

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1242**      December 2011

2011年東北地方太平洋沖地震の地震動に対しての  
地盤の液状化挙動に関する考察

山崎 浩之  
後藤 佑介

独立行政法人 港湾空港技術研究所  
Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	4
2. 液状化予測判定および不規則波に対する補正係数 .....	4
2.1 粒度・N値法による液状化予測判定法の改良案 .....	4
2.2 不規則波に対する補正係数 .....	6
3. 粒度・N値法に関する検討 .....	6
3.1 塩釜港湾・空港整備事務所（仙台港） .....	6
3.2 小名浜港湾事務所（小名浜港） .....	9
3.3 千葉港湾事務所（千葉港） .....	11
3.4 液状化予測に関する考察 .....	14
4. 不規則波に対する補正係数に関する検討 .....	15
4.1 試験方法 .....	15
4.2 試験結果 .....	15
4.3 不規則波に対する補正係数 .....	19
5. 地震動継続時間の液状化現象に及ぼす影響に関する考察 .....	20
5.1 液状化の発生に関する考察 .....	20
5.2 液状化の程度に関する考察 .....	21
5.3 規則波試験からの考察 .....	22
6. 結論 .....	23
7. あとがき .....	23
参考文献 .....	23

# **Study on Liquefaction of Soil subjected to Seismic Motion in The 2011 off The Pacific Coast of Tohoku Earthquake**

**Hiroyuki YAMAZAKI\***

**Yusuke GOTOH\*\***

## **Synopsis**

The continuation time of the seismic motion in the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake was extraordinary long, more than three minutes, which had never been experienced. This paper describes the liquefaction behavior of soil under seismic motions having a long continuation time. The paper includes case studies on the liquefaction prediction method, verification of an empirical equation for the correction factor on the irregularity of seismic wave proposed by authors, and discussions on the effect of the continuation time on liquefaction phenomenon. The main results are follows.

It is revealed that the liquefaction prediction method gives a conservative prediction for seismic motions having a long continuation time and the method is applicable to the practical design.

The empirical equation for the correction factor on the irregularity of seismic motion can estimate the correction factors obtained from the laboratory experiments using the seismic motions having a long continuation time.

When the continuation time becomes long, the degree of liquefaction, that is the magnitude of liquefaction damage, becomes large and the soil behavior becomes less ductile.

**Key Words:** seismic motion, continuation time, liquefaction, liquefaction prediction.

---

\* Director, Geotechnical Engineering Division

\*\* Researcher of Soil Dynamics Group, Geotechnical Engineering Division

Phone : +81-46-8445054 Fax : +81-46-8440618 e-mail:yamazaki@pari.go.jp

# 2011年東北地方太平洋沖地震の地震動に対しての 地盤の液状化挙動に関する考察

山崎 浩之\*  
後藤 佑介\*\*

## 要 旨

2011年東北地方太平洋沖地震での地震動は、継続時間が3分を超える非常に長いもので、過去にない地震動であった。本論文では、このような継続時間の長い地震動に対しての地盤の液状化現象について、現地で観測された地震動を用いて検討を行っている。

検討は、粒度・N値法による液状化予測判定法の検証のための事例解析、不規則波に対する補正係数についての著者らの提案式の室内液状化試験による検証、および室内試験結果を用いた液状化現象に及ぼす継続時間の影響についての考察からなっている。得られた結論は以下のとおりである。

- ・液状化予測判定手法については、設計で用いるのに適切な方法であることがわかった。
- ・不規則波に対する補正係数についての実験式は、試験結果より得られた補正係数とほぼ整合していた。
- ・液状化現象に関する考察では、継続時間が長くなると液状化状態における発生ひずみ量が大きくなり、地盤の液状化の程度、すなわち液状化による被害は大きくなり、液状化に対して「ねばり」がなくなる。特に、密度の小さい緩詰め状態の砂でこの傾向は顕著である。

キーワード：地震動，継続時間，液状化，液状化予測判定法

---

\* 地盤研究領域 領域長

\*\*地盤研究領域 動土質研究チーム研究員

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5054 Fax：046-844-0618 e-mail:yamazaki@pari.go.jp

# 1. まえがき

2011年東北地方太平洋沖地震では地震動の継続時間が非常に長く、これが液状化の発生、液状化被害に大きな影響を及ぼしたことが推察されている<sup>1)</sup>。

著者らは、地震動波形の液状化発生に及ぼす影響を実験的に検討し、既に港湾空港技術研究所報告<sup>2)</sup>として取りまとめている。そして、有効波数： $n_{ef}$ を定義して、粒度・N値法による液状化予測判定に波形の影響、すなわち地震動継続時間の影響を取り入れる方法を提案した。また、正弦波による液状化抵抗： $R_{L20}$ と、不規則波での液状化抵抗： $R_{Lmax}$ との関係を調べ、不規則波に対する補正係数： $c_2$ と有効波数 $n_{ef}$ の関係式を提案している。本研究は、上記の液状化予測判定法、不規則波に対する補正係数を、2011年東北地方太平洋沖地震について考察し、あわせて同地震での液状化について考察するものである。

## 2. 液状化予測判定および不規則波に対する補正係数

粒度・N値法による液状化予測判定の改良案および不規則波に対する補正係数について説明する<sup>2)～5)</sup>。

### 2.1 粒度・N値法による液状化予測判定法の改良案

以下に、粒度・N値法による液状化予測判定法の改良案を示す。

#### ①粒度による判定

図-1を用いて、粒度による土の分類を行う。図-1は均等係数の大小に応じて使い分ける。均等係数の大小は $U_c=D_{60}/D_{10}=3.5$ が目安となる。

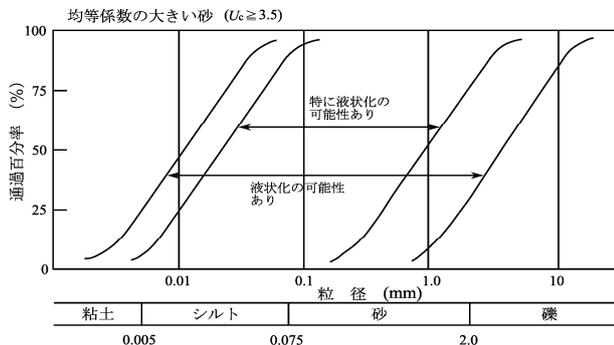


図-1(a) 液状化の可能性のある範囲 ( $U_c \geq 3.5$ )

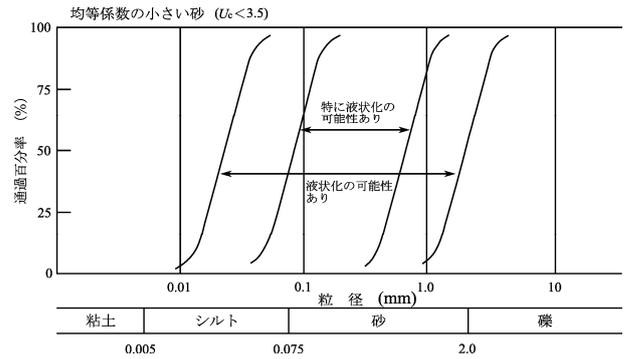


図-1(b) 液状化の可能性のある範囲 ( $U_c < 3.5$ )

ここに、 $U_c$ ：均等係数、 $D_{60}$ ：60%径、 $D_{10}$ ：有効径（10%径）である。粒度加積曲線が「液状化の可能性あり」の範囲以外に含まれる土は液状化しないと判定する。粒度加積曲線が「液状化の可能性あり」の範囲にまたがった場合など分類が困難である場合には、粘土分側については繰返し三軸試験による予測・判定法を用いる等の適切な対応が必要である。礫分側については、透水係数が3cm/s以上であることを確認した場合に液状化しないと判定することができる。

#### ②等価N値、等価加速度による液状化の予測・判定

図-1の「液状化の可能性あり」の範囲に含まれる粒度の土層については以下の検討を行う。

##### (a)等価N値

式(1)により等価N値の算定を行う。

$$(N)_{65} = \frac{N - 0.019(\sigma'_v - 65)}{0.0041(\sigma'_v - 65) + 1.0} \quad (1)$$

ここに、 $(N)_{65}$ ：等価N値、 $N$ ：土層の標準貫入試験N値、 $\sigma'_v$ ：土層の有効上載圧力(kN/m<sup>2</sup>)（等価N値の算定における有効上載圧力は、標準貫入試験を行った時点での地盤高に基づいて求めることに注意する）。

##### (b)等価加速度

式(2)により等価加速度の算定を行う。これは、地盤の地震応答計算により求まる最大せん断応力の時刻歴を用いて、各土層について算定する。

$$\alpha_{eq} = 0.7 \cdot \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} \cdot g \cdot \frac{1}{c_\alpha} \quad (2)$$

$$c_\alpha = 5^{-d_1} \cdot n_{ef}^{d_1} \quad (3)$$

$$d_1 = 0.2 - 0.7 \cdot D_r \quad : \left( D_r \geq \frac{0.2}{0.7} \right) \quad (4)$$

$$d_1 = 0 \quad : \left( D_r < \frac{0.2}{0.7} \right) \quad (5)$$

$$D_r = 0.16 \cdot \sqrt{\frac{170 \cdot N}{70 + \sigma_v'}} \quad (6)$$

ここに、 $\alpha_{eq}$ ：等価加速度(Gal)， $\tau_{max}$ ：最大せん断応力(kN/m<sup>2</sup>)， $g$ ：重力加速度(980Gal)， $c_a$ ：波形補正係数。後述の塑性指数によるN値の補正を行い液状化の予測・判定を行う場合には、式(3)に $d_1=0.3$ を代入して $c_a$ を求める。 $n_{ef}$ ：有効波数。図-2に示すように、せん断応力の時刻歴において最大せん断応力の6割以上の波頭の数の半分。 $D_r$ ：相対密度。式(6)を用いてN値とN値計測時の有効上載圧から求めてよい。 $\sigma_v'$ ：有効上載圧(kN/m<sup>2</sup>) (等価加速度の算定における有効上載圧は地震時の地盤高に基づいて求め、相対密度の算定における有効上載圧はN値計測時の地盤高に基づいて求めることに注意する必要がある。)

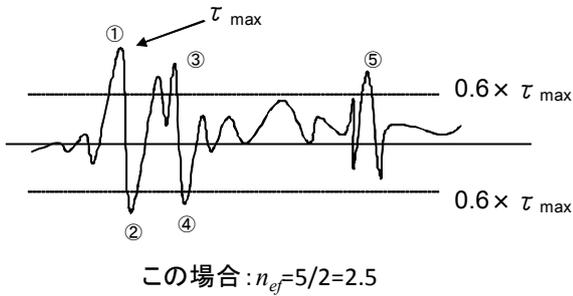


図-2 有効波数  $n_{ef}$  の定義

(c) 等価N値と等価加速度による予測・判定

対象土層の等価N値と等価加速度が、図-3に示すI～IVのどの範囲にあるかを判断する。

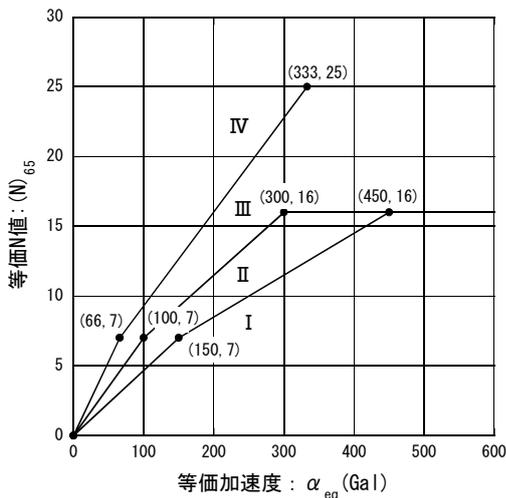


図-3 等価N値と等価加速度による土層の区分

③ 細粒分を多く含む場合のN値の補正と予測・判定

(a) 細粒分(粒径が75μm以下の成分)を5%以上含むものについては、等価N値の補正を行い、補正後の等価N値を用いて対象土層が図-3に示したI～IVのどの範囲にあ

るかを判定する。等価N値の補正は、下記の3ケースの場合に分けて行う。

- 1) ケース1：塑性指数が10未満又は得られていない場合、あるいは細粒分含有率が15%未満
- 2) ケース2：塑性指数が10以上20未満、かつ、細粒分含有率が15%以上
- 3) ケース3：塑性指数が20以上、かつ、細粒分含有率が15%以上

(b) ケース1：塑性指数が10未満又は得られていない場合、あるいは細粒分含有率が15%未満の場合

等価N値(補正後) =  $(N)_{65}/c_N$  とする。補正係数  $c_N$  は図-4で与えられる。得られた等価N値(補正後)と等価加速度から図-3を用いて予測判定する。

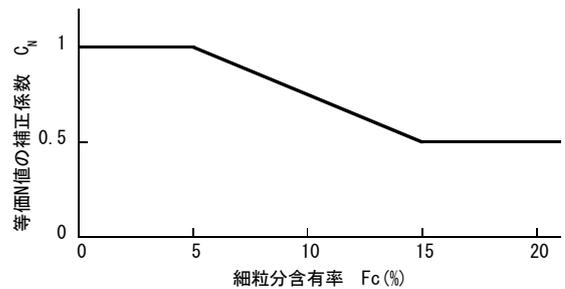


図-4 細粒分含有率に応じた等価N値の補正係数

(c) ケース2：塑性指数が10以上20未満、かつ、細粒分含有率が15%以上の場合

等価N値(補正後) =  $\{(M)_{65}/0.5\}$  及び  $\{N+\Delta N\}$  とし、以下の場合に応じて判定する。

ここで  $\Delta N$  は以下のように与えられる。

$$\Delta N = 8 + 0.4 \cdot (I_p - 10) \quad (7)$$

- 1)  $\{N+\Delta N\}$  がIの範囲にある場合：Iと判定する。
- 2)  $\{N+\Delta N\}$  がIIの範囲にある場合：IIと判定する。
- 3)  $\{N+\Delta N\}$  がIII又はIVの範囲にあり、かつ、 $\{(N)_{65}/0.5\}$  がI, II又はIIIの範囲にある場合：IIIと判定する。
- 4)  $\{N+\Delta N\}$  がIII又はIVの範囲にあり、かつ、 $\{(N)_{65}/0.5\}$  がIVの範囲にある場合：IVと判定する。

(d) ケース3：塑性指数が20以上、かつ、細粒分含有率が15%以上の場合

等価N値(補正後)={ $N+\Delta N$ }とする。等価N値(補正後)、等価加速度により判定する。

④液状化の予測・判定

②, ③において行ったI~IVの土層の分類に応じて, Iの場合には液状化する, IIの場合には液状化する可能性が高い, IIIの場合には液状化しない可能性が高い, IVの場合には液状化しない, と予測する。

2.2 不規則波に対する補正係数

不規則波に対する補正係数 $c_2$ とは, 不規則波载荷での液状化抵抗: $R_{Lmax}$ を, 正弦波载荷での液状化抵抗: $R_{L20}$ で除したもので, 次式で定義されている。

$$c_2 = \frac{R_{Lmax}}{R_{L20}} \quad (8)$$

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。

通常, 繰返し三軸試験では正弦波で液状化試験が行われ, 液状化抵抗は繰返し回数が20回で液状化する場合の繰返しせん断応力比,  $R_{L20}$ として求められる。実際の地震動は正弦波でなく不規則波なので補正が必要となり, そのための補正係数が不規則波に対する補正係数 $c_2$ である。不規則波に対する補正係数については, いくつかの研究があり(例えば7), 著者らは以下のものを提案している(2)。

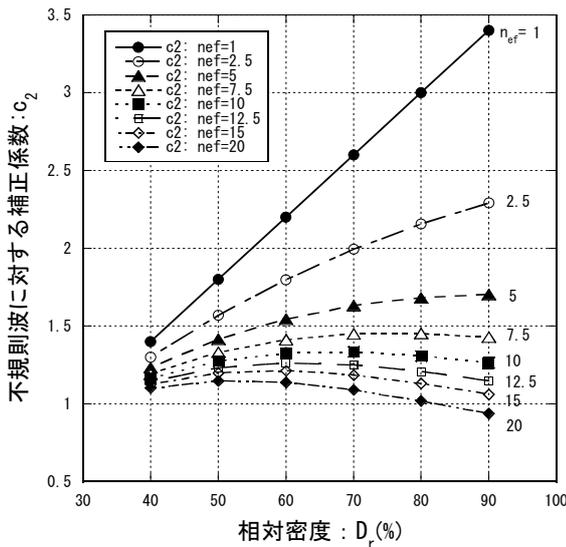


図-5 不規則波に対する補正係数  $c_2$  と有効波数  $n_{ef}$ , 相対密度  $D_r$  の関係

$$c_2 = c_{20} \cdot (n_{ef})^{2.1} \quad (9)$$

$$D_r \geq 2/7: \quad c_{20} = -0.2 + 4 \cdot D_r \quad (10)$$

$$c_{21} = 0.2 - 0.7 \cdot D_r \quad (11)$$

ここで, 式(11)において $c_{21}$ は正の値をとると, 式(9)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。図-5は, 式(9)から得られる,  $c_2$ と相対密度, 有効波数の関係である。

3. 粒度・N値法に関する検討

2011年東北地方太平洋沖地震で, 観測された基盤加速度データ<sup>8)</sup>を用いて, 2.章で示した粒度・N値法の検証を行う。対象とした観測地点は, 東北地方整備局塩釜港湾・空港整備事務所, 小名浜港湾事務所, 関東地方整備局千葉港湾事務所の3地点である。このうち, 小名浜港湾事務所が液状化地点, 他の2事務所は非液状化地点である。液状化, 非液状化の確認は, 現地の地盤状況(噴砂の有無など)や地表面で観測された加速度記録波形で判断した。

3.1 塩釜港湾・空港整備事務所(仙台湾)

地震計設置地点の土質柱状図と粒径加積曲線を図-6に示す<sup>9)</sup>。

図-6から, 観測地点の地盤は工学的基盤までが, 細砂~中砂の砂質土でなっており, 地表面近くでN値が $N=7$ と若干小さく, GL.-3~6mにかけては $N=18\sim29$ と大きな値で, GL.-7m付近で工学的基盤が現れている。

細粒分含有率は, 地表面近くのN値の小さいところで $F_c=15\%$ と細粒分のやや多い層があるが, その下の層は $F_c=5\%$ 程度の細粒分の少ない層である。

PS検層の結果からは, 砂質土層はS波速度が中砂のところで $V_s=130\text{m/s}$ , 細~中砂層で $V_s=180\text{m/s}$ となっており, 工学的基盤では $V_s=820\text{m/s}$ となっている。

表-1に上記のデータから作成した, 応答計算(SHAKE)の入力定数を示す。

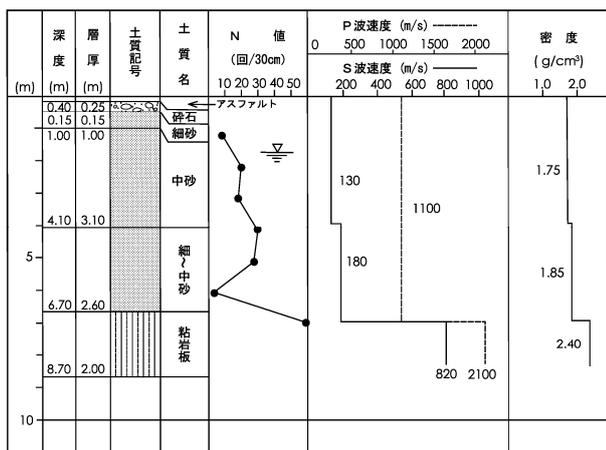


図-6(a) 土質柱状図 (仙台港)

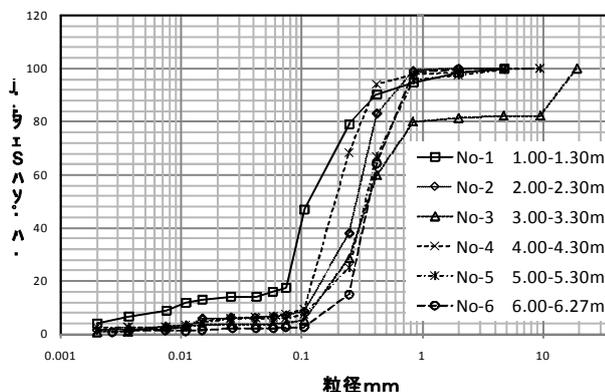


図-6(b) 粒径加積曲線 (仙台港)

表-1 入力定数 (仙台港)

仙台		地下水位: G.L.-1.7m		
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)
1.7	7	15.8	1.75	130
2.0	7	15.8	1.75	130
3.0	19	6.9	1.75	130
4.1	18	3.8	1.75	130
5.0	29	7.4	1.85	180
6.0	27	6	1.85	180
6.7	2	2.4	1.85	180
7.0	50		2.40	820

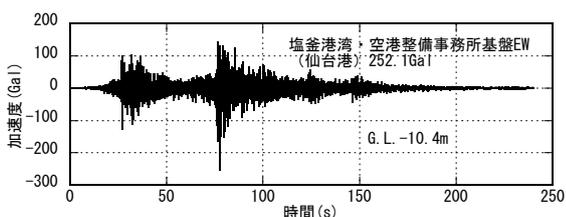


図-7(a) 基盤加速度 EW (仙台港)

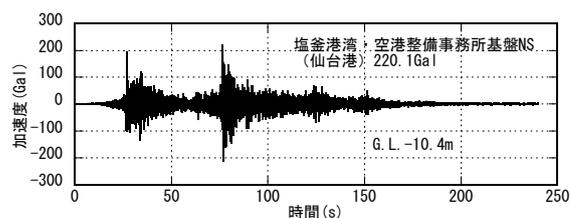


図-7(b) 基盤加速度 NS (仙台港)

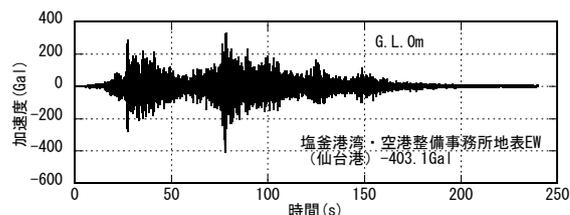


図-7(c) 地表加速度 EW (仙台港)

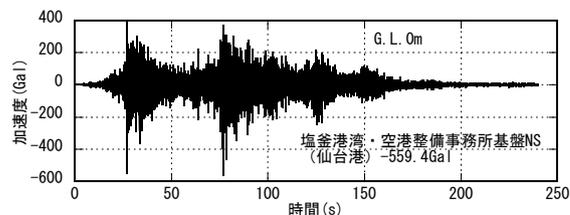


図-7(d) 地表加速度 NS (仙台港)

図-7に、基盤加速度記録と地表面加速度記録を示す。地震計は地表面G.L.0mと工学的基盤内のG.L.-10.5mに設置されている。

図-7(a), (b)から基盤加速度はEW方向, NS方向のいずれも2つ山の波形で、2つ目の山に加速度の最大値がある。最大加速度はEW方向が252Gal, NS方向が220Galとなっており、EW方向が若干大きな値である。

図-7(c), (d)から地表面加速度も基盤と同じく2つ山の波形で、最大加速度は2つ目の山にある。地表面での最大加速度はEW方向が403Gal, NS方向が559Galと2~3倍に増幅しており、またNS方向が大きな値となっている。

上述した地盤条件と基盤加速度を用いて、液状化の予測を行った。図-8に粒度・N値法による液状化の予測結果、図-9に液状化安全率 $F_L$ の深度分布を、EW波, NS波について示す。図-8, 9には現行の方法による結果を●プロットで、波形による補正を行う改良案の結果を○プロットで示す。また、液状化安全率 $F_L$ は以下のように求めたものである。

液状化安全率は、対象土層の等価N値に対して、その土層が液状化するか否かの限界の等価加速度を図-8のIIと

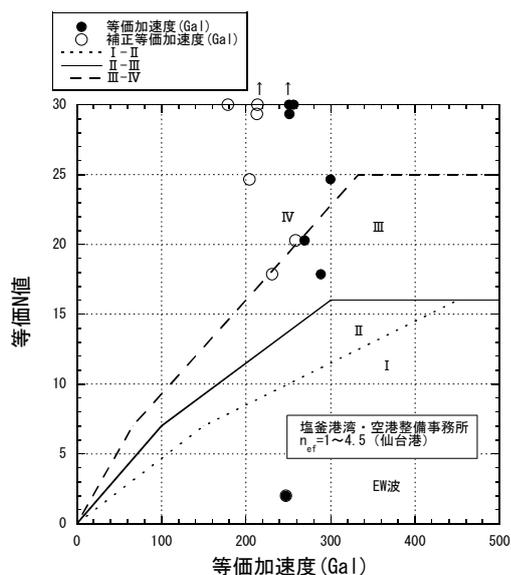


図-8(a) 液状化予測結果（仙台港：EW波）

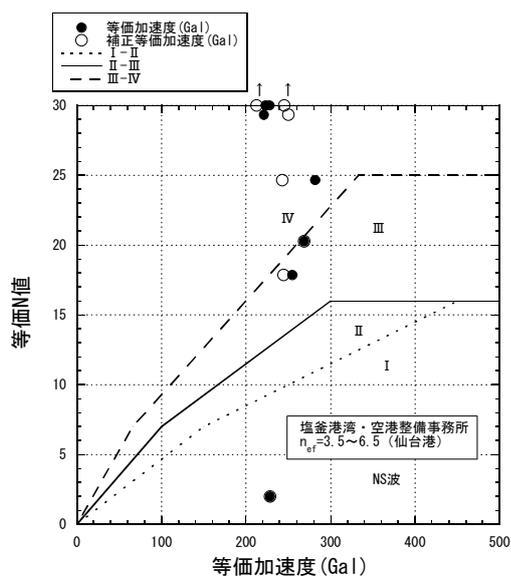
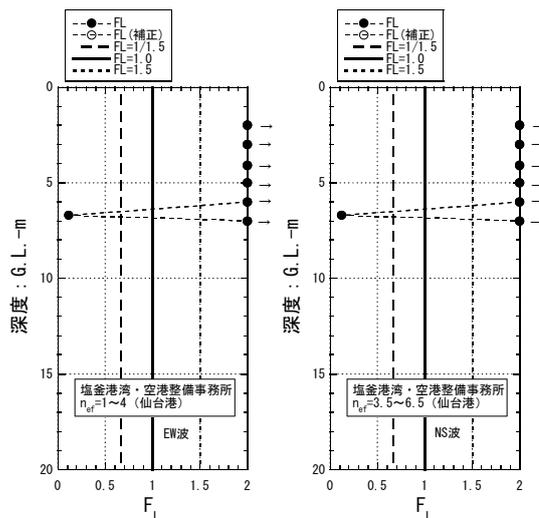


図-8(b) 液状化予測結果（仙台港：NS波）

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。また、 $F_L$ が2以上のものは $F_L=2$ としてプロットし、等価N値が16以上のものは安全率が定まらないので $F_L=2$ としている。液状化安全率が $F_L=1/1.5$ が図-8, 9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。

波形による補正の有無の影響は、図-8から、波形補正を行った方が、等価加速度が小さくなるプロットとなって表れている。これは、有効波数を求めた例として、図-10にEW波を用いたGL-1.85mとGL-4.55mの土層の応答計算結果を示すが、応答計算結果から得られた有効波



(a) EW波 (b) NS波  
図-9 液状化安全率： $F_L$ 分布（仙台港）

数がEW波を用いたものでは $n_{ef}=1\sim 4.5$ 、また、NS波を用いたものでは $n_{ef}=3.5\sim 6.5$ となり、大部分が $n_{ef}=5$ より小さくなったからである。すなわち、式(3)で算定される波形補正係数 $c_a$ は、有効波数が5より小さくなると1よりも大きくなり、式(2)において等価加速度が小さくなる補正となるからである。また、図-10で示されたように、基盤加速度が同じでも、土層ごとにせん断応力の時刻歴は異なったものとなり、有効波数の値は土層ごとに異なる。

液状化予測については、図-8, 9から、1点（GL-6.7mの層）だけが、I（液状化する）の領域で、 $F_L=0.1$ 程度で非常に低くなっている。その他は、IVあるいはIIIの領域にプロットされ、液状化安全率も $F_L=2$ となっている。また、波形補正の有無で予測に大きな違いは見られない結果となっている。

現地では、噴砂等の液状化の痕跡は報告されていない。ただし、津波が遡上しておりその影響で痕跡が失われた可能性がある。また、図-7で示した地表面加速度波形を基盤加速度波形と比較すると、液状化の発生を示すような波形の大きな乱れは認められない。これらのことから、現地の地盤は液状化していないと思われる。

しかし液状化の予測結果は、1層だけ液状化の可能性を示しており、現地と矛盾している。この点については後述の3.4節で考察する。

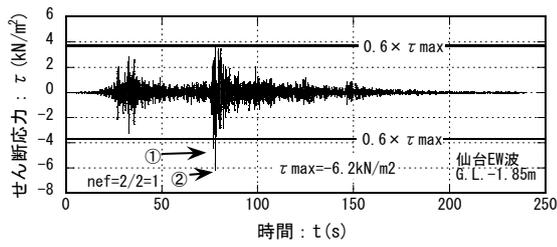


図-10(a) 応答計算結果と有効波数：G.L.-1.85m

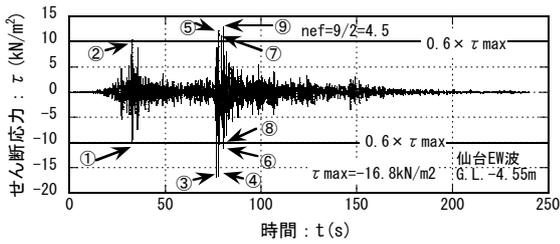


図-10(b) 応答計算結果と有効波数：G.L.-4.55m

### 3.2 小名浜港湾事務所（小名浜港）

地震計設置地点の土質柱状図と粒径加積曲線を図-10に示す<sup>10)</sup>。

図-11から、観測地点の地盤は工学的基盤までが、盛土・瓦礫と中砂の砂質土でなっており、地表面近くでN値がN=7と若干小さく、G.L.-3～6mにかけてはN=36～50と大きな値で、G.L.-7mで工学的基盤が現れている。

細粒分含有率はG.L.-4mまでは $F_c=5\sim10\%$ と小さいが、その下のG.L.-4～-6mの層は $F_c=15\sim30\%$ 程度の細粒分の多い層である。

PS検層の結果から、S波速度は、地表からG.L.-3.5mまでが $V_s=100\text{m/s}$ 、G.L.-3.5～-7mで $V_s=150\text{m/s}$ となっており、G.L.-7m以深の工学的基盤では $V_s=700\text{m/s}$ となっている。

表-2に上記のデータから作成した、応答計算(SHAKE)の入力定数を示す。

図-12に、基盤加速度記録と地表面加速度記録を示す。地震計は地表面G.L.0mと工学的基盤内のG.L.-11.05mに設置されている。

図-12(a)，(b)から、最大加速度はEW方向が173Gal，NS方向が198Galとなっており，NS方向が大きな値である。

図-12(c)，(d)から、地表面での最大加速度はEW方向が1247Gal，NS方向が974GalとEW方向が大きな値となっており，基盤加速度と比較すると5～7倍の非常に大きな値に増幅している。

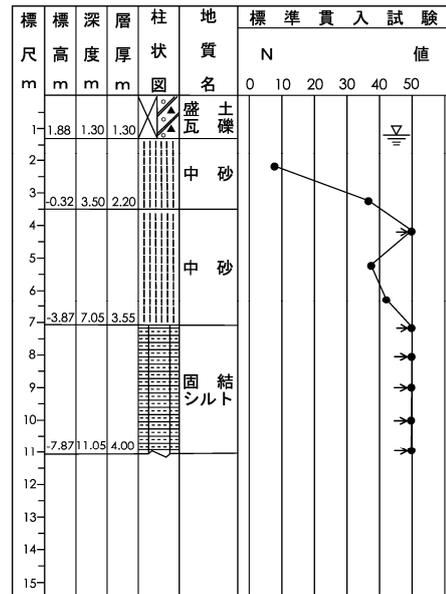


図-11(a) 土質柱状図（小名浜港）

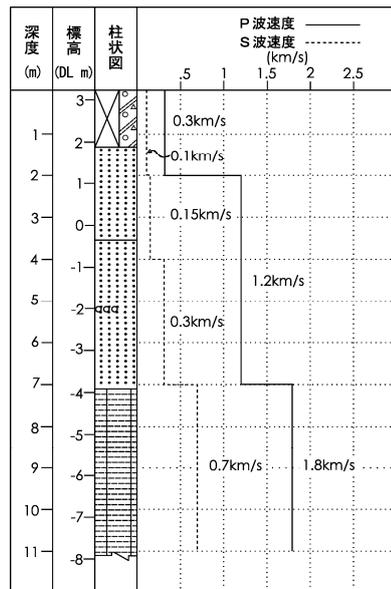


図-11(b) PS検層（小名浜港）

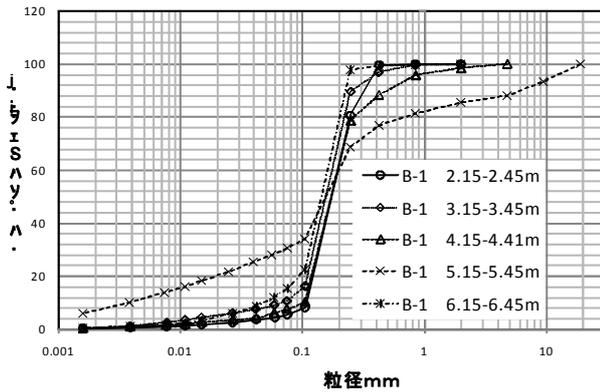


図-11(c) 粒径加積曲線 (小名浜港)

表-2 入力定数 (小名浜港)

小名浜			地下水位: G.L.-1.3m	
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)
1.3	7	5.5	1.80	100
2.0	7	5.5	2.00	100
3.0	36	10.6	2.00	150
4.0	50	7.5	2.00	150
5.0	37	30.4	2.00	300
6.0	42	15.3	2.00	300
7.0	50		2.00	300
8.0	50		2.00	700

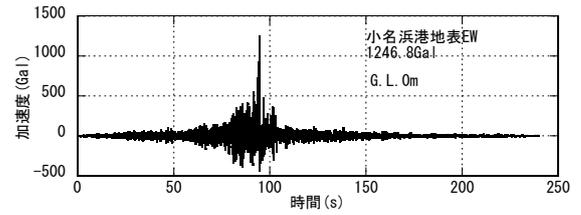


図-12(c) 地表加速度 EW (小名浜港)

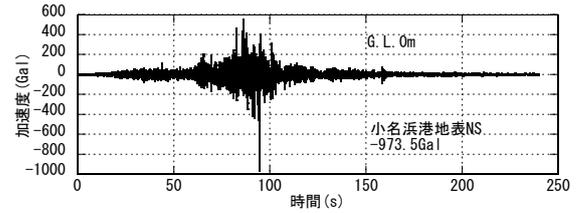


図-12(d) 地表加速度 NS (小名浜港)

上述した地盤条件と基盤加速度を用いて、液状化の予測を行った。図-13に粒度・N値法による液状化の予測結果、図-14に液状化安全率 $F_L$ の深度分布を、EW波、NS波について示す。

波形による補正の有無の影響は、図-13, 14から、波形補正を行った方が等価加速度は大きくなり、前述した仙台港の事例とは逆の傾向である。これは、応答計算結果から得られた有効波数が、EW波を用いたものでは $n_{ef}=14 \sim 18$ 、NS波を用いたものは $n_{ef}=11.5 \sim 17$ で、すべてが $n_{ef}=5$ よりも大きくなり、波形補正係数 $c_a$ が1よりも小さくなったからである。

液状化予測については、図-13, 14から、地下水位付近の1点 (G.L.-1.3~-2mの層) だけが、I (液状化する) の領域で、液状化安全率も $F_L=0.5$ 程度で低い値になっている。その他は、すべてIVの領域にプロットされ、液状化安全率も $F_L=2$ となっている。波形補正の有無による液状化予測の差異に関しては、等価加速度に比較的大きな違いがでていますが、液状化の有無の予測については同じ予測結果となっている。

現地の状況は、津波の影響などもあり噴砂等の確認の報告はないが、図-12で示した地表面加速度波形において、スパイク状の加速度応答が記録されている。これは、野津らの指摘<sup>1)</sup>のように、サイクリックモビリティの影響であり、液状化が発生した層があると考えられる。

液状化の予測結果は、地下水位付近の1層だけが液状化の可能性を示しており、この層が液状化してサイクリックモビリティの挙動を示し、図-12の地表面加速度応答になったといえる。

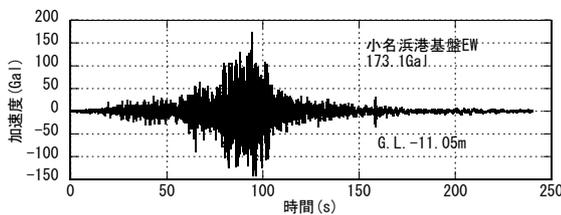


図-12(a) 基盤加速度 EW (小名浜港)

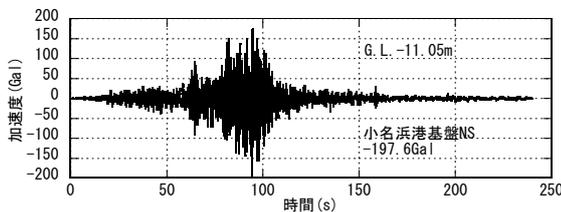


図-12(b) 基盤加速度 NS (小名浜港)

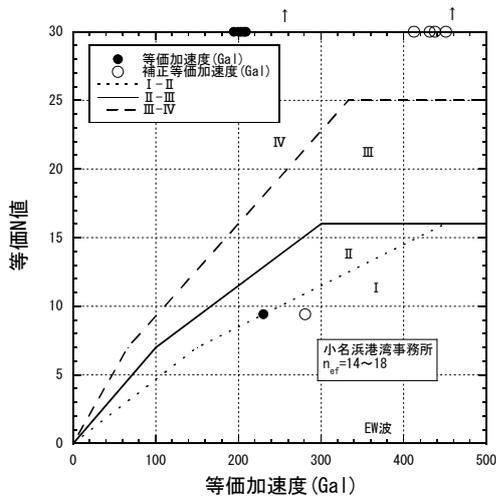


図-13(a) 液状化予測結果 (小名浜港: EW波)

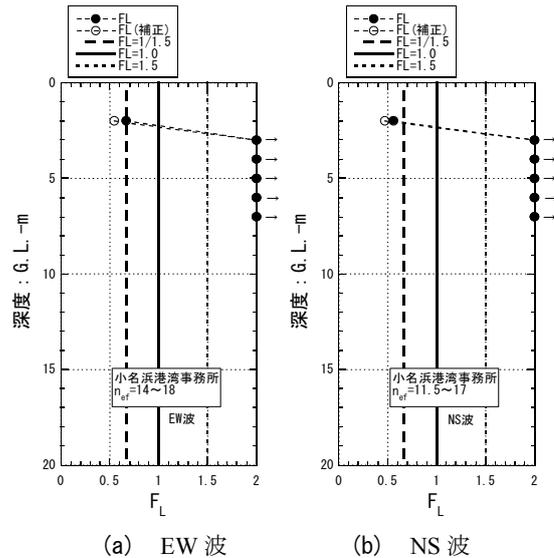


図-14 液状化安全率:  $F_L$  分布 (小名浜港)

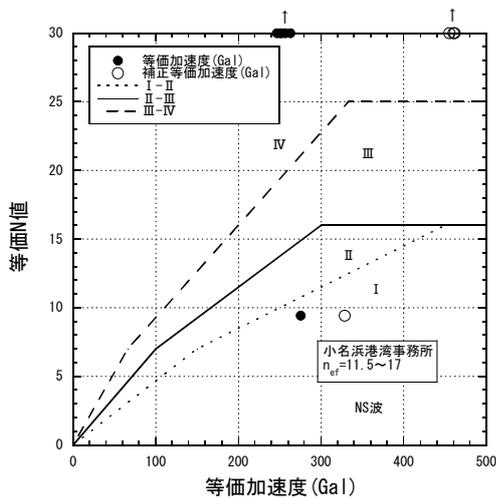


図-13(b) 液状化予測結果 (小名浜港: NS波)

### 3.3 千葉港湾事務所 (千葉港)

地震計設置地点の土質柱状図と粒径加積曲線を図-15に示す<sup>11)</sup>。

図-15から、観測地点の地盤は、地表面からG.L.-1.5mまでが細砂による埋め土、G.L.-1.5~-12mが細砂、G.L.-12~-18mがシルト質細砂~粘土などの互層、G.L.-18~-25mが一部シルト質細砂を挟んだ細砂、G.L.-25~-30mがシルト質粘土、G.L.-30.5mにシルト混じり細砂を挟み、G.L.-31mに細砂による工学的基盤が現れている。

N値については、上部細砂層は地表面からG.L.-4mまでは $N=2\sim4$ と小さく、G.L.-4~-8mで $N=13\sim21$ と比較的大きくなり、G.L.-8~-12mで $N=3\sim8$ の値になっている。G.L.-12~-18mのシルト質細砂~粘土の互層は、 $N=1\sim2$ と非常に小さい値である。G.L.-18~-25mの下部細砂層は、 $N=10\sim32$ の範囲でばらついている。G.L.-25~-30mのシルト質粘土層では $N=4$ 程度の値となり、これ以深で $N=50$ 以上の工学的基盤となっている。

細粒分含有率は、上部細砂層のみで調べられており、下部のシルト質細砂層との境界部を除くと、 $F_c=10\%$ 以下である。

PS検層の結果から、S波速度は、地表からG.L.-3.4mまでが $V_s=120\text{m/s}$ 、G.L.-3.4~-7.9mで $V_s=220\text{m/s}$ 、G.L.-7.9~-11.7mで $V_s=200\text{m/s}$ 、G.L.-11.7~-17.5mで $V_s=120\text{m/s}$ 、G.L.-17.5~-25.6mで $V_s=290\text{m/s}$ 、G.L.-25.6~-29.9mで $V_s=210\text{m/s}$ となっており、G.L.-29.9m以深の工学的基盤では $V_s=420\text{m/s}$ となっている。

表-3に上記のデータから作成した、応答計算(SHAKE)の入力定数を示す。

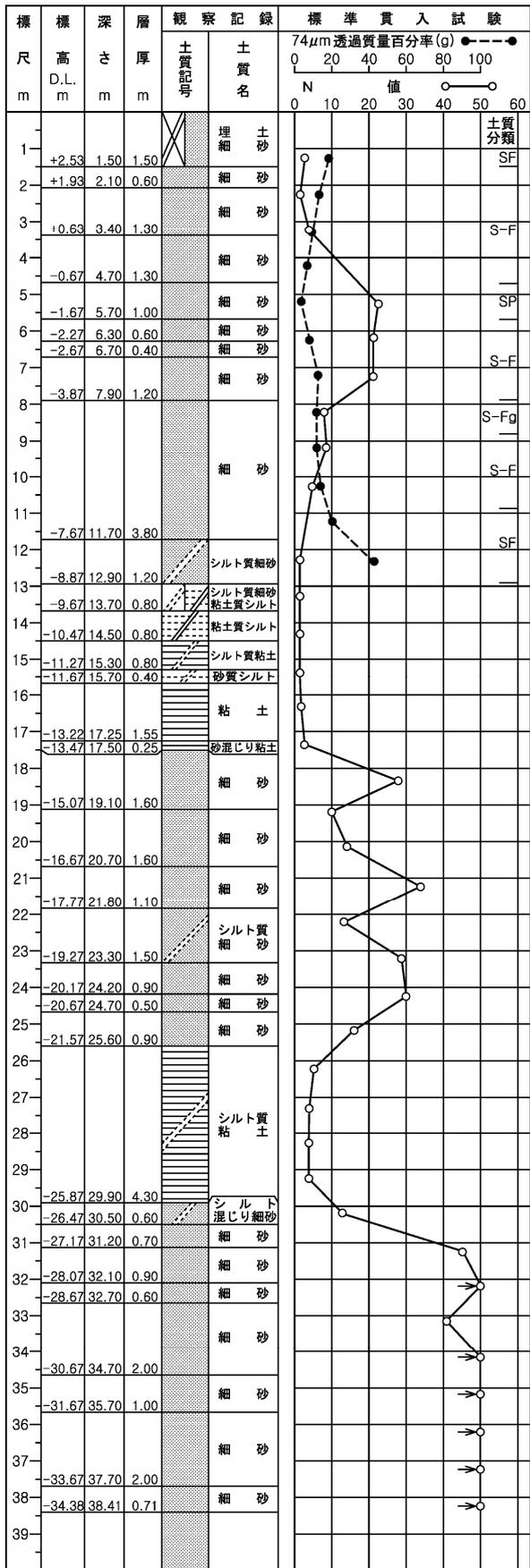


図-15(a) 土質柱状図：(千葉港)

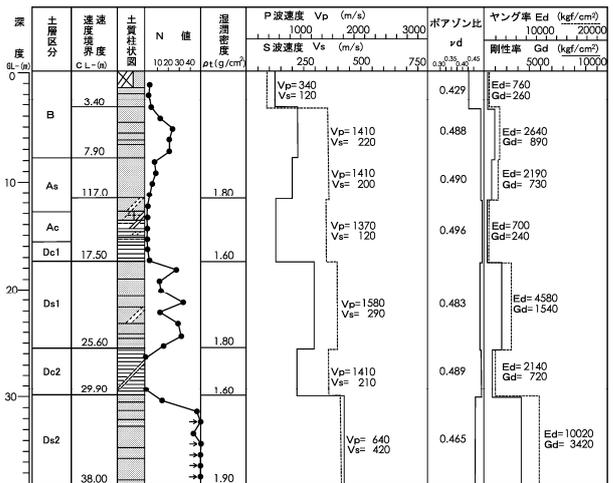


図-15(b) PS 検層 (千葉港)

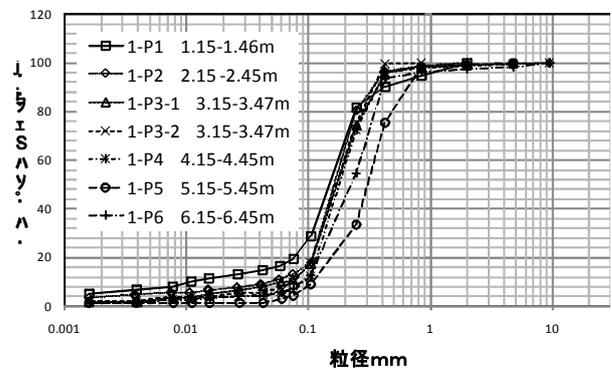


図-15(c) 粒径加積曲線：GL-1.15~6.45m (千葉港)

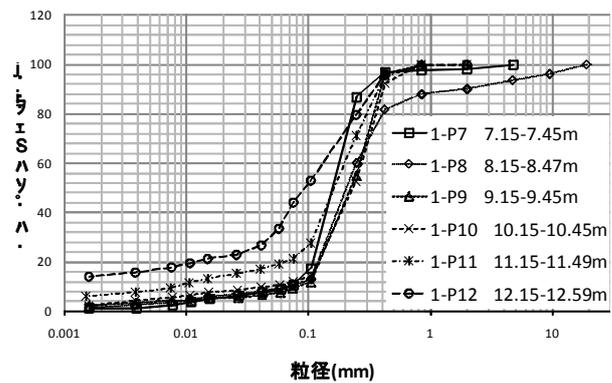


図-15(d) 粒径加積曲線：GL-7.15~12.59m (千葉港)

表-3 入力定数 (千葉港)

千葉			地下水位: G.L.-2.2m	
深さ G.L.-m	N値	細粒分含有率 Fc(%)	湿潤密度 $\rho_s(t/m^3)$	せん断波速度 Vs(m/s)
1.0	3	19.6	1.80	120
2.2	3	19.6	1.80	120
3.0	2	13.1	1.80	220
4.0	4	10.1	1.80	220
5.0	13	6.5	1.80	220
6.0	23	4.3	1.80	220
7.0	21	7	1.80	220
8.0	21	10.4	1.80	200
9.0	7	10.6	1.80	200
10.0	8	9.3	1.80	200
11.0	5	11.6	1.80	200
12.0	3	21	1.80	200
13.0	1	44.1	1.60	120
14.0	1		1.60	120
15.0	1		1.60	120
16.0	1		1.60	120
17.0	1		1.60	120
18.0	2		1.80	290
19.0	26		1.80	290
20.0	11		1.80	290
22.0	12		1.80	290
26.0	4		1.80	290
30.0	45		1.60	210
35.0	50		1.90	420
38.0	50		1.90	420

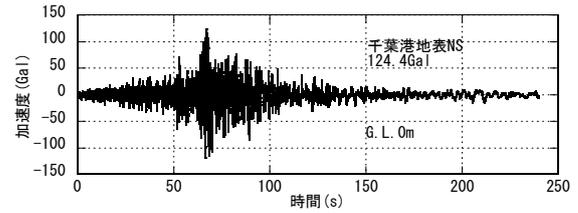


図-16(d) 地表加速度 NS (千葉港)

図-16に、基盤加速度記録と地表面加速度記録を示す。地震計は地表面G.L.0mと工学的基盤内のG.L.-37.82mに設置されている。

図-16(a), (b)から、最大加速度はEW方向が-63Gal, NS方向が-58Galとなっており、EW方向が大きな値である。

図-16(c), (d)から、地表面最大加速度はEW方向が107Gal, NS方向が124GalとNS方向が大きな値となっており、基盤加速度と比較すると2倍程度の値に増幅している。

上述した地盤条件と基盤加速度を用いて、液状化の予測を行った。図-17に粒度・N値法による液状化の予測結果、図-18に液状化安全率 $F_L$ の深度分布を、EW波, NS波について示す。なお、液状化の予測は上部細砂層 (G.L.-2.5 ~ -12m) について行っている。

波形による補正の有無の影響は、図-17, 18から、NS波を用いたものは波形補正を行った方が等価加速度は大きくなり、前述した小名浜港の事例と同じ傾向である。しかし、EW波を用いたものは波形補正の影響はほとんど表れていない。これは、応答計算結果から得られた有効波数が、EW波を用いたものでは $n_{eq}=4.5\sim 5$ で、波形補正係数 $c_w$ が1あるいは1に近い値になったからである。

液状化予測については、図-17, 18から、地下水位付近のG.L.-3~-4mがII (液状化する可能性が高い) の領域で、液状化安全率は $F_L=0.9$ 程度、G.L.-11~-12mがI (液状化する), II (液状化する可能性が高い) の領域で、液状化安全率も $F_L=0.4\sim 0.7$ で低い値になっている。その他は、III, IVの領域にプロットされ、液状化安全率は $F_L=1$ 以上となっている。また、仙台港、小名浜港と同様に、波形補正の有無で液状化の予測結果に大きな違いは見られない。

現地の状況は、噴砂等の液状化の痕跡の報告はなく、また図-16で示した地表面加速度波形を基盤加速度波形と比較すると、液状化の発生を示すような波形の大きな乱れは認められない。これらのことから、現地の地盤は液状化していないと思われる。

液状化の予測結果は、上部細砂層の浅部と深部で液状化の可能性を示しており、現地と矛盾した結果となっている。この矛盾点については、仙台港と同様に3.4節で考察する。

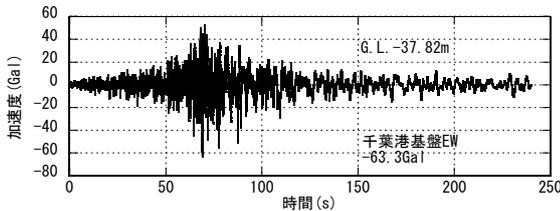


図-16(a) 基盤加速度 EW (千葉港)

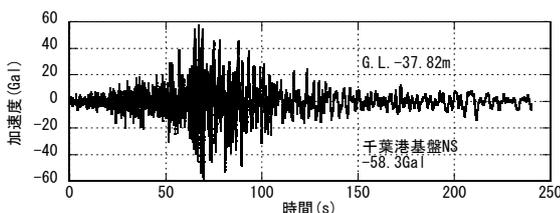


図-16(b) 基盤加速度 NS (千葉港)

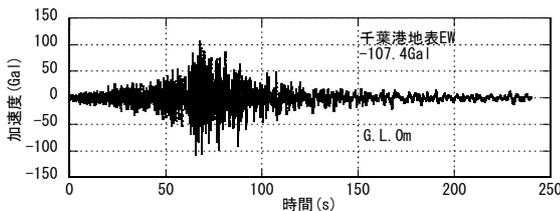


図-16(c) 地表加速度 EW (千葉港)

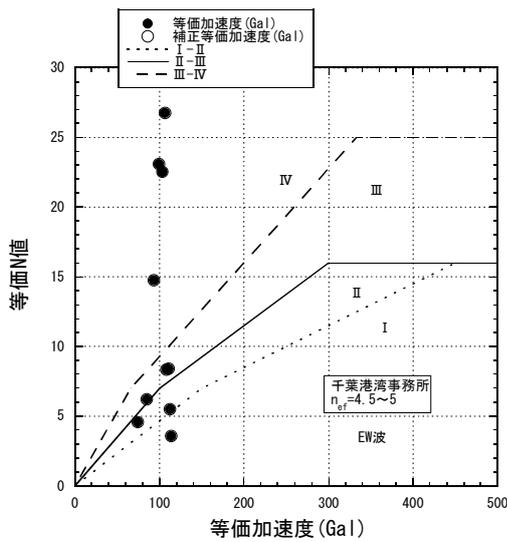
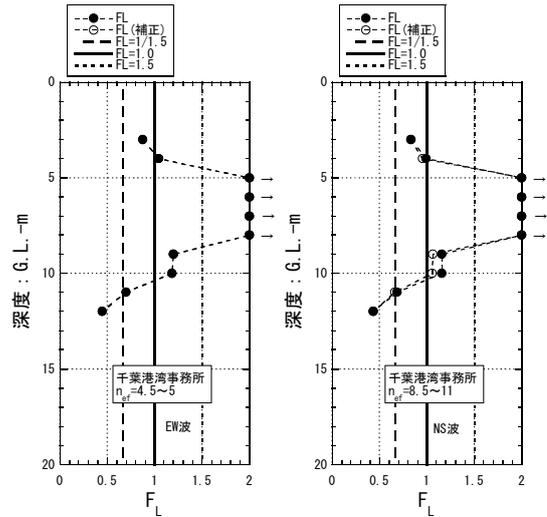


図-17(a) 液状化予測結果（千葉港：EW波）



(a) EW波 (b) NS波  
図-18 液状化安全率： $F_L$ 分布（千葉港）

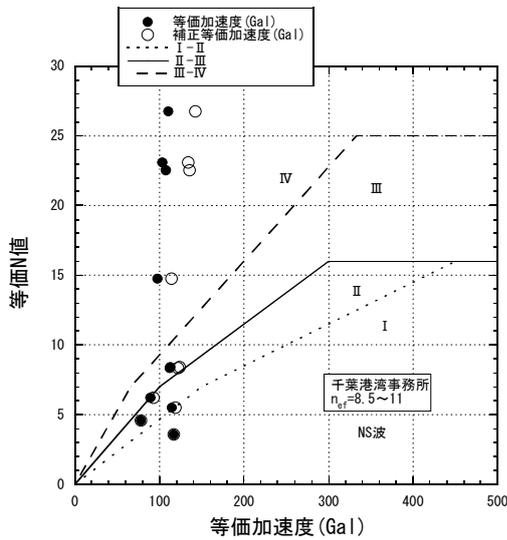


図-17(b) 液状化予測結果（千葉港：NS波）

### 3.4 液状化予測に関する考察

前節3.1～3.3で、仙台港、小名浜港、千葉港の地震計設置地点の液状化予測を行った。現地で実際に液状化が発生したと思われるのは、小名浜港の観測地点で、他の2地点については液状化の発生は認められていない。これに対して、液状化予測の結果の対応は以下の通りであった。

仙台港では局所的にN値の小さい層があり、薄層ではあるが液状化すると予測され、現地の観察と矛盾した。

小名浜港では、地下水付近の層が液状化すると予測され、現地の観測結果と整合した。

千葉港では、地下水位付近、およびやや深い位置の層が液状化の可能性がある、と予測され現地の観測と矛盾した。

矛盾した予測結果の仙台港と千葉港については、安全側であるので、設計上は問題ないと思われるが、以下のことが原因、あるいは課題として残される。

①仙台港についての矛盾の原因は2つ考えられる。1つは、土質調査で得られた対象層のN値が局所的に小さな値であって、平面的に見た場合に対象土層の代表値になっていないことが考えられる。2つ目は、平面的な広がりはあるが、薄層であったために地盤全体の液状化に影響を及ぼさなかった。あるいは、地表面にまで液状化の影響が現れなかった。原因が後者であったのであれば、薄層の液状化が地盤全体の液状化に及ぼす影響等を定量的に評価する方法が必要といえる。

②千葉港の事例では、等価N値の小さい土層が、等価加速

度が100Gal程度の小さい揺れに対して液状化するという予測になったところが、現地の観測と矛盾したところである。粒度・N値法で用いる図-3の判定チャートは、等価N値と等価加速度の関係（限界N値の関係）が原点を通り、N値が小さい場合には、等価加速度が数Gal程度の非常に小さい揺れでも液状化するというものである。この点が、予測結果が現地の観測と矛盾した原因の1つであると思われる。正弦波を用いた繰返し単純せん断試験による液状化試験を行うと、繰返し载荷を何回行っても液状化を起こさないという、液状化抵抗の下限値がある。緩詰め状態の砂であっても、下限値は繰返しせん断応力比で0.1程度はある。この値は正弦波に対する液状化抵抗であるので、例えば不規則波に対する補正係数として図-5での $D_r=50\%$ に対する平均的な値、 $c_2=1.4$ を用いて、不規則波での液状化抵抗（最大せん断応力比）に換算すると、 $R_{Lmax}=0.14$ が得られる。この $R_{Lmax}=0.14$ を式(2)の $(\tau_{max}/\sigma_v')$ の項に代入し、波形補正係数を $c_a=1$ とすると、100Gal程度の値が得られる。これは、下限値0.1を等価加速度に換算すると、100Gal程度の等価加速度に対応する液状化抵抗になることを意味するものである。したがって、等価N値と等価加速度の関係（限界N値の関係）は原点を通るような関係ではなく、例えば等価加速度が100Gal程度のところを切片とするような関係である可能性がある。今後は、等価N値が小さい土を対象に、この点について検討する必要がある。

事例解析での矛盾した予測は安全側の誤差であるので、粒度・N値法を継続時間の長い地震動に対して適用しても問題はないと思われる。ただし、適用に際しては、上述した課題が残されており、また、これは、継続時間の長い地震動に対してだけでなく、通常地震動に対しても同様と考えられ、粒度・N値法の適用に際しては常に留意しなければならない点であるといえる。

#### 4. 不規則波に対する補正係数に関する検討

仙台港、小名浜港および千葉港で観測された基盤加速度データを用いて、不規則波に対する液状化抵抗の補正係数を検討する。検討は、各基盤加速度のNS方向の加速度記録を、せん断応力の時刻歴波形として行った。

##### 4.1 試験方法

液状化試験は繰返し単純せん断試験装置を用いて行った。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。

供試体は、リング内に乾燥状態の相馬砂（土粒子密度 $\rho_s=2.64\text{g/cm}^3$ 、最大間隙比 $e_{max}=1.20$ 、最小間隙比 $e_{min}=0.71$ ）をスプーンで投入しながらリング側方を打撃し、所定の密度になるように作製した。密度は相対密度が $D_r=50, 80\%$ の2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制御し、等体積条件で所定のせん断応力波形を载荷した。

せん断応力の波形は、図-7(b)の仙台波、図-12(b)の小名浜波、図-16(b)の千葉波、および、旧基準で用いられていた1968年十勝沖地震での八戸波<sup>3)</sup>と周期10秒の正弦波である。荷重制御の精度を高くするために、観測された波形の時間軸を仙台波、小名浜波、千葉波については10倍、八戸波については5倍にして载荷している。

そして、正弦波载荷では繰返しせん断応力比と液状化に至るまでの繰返し回数の関係を、不規則波载荷では最大せん断応力比と発生する両振幅せん断ひずみの関係を調べた。

#### 4.2 試験結果

##### (1) 正弦波载荷

正弦波载荷による相馬砂の液状化抵抗曲線を図-19に示す。図-19の液状化抵抗曲線は、繰返し载荷中の両振幅せん断ひずみが $\gamma_{DA}=7.5\%$ に達したときを液状化の発生として求めたものである。なお、液状化状態を両振幅せん断ひずみ $\gamma_{DA}=7.5\%$ としているのは、繰返し三軸試験では両振幅軸ひずみが5%の状態を液状化として定義するのが一般的で<sup>例えは6)</sup>、これを両振幅せん断ひずみに直すと7.5%になるからである。図-19において、●プロットが相対密度 $D_r=50\%$ 、▲プロットが相対密度 $D_r=80\%$ の結果で、図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。

正弦波での液状化抵抗は、繰返し回数が $N=20$ 回で液状化する繰返しせん断応力比 $R_{L20}$ として定義される。図-19から、 $D_r=50\%$ では $R_{L20}=0.103$ 、 $D_r=80\%$ では $R_{L20}=0.128$ が得られた。

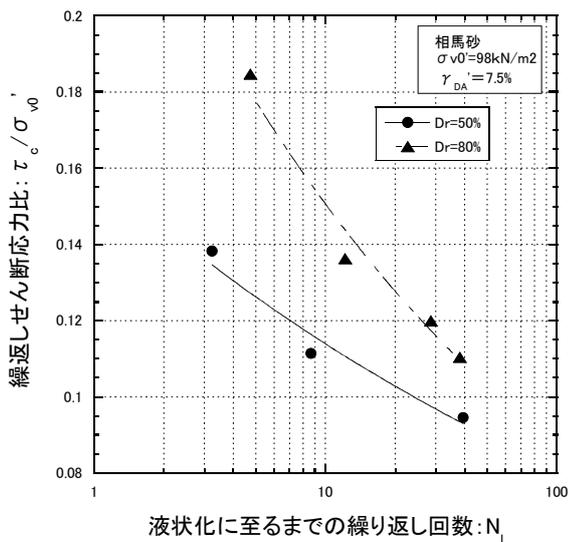


図-19 液状化抵抗曲線（正弦波）

(2) 不規則波載荷

各不規則波載荷でのせん断応力，有効応力，せん断ひずみの時刻歴の一例を，図-20～23に示す。

図-20(a)，21(a)，22(a)と，図-7(b)，12(b)，16(b)を比較すると，試験でのせん断応力の時刻歴は，後半で荷重が小さめにかかっていることが分かる。これは，図-7(b)，12(b)，16(b)の各基盤加速度波形を入力したのであるが，载荷中に有効応力が低下し供試体に大きなせん断ひずみが発生すると，荷重制御が困難となり荷重がかりきらなくなるからである。

仙台で記録された地震動波形は，図-20(a)で示したような，2つ山の波形で，過去にない時刻歴波形である。そこで，図-20についてやや詳しく見てみる。図-20(a)のせん断応力の時刻歴と図-20(b)の有効応力の時刻歴から，せん断応力の時刻歴が1つ目の山のピーク荷重のところで，有効応力が大きく減少し，その後は一定値を保ち，再び2つ目の山のピーク荷重のところで大幅に有効応力が減少して液状化に至っていることがわかる。図-20(a)のせん断応力の時刻歴と図-20(c)のせん断ひずみの時刻歴から，せん断応力の時刻歴の1つ目の山ではひずみはほとんど発生せず，2つ目の山で大きなひずみが発生していることがわかる。最大せん断応力の設定をさらに大きくすれば，1つ目の山でも有効応力はゼロとなって液状化し，大きなひずみは発生するが，図-20(b)，(c)で示した有効応力とせん断ひずみの時刻歴は，図-20(a)のような2つ山の波形に対しての特徴的な土の挙動であると考えられる。

また，小名浜港においては図-12(c)，(d)で示したように，加速度応答記録にサイクリックモビリティの影響が見られた。そこで，試験で用いた試料や密度などの試験

条件は現地のものとは異なっているが，小名浜波でのサイクリックモビリティについて調べたのが図-24である。図-24は，図-21のデータから有効応力経路と応力ひずみ関係を求めたものである。図-24中で示すように，せん断応力の載荷とともに有効応力が回復し，そしてせん断剛性が回復するサイクリックモビリティの現象が確認できる。

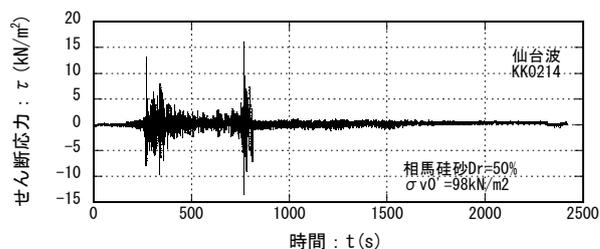


図-20(a) せん断応力時刻歴（仙台波）

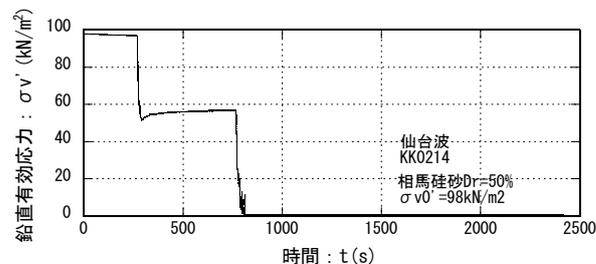


図-20(b) 有効応力時刻歴（仙台波）

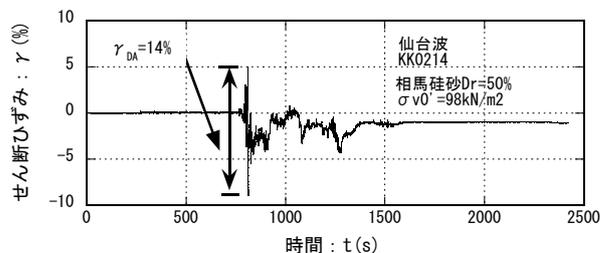


図-20(c) せん断ひずみ時刻歴（仙台波）

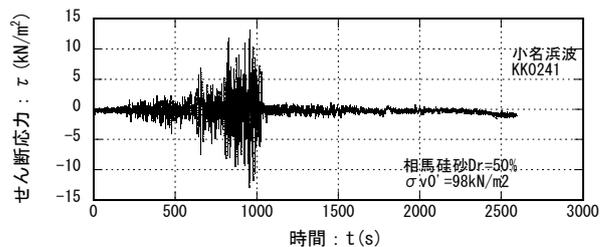


図-21(a) せん断応力時刻歴（小名浜波）

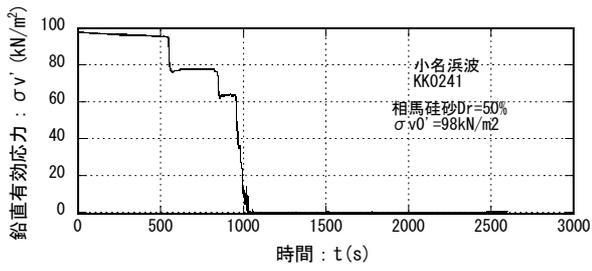


図-21(b) 有効応力時刻歴 (小名浜波)

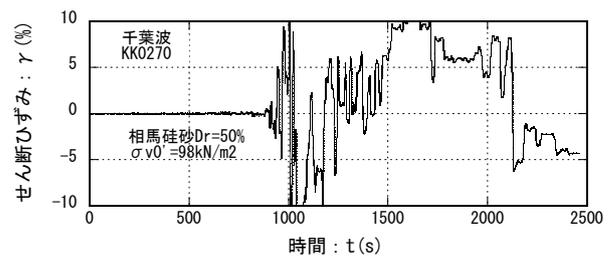


図-22(c) せん断ひずみ時刻歴 (千葉波)

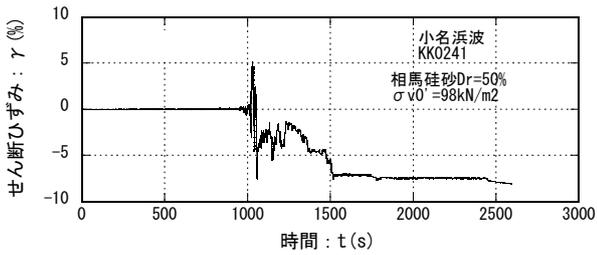


図-21(c) せん断ひずみ時刻歴 (小名浜波)

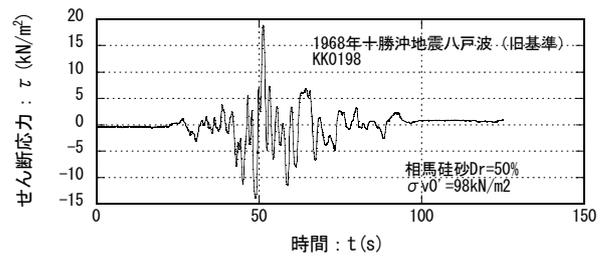


図-23(a) せん断応力時刻歴 (1968年十勝沖一八戸波)

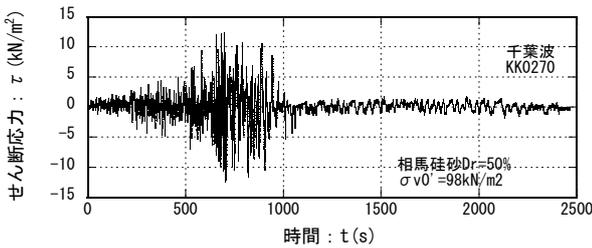


図-22(a) せん断応力時刻歴 (千葉波)

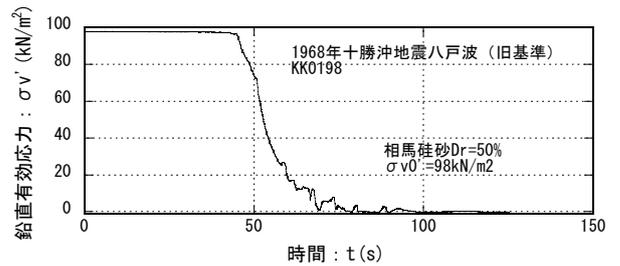


図-23(b) 有効応力時刻歴 (1968年十勝沖一八戸波)

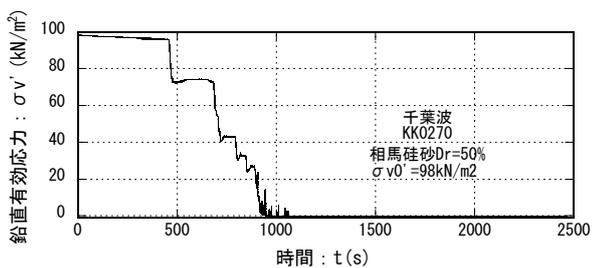


図-22(b) 有効応力時刻歴 (千葉波)

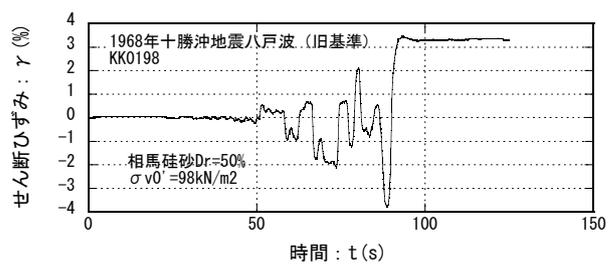


図-23(c) せん断ひずみ時刻歴 (1968年十勝沖一八戸波)

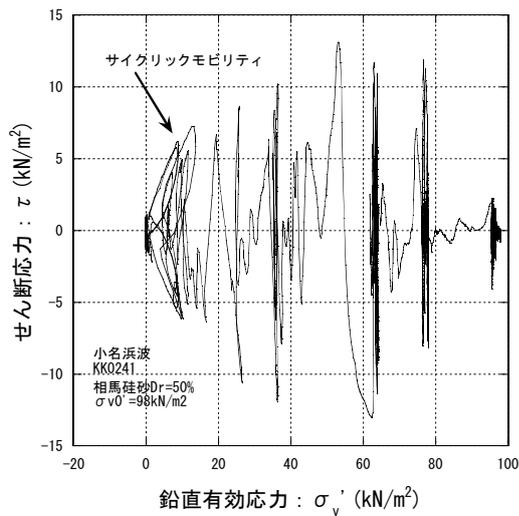


図-24(a) 有効応力経路 (小名浜波)

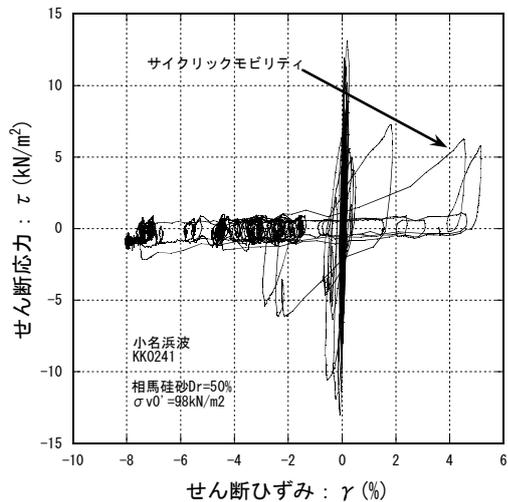


図-24(b) 応力ひずみ関係 (小名浜波)

図-25に不規則波載荷での最大せん断応力比と、発生した最大両振幅せん断ひずみ関係を示す。図-25には各プロットを累乗関数で近似した線、および各不規則波の有効波数 $n_{ef}$  (実際に供試体に載荷され計測されたせん断応力の時刻歴から求めたものの平均値)を示してある。

図-25から、相対密度が同じでも、波形が異なると最大せん断応力比と発生する両振幅せん断ひずみ関係は大きく異なり、有効波数が大きくなると小さなせん断応力比でも大きなせん断ひずみが発生することが分かる。

不規則波載荷での液状化抵抗 $R_{Lmax}$ は、最大両振幅せん断ひずみが、 $\gamma_{DA}=7.5\%$ になる場合の最大せん断応力比として定義される。図-25から、各波の液状化抵抗は相対密度が $D_r=50\%$ の場合、仙台波で $R_{Lmax}=0.165$ 、小名浜波で

$R_{Lmax}=0.134$ 、千葉波で $R_{Lmax}=0.126$ 、および十勝沖地震での八戸波で $R_{Lmax}=0.195$ となった。相対密度が $D_r=80\%$ の場合には、仙台波で $R_{Lmax}=0.246$ 、小名浜波で $R_{Lmax}=0.181$ 、千葉波で $R_{Lmax}=0.174$ 、および十勝沖地震での八戸波で $R_{Lmax}=0.370$ となった。

図-26には、液状化抵抗と有効波数の関係を示す。図-26から、液状化抵抗は有効波数が大きくなると小さくなり、相対密度が大きな方が大きな値となっている。

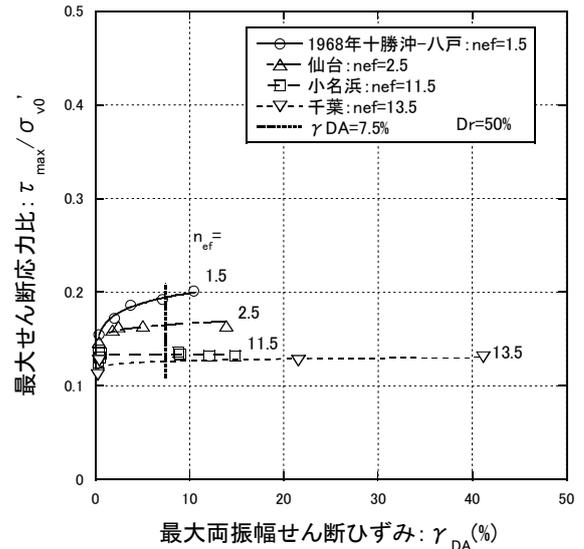


図-25(a) 最大せん断応力比と最大両振幅せん断ひずみの関係 ( $D_r=50\%$ )

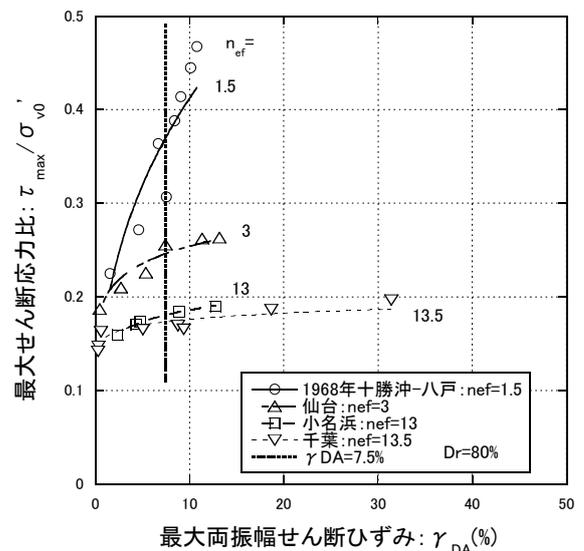


図-25(b) 最大せん断応力比と最大両振幅せん断ひずみの関係 ( $D_r=80\%$ )

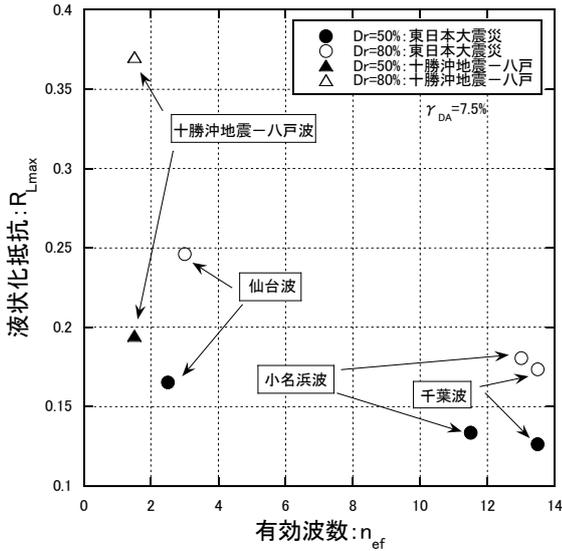


図-26 不規則波での液状化抵抗  $R_{Lmax}$  と有効波数  $n_{ef}$  の関係

### 4.3 不規則波に対する補正係数

前述の正弦波試験，不規則波試験で得られた液状化抵抗  $R_{L20}$  と  $R_{Lmax}$  から不規則波に対する補正係数  $c_2$  を式(8)により求めた。得られた不規則波に対する補正係数  $c_2$  を正弦波での液状化抵抗  $R_{L20}$ ，不規則波での液状化抵抗  $R_{Lmax}$ ，有効波数  $n_{ef}$  とともに表-4に示す。図-27は，不規則波に対する補正係数  $c_2$  と有効波数  $n_{ef}$  の関係を調べ，式(9)で示した著者らの提案式と比較したものである。図-27中には，著者らの実施した過去の実験データ<sup>2)</sup>，不規則波を衝撃型と振動型に分け石原により提案された  $c_2$  の値<sup>7)</sup>も示している。

図-27から，今回の地震動波形に対する  $c_2$  の実験結果と提案式で求めた  $c_2$  を比較すると，提案式は相対密度  $D_r=80\%$  でやや過小評価しているが，実験結果と整合性のある対応で提案式は妥当性があるといえる。また，地震動継続時間の液状化の発生におよぼす影響は，著者らの提案した有効波数  $n_{ef}$  をパラメータとして定量的に評価できるといえる。

表-4 不規則波に対する補正係数

相対密度 (%)	波形名	$R_{L20}$	$R_{Lmax}$	$c_2$	$n_{ef}$
50	仙台波	0.103	0.165	1.602	2.5
	小名浜波		0.134	1.301	11.5
	千葉波		0.126	1.223	13.5
	十勝沖地震-八戸波		0.195	1.893	1.5
80	仙台波	0.128	0.246	1.922	3.0
	小名浜波		0.181	1.414	13.0
	千葉波		0.174	1.359	13.5
	十勝沖地震-八戸波		0.370	2.891	1.5

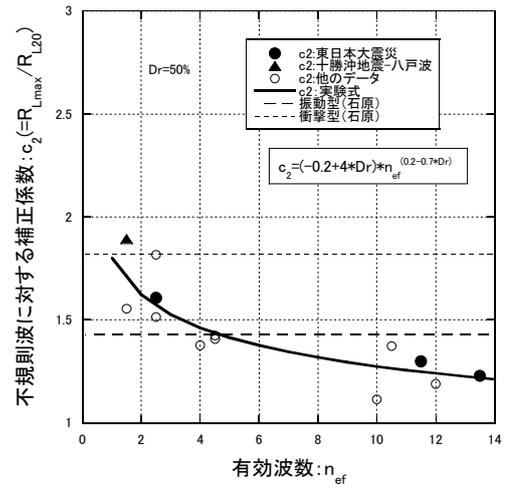


図-27(a) 不規則波に対する補正係数  $c_2$  と有効波数  $n_{ef}$  の関係 ( $D_r=50\%$ )

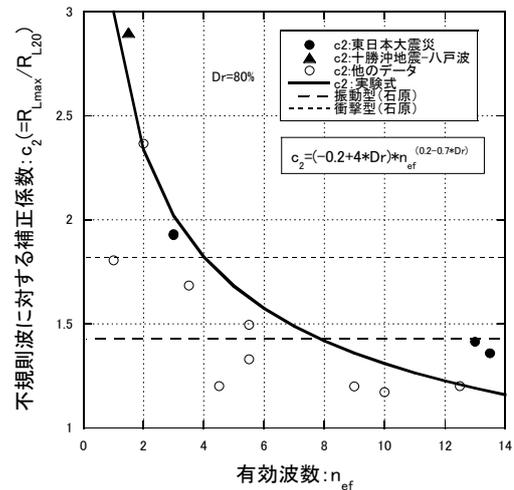


図-27(b) 不規則波に対する補正係数  $c_2$  と有効波数  $n_{ef}$  の関係 ( $D_r=80\%$ )

## 5. 地震動継続時間の液状化現象に及ぼす影響に関する考察

今回の地震では、地震動継続時間が非常に長く、このことが液状化現象に大きな影響を及ぼした可能性がある。継続時間が長くなると地盤の排水の影響が大きくなる可能性があるが、地盤の排水性を考慮するには透水係数がパラメータとして必要となり、境界条件なども考慮した複雑な地盤解析が必要となるので、ここでは排水条件については非排水として考察する。したがって、排水性の良い地盤については精度の高くない考察となる。

液状化の発生は、非排水条件であれば作用する繰返しせん断応力の大きさと、その波形（あるいは繰返し回数）に依存する。4章で示したように、波形の影響は有効波数を介して考慮することができ、継続時間が長くなると有効波数は大きくなると考えられる。そこで最初に、有効波数と継続時間の関係を調べる。

図-28は、3章で行った液状化予測での基盤加速度の継続時間と地盤応答解析で得られた有効波数の関係を調べたものである。図-28には、過去の5つの被災地震についてもプロットしている<sup>2), 7), 12)</sup>。ここでの地震動継続時間の定義は、10Gal以上の加速度振幅が作用している時間としている。

図-28から、過去の地震での継続時間は20～100秒程度であったが、今回の地震の継続時間は150～200秒と非常に長いものであったことがわかる。しかし、有効波数は、小名浜については $n_{ef}=14\sim 18$ 、千葉については $n_{ef}=5\sim 11$ と大きいのであるが、仙台については $n_{ef}=1\sim 5$ 程度で大きくはない。また、継続時間に対しての有効波数のばらつきは、過去の地震も含めて非常に大きく、継続時間と有効波数の間に良い相関があるとは言えない。これは、継続時間あるいは波形が同じでも、地盤の応答特性により、有効波数は大きく変化するからである。しかし、図-28のプロットの傾向として、継続時間が長くなるほど有効波数は大きくなることが認められる。

そこで、以降では、継続時間との相関は必ずしも高くないが、有効波数を介して継続時間が長かった影響を考察する。考察は、液状化の発生に関することと、液状化が発生した場合の液状化の程度（被害の大きさ）に関することの2つに分けて行う。なお、本論文では、「液状化の程度」を液状化状態での発生ひずみ量の大小で考える。

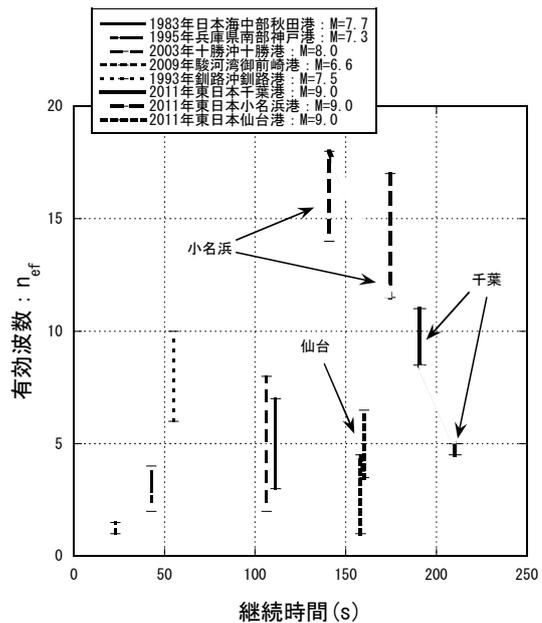


図-28 地震動継続時間と有効波数  $n_{ef}$  の関係

### 5.1 液状化の発生に関しての考察

「液状化する」、「液状化しない」、という液状化発生に及ぼす、継続時間の影響は、有効波数を介して、図-29の波形補正係数 $c_a$ で示すことができる。図-29(a)は式(3)～(5)を用いて波形補正係数 $c_a$ と相対密度、有効波数の関係を調べたものである。図-29(b)は、図-29(a)から式(6)を利用して、有効上載圧が $\sigma'_v=65\text{kN/m}^2$ として求めた波形補正係数 $c_a$ とN値の関係である。図-29からわかるように、有効波数が $n_{ef}=5$ の場合には補正係数は1.0となり、この有効波数に相当する地震動をここでは「標準的な地震動」と呼ぶことにする。

図-29から、相対密度が小さい領域では $c_a$ に及ぼす有効波数の影響は小さいが、相対密度が大きくなると影響は大きくなることが分かる。したがって、密な地盤ほど継続時間の影響が液状化の発生に大きく現れることになる。

定量的に考察すると、3章での検討の範囲ではあるが、今回の地震動では小名浜港で有効波数が最も大きく $n_{ef}=18$ が得られている。図-29(b)から有効波数が $n_{ef}=18$ の場合には、N値が20の非常に密な地盤では、 $c_a\approx 0.65$ となる。これは、「標準的な地震動」と比較した場合、最大加速度が同じでも、液状化の発生については式(2)から1.7倍程度大きな揺れ（外力）に相当したことを意味する。しかし、N値が5程度の緩い地盤では、 $c_a\approx 0.9$ となり、これは、「標準的な地震動」の1.1倍程度の揺れにしか相当しない。したがって、緩い地盤での液状化の発生には、地震動継続時間が長かったという影響は小さかったといえる。

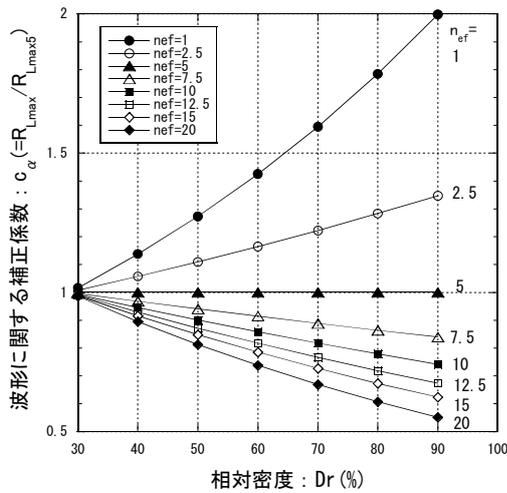


図-29(a) 波形補正係数  $c_\alpha$  と有効波数  $n_{ef}$ , 相対密度  $D_r$  の関係

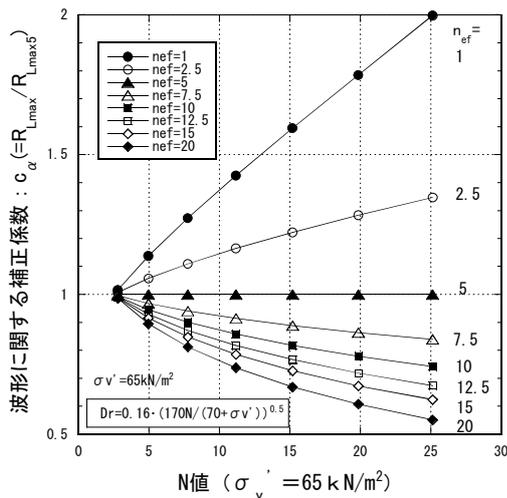


図-29(b) 波形補正係数  $c_\alpha$  と有効波数  $n_{ef}$ , N 値の関係

## 5.2 液状化の程度についての考察

液状化とは、土の有効応力がゼロとなった状態であるが、液状化後の地盤沈下量など、被害の大きさと直結する変形量で見ると、液状化状態には幅広い状態があり、これは作用した外力に依存する。液状化状態の土の変形の大きさ、あるいは変形のしやすさを「液状化の程度」といい、液状化の程度に及ぼす地震動継続時間の影響を、4章での液状化試験結果を用いて考察する。

液状化抵抗は、液状化状態を図-25に示したように  $\gamma_{DA}=7.5\%$  で定義して求められている。したがって、各波形が、各波形の液状化抵抗と同じ最大せん断応力比で地

盤に作用した場合には、有効波数、すなわち継続時間によらず液状化の程度は同じとなる。しかし、実際の地盤では、液状化抵抗と全く同じ最大せん断応力比が作用して液状化を起こすことは稀であり、最大せん断応力比は、若干なりとも大きいことが現実であると考えられる。図-30に相対密度が  $D_r=50\%$  の供試体を用いた千葉波の試験結果を例に、最大せん断応力比が若干でも増えた場合のせん断ひずみの発生状況の違いを示す。図-30(a)の最大せん断応力比が  $(\tau/\sigma'_{v0})_{max}=0.112$  ではひずみはほとんど発生していないが、図-30(b)の  $(\tau/\sigma'_{v0})_{max}=0.127$  では液状化が発生し、両振幅せん断ひずみは  $\gamma_{DA}=21.5\%$  に達している。そして、さらに最大せん断応力比を若干増加させた  $(\tau/\sigma'_{v0})_{max}=0.131$  の図-30(c)では  $\gamma_{DA}=41.2\%$  と大幅なひずみの増加になっており、液状化の程度が大きくなっている。そこで、図-25, 26で調べた液状化抵抗よりも最大せん断応力比が若干大きくなると両振幅せん断ひずみがどの程度大きくなるかを調べ、有効波数、すなわち継続時間がどのように液状化の程度に影響するかを検討する。

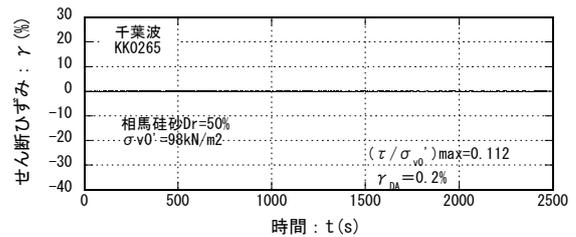


図-30(a) せん断ひずみの違い :  $(\tau/\sigma'_{v0})_{max}=0.112$

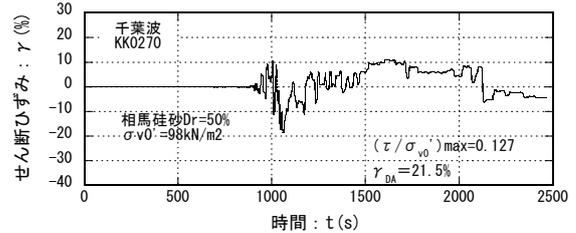


図-30(b) せん断ひずみの違い :  $(\tau/\sigma'_{v0})_{max}=0.127$

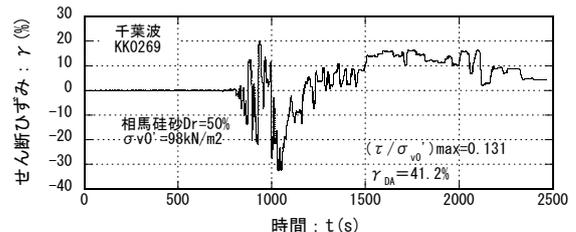


図-30(c) せん断ひずみの違い :  $(\tau/\sigma'_{v0})_{max}=0.131$

まず、図-25の各プロットを累乗関数で近似し、各波形が、各波形の液状化抵抗 $R_{Lmax}$ よりも $\Delta\tau_{max}/\sigma_{v0}'=0.01$ だけ大きな最大せん断応力比で作用した場合の両振幅せん断ひずみの増分を求める。各波形の液状化抵抗は $R_{Lmax}=0.1\sim 0.4$ であるので、 $\Delta\tau_{max}/\sigma_{v0}'=0.01$ は液状化抵抗よりも1オーダー小さい値である。得られた両振幅せん断ひずみ増分 $\Delta\gamma_{DA}$ を有効波数との関係で示したものが図-31である。

図-31から、相対密度が $D_r=50\%$ の場合も $D_r=80\%$ の場合も、有効波数が大きくなると、両振幅せん断ひずみ増分は大きくなるのがわかる。また、両振幅せん断ひずみ増分は、有効波数が同じ場合、 $D_r=50\%$ の方が $D_r=80\%$ よりも大きいことがわかる。相対密度が $D_r=50\%$ で有効波数が大きい場合には $\Delta\gamma_{DA}>300\%$ と極端に大きな値になっている。したがって、液状化が発生するような地震動が地盤

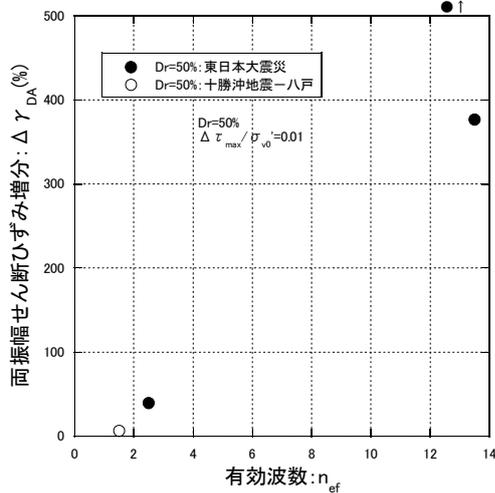


図-31(a) 有効波数  $n_{ef}$  と両振幅せん断ひずみ増分の関係( $D_r=50\%$ )

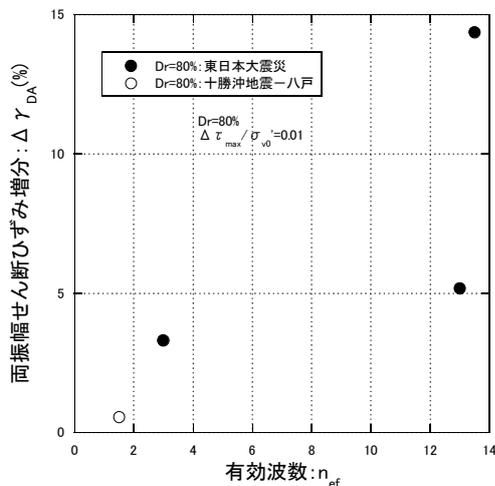


図-31(b) 有効波数  $n_{ef}$  と両振幅せん断ひずみ増分の関係( $D_r=80\%$ )

に作用し、その有効波数が大きい場合には、地盤の液状化の程度は大きくなり、液状化による被害が大きくなるといえる。また、液状化の程度は緩い地盤になると極端に大きくなり、緩い地盤は液状化に対しての「ねばり」がないことがわかる。

以上から、今回の地震において地震動の継続時間が長かったことは、液状化の程度に大きな影響を及ぼしたといえる。ただし、継続時間と有効波数の間には高い相関はなく、例えば仙台港の事例のように地震動の継続時間が長くても有効波数は大きくない場合があり、このような場合には継続時間が長くても液状化に大きな影響を及ぼさないと考える。

### 5.3 規則波試験からの考察

図-32は、図-19で示した液状化試験でのデータを用いて、両振幅せん断ひずみが、 $\gamma_{DA}=3, 7.5, 15\%$ になったときの繰返しせん断応力比と繰返し回数の関係を調べたものである。一般的に知られているように、両振幅ひずみを大きくしたものはプロットが上の方になり、相対密度の小さい方( $D_r=50\%$ )が両振幅ひずみの違いによる差は小さくなり勾配も緩やかになる。図-33は図-32の傾向を説明のために模式図に直したものである。

図-32, 33の密度の大きなものと小さなものの比較から、①緩い(密度の小さい)砂の方が繰返し回数の増加に対する繰返しせん断応力比の変化(減少)が小さく、②繰返し回数が大きくなると発生せん断ひずみが小と大の場合で繰返しせん断応力比の差が小さくなり、緩い砂の方の場合にはその差は非常に小さくなる。

規則波での上記、①、②の液状化特性は、5.1、5.2での不規則波の液状化特性に及ぼす継続時間(有効波数)の影響のしかたにそのまま対応している。すなわち、5.1で示した、緩詰め地盤の場合には継続時間の影響が小さいというのは、①繰返し回数の変化に対して繰返しせん断応力比の変化が小さいということ。5.2で示した、継続時間が長い方が液状化の程度が大きくなり、緩詰め砂の場合には極端に大きなひずみが発生しやすく「ねばり」がないというのは、②のせん断応力比の差が小さいということに対応している。

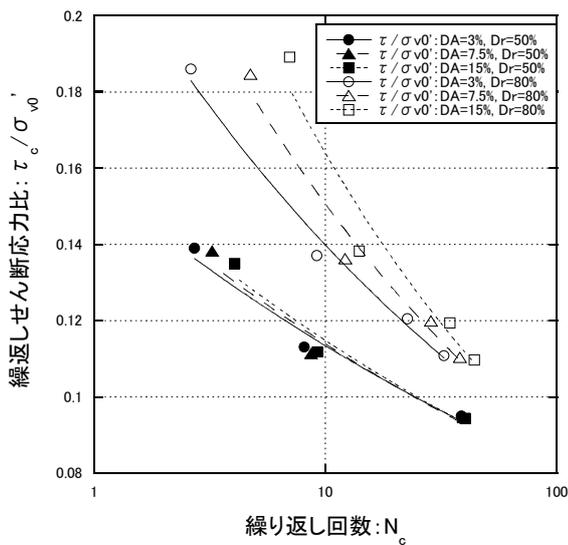


図-32 繰返しせん断応力比と繰返し回数の関係

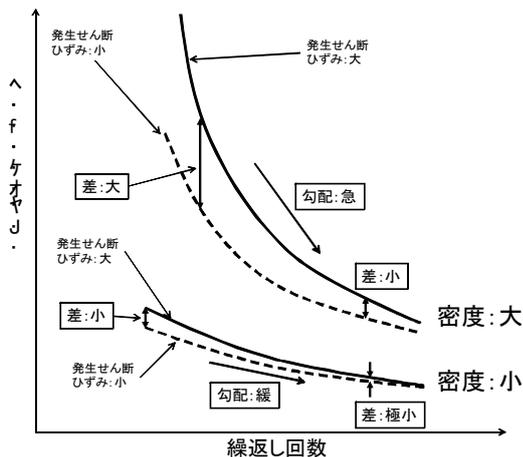


図-33 繰返しせん断応力比と繰返し回数の関係の説明図

## 6. 結論

得られた結論は以下のとおりである。

①粒度・N値法による液状化の予測判定手法は、継続時間の長い地震動に対しても設計で用いて問題ないといえる。ただし、安全側ではあるが非液状化地点でも液状化するという予測をしており、以下のことが課題として残された。

・等価N値によらず液状化を起こさないという等価加速度の下限値があると思われ、この点について今後の精度向上が必要といえる。

・液状化層が地盤の一部に薄層として存在する場合には、

液状化の影響が地表面や地盤全体に現れない場合があると思われ、この点についての評価法が必要である。

②粒度・N値法において、地震動の波形（継続時間）の影響を考慮した（補正を行った）予測と、考慮しない予測は、液状化の有無について同じような予測結果となっており、今回の事例解析では波形を考慮したことによる予測精度の向上は確認できなかった。

③不規則波に対する補正係数を求めるための実験式は、継続時間の長い地震動に対しても適用可能である。

④地震動の継続時間は、液状化の発生に関しては、緩い地盤よりも密な地盤で影響が大きくなる。

⑤また、継続時間は、液状化の程度について大きな影響があり、密な地盤よりも緩い地盤で特に大きな影響がある。

## 7. あとがき

2011年東北地方太平洋沖地震では、地震動継続時間が非常に長く、これが液状化現象にどのように影響したかが問題となった。本論文では、速報的であるが、継続時間の影響を事例解析や実験データを基に検討している。ここでの検討は、震動中の排水の影響を無視し、非排水条件として行っている。継続時間が長い場合には、従来無視していた間隙水の排水の影響が強くなる。排水性の良い方が、過剰間隙水圧が消散しやすいので液状化しにくいと考えられるが、消散して伝播した過剰間隙水圧が2次液状化を引き起こす可能性もある。したがって、今後は排水の影響も考慮した検討が必要である。

末筆ではありますが、本検討は、国土技術政策総合研究所の地震記録を使用したものであり、また、各整備局の協力をいただいたものであります。関係各位に深く感謝いたします。

(2011年8月12日受付)

## 参考文献

- 1) 高橋重雄, 他33名: 2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報, 港湾空港技術研究所資料, No.1231, 2011.
- 2) 山崎浩之, 江本翔一: 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, 港湾空港技術研究所報告, 第49巻, 第3号, pp.79~109, 2010.
- 3) 沿岸技術研究センター: 埋立地の液状化対策ハンド

ブック（改訂版），p.66，1997.

- 4) 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，pp.383～389.
- 5) 山崎浩之，金田一広，江本翔一：液状化抵抗に及ぼす波形の影響に関する考察，土木学会論文集C，Vol.66，No.3，pp.625～630，2010.
- 6) 地盤工学会：地盤調査・土質試験結果の解釈と適用例，p.167，1998.
- 7) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，pp.265～275，1976.
- 8) 国土技術政策総合研究所：港湾地域強震観測，<http://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm>.
- 9) 一井康二，佐藤幸博，佐藤陽子，星野裕子，井合進：港湾地域強震観測地点資料（その6），港湾技研資料，No. 935，pp.207～216，1999.
- 10) 前出9)，pp.225～232.
- 11) 前出9)，pp.249～260.
- 12) 神戸市開発局：兵庫県南部地震による埋立て地盤変状調査報告書，1995.

港湾空港技術研究所資料 No.1242

2011. 12

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 株式会社シーケン

Copyright © (2011) 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。



古紙配合率70%再生紙を使用しています