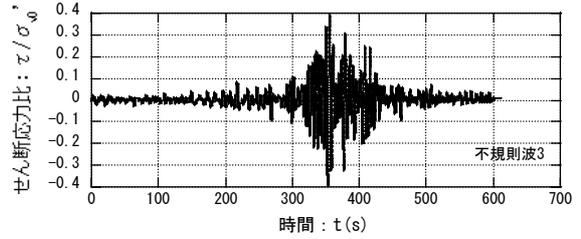


図-1(c) 不規則波 3

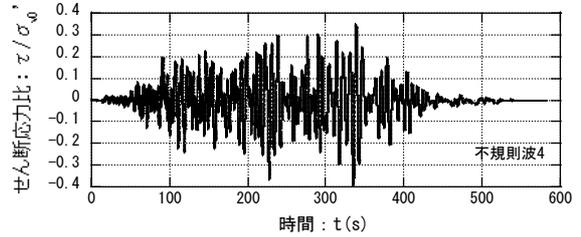


図-1(d) 不規則波 4

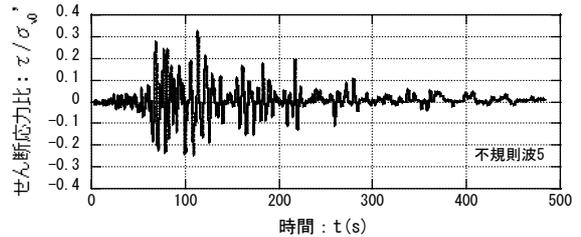


図-1(e) 不規則波 5

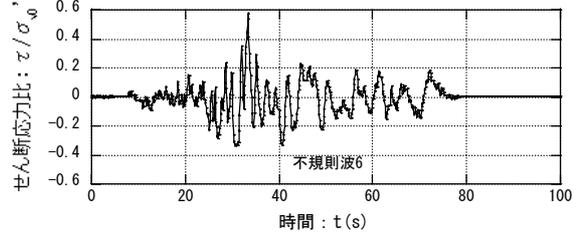


図-1(f) 不規則波 6

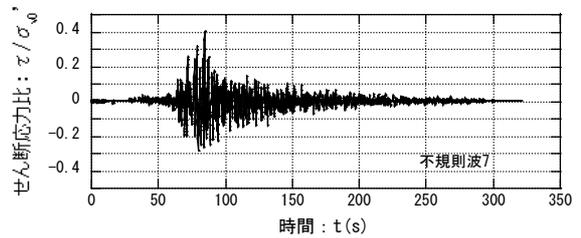


図-1(g) 不規則波 7

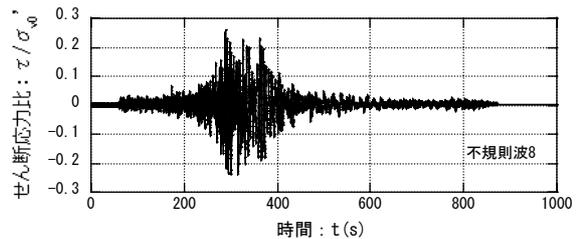


図-1(h) 不規則波 8

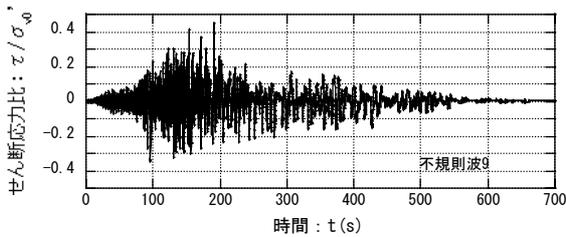


図-1(i) 不規則波 9

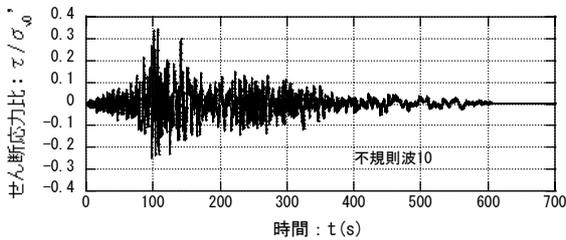


図-1(j) 不規則波 10

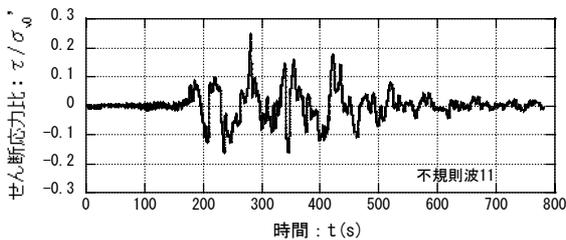


図-1(k) 不規則波 11

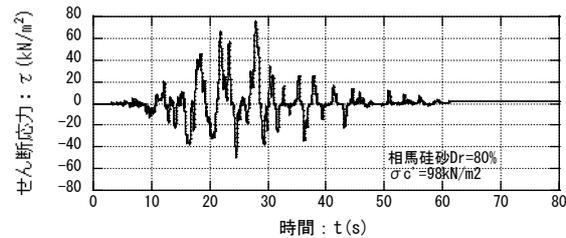


図-2(a) せん断応力の時刻歴 (T-1 不規則波 2)

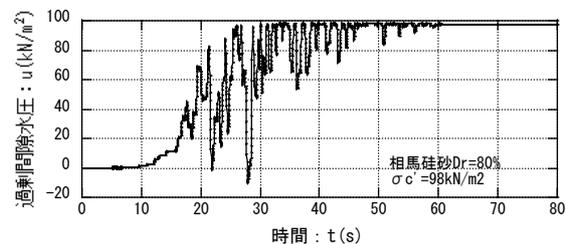


図-2(b) 過剰間隙水圧の時刻歴

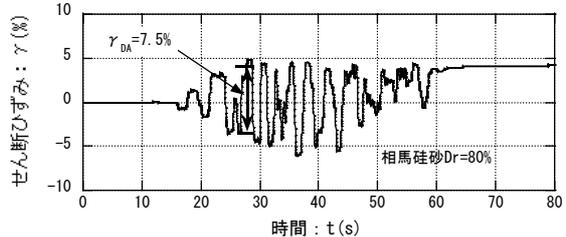


図-2(c) せん断ひずみの時刻歴

3. 試験結果

3.1 液状化の定義

図-2に、シリーズT-1での不規則波2の場合のせん断応力の時刻歴と载荷により発生した過剰間隙水圧、せん断ひずみの時刻歴の一例を示す。

図-2から载荷にともない過剰間隙水圧が上昇し、せん断ひずみが発生していくことがわかる。

液状化の定義は両振幅せん断ひずみが、 $\gamma_{DA}=7.5\%$ になったときとした。図-2の例の場合には、約27秒で $\gamma_{DA}=7.5\%$ の両振幅せん断ひずみが発生しており、液状化したことになる。また、このとき過剰間隙水圧は拘束圧の $\sigma'_{m0}=98\text{kN/m}^2$ に達している。

3.2 液状化抵抗

図-3に正弦波試験での繰返しせん断応力比と液状化に至るまでの繰返し回数： N_c の関係（液状化抵抗曲線）を示す。液状化抵抗の定義は、正弦波を用いた試験の場合には図-3において繰返し回数が $N_c=20$ 回で液状化するときの繰返しせん断応力と初期有効鉛直応力（軸応力）の比： $R_{L20} (= \tau_c/\sigma'_{v0})$ で定義した。

不規則波の場合には各不規則波試験において最大せん断応力比の値を変えた試験を行い、図-4に示すように、最大せん断応力比と発生した両振幅せん断ひずみの関係を求めておき、 $\gamma_{DA}=7.5\%$ に対応する最大せん断応力比 τ_{max}/σ'_{v0} で定義し、不規則波での液状化抵抗： R_{Lmax} とした。

正弦波での液状化抵抗： R_{L20} については、表-1に相対密度ごとに示す。

不規則波での液状化抵抗 R_{Lmax} については、図-5に有効波数 N_{ef} との関係で示す。有効波数とは、各不規則波の波形を定量的に評価する量で、定義および物理的意味については4章で後述する。図-5の実線は相対密度ごとに液状化抵抗と有効波数の関係を累乗関数で近似したもので、また破線は4章で示す提案式の関係である。図-5から有効波数が大きくなると液状化抵抗は低下し、また相対密度が小さいものほど小さくなっている。

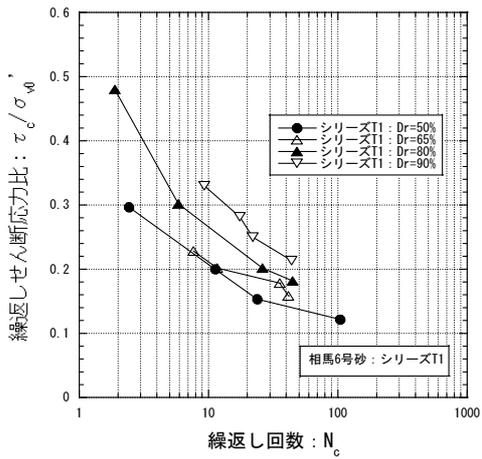


図-3(a) 液状化抵抗曲線 (シリーズ T-1)

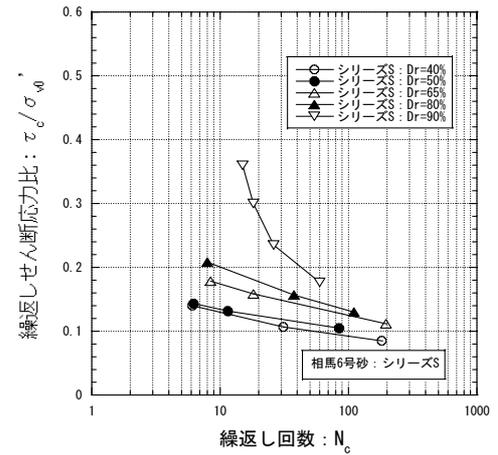


図-3(d) 液状化抵抗曲線 (シリーズ S)

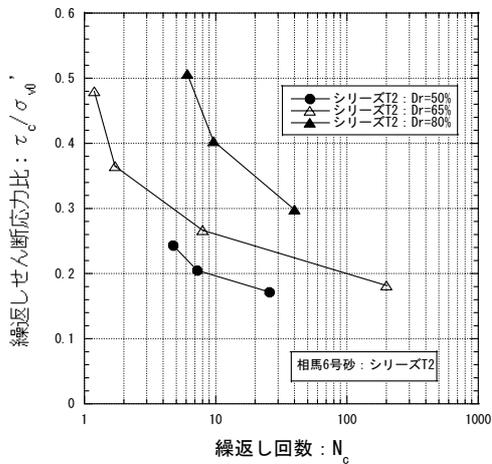


図-3(b) 液状化抵抗曲線 (シリーズ T-2)

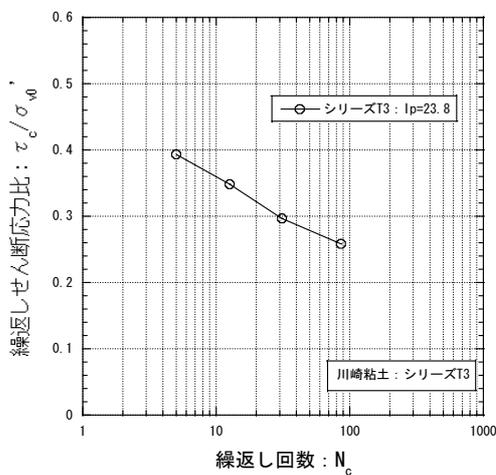


図-3(c) 液状化抵抗曲線 (シリーズ T-3)

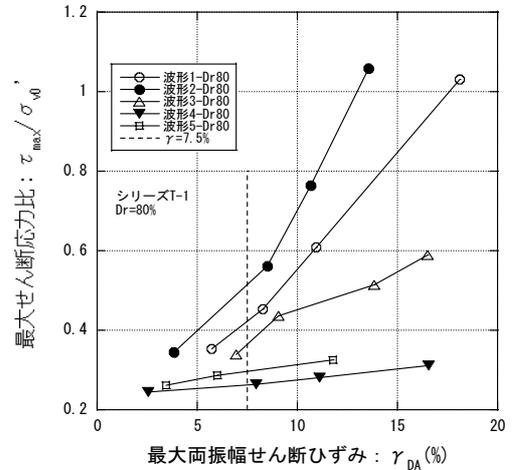


図-4 最大せん断応力比と最大両振幅せん断ひずみ

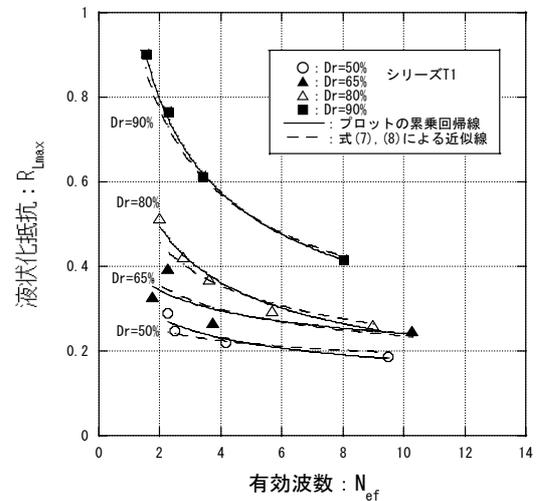


図-5(a) 液状化抵抗と有効波数 (シリーズ T-1)

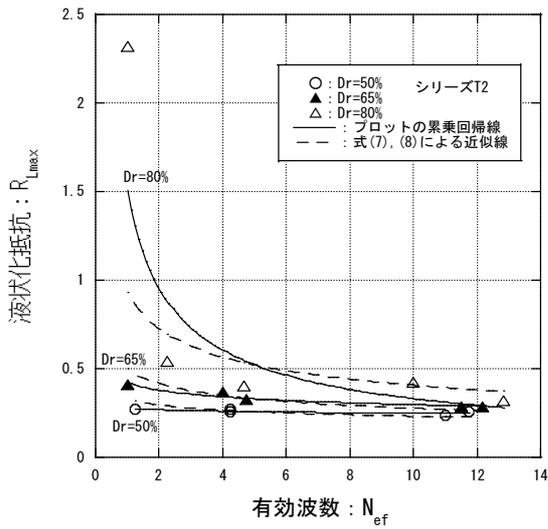


図-5(b) 液状化抵抗と有効波数 (シリーズ T-2)

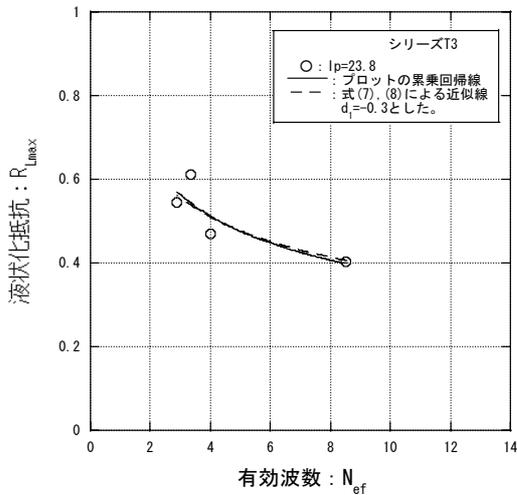


図-5(c) 液状化抵抗と有効波数 (シリーズ T-3)

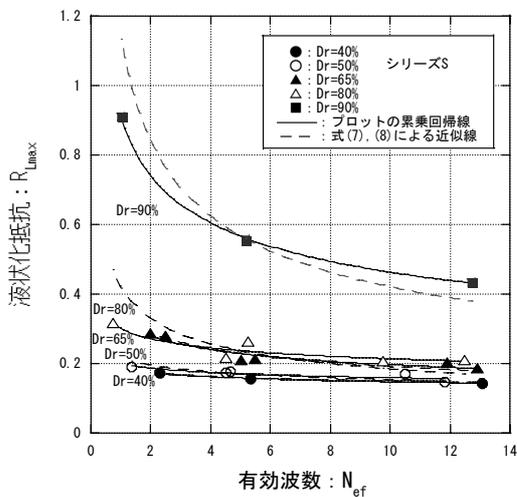


図-5(d) 液状化抵抗と有効波数 (シリーズ S)

3.3 不規則波に対する補正係数

不規則波に対する補正係数： c_2 は正弦波での液状化抵抗と不規則波での液状化抵抗を関連づける係数で、次式で定義されているものである(例えば²⁾。

$$c_2 = \frac{R_{Lmax}}{R_{L20}} \quad (1)$$

ここに、 c_2 は不規則波に対する補正係数、 R_{Lmax} は不規則波での液状化抵抗、 R_{L20} は正弦波での液状化抵抗である。

図-6は各試験で得られた c_2 と相対密度の関係である。また、粘土については相対密度が定義できない。そこで、粘土の試験結果(シリーズT-3)については、 c_2 が最大となった不規則波3の $c_2=1.9$ を太破線で、最小となった不規則波5の $c_2=1.25$ を太実線で図-6中に示しておく。

図-6から相対密度が同じでも、 c_2 は波形により異なった値になっている。相対密度が50%では c_2 は1.1~1.7の範囲であるが、80%になると0.9~2.3の範囲になり、密度が大きくなるほど、波形の影響を受けやすくなる。また、粘土については、 c_2 は1.25~1.9の範囲にあり、相対密度が $D_r=70\%$ の砂と同程度の結果になっている。

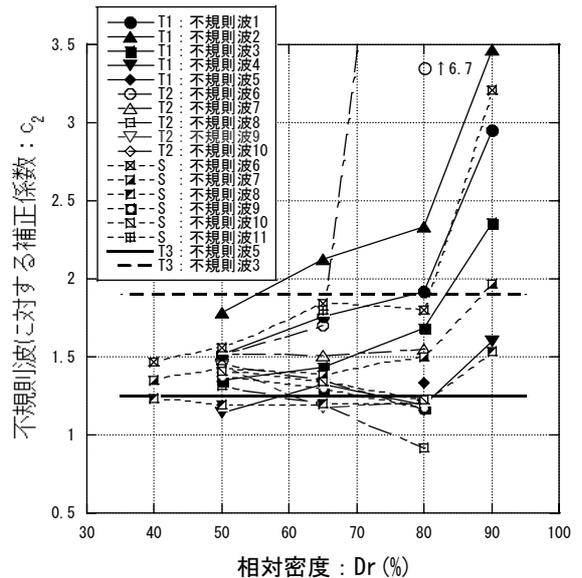


図-6 c_2 と相対密度の関係

4. 考察

液状化抵抗は作用する不規則波の波形に大きく依存し、不規則波に対する補正係数 c_2 は大きくばらつくことを前章で示した。ここでは、有効波数というものを考え不規則波の波形を定量的に評価することを試みる。そして、 c_2 と有効波数の関係を調べる。さらに、港湾基準の粒度・N値法による液状化判定に、波形の影響を考慮する方法を提案する。

4.1 有効波数

液状化発生に関して不規則波の波形の特性を代表させるものとして有効波数というものを考え、有効波数を、**図-7**で示すように、不規則波の時刻歴において最大値に対してある割合(= β)以上の大きさを持つ半波の数の半分として定義するものとする。これは、**図-7**のような不規則波において、発生せん断応力の最大値： τ_{max} に対して $\beta \times \tau_{max}$ 以下の振幅のせん断応力は液状化の発生に関して大きな影響はないと考えたことである。次に、 β としていくつが適当であるかを調べる。

図-8は相対密度が $D_r=65\%$ の場合の c_2 と $\beta \times \tau_{max}$ 以上となる半波の数の関係を調べたもので、**図-8(a)**は横軸を線形、**図-8(b)**は対数で表示したものである。 β は、90%~10%まで10%さきみで変化させている。また、同じ不規則波でも試験(供試体)ごとに計測された波形は微妙に異なり、 $\beta \times \tau_{max}$ 以上となる半波の数は異なった値となったので、平均した値を用いている。

図-8(a)から c_2 と $\beta \times \tau_{max}$ 以上となる半波の数の関係は下に凸の関係になっている。そこで、**図-8(a)**中の曲線で示すように、各プロットを後述の式(2)と同じような累乗関数で近似しその相関係数を調べた。**図-9**は、相関係数と β の関係を、相対密度ごとに調べて整理したものである。

図-9から、相対密度が小さくなると、 β の小さいところでは相関係数は低くなっている。なお、**図-9**において相対密度が40%のプロットは相関係数が大きいのが、これは、試験数が少なかったからである。そして、**図-9**から、 β が60%あたりで相関係数はピーク値をとっていることがわかる。したがって、累乗関数で近似する場合についてはあるが、 β を60%とした場合の半波の数が、 c_2 と最も相関が高いといえる。そこで、以後、累乗関数を用いて有効波数と不規則波に対する補正係数あるいは液状化抵抗の関係を近似することを前提として、最大値の60%以上の半波の数の半分を有効波数： N_{ef} と定義する。

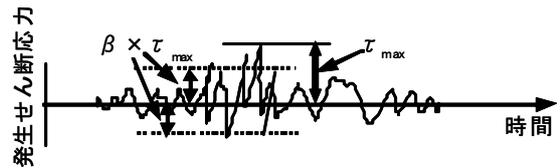


図-7 β と最大せん断応力 τ_{max}

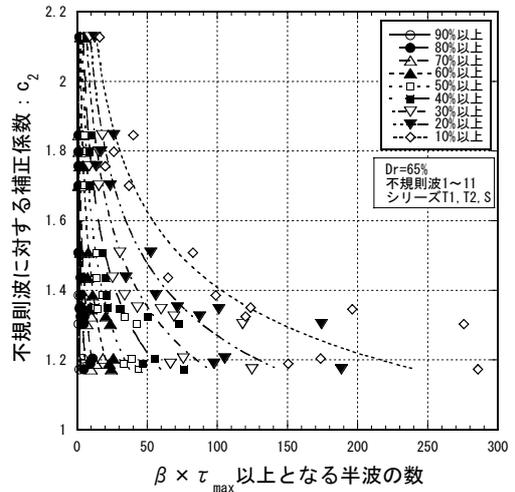


図-8 (a) c_2 と係数 β 以上となる半波の数の関係 ($D_r=65\%$) 横軸-線形表示

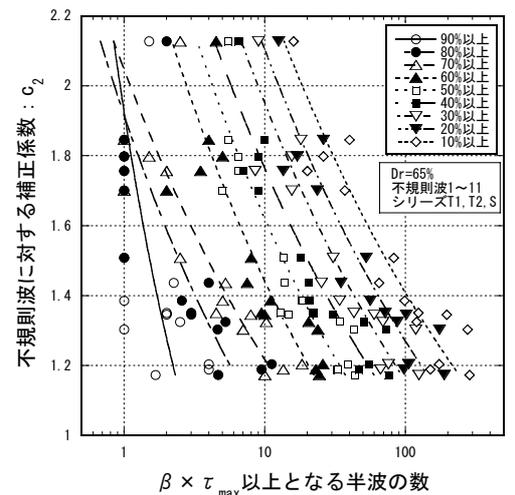


図-8 (b) c_2 と係数 β 以上となる半波の数の関係 ($D_r=65\%$) 横軸-対数表示

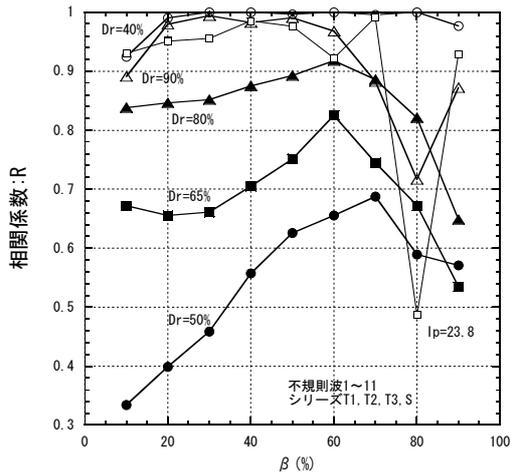


図-9 相関係数と β

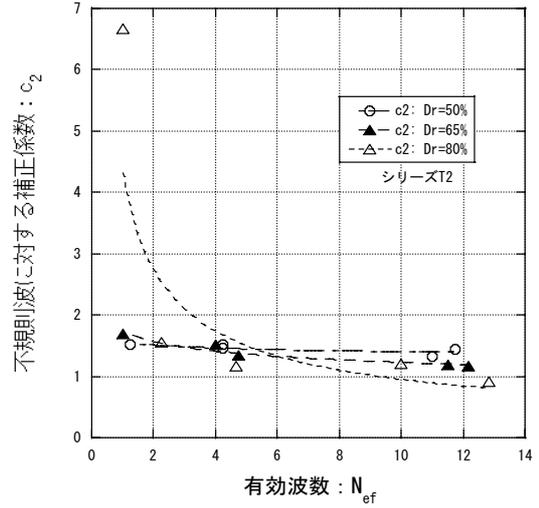


図-10(b) c_2 と有効波数 (シリーズ T-2)

4.2 不規則波に対する補正係数と有効波数、相対密度の関係

図-10は、不規則波に対する補正係数 c_2 と有効波数の関係をシリーズごとに調べたもので、相馬砂については相対密度ごとにプロットしてある。図-10中の曲線は各プロットを累乗関数で近似したものである。

図-10から、有効波数が大きくなるとともに、 c_2 は小さくなっていくことが分かる。また相対密度が大きなものほど有効波数に対する変化は大きい。

図-11は図-10の近似線を利用し、各シリーズ(シリーズT-3を除く)の相対密度ごとに有効波数が $N_{ef}=1, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5$ に対する c_2 を読みとり、 c_2 と相対密度の関係を有効波数ごとにプロットし整理したものである。

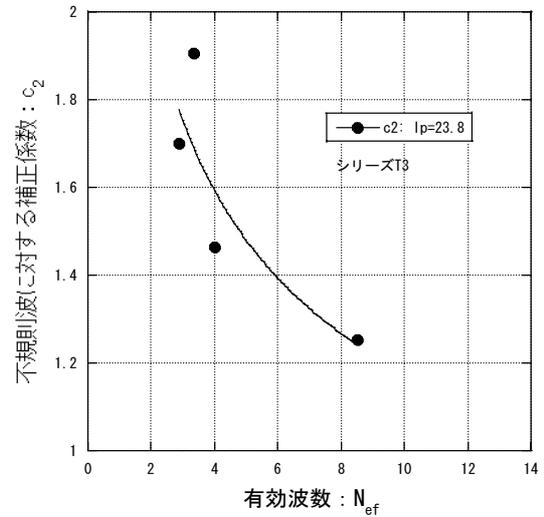


図-10(c) c_2 と有効波数 (シリーズ T-3)

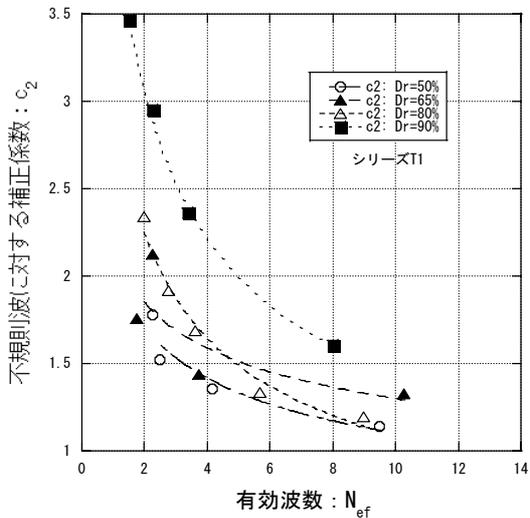


図-10(a) c_2 と有効波数 (シリーズ T-1)

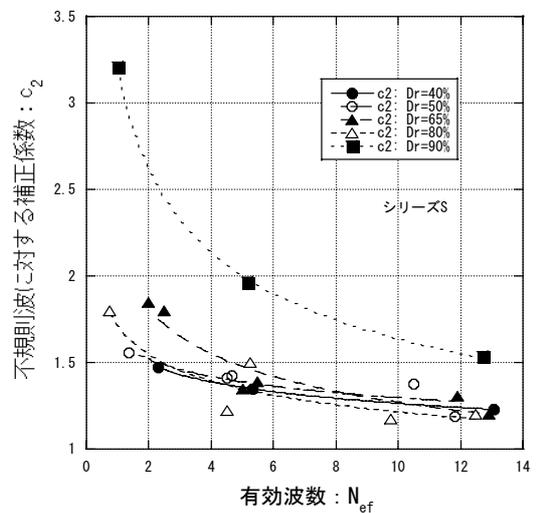


図-10(d) c_2 と有効波数 (シリーズ S)

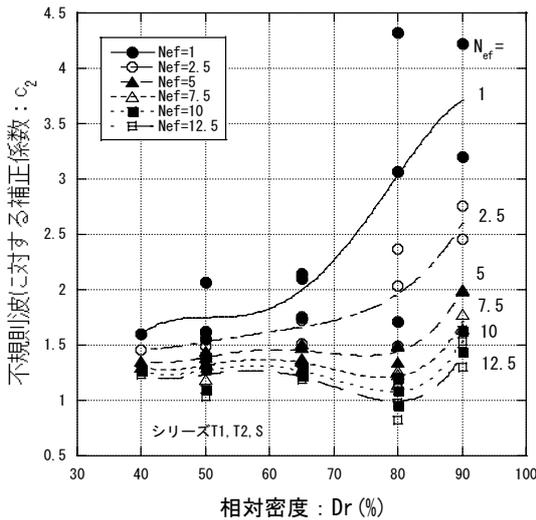


図-11 c_2 と相対密度 (シリーズ T-1, T-2, S)

図-11から、有効波数の小さい方が c_2 は大きくなり、より大きな液状化抵抗になる。 c_2 と相対密度の関係は、 $D_r=60\%$ までは N_{ef} が同じであればほぼ一定である。相対密度が $D_r=60\%$ から 80% までは、有効波数が $N_{ef}=1, 2.5$ と小さい場合には c_2 は相対密度とともに大きくなるが、 $N_{ef}=7.5\sim 12.5$ と大きい場合には c_2 は減少する傾向にある。しかし、相対密度が $D_r=80\%$ を超えると c_2 はいずれの有効波数でも増加する傾向にある。また、有効波数が小さい方がプロットのばらつきは大きくなっており、有効波数が小さい波形の方が c_2 は敏感に変わりやすいといえる。さらに、相対密度の大きなところでプロットのばらつきや有効波数の違いによる c_2 の値の差は大きくなっており、密度が高い方が波形の影響を大きく受けるようである。

他の研究と比較すると、石原¹⁾は相対密度が $D_r=55\%$ の砂に対してねじりせん断試験を行い、载荷波形を衝撃型と振動型に分け、衝撃型では $c_2=1/0.55\approx 1.8$ 、振動型では $c_2=1/0.7\approx 1.4$ を示している。図-11の結果では有効波数が小さいものが衝撃型、大きいものが振動型に相当すると考えられ、石原の結果と整合するといえる。Tatsuokaら²⁾は相対密度の異なる砂試料に対して試験を行っている。そして、相対密度が 50% 程度では衝撃型、振動型のいずれの場合も石原と同様な結果となったが、相対密度が大きくなると振動型の場合には c_2 は低下することを示している。これに対して衝撃型の場合には相対密度が大きくなると c_2 は大きくなっていき相対密度が 80% 程度で $c_2=2.6$ 程度のピークを示し、その後 c_2 は小さくなっていくという複雑な結果を示している。図-11の相対密度の増加に対する c_2 の変化は、Tatsuokaらの結果と整合していない。この原因は、Tatsuokaらの試験では相対密度が 80% を超えると規則波の液状化抵抗 R_{L20} が急激に大きくなっていく

が、本試験ではそのような結果が得られなかったからである。

したがって、密度が高い場合には、 c_2 は試験方法などで大きく変わる可能性があると思われるが、 c_2 は正弦波载荷で得られる液状化抵抗 R_{L20} と不規則波载荷での液状化抵抗 R_{Lmax} を関係づける係数である。液状化抵抗 R_{L20} は液状化に関するインデックスとして広く使用されており、有効波数 N_{ef} と c_2 の関係を、相対密度をパラメータとして定式化しておくことと不規則波の検討の際に有用と思われる。以下ではここでの試験結果を利用して、 c_2, N_{ef}, D_r の関係を求める。

図-10の各プロットを、各シリーズの相対密度ごとに次式の累乗関数により回帰した。

$$c_2 = c_{20} \cdot (N_{ef})^{c_{21}} \quad (2)$$

ここに、 c_{20}, c_{21} は図-10で示した不規則波に対する補正係数 c_2 と有効波数関係の回帰式の係数と指数である。

式(2)の c_{20}, c_{21} と相対密度 D_r の関係を調べたのが図-12である。

図-12からかなりばらつきがあるが、 c_{20}, c_{21} と相対密度 D_r の関係を線形関係の次式で近似し、図-12中の実線で示す。線形関係による近似は、図-12のプロットにばらつきがあることと、ここでの実験データは限られた条件でのものであることを考慮し、切片および勾配の有効数字は1桁になるように行った。

$$D_r \geq 2/7: \quad c_{20} = -0.2 + 4 \cdot D_r \quad (3)$$

$$c_{21} = 0.2 - 0.7 \cdot D_r \quad (4)$$

ここで、式(4)において c_{21} は正の値をとると、式(2)の c_2 と N_{ef} の関係において N_{ef} が大きくなると c_2 が大きくなるという矛盾が生じる。そこで、適用範囲を $D_r \geq 2/7$ とした。

式(2)~(4)で相対密度 D_r と対象とする不規則波の有効波数 N_{ef} が得られれば、不規則波に対する補正係数 c_2 を求めることができる。

図-13が式(2)~(4)を用いて、 D_r と c_2 の関係を有効波数 $N_{ef}=1, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5$ について求めたものである。

図-13から有効波数が小さい場合には c_2 は相対密度とともに大きくなるが、有効波数が大きい場合には減少する傾向にある。また、図-11の実測値と比較すると、相対密度が $D_r=90\%$ のところ両者に大きな違いが見られる。したがって、密度の高い場合には、式(2)~(4)による誤差は大きくなるといえる。

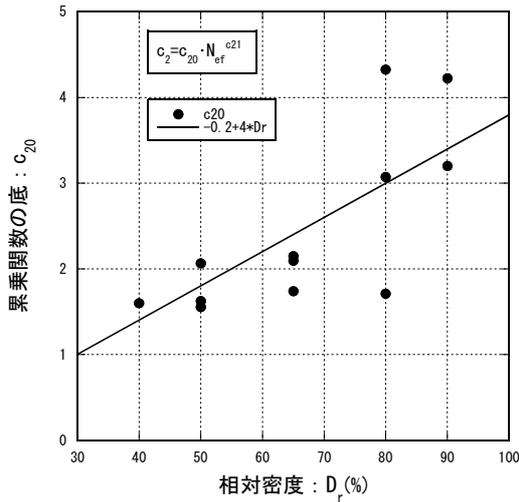


図-12(a) c_{20} と相対密度 (シリーズ T-1, T-2, S)

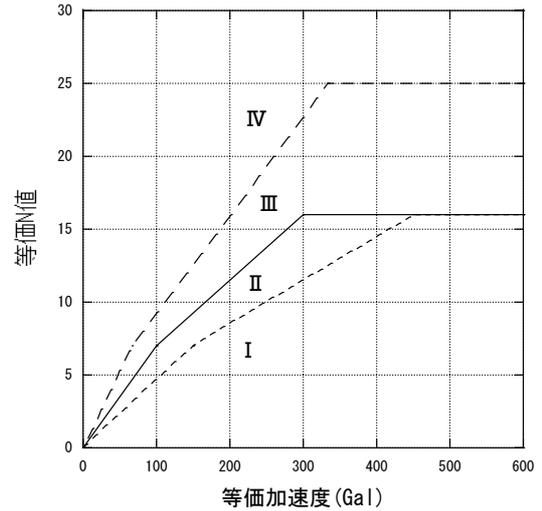


図-14 液状化の判定チャート

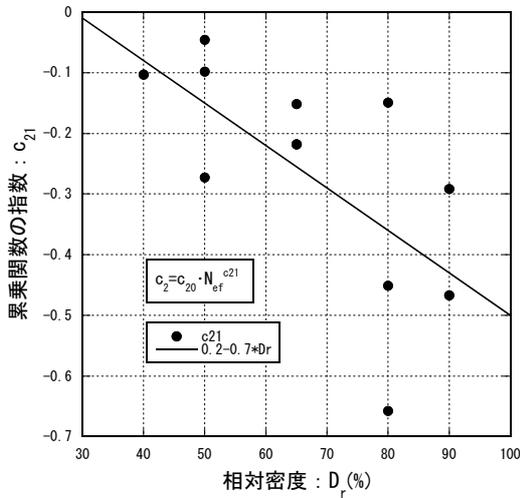


図-12(b) c_{21} と相対密度 (シリーズ T-1, T-2, S)

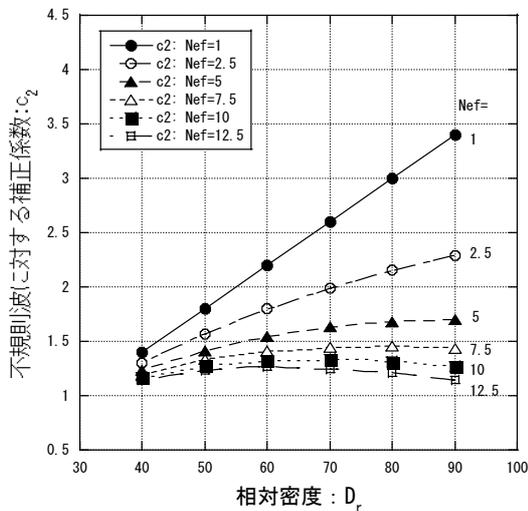


図-13 実験式による c_2 と相対密度の関係

4.3 粒度・N値法への波形の影響の導入

粒度・N値法⁸⁾では、等価加速度と等価N値を図-14の判定チャートにプロットし、プロットが図-14で示される各境界線で区切られる範囲のどこにあるかで液状化の可能性の有無を予測する。ここで、等価N値は標準貫入試験結果から求まり、等価加速度は応答計算から得られるもので、予測対象層のせん断応力の時刻歴の最大値を用いて算出されるものである。等価加速度、等価N値は次式で与えられる。

$$\alpha_{eq} = 0.7 \cdot \frac{\tau_{max}}{\sigma_{v0}'} \cdot g \quad (5)$$

$$N_{65} = \frac{N - 0.019 \cdot (\sigma_v' - 65)}{0.0041 \cdot (\sigma_v' - 65) + 1.0} \quad (6)$$

ここに、 α_{eq} は等価加速度(Gal)、 τ_{max} は応答せん断応力(k N/m²)の最大値、 σ_{v0}' は有効上載圧(k N/m²)、 g は重力加速度(980Gal)、 N_{65} は等価N値、 N は標準貫入試験N値である。なお、等価N値は細粒分含有率や塑性指数に応じて式(6)からさらに補正される。

図-14の判定チャートは過去の地震での液状化の事例から経験的に作製されたもので、地震で発生する最大せん断応力のみが考慮され、せん断応力の波形の影響は考慮されていない。以下で、波形に対する補正法を提案する。

最初に、図-14が作成された過去の地震での有効波数がどの程度であったかを調べる。図-14の提案は、主に1983年日本海中部地震での秋田港での液状化・非液状化事例

に基づいて行われたものである⁹⁾。そこで、再度、1983年日本海中部地震での秋田港での応答計算を行い、秋田港での各地点の有効波数を調べた。

図-15が、得られた有効波数で、有効波数は深度方向に分割した土層ごとに得られているので、各土層を番号で表記し土層番号に対してプロットした。図-15から、有効波数は3~7の間に分布し、平均的には $N_{ef}=5$ であったといえる。したがって、図-14のチャートの境界線は、 $N_{ef}=3\sim7$ の地震動に対して液状化の有無を予測すると考えられ、以降ではチャートの境界線の有効波数は平均値の $N_{ef}=5$ に相当していたものとし、考察を進める。

まず、図-5において有効波数 $N_{ef}=5$ に対応する液状化抵抗 R_{Lmax5} を求め、図-5の液状化抵抗 R_{Lmax} を R_{Lmax5} で除して液状化抵抗比 R_{Lmax}/R_{Lmax5} と N_{ef} の関係を求める。図-16が得られた R_{Lmax}/R_{Lmax5} と N_{ef} の関係である。そして、図-16の関係を相馬砂のシリーズT-1、T-2、Sについて相対密度ごとに累乗関数で近似し、近似式の指数を相対密度との関係で調べたのが図-17である。

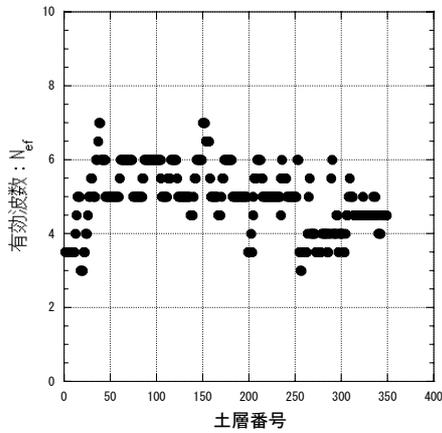


図-15 1983年日本海中部地震(秋田港)での有効波数

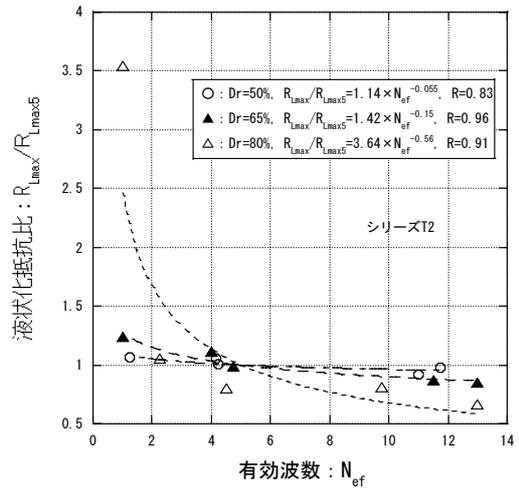


図-16(b) 液状化抵抗比と有効波数 (シリーズ T-2)

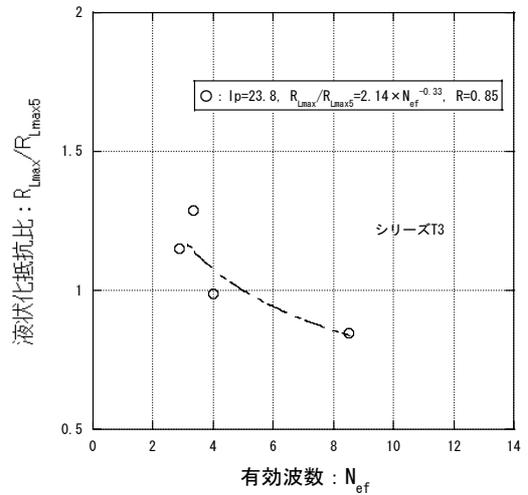


図-16(c) 液状化抵抗比と有効波数 (シリーズ T-3)

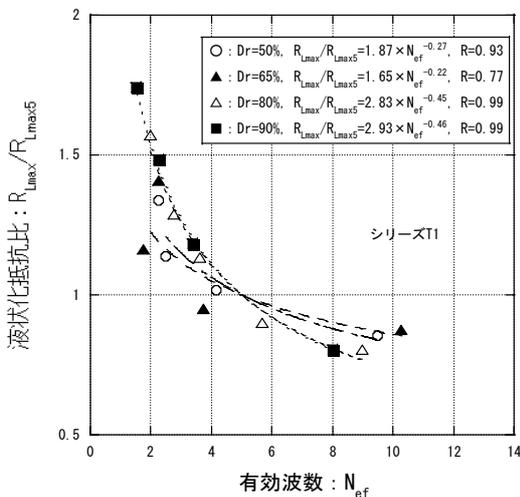


図-16(a) 液状化抵抗比と有効波数 (シリーズ T-1)

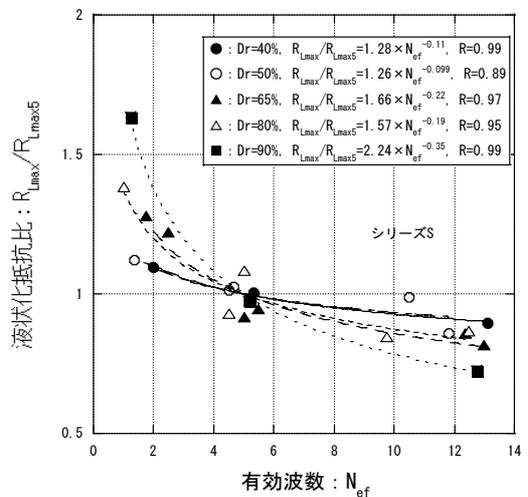


図-16(d) 液状化抵抗比と有効波数 (シリーズ S)

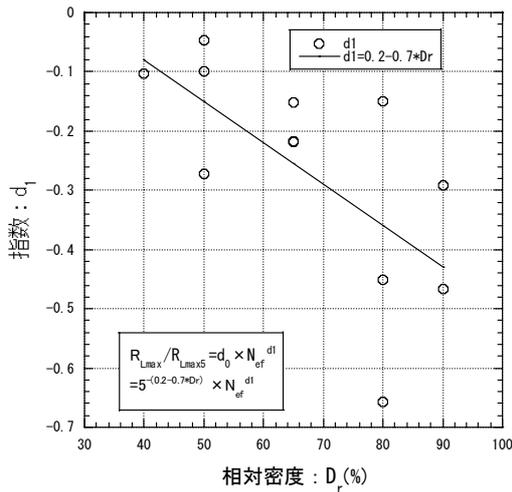


図-17 指数 d_1 と相対密度 D_r (シリーズ T-1, T-2, S)

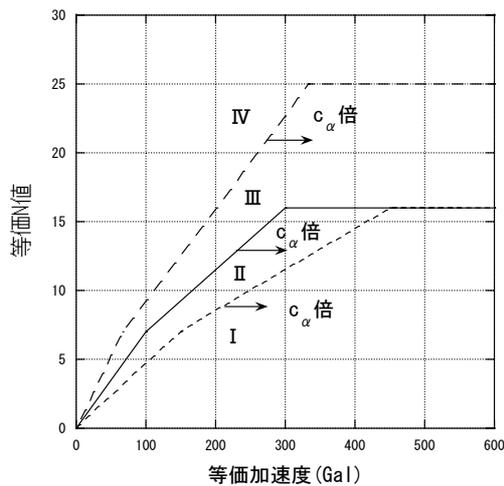


図-18 液状化の判定チャート

図-17の関係から、 R_{Lmax}/R_{Lmax5} と N_{ef} の関係は式(7)、(8)の関係で得られ、液状化抵抗比 R_{Lmax}/R_{Lmax5} を波形補正係数： c_α と呼ぶことにする。

$$\frac{R_{Lmax}}{R_{Lmax5}} = 5^{-d_1} \cdot N_{ef}^{d_1} \equiv c_\alpha \quad \left(D_r \geq \frac{0.2}{0.7} \right) \quad (7)$$

$$d_1 = 0.2 - 0.7 \cdot D_r \quad (8)$$

ここに、 d_1 は波形補正係数 c_α と有効波数 N_{ef} を累乗関数で関連づける指数で、相対密度 D_r に応じて定まる。式(7)の係数は $N_{ef}=5$ で $R_{Lmax}/R_{Lmax5}=1$ を満たす必要があるので、 5^{-d_1} となる。また、式(7)は $D_r < 0.2/0.7$ では d_1 が正の値をとり、有効波数が大きくなると液状化抵抗が増加するという矛盾した結果を与えるので、 $D_r \geq 0.2/0.7 \approx 0.29$ が適用範囲である。 $D_r < 0.29$ と非常に緩い状態においては $c_\alpha=1$ とす

る。式(7)、(8)で波形補正係数を求めるためには相対密度が必要となるが、相対密度の実測値がない場合には N 値などを用いた経験式で推定する必要がある。

ここで、式(7)の波形補正係数 c_α は、有効波数 $N_{ef}=5$ の波形の液状化抵抗に対する任意の有効波数の波形の液状化抵抗の比である。したがって、粒度・ N 値法による液状化判定において波形の影響を考慮する場合には、図-14の判定チャートの各境界線を図-18に示すように等価加速度に関して c_α 倍すればよいことになる。あるいは、応答計算で得られた等価加速度を c_α で除してそのままプロットすればよい。

4.4 波形補正係数についての考察

式(7)、(8)の波形補正係数を求める実験式は、図-16を累乗関数で近似し、近似した累乗関数のパラメータをさらに図-17のように相対密度との線形関係で近似して得たものである。このように求めた式(7)、(8)の元データである、図-5の液状化抵抗 R_{Lmax} の実測値に対する再現性を調べ、式(7)、(8)による波形補正係数の精度を確認する。

図-5の各破線は、式(7)、(8)を用いて波形補正係数 c_α を求め、これと各実線の $N_{ef}=5$ に対応する液状化抵抗 R_{Lmax5} から求めた R_{Lmax} の計算値で波形補正係数による予測値になる。図-5の粘土については相対密度が求められないので、式(7)の d_1 を $d_1=-0.3$ として計算したものを示した。これは、相対密度が $D_r=70\%$ 程度に相当する。

図-19の●プロットは、図-5の液状化抵抗の実測値と破線で示した推定値を比較したものである。ただし、図-5(c)の粘土についてはプロットしていない。また、図-19の○プロットは、図-3で示した各シリーズの液状化抵抗曲線を用いて、累積損傷度理論¹⁰⁾により、図-5の各不規則波の液状化抵抗の実測値を予測したものである。なお、累積損傷度理論については付録Aを参照されたい。

図-5および図-19から、式(7)、(8)による c_α は液状化抵抗をほぼ再現できており、式(7)、(8)は妥当な波形補正係数を与えると考える。また、図-19の●と○プロットの比較から、式(7)、(8)は累積損傷度理論とほぼ同程度の予測精度、誤差であることがわかる。

なお、累積損傷度理論による予測値は、各シリーズの各相対密度に対して正弦波载荷を行って得られた液状化抵抗曲線を利用したものである。したがって、累積損傷度理論が土の液状化抵抗に対して正しいものであるならば、予測値と実測値は一致しなければならないので、図-19で示される○プロットの1:1のラインからの差は累積損傷度理論の持っている本来的な誤差であるといえる。

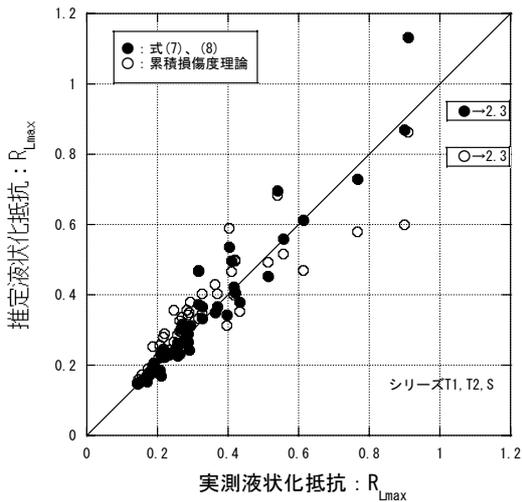


図-19 液状化抵抗の実測値と予測値の比較

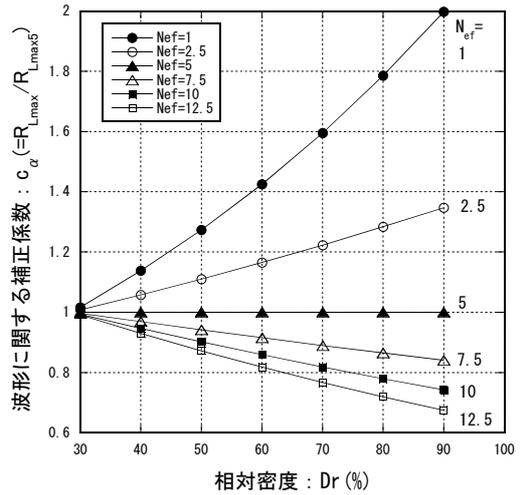


図-21 波形補正係数と相対密度の関係

ここで、式(3)、(4)の精度についても検討しておく。図-20の▲プロットは、式(3)、(4)を用いた予測値と実測値の関係で、累積損傷度理論による予測値の○プロットと比較したものである。式(3)、(4)による予測値は、図-5の各液状化抵抗が得られた波形の有効波数、相対密度から c_2 を求め、これと表-1で示した各シリーズの正弦波の液状化抵抗 R_{L20} から R_{Lmax} を予測したものである。図-20から、式(3)、(4)によるものと累積損傷度理論によるものはほぼ同程度の予測精度であるといえる。

図-21は、波形補正係数 c_α と相対密度の関係を、有効波数をパラメータとして調べたものである。図-21から、 c_α は有効波数が $N_{ef}=5$ より小さい場合には相対密度とともに大きくなり、大きい場合には小さくなる。図-21から c_α は、 $c_\alpha=0.6\sim 2$ 程度で変化し、密度が高い地盤ほど波形の違いにより判定結果が大きく変わるといえる。

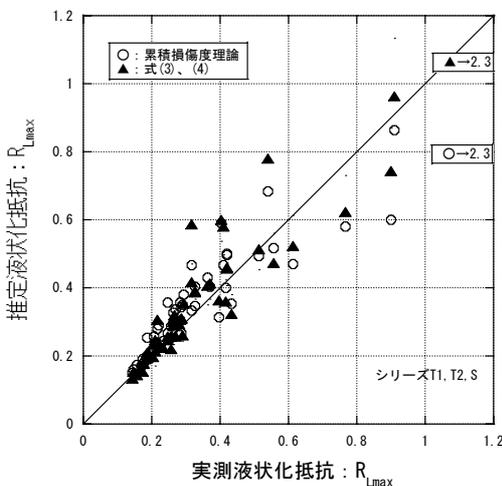


図-20 累積損傷度理論と式(3)、(4)による予測の比較

5. 波形補正係数の検証

波形補正係数を前章で提案した。本章では波形補正係数の粒度・N値法への適用性、精度を確認する。確認の方法は、実際の地震での液状化、非液状化事例に提案した方法を適用して行う。用いた事例は、1983年日本海中部地震（マグニチュード $M=7.7$ ）での秋田港⁹⁾、1993年釧路沖地震（ $M=7.5$ ）での釧路港¹⁴⁾、1995年兵庫県南部地震（ $M=7.3$ ）での神戸ポートアイランド¹¹⁾、2003年十勝沖地震（ $M=8.0$ ）での十勝港、2009年駿河湾地震（ $M=6.6$ ）での御前崎港の事例である。

液状化予測判定は、図-22に示すように、現行の方法に波形補正係数に関する項目（相対密度の算出、有効波数の算出、波形補正係数の算出、等価加速度の補正）を追加する流れで行った。

用いた土質データは付録B^{9), 11), 12)}に示す。相対密度については試験が行われていなかったため、次式の Meyerhof¹³⁾の式でN値から推定した。

$$D_r = 0.16 \cdot \sqrt{\frac{170 \cdot N}{70 + \sigma'_v}} \quad (9)$$

ここに、 D_r は相対密度、 N は標準貫入試験N値、 σ'_v は有効上載圧(kN/m²)である。

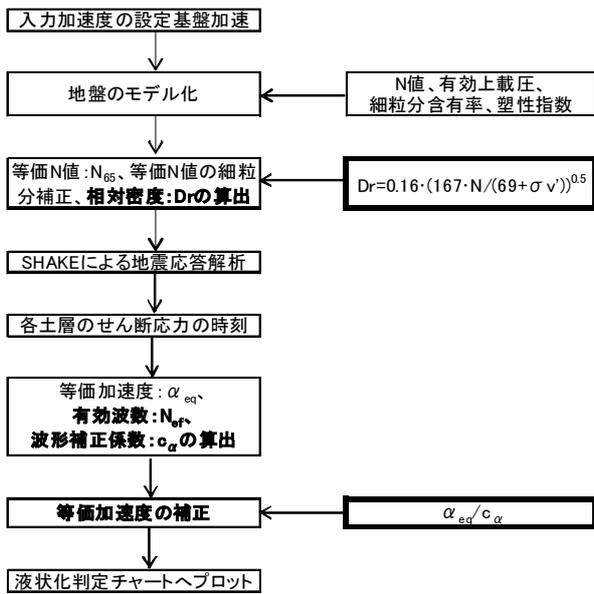


図-22 液状化予測判定の流れ

5.1 1983年日本海中部地震（秋田港）

図-23に1983年日本海中部地震での観測波形および予測判定で用いた入力加速度を示す。入力加速度は秋田港の地表面で観測された加速度波形を観測地点の基盤に引き戻した2E波である⁹⁾。

秋田港の各地点の土質データを基に地盤をモデル化し、図-23(b)の地震動を入力波として応答計算を「SHAKE」を用いて行った。波形補正係数 c_α を用いた液状化の予測は、図-18のように各境界のラインを変更するのではなく、応答計算で得られた等価加速度を c_α で除して補正する方法で行っている。

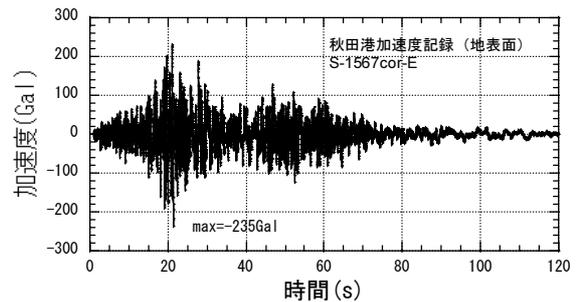
応答計算で得られた有効波数は $N_{ef}=3\sim 7$ で、予測判定の対象となったところでは、 $N_{ef}=3\sim 6.5$ で、波形補正係数は $c_\alpha=0.85\sim 1.1$ の範囲であった。

図-24~31が液状化予測結果で、図-24~30には深度方向に液状化に対する安全率： F_L を、図-31にはすべての地点の等価N値と等価加速度の関係を示した。図-24~31では丸プロットが波形補正係数で補正したもので、三角プロットは波形補正係数を用いない従来からのものである。また、それぞれ黒塗りは液状化地点、白抜きが非液状化地点である。

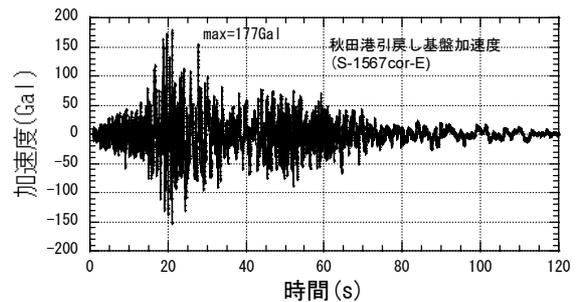
液状化に対する安全率は、対象土層の等価N値よりその土層が液状化するか否かの限界の等価加速度を図-31のIIとIIIの境界のラインから求め、これをその土層の等価加速度で除したものである。ただし、等価N値が16以上の場合には土層の等価N値を限界N値（等価加速度に対するIIとIIIの境界のラインの等価N値）で除した値を F_L

とし、等価加速度が300Gal以上の場合には等価N値を16で除した値を F_L とした。また、 F_L が2以上のものは $F_L=2$ としてプロットした。なお、液状化に対する安全率が $F_L=1/1.5$ が図-18のIとIIの境界、 $F_L=1$ がIIとIIIの境界、 $F_L=1.5$ がIIIとIVの境界に相当する。

図-24~30, 31で、波形補正係数の有無に関して予測結果を比較すると大きな違いは見られない。これは、N値が小さく相対密度が低く算定される土層が多かったことと、N値が大きく相対密度の高く算定された土層でも有効波数が $N_{ef}=5$ 程度であったため、波形補正係数が $c_\alpha=0.85\sim 1.1$ の範囲となったからである。予測は補正の有無にかかわらず、液状化・非液状化事例と整合した結果になっているといえる。

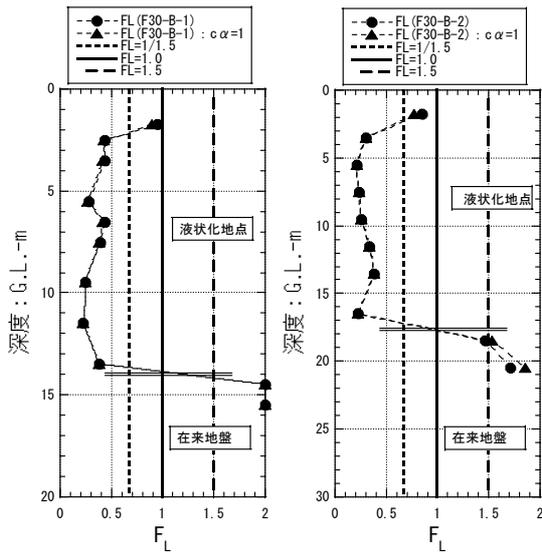


(a)観測波形（地表面）



(b)入力波形（引戻し波：2E波）

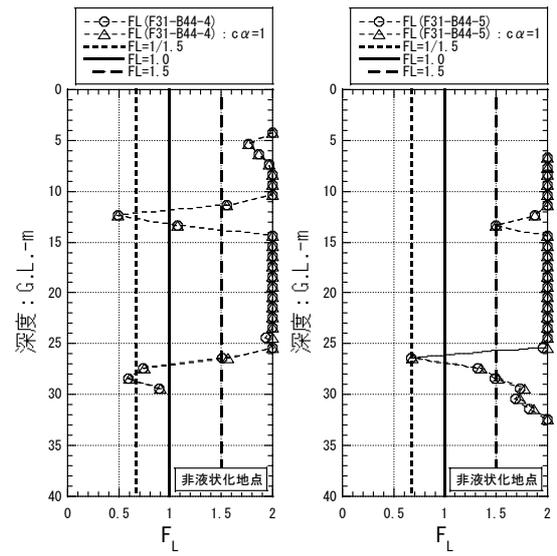
図-23 入力波形と観測波（秋田港）



(a) B-1 地点

(b) B-2 地点

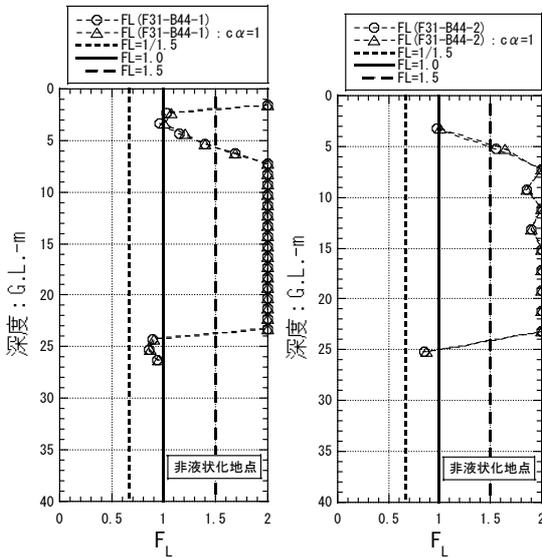
図-24 秋田港外港-13m岸壁（液状化地点）予測結果



(c) B-44-4 地点

(d) B-44-5 地点

図-25 秋田港大浜 1 号岸壁（非液状化地点）予測結果



(a) B-44-1 地点

(b) B-44-2 地点

図-25 秋田港大浜 1 号岸壁（非液状化地点）予測結果

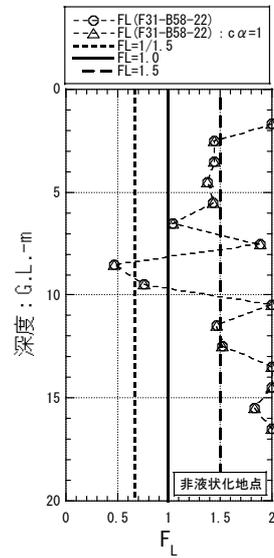


図-26 大浜 1 号岸壁 B-58-22(地震後)
（非液状化地点）予測結果

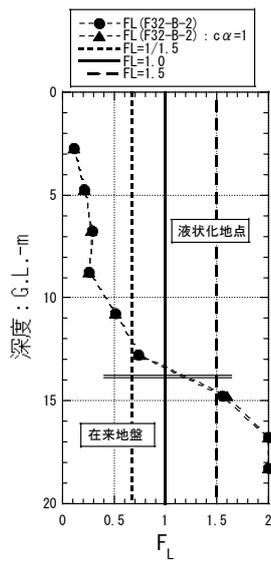
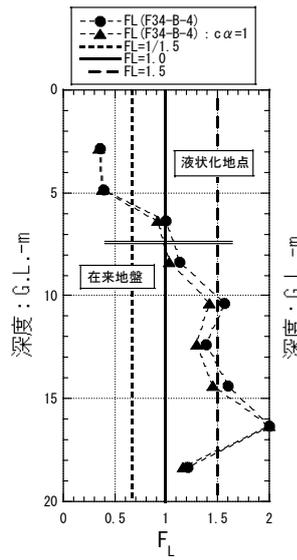
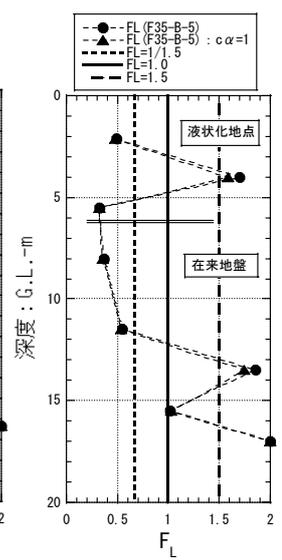


図-27 秋田港大浜 2号岸壁 B-2 地点
(液状化地点) 予測結果

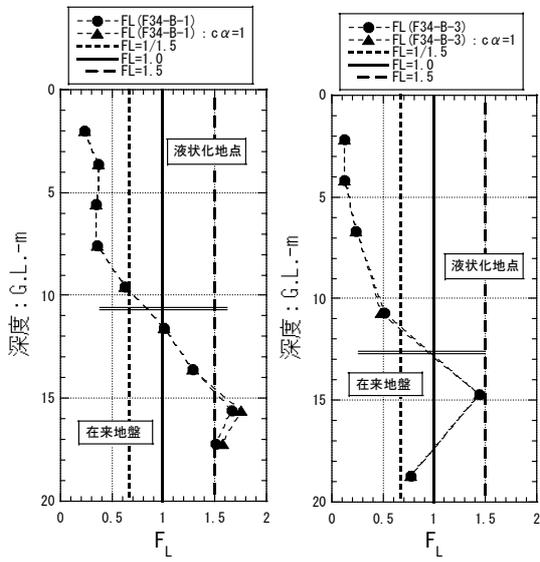


(c)B-4 地点



(d)B-5 地点

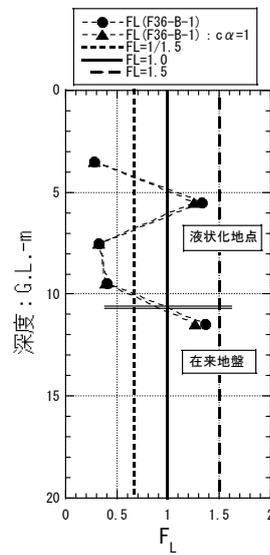
図-28 秋田港大浜 3号岸壁 (液状化地点) 予測結果



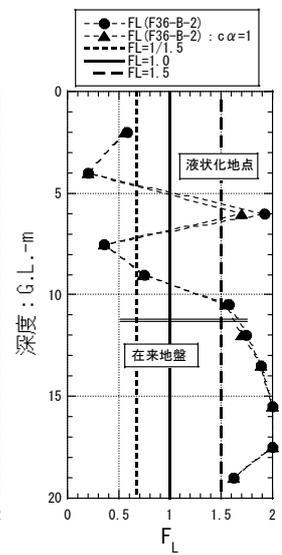
(a)B-1 地点

(b)B-3 地点

図-28 秋田港大浜 3号岸壁 (液状化地点) 予測結果

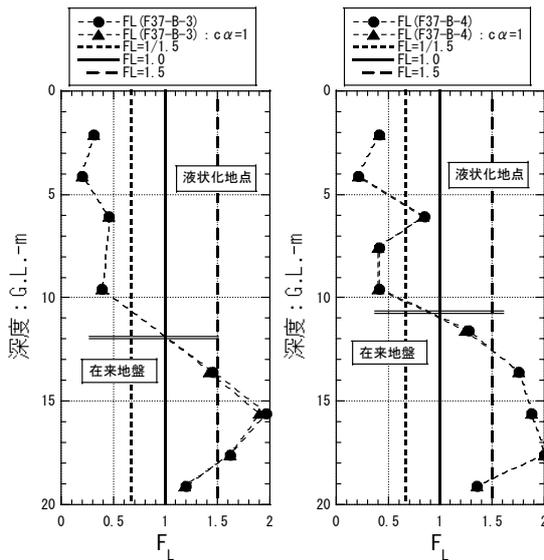


(a)B-1 地点



(b)B-2 地点

図-29 秋田港中島 2号岸壁 (液状化地点) 予測結果



(c) B-3 地点 (d) B-4 地点

図-29 秋田港中島 2 号岸壁 (液状化地点) 予測結果

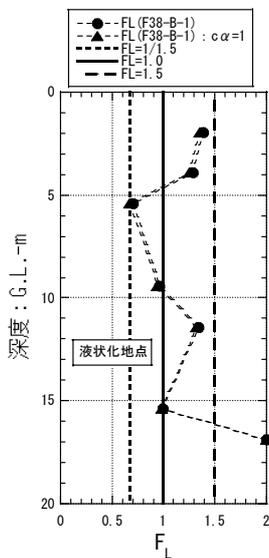


図-30 秋田港北埠頭 A 岸壁 B-1 地点 (液状化地点) 予測結果

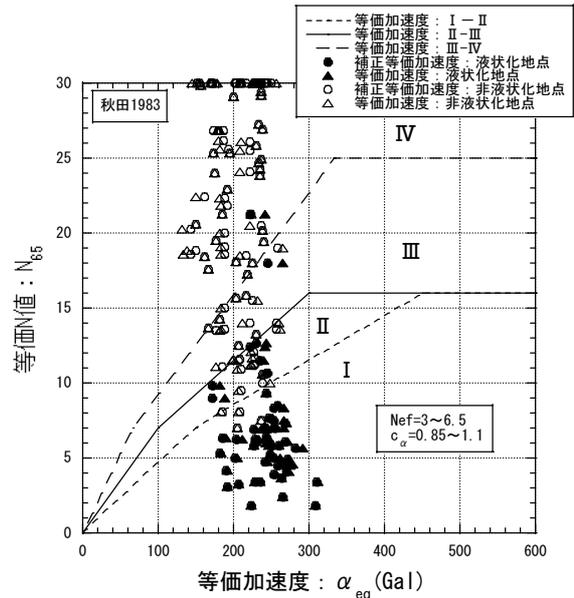


図-31 等価加速度と等価 N 値 (秋田港)

5.2 1993 年釧路沖地震 (釧路港)

用いた入力地震動は図-32に示す波形で、釧路港の工学的基盤 (G.L.-76m) で観測されたものである^{12),14)}。観測地点では地震による液状化の痕跡は報告されておらず、非液状化であったと判断される。ただし、井合ら¹⁵⁾の解析によると密な砂で観測されるサイクリックモビリティが発生していたということが報告されている。サイクリックモビリティは、密な砂が非排水状態で繰返しせん断を受けた場合に過剰間隙水圧が発生して生じる現象であり、液状化に近い状態であったと推察される。しかし、ここでは非液状化事例として取り扱う。

観測地点の土質データを基に地盤をモデル化し応答計算を行い、前項までと同様に整理した。

応答計算で得られた有効波数は $N_{ef}=6\sim 10$ で、波形補正係数は $c_{\alpha}=0.73\sim 0.94$ の範囲であった。

図-33, 34が液状化予測結果で、図-33には深度方向に液状化に対する安全率 F_L を、図-34には等価N値と等価加速度の関係を示した。

波形補正係数の有無で予測結果を比較すると、補正を行った方が、図-40では F_L は小さくなり、図-41ではIVの領域のプロットがIIIの領域に、IIIの領域のプロットがIIの領域に近づいている。現地の観察では非液状化の痕跡が観察されなかったということから、補正の有無にかかわらず、整合した予測結果であるといえる。しかし、井合らの解析では、サイクリックモビリティが発生していたということであり現地は液状化に近い状態であった可能性がある。これについては補正後の方が現地との整合性は高いといえる。したがって、波形補正係数により補

正を行った方が、現地との整合性は高くなっているといえる。

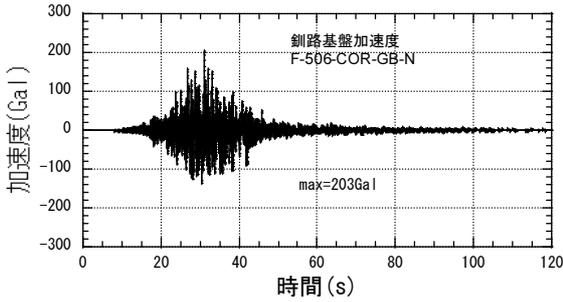


図-32 鋼路港工学的基盤観測波 (G.L.-76m)

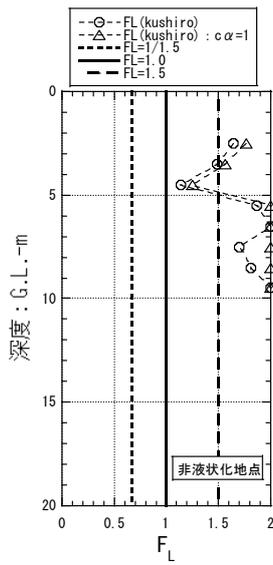


図-33 鋼路港予測結果

5.3 1995年兵庫県南部地震(神戸ポートアイランド)

神戸市は神戸ポートアイランドでアレー観測を実施しており、用いた入力地震動は図-35に示すもので、深度G.L.-16mで観測されたものである¹¹⁾。観測地点では液状化の痕跡が確認されており、地盤は地震により液状化したと判断される。

観測地点の土質データを基に地盤をモデル化し応答計算を行い、前項と同様に整理した。

応答計算で得られた有効波数は $N_{ef}=2\sim4$ で、予測判定の対象となったところでは、 $N_{ef}=2\sim3$ で、波形補正係数は $c_a=1.0\sim1.2$ の範囲であった。

図-36, 37が液状化予測結果で、図-36には深度方向に液状化に対する安全率 F_L を、図-37には等価N値と等価加速度の関係を示した。予測は補正の有無にかかわらず、液状化事例と整合した結果になっている。特に、図-36の F_L のプロットは補正したものとししないものは完全に一致している。これは、図-37に示されるように、土層の等価加速度がすべて $\alpha_{eq}=300\text{Gal}$ を上回っており、 F_L は土層の等価N値を $N_{65}=16$ で除したものとしたためである。

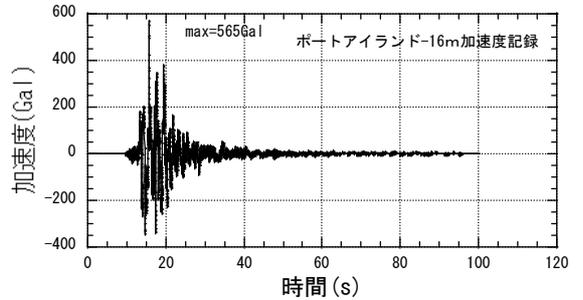


図-35 神戸ポートアイランド-16m観測波

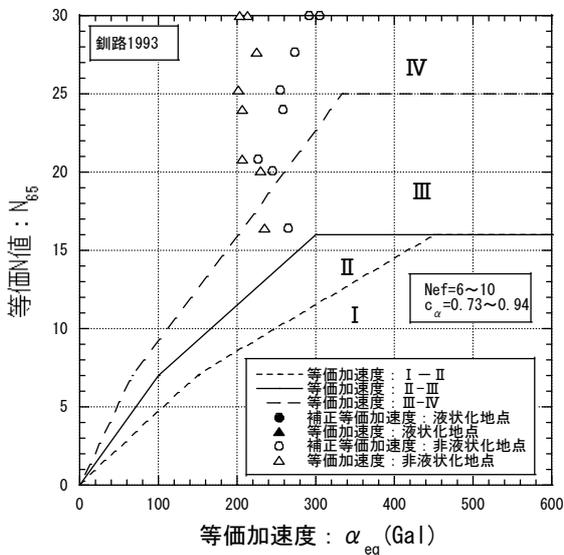


図-34 等価加速度と等価N値(鋼路港)予測結果

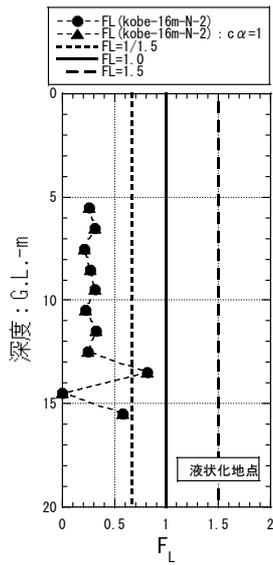


図-36 神戸ポートアイランド (液状化地点)

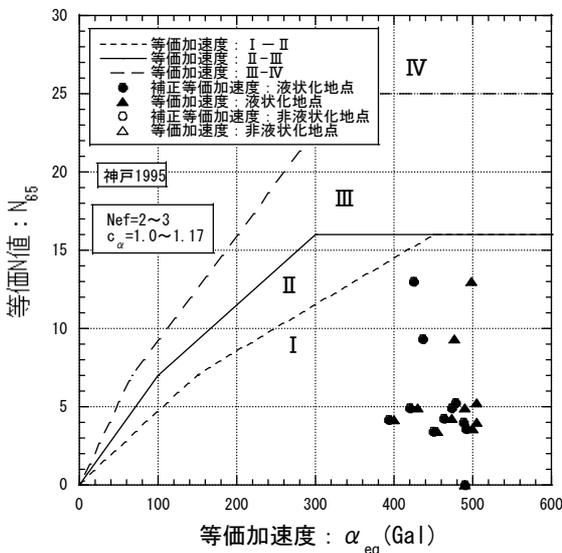


図-37 等価加速度と等価N値 (神戸ポートアイランド) 予測結果

5.4 2003年十勝沖地震 (十勝港)

図-38に2003年十勝沖地震での観測波形および予測判定で用いた入力加速度を示す。図-38の入力波形は十勝港の地表面で観測された加速度波形を観測地点の基盤に引き戻した2E波である¹²⁾。

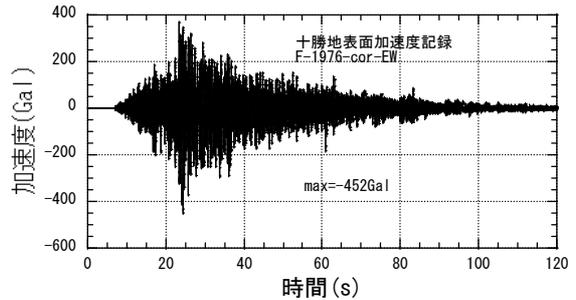
この事例は、サンドコンパクションパイル工法 (SCP) による液状化対策前後の比較で、液状化対策を行ったところでは液状化の発生はなく、無対策のところでは液状化が発生していた。液状化発生地点の土質データはなかったため、液状化対策地点の対策前後の土質データを基

に地盤をモデル化し液状化予測を行い、前項までと同様に整理した。したがって、「液状化対策前」が前項までの「液状化地点」、「液状化対策後」が「非液状化地点」に対応する。

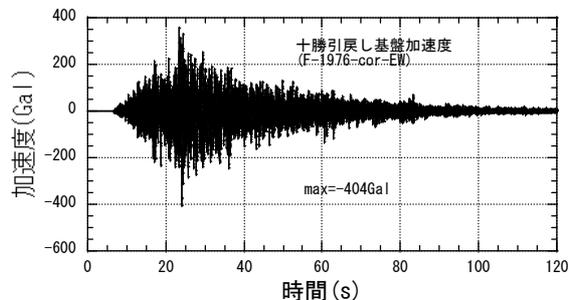
応答計算で得られた有効波数は $N_{ef}=2\sim 8$ で、波形補正係数は $c_\alpha=0.9\sim 1.3$ の範囲であった。

図-39~41が液状化予測結果で、図-39, 40には深度方向に液状化に対する安全率: F_L を、図-41には等価N値と等価加速度の関係を示した。

図-39, 40で波形補正係数の有無で予測結果を比較すると、液状化対策後のB-3地点 (図-39 (b)) で差が大きくなっている。また、図-41を見ると等価N値の大ききところで補正前後の差が大きくなっている。これは、いずれもN値が大ききことから、相対密度が大きき算定され、波形補正係数による補正が大きくなったためである。また、図-41において液状化地点 (液状化対策前) のプロット (●, ▲) がIVの領域にあるが、これらのプロットは図-39の F_L が1以上の非液状化層のもので、他の F_L が1以下の層が液状化して地盤全体としては液状化したということである。したがって、予測は補正の有無にかかわらず、液状化事例 (SCP改良後)、非液状化事例 (SCP改良前) と整合した結果になっている。

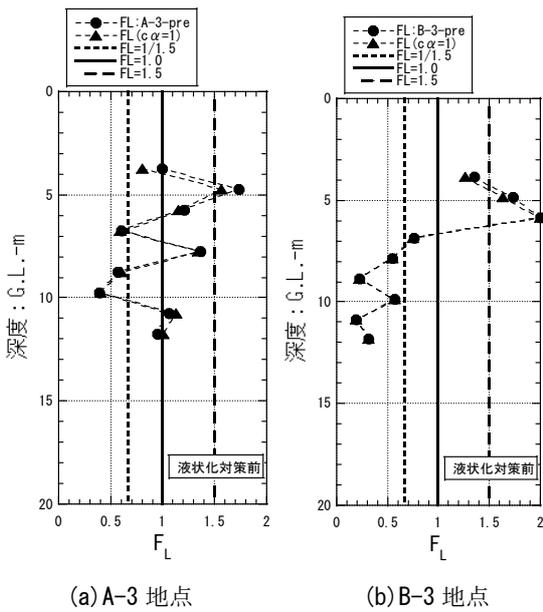


(a) 観測波形 (地表面)



(b) 入力波形 (引戻し波: 2E波)

図-38 入力波形と観測波 (秋田港)



(a) A-3 地点 (b) B-3 地点

図-39 十勝港（液状化対策前）予測結果

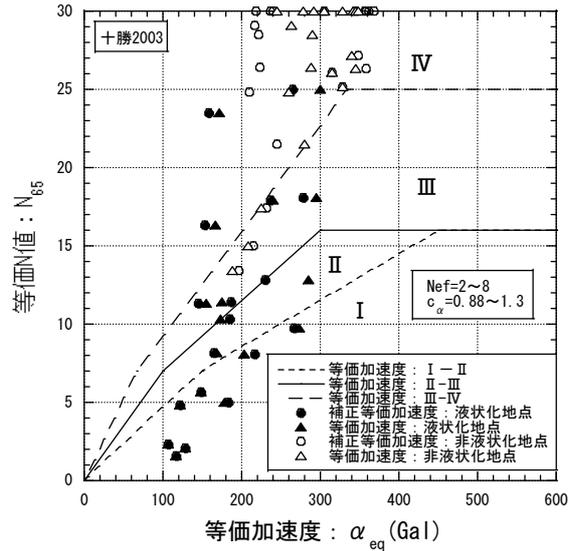
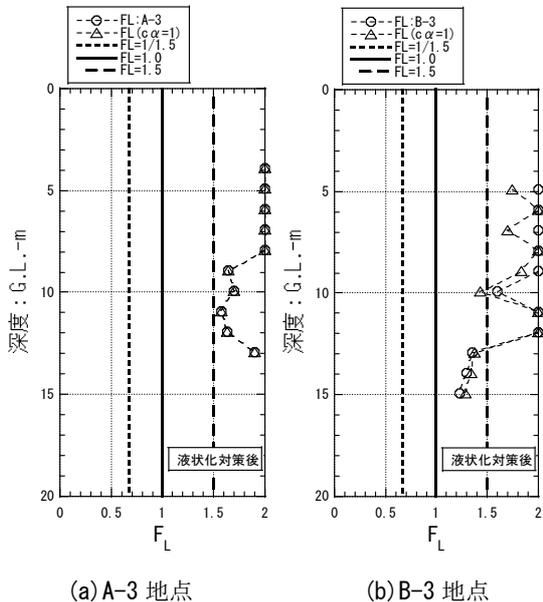


図-41 等価加速度と等価 N 値（十勝港）予測結果



(a) A-3 地点 (b) B-3 地点

図-40 十勝港（液状化対策後）予測結果

5.5 2009 年駿河湾地震（御前崎港）

用いた入力地震動は図-42に示す波形で、御前崎港の工学的地盤（G.L.-10m）で観測されたものである¹²⁾。観測地点では地震による液状化の痕跡は報告されておらず、非液状化であったと判断される。

観測地点の土質データを基に地盤をモデル化し応答計算を行い、前項までと同様に整理した。

応答計算で得られた有効波数は $N_{ef}=1$ で、波形補正係数は $c_a=1.2\sim 1.5$ の範囲であった。

図-43、44が液状化予測結果で、図-43には深度方向に液状化に対する安全率： F_L を、図-44には等価N値と等価加速度の関係を示した。

波形補正係数の有無で予測結果を比較すると、補正を行った方が、図-43では F_L は1以下であったものが1以上になり、図-44ではIIの領域にあったプロットがIIIの領域に、Iの領域にあったプロットがIIの領域に移動している。したがって、波形補正係数により補正を行った方が、現地在非液状化であったという事実と整合性が高くなっている。

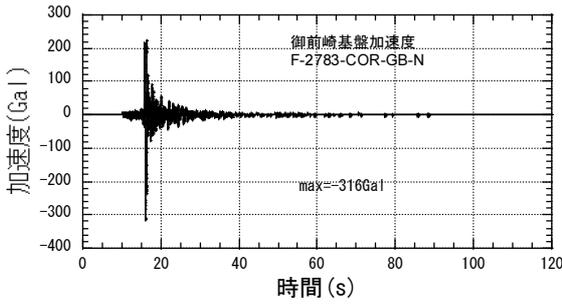


図-42 御前崎港工学的基盤観測波 (GL-10m)

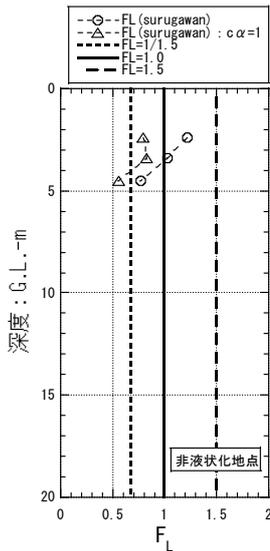


図-43 御前崎港予測結果

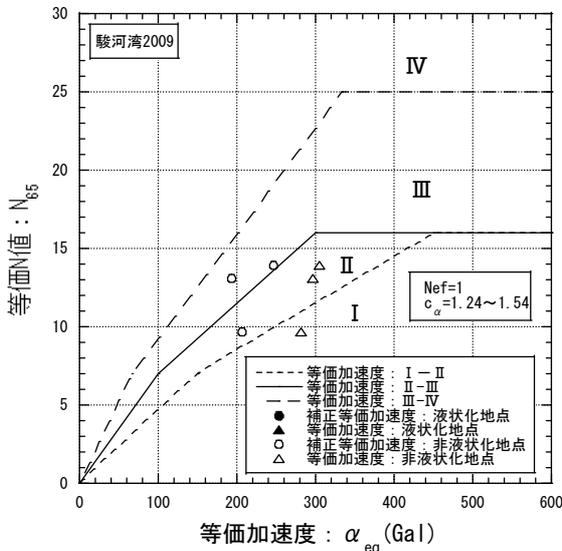


図-44 等価加速度と等価 N 値 (御前崎港) 予測結果

5.6 事例解析のまとめ

過去5つの地震での液状化、非液状化の事例解析を5.1～5.5で行った。

今回の検討では、全体としては補正の有無で予測に大きな違いは見られなかったといえる。しかし、詳細にみると、N値 (相対密度) が大きくなるほど、補正の有無による予測の差は大きくなっていった。特に、5.5の駿河湾地震の事例では大きな差となり、補正を行った方が現地での非液状化事例との整合性が高くなった。

以上から、提案した波形補正係数を粒度・N値法に適用しても問題ないと考える。

また、事例解析を行った5つの地震はマグニチュードが $M=6.6, 7.2, 7.5, 7.7, 8.0$ とそれぞれ異なっていた。Seed はマグニチュードと等価波数とよばれるものの関係¹⁶⁾を提案しているので、事例解析での応答計算から得られた有効波数 N_{ef} とマグニチュード M の関係を調べてみる。

図-45は各事例で得られた有効波数の範囲をマグニチュードに対して示したものである。図-45からマグニチュードが大きくなるにしたがい有効波数は大きくなる傾向にあり、これはSeedが提案したマグニチュードと等価波数の関係と同様である。しかし、マグニチュードに対して有効波数はかなりばらついており、マグニチュードだけから有効波数を推定するのは困難であるといえる。

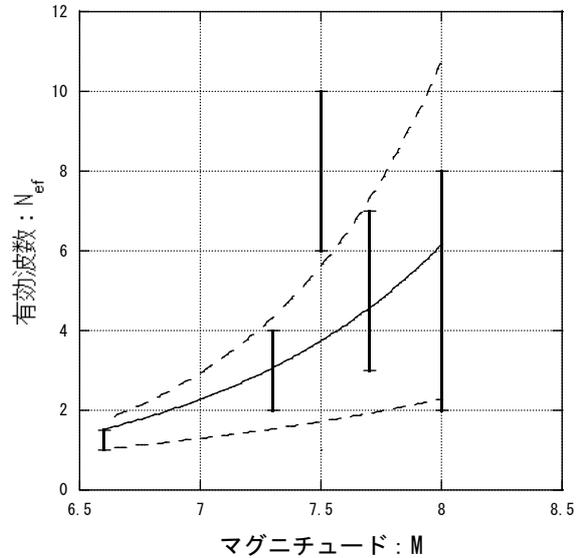


図-45 マグニチュードと有効波数の関係

6. 結論

液状化発生におよぼす載荷波形の不規則性の影響について検討を行い、以下のような結論が得られた。

- ①密度（相対密度）が高い土ほど波形の不規則性の影響を大きく受ける。
- ②液状化抵抗におよぼす波形の影響を定量化するために有効波数 N_{ef} を定義し、有効波数と液状化抵抗の間に有為な関係があることを示した。
- ③不規則波に対する補正係数 c_2 と有効波数 N_{ef} の関係を実験式で示した。
- ④粒度・N値法に地震動波形の不規則性の影響を考慮できるようにするために、実験データから波形補正係数を提案した。
- ⑤既往地震での液状化・非液状化事例により波形補正係数の適用性を検証した。

7. あとがき

液状化発生に及ぼす波形の不規則性の影響を室内試験で調べ、粒度とN値による液状化の予測判定法に地震動波形の影響を取り入れる方法を提案した。波形の不規則性の影響は密度の高い地盤で敏感に変わる。これは、締固めによる液状化対策における、目標N値の設定に大きく影響することで、この点についての今後の研究が必要である。さらに、細粒分を多く含む土や塑性がでるような土に関しての不規則性の影響は不明なところが多く、今後の検討課題として残される。

本研究は国土交通省の各整備局のご協力を得ております。ここに謝意を表します。

(2010年4月26日受付)

参考文献

- 1) 石原研而：土質力学の基礎，鹿島出版会，pp.265～275，1976.
- 2) Tatsuoka, F., Maeda, S., Ochi, K. and Fujii, S.: Prediction of cyclic undrained strength of sand subjected to irregular loadings, *Soils & Foundations*, Vol.26, No.2, pp.73-90,1986.
- 3) 東拓生，田村敬一：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，pp.50～53，1997.
- 4) Ishihara, K.,: *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, Oxford Science Publications, pp.233-241,1996.
- 5) 金田一広，山崎浩之，永野賢次：砂の液状化試験における不規則波の換算係数に関する考察，第43回地盤工学研究発表会，pp.447～448，2008.
- 6) 金田一広，山崎浩之，神宮勝久，大塚悟：単純せん断試験機による砂の液状化試験における不規則波の換算係数に関する考察，土木学会第63回年次学術講演会，pp.115～116，2008.
- 7) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻），pp.330～365，2007.
- 8) 前出7)，pp.383～389.
- 9) 井合進，小泉勝彦，土田肇：粒度とN値による新しい液状化予測法，港湾技術研究所報告，第23巻，第3号，pp.125～234，1986.
- 10) Annaki, M. and Lee, K.L.: Equivalent uniform cycle concept for soil dynamics, *J. GED., ASCE*, Vol.103, No.GT6, pp.549-564, 1977.
- 11) 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（ポートアイランド，六甲アイランド）報告書，1995.
- 12) 一井康二，佐藤幸博，佐藤陽子，星野裕子，井合進む：港湾地域強震観測地点資料（その6），港湾技研資料，No.935，1999.
- 13) Meyerhof, G. G.: Discussion of Session 1, *Proc. of 4th ICSMFE*, London, Vol. 3, p. 110, 1957.
- 14) 上田茂，稲富隆昌，上部達生，井合進，風間基樹，松永康男，藤本健幸，菊池喜昭，宮井真一郎，関口信一郎，藤本義則：1993年釧路沖地震港湾施設被害報告，港湾技研資料，No.766，1993.
- 15) Iai, S., Morita, T., Kameoka, T., Matsunaga, Y. and Abiko, K.: Response of a dense sand deposit during 1993 Kushiro-oki earthquake, *Soils & Foundations*, Vol.35, No.1, pp.115-131, 1995.
- 16) Seed, H.B.: Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during eqrthquakes, *J. GED., ASCE*, Vol.105, No.GT2, pp.201-255, 1979.

付録A 累積損傷度理論による液状化抵抗

累積損傷度理論¹⁰⁾は、金属疲労の考えを利用して液状化予測を行うものである。

まず、正弦波を用いた液状化試験を行って得られる図-A.1の液状化抵抗曲線を用意し、これを疲労曲線と考える。そして、液状化予測を行う図-A.2のせん断応力比の時刻歴について、半波ごとの振幅： τ_i/σ_{v0}' を調べる。振幅 τ_i/σ_{v0}' を持つ半波は、図-A.1から液状化に関して式(A.1)に示す D_i の損傷度があると考える(式(A.1)の係数0.5は半波であることから)。これら損傷度を不規則波の各半波について総和をとり、式(A.2)で示す累積損傷度 D が $D=1$ となる場合に液状化が発生すると考えるのが、累積損傷度理論である。

$$D_i = 0.5 \cdot \frac{1}{N_i} \quad (A.1)$$

$$D = \sum D_i \quad (A.2)$$

ここに、 D_i は不規則波の各半波の損傷度、 N_i は各半波の振幅 τ_i/σ_{v0}' に対する液状化抵抗曲線での繰返し回数、 D は累積損傷度である。

不規則波形が与えられ、その液状化抵抗 R_{Lmax} を求める場合には、式(A.2)の累積損傷度が $D=1$ となる波形の最大振幅を求めればよい。

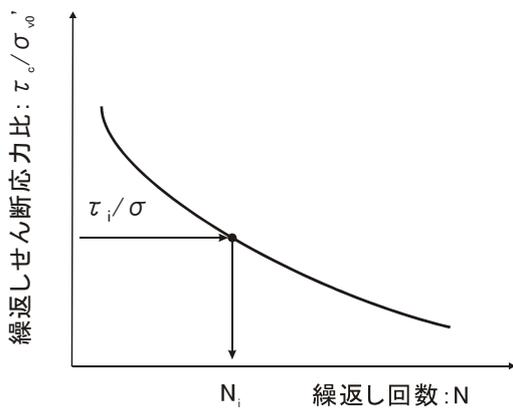


図-A.1 液状化抵抗曲線(疲労曲線)

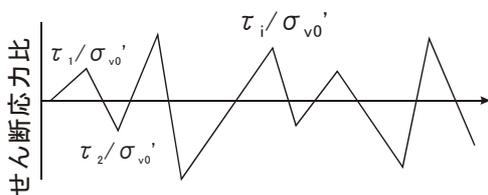


図-A.2 不規則波形

付録B 地盤データ

表-B.1 秋田港外港-13m岸壁 B-1

外港-13m岸壁 B-1			地下水位: G.L.-1.5m	
深さ G.L.-m	N値	細粒分含有率 Fc(%)	湿潤密度 $\rho_t(t/m^3)$	せん断波速度 Vs(m/s)
1.0	11		1.8	203
2.0	6	9	2.0	203
3.0	5	5	2.0	165
4.0	6	2	2.0	165
6.0	5	1	2.0	165
7.0	8	1	2.0	165
8.0	8	2	2.0	165
10.0	6	1	2.0	182
12.0	6	1	2.0	165
14.0	10	2	2.0	165
15.0	50	2	2.0	165
16.0	50		2.0	197
17.0			2.0	197
20.5			1.9	363
24.0			1.9	363
28.0			1.8	249
41.6			1.9	316
55.2			1.9	316
68.8			1.9	316
82.4			1.9	316
96.0			1.9	316

表-B.2 秋田港外港-13m岸壁 B-2

外港-13m岸壁 B-2			地下水位: G.L.-1.5m	
深さ G.L.-m	N値	細粒分含有率 Fc(%)	湿潤密度 $\rho_t(t/m^3)$	せん断波速度 Vs(m/s)
1.0	7		1.8	174
2.0	7	5	1.9	174
4.0	2	22.1	1.9	144
5.0	2		1.9	144
6.0	4	3	1.9	144
7.0	4		1.9	144
8.0	5	3	1.9	144
9.0	6		1.9	144
10.0	6	5	1.9	144
12.0	8	4	1.9	165
14.0	9	4	1.9	165
17.0	4	61.5	1.8	144
19.0	24	6	1.9	265
21.0	33	5	1.9	296
25.0	32	5	1.8	249
28.0			1.8	249
42.0			1.9	316
56.0			1.9	316
70.0			1.9	316
84.0			1.9	316
98.0			1.9	316

港湾空港技術研究所報告 第49巻第3号

2010.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 大 應

Copyright © (2010) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

Assessment of shear velocity determinations referring DO microprofiles - Simultaneous field observation of turbulence and DO in the benthic boundary layer - Tetsunori INOUE, Ronnie N. GLUD, Henrik STAHL, Andrew HUME	3
Seed dispersal supporting areal expansion of meadow in the seagrass, <i>Zostera marina</i> L. Shinya HOSOKAWA, Masahiro NAKAOKA, Eiichi MIYOSHI, Tomohiro KUWAE	31
Block Removal Using Holding Device with a Chain Net and its Modeling Hitoshi NOGUCHI	51
Study on Liquefaction Prediction Method Considering Wave Forms of Seismic Motions Hiroyuki YAMAZAKI, Shouichi EMOTO	79
Rupture Process of Recent Crustal Earthquakes in Japan Estimated by Waveform Inversion Atsushi NOZU	111
Evaluation of intertidal flat stratigraphy by MASW technology —Interpretation of shear wave velocity structure and safety assessment of artificial intertidal flats— Yoichi WATABE, Shinji SASSA, Tomohiro KUWAE, SoonBo YANG, Masanori TANAKA	157