B-76

地盤系オンライン地震応答実験システムにおける応力条件の相違が液状化挙動に及ぼす影響

Influence of the difference in stress condition on liquefaction behavior by pseudo-dynamic testing system

○駒井慎吾[1]，山田雅一[2]，寺木亨[3]，岡部元[1]
Shingo Komai[1], Masaichi Yamada[2], Toru Teraki[3], Gen Okabe[1]

Abstract：In this paper , we conducted the experiment in consideration of anisotropy of the stress by used of pseudo-dynamic testing system and examined the influence of the difference in stress condition on liquefaction behavior.

1. はじめに

一般に地盤内の応力状態は鉛直方向応力と水平方向応力が異なる異方応力状態にある．一方，地盤の液状化特性を評価する室内要素試験では，異方応力状態の再現方法や試験方法が複雑であること，実地盤の応力状態を正確に把握することが困難であることから，鉛直方向応力と水平方向応力が等しい等方応力状態で行われることが多い．

また，本研究で用いるオンライン地震応答実験システムは中空ねじりせん断試験により直接復元力を計測し，応答計算に反映させるため，地震時の復元力特性や過剰間隙水圧など非線形性が卓越する液状化地盤の挙動を求める際には有効性が高いと考えられる．

本報ではオンライン地震応答実験システムを用いて実験を行い，地盤内の応力条件の相違が液状化挙動に及ぼす影響を検討する．

2. オンライン地震応答実験

2.1 システム概要

オンライン地震応答実験システムでは質点系にモデル化された解析地盤に地震加速度を入力し，コンピューターで数値積分法を用いて逐次，振動方程式を解く．そこで得られた応答変位に基づいてせん断ひずみを算出し供試体に与える．その時の復元力より次のステップの応答変位を求め，これを順次繰り返すことにより地震時の挙動を再現する．

一方で，実験から得られた復元力を直接取り込むため実験においては高精度な制御が必要となる．本実験では地盤内の応力と変形状態を比較的忠実に再現可能な中空ねじりせん断試験機を用いた．また，制御プログラムは LabVIEW を用いて全自動で，電動ジャッキによるアクチュエータの制御を行い，精度の向上を図っている．しかし，実験誤差の蓄積がオンライン実験において応答結果に影響を与えるという課題点が挙げられる．本システムでは，実験誤差の補正には文献 1) で報告した接線剛性を用いる．

2.2 応力条件

異方応力状態において，石原ら[2)]は圧密応力比 K が液状化強度に及ぼす影響を検討した結果，(1)式と(2)式に示したように，せん断応力 τ を平均有効主応力 σ'_m で基準化することで圧密応力比 K によらず，液状化強度を統一的に評価できることを示した．

本実験における解析対象地盤は 10m を想定し、等方応力状態での平均有効主応力σ'_mは，対象地盤の中間点である 5m の要素を再現した．この時の平均有効主応力σ'_mは 49kN/m^2 となる．よって，異方応力状態での平均有効主応力σ'_m を合わせるため等方応力状態と同様に 49kN/m^2 とした．また，圧密応力比は文献 3) より K=0.4 とし，(2)式から異方応力状態における鉛直応力 σ'_v と水平応力 σ'_h を算出している．

$$\left(\frac{\tau}{\sigma'_v}\right)_{異方} = \frac{1+2K}{3}\left(\frac{\tau}{\sigma'_v}\right)_{等方} \quad (1)$$

$$\sigma'_m = \frac{1}{3}(\sigma'_v + 2\sigma'_h) = \frac{1+2K}{3}\sigma'_v \quad (2)$$

ここにτ：せん断応力，σ'_v：鉛直応力，σ'_h：水平応力，σ'_m：平均有効主応力，K：圧密応力比(=σ'_h/σ'_v)である．

3. 実験概要

本報の実験で用いる砂試料は，豊浦砂(e_{max}=0.98，e_{min}=0.61，ρ_s=2.631g/cm^3)で，供試体は空中落下法で作製した中空円筒供試体(外径 10cm，内径 6cm，高さ 10cm)を用いた．試験条件を Table1 に，入力地震波は Fig. 1 に示す．

Table1. Experimental conditions

入力地震波		応力条件	初期剛性 (kN/m^2)	相対密度 (%)
Elcentro-NS	最大加速度 270gal 刻み時刻 0.01秒	等方	57330	62
		異方	38986	56
Taft-NS		等方	56753	58
		異方	40469	59
Hachinohe-NS		等方	61076	58
		異方	32501	61

1：日大理工・学部・建築　2：日大理工・教員・建築　3：日大理工・院・建築

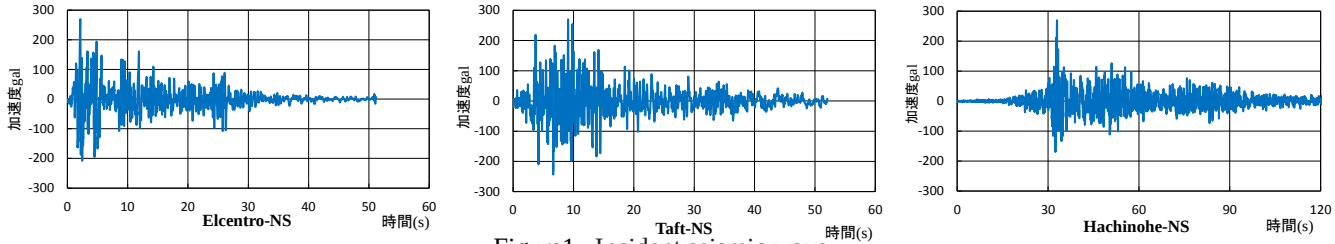

Figure1 . Incident seismic wave

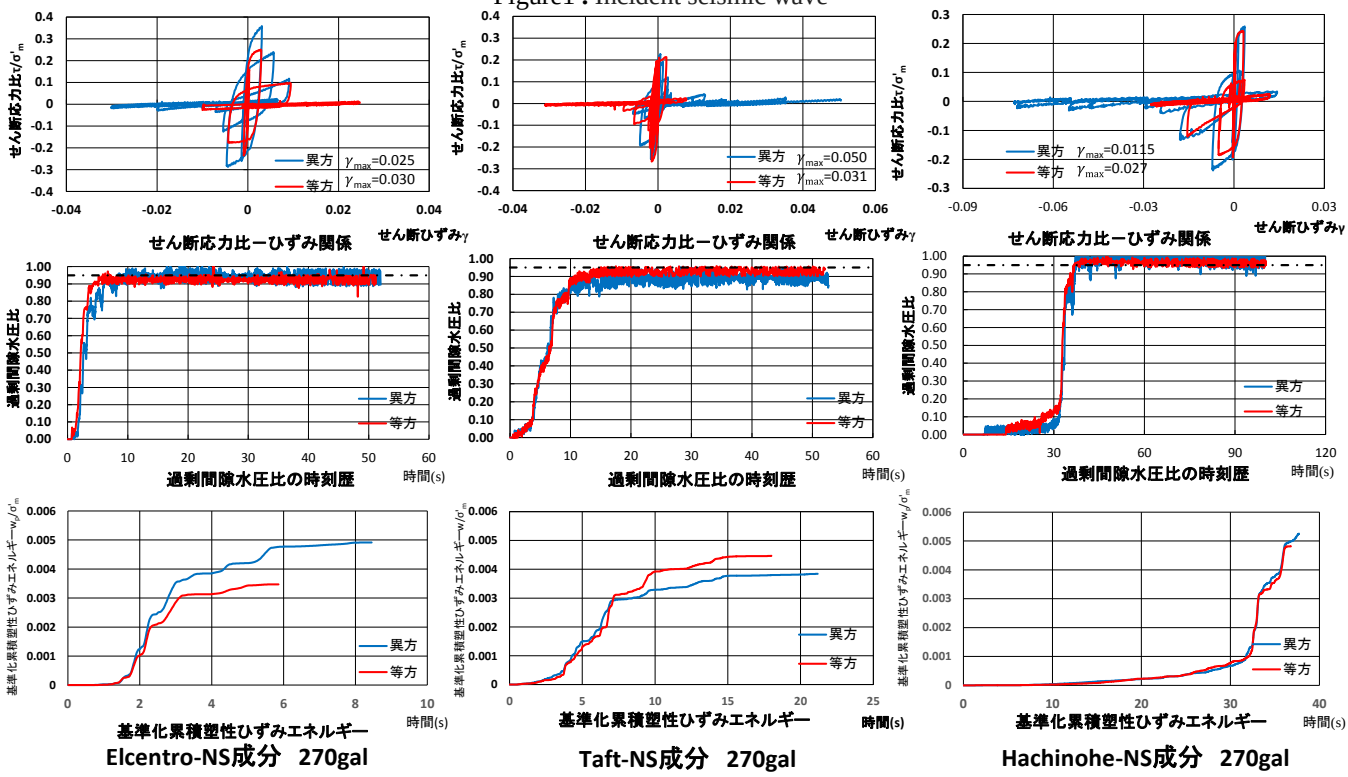

Figure2 .Results of Pseudo-dynamic testing

4. 実験結果

本研究では石原らの知見に基づいて圧密応力比 K の影響を取り除くためにせん断応力 τ を平均有効主応力 σ'_m で基準化して考察する．

オンライン地震応答実験結果を Fig.2 に示す. せん断応力比－せん断ひずみ関係において，せん断応力比 τ/σ'_m は地震波によらず，異方応力状態と等方応力状態でほぼ同様な挙動を示すことが見て取れる．一方，液状化後のせん断ひずみの発達については，異方応力状態と等方応力状態で挙動が異なり，異方応力状態の方が最大せん断ひずみが大きくなる傾向が見てとれた．過剰間隙水圧比の時刻歴に着目すると，各地震波とも応力状態によらず，液状化したと判断される過剰間隙水圧比 0.95(初期液状化)にほぼ同時間に達していることが確認できる．次に，初期液状化に達するまでの基準化累積塑性ひずみエネルギーでの比較を行った．基準化累積塑性ひずみエネルギーとは，累積した応力－ひずみ関係のループの面積である塑性ひずみエネルギーを平均有効主応力 σ'_m で除したものである. 応力状態の差異による基準化累積塑性エネルギーの差が小さいことから，任意の地盤深度における平均有効主応力 σ'_m で基準化することで応力条件によらず，液状化挙動を評価できることがわかる．

したがって通常の非排水繰返し試験と同様にせん断応力を平均有効主応力 σ'_m で基準化することで，オンライン地震応答実験システムにおいても，応力状態の相違を圧密応力比 K によらず評価でき，また液状化に至る挙動もほぼ同じになることが確認された．

5. 結論

本研究ではオンライン地震応答実験システムを用いて地盤の応力条件の相違が液状化挙動にどのような影響を及ぼすかを検討した．その結果，σ'_m で基準化することで等方応力状態と異方応力状態における液状化に至る挙動はほぼ同様な結果が得られることがわかった．

[参考文献]

1)寺木亨　他：地盤系オンライン地震応答実験システムにおける誤差補正方法の違いが応答結果に及ぼす影響，平成 27 年度日本大学理工学部学術講演会予稿集，pp.143－144，2015

2)K. Ishihara et al. : Liquefaction of Anisotropically Consolidated Sand, Proc. of the 9th Int. Conf. on S.M.F.E, pp.11－15, 1977.

3) 木原朋広：山留め壁に作用する掘削側地盤の土圧特性に関する実験的研究，日本大学大学院理工学研究科，修士論文，2007