

令和 5 年 6 月 3 日現在

機関番号：32657

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15091

研究課題名（和文）地震動波形の影響を考慮した合理的な液状化判定手法に関する研究

研究課題名（英文）Study on a rational liquefaction determination method considering the influence of seismic waveforms

研究代表者

石川 敬祐 (Ishikawa, Keisuke)

東京電機大学・理工学部・准教授

研究者番号：00615057

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：2011年東日本大震災や2016年熊本地震では、液状化に伴う地盤災害が発生した。また、南海トラフの巨大地震や首都直下地震の発生が危惧されている。このような地震に備えるためには、地震動波形の特徴を考慮した合理的な液状化予測を行う必要がある。本研究では、様々な地震動波形による砂質土の液状化特性を解明するために繰返しねじりせん断試験を実施し、砂質土の液状化強度に及ぼす地震動波形の影響を定量的に解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震動波形の形状が液状化強度に及ぼす影響を定量的に定めた。そして現行の液状化判定手法との定量的な違いを示し、合理的な液状化判定の方法を提示したことは社会的意義が大きい。また、一連の実験を通じて不規則な地震動下での砂質土の液状化過程を考察したところ、地震動波形の繰返し波数が多い場合はより液状化し易い波形特性であることを実験的に解明したことは学術的に新たな知見が得られて意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：The 2011 Great East Japan Earthquake and the 2016 Kumamoto Earthquake resulted in liquefaction-induced disasters. Additionally, there are concerns regarding the potential occurrence of devastating earthquakes with high magnitudes in the Nankai Trough and directly beneath the Tokyo metropolitan area. To effectively prepare for such seismic events, accurate and reliable liquefaction prediction is crucial, considering the specific characteristics of seismic waveforms, such as their amplitudes and frequencies. In this study, cyclic torsional shear tests were conducted to examine the characteristics of liquefaction in sandy soil under various seismic waveforms, assessing the influence of these waveforms on the soil's susceptibility to liquefaction.

研究分野：土木工学のうち地盤工学を専門とし、地震地盤工学を主としている。

キーワード：液状化 液状化判定 室内土質試験 繰返しねじりせん断試験 地震波形

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

現在の液状化判定方法に対する学術的な課題として、「地震動特性による補正係数 C_w 」の改善が必須であると考えている。この補正係数は、岩崎・龍岡ら(1978)によって考案された係数であり、室内と原位置の拘束条件に関する補正 C_1 、地震波荷重のランダム性に関する補正 C_2 、試料採取から運搬過程のかく乱に関する補正 C_3 、運搬過程中の密度化に関する補正 C_4 、地震動の水平面の2次元性に関する補正 C_5 、これら5つの係数を乗じた値である。これらの係数の内、本研究では地震波荷重のランダム性に関する補正に着目した。現在の液状化判定方法の補正係数 C_2 は、海溝型地震動に対しては石原・安田(1975)の地震波形を用いた繰返し三軸試験結果が用いられており、密度や材料特性の影響は考慮されていない。その後、國生ら(1981)は密な砂に対する実験を、龍岡ら(1986)は密度の広い砂質土に対する実験がなされ、 C_2 の値が変動することが指摘されている。近年では、三上ら(1997)は1995年兵庫県南部地震や1993年釧路沖地震の観測記録に対する実験が、山崎・江本(2010)は様々な地震波形を用いた実験がなされ、供試体密度が密実化すると波形の影響を受けやすいことが述べられている。一方、内陸直下型地震に対しては東ら(1996)が累積損傷度理論に基づいて求め、密度は考慮されているが材料特性は考慮されていないことに加え、一部の砂の液状化強度曲線に対して数値計算で求めた値である。この様に、いずれの既往の研究は、地震動の継続時間は数十秒と、本研究で考えているような今後想定される巨大海溝型地震の継続時間には及ばず、液状化強度比に長時間継続する地震動の影響を定量的に解明した研究事例は非常に少ない状況である。これに対して、著者ら(2014, 2018)は東日本大震災において観測された長時間継続地震動を用いた繰返しねじりせん断試験を行い、液状化強度比の違いによって補正係数 C_2 が異なることを実験的に明らかにしている。その後、熊本地震で観測された内陸直下型の地震波形を用いた繰返しねじりせん断試験を行い海溝型地震と内陸直下地震の波形形状の違いによって補正係数 C_2 が異なることを明らかにしてきた。また、累積損傷度法を用いた方法では、地震波形記録の全体に対する損傷度であり、地震動の開始時刻と終了時刻を反転して計算しても同じ値となるが、繰返しねじりせん断試験では累積損傷度法のようにはないといった課題がある。

2. 研究の目的

本研究では、現行の液状化判定方法の高度化を目指し、液状化被害を生じた観測地震波に加えて今後発生が危惧される想定地震波といった様々な地震波荷重に対して、密度や地盤材料をパラメータとした繰返しねじりせん断試験を行い、これまでに蓄積してきた既存の実験結果とともに地震波荷重のランダム性に関する補正係数 C_2 を定量的に立証することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、地震波荷重のランダム性に関する補正係数 C_2 を定量的に立証するために、既往地震動記録の波形分析と地震波形を用いた繰返しねじりせん断試験を実施した。

(1) 東日本大震災の観測地震動の波形分析

既往地震動記録の波形分析では、東日本大震災時に観測された地震波形を用いて、モーメントマグニチュード($M_w=9.0$)の際の東日本地域の最大加速度や等価繰返し回数を求め、それらが断層距離や観測地点の微地形に係る特徴を分析し、現行の液状化判定手法による等価繰返し回数に関する補正係数と観測波形から求められる同補正係数を比較検討した。検討に用いた地震波形は、K-NET および KiK-net にて東日本大震災時に観測された地表観測記録¹⁾の内、東西方向と南北方向の観測記録を用いた。検討対象地点は、図1の微地形分類図²⁾に示す全53地点である。これらの地点は、震央より放射状に設けた5測線沿いにそれぞれ位置する。これは、東日本大震災の震源域が岩手沖から茨城沖の広範囲にわたることで、震源域内で複数のすべり域が生じたため各地域で地震波形の形状が異なる特徴を考慮した。また、選定した測線沿いの観測地点の微地形分類より、液状化の可能性のある低地・埋立地・干拓地に該当する観測地点を分析対象とした。地震波形の分析項目は、最大加速度、等価繰返し回数、断層距離、微地形とした。ここで、等価繰返し回数は、Seedらによる地震波形の有効繰返し回数の考えに基づいている³⁾。断層距離は、国土院による震源断層モデルより震源断層を決定し、その断層面より各観測地点の最短距離と定義した。

(2) 地震波形の不規則性の影響を評価するための繰返しねじりせん断試験

地震波形を用いた繰返しねじりせん断試験には、外径100mm、内径60mm、高さ100mmの中

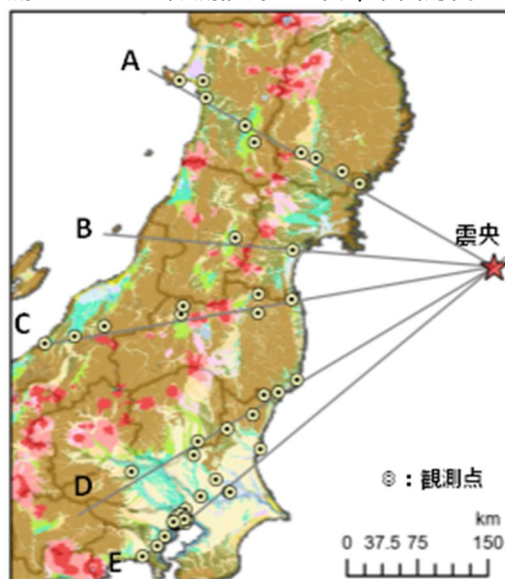


図1 検討測線および観測地点位置

表 1 試験条件

| Sample | Relative density D_r (%) | Specimen preparation | Confining pressure σ'_c (kN/m ²) | Irregular wave | | | | | |
|---------|----------------------------|----------------------|---|----------------|-----------|-------|-----------------|--------------|--------|
| | | | | Long duration | | | Short duration | | |
| | | | | Urayasu | Haramachi | Kanto | Mashiki combind | Mashiki fore | Hokubu |
| Toyoura | 50 | AP | 50 | ○ | ○ | | | | |
| | 70 | | | ○ | ○ | | | ○ | ○ |
| | 90 | DV | | ○ | ○ | | | | |
| | 50 | AP | 100 | | | ○ | ○ | | |
| | 70 | | | | | ○ | ○ | | |
| | 90 | | | | | ○ | ○ | | |
| Urayasu | 80 | DV | 50 | ○ | ○ | | | | |
| | 100 | | | ○ | ○ | | | | |
| | 110 | | | ○ | ○ | | | | |
| | 80 | DV | 100 | | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 100 | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 110 | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ |

AP: Air-pluviation, DV: Dry-vibration

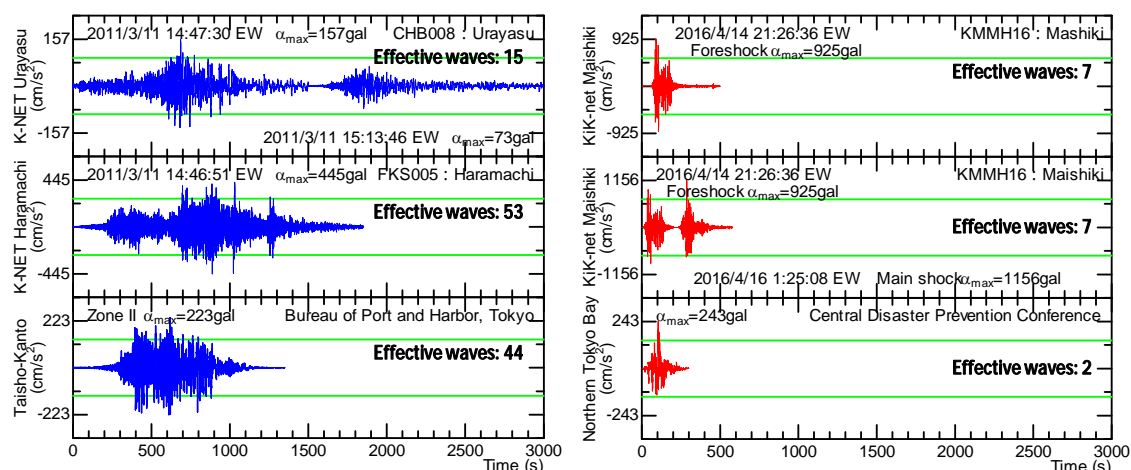


図 2 試験に用いた地震波形

空円筒形の供試体を用いた。試料は、細粒分を含まない均質な砂である豊浦砂と細粒分を含む浦安砂を用いた。試験条件は、表 1 に示すとおりである。豊浦砂は、空中落下法にて供試体作製時の相対密度が 50%、70%、90%となるように調整した。ただし、拘束圧が 50kN/m²の $D_r=90\%$ はタッピング法を用いている。浦安砂は、細粒分を含むためタッピング法を用いて、供試体作製時の相対密度が 80%、100%、110%となるように調整した。供試体密度を同一試料で 3 種類設定したのは、既往の先行研究にて供試体密度が不規則波の影響を強く受けることに基づいている。供試体作成後に、二酸化炭素、脱気水と背圧を用いて、間隙水圧係数 B にて飽和状態を確認し、全ての供試体で B が 0.95 以上であることを確認している。次に、有効拘束圧を 50 または 100kN/m² の等方応力状態で圧密を行った。そして圧密完了後、非排水条件下で応力制御による繰返しせん断試験を実施した。せん断応力波形は、海溝型地震として東日本大震災時に K-NET 浦安と K-NET 原町で観測された波形¹⁾と東京都港湾局で想定された大正関東地震想定波⁴⁾を選定した。内陸直下型地震として、熊本地震時に KiK-net 益城の地表観測波形¹⁾と東京湾北部地震の想定波⁵⁾を選定した。地震波形の形状を図 2 に示す。図中の緑線は、最大加速度の 0.6 倍となる位置を示しており、海溝型地震では 10 回以上、内陸型では 10 回以下の振幅回数となっている。また、正弦波は 0.1Hz の一様振幅の応力制御である。地震波による液状化強度比は、各波形形状を維持したまま波形振幅を段階的に変化させる試験を複数回行い、最大両振幅せん断ひずみが 7.5% に至る際の最大せん断応力比と定義した。正弦波による液状化強度比は、繰返し回数が 20 回時の両振幅せん断ひずみが 7.5% に至る際のせん断応力比と定義した。

4. 研究成果

(1) 東日本大震災の観測地震動による等価繰返し回数の特徴

断層距離と等価繰返し回数の関係を図 3 に示す。同図中の × 印はその観測地点の周辺で液状化が確認されたことを示している。紙面の都合上、各観測地点の波形形状は割愛するが、測線 A や B では波群が 2 つ、測線 D や E では波群が 1 つ、測線 C は波群が 1~2 つと震源域内で複数のすべり域が生じているため観測地点の位置によって波群は異なる。測線 A や C において波群が明瞭に 2 つの場合には断層距離の違いによらず等価繰返し回数は 35 回を超えることがわかる。一方、測線 D や E の波群が 1 つの関東地方の等価繰返し回数は、バラツキはあるが断層距離に対して等価繰返し回数は増加していることが確認された。また、東京低地で液状化が確認された観測点では、等価繰返し回数が 10~30 回と東北地方に比べて少ないことがわかる。図 4 は、最大加速度と等価繰返しの関係を微地形ごとに整理したものである。微地形に関する特徴として、同

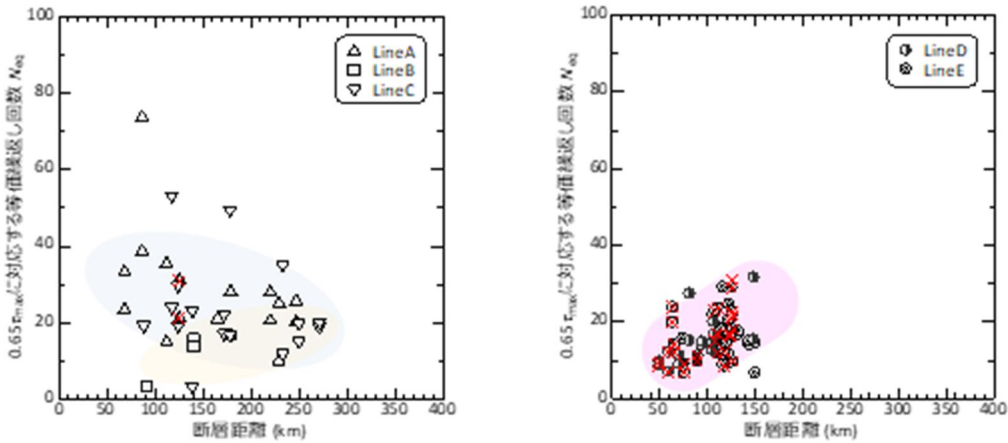


図3 断層距離と等価繰返し回数との関係

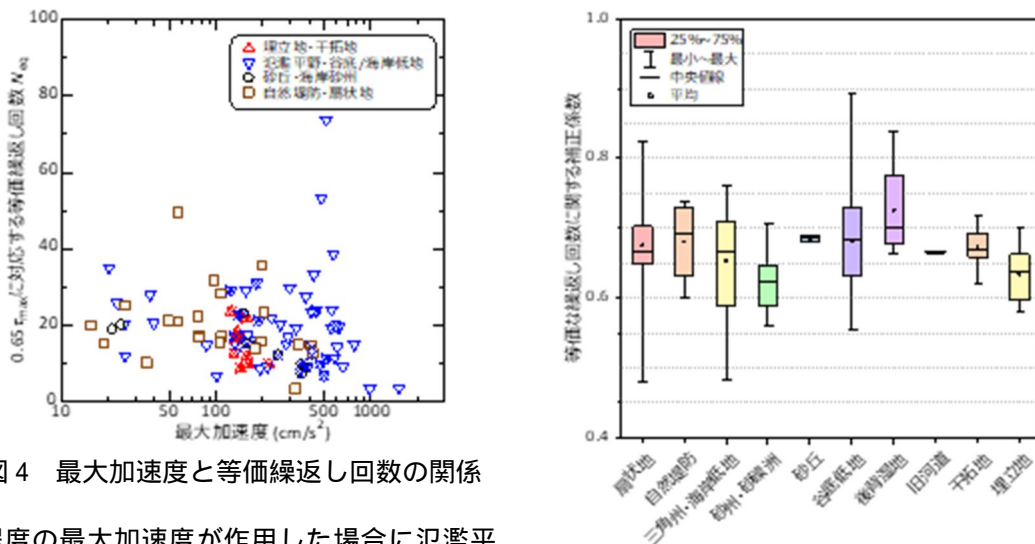


図4 最大加速度と等価繰返し回数との関係

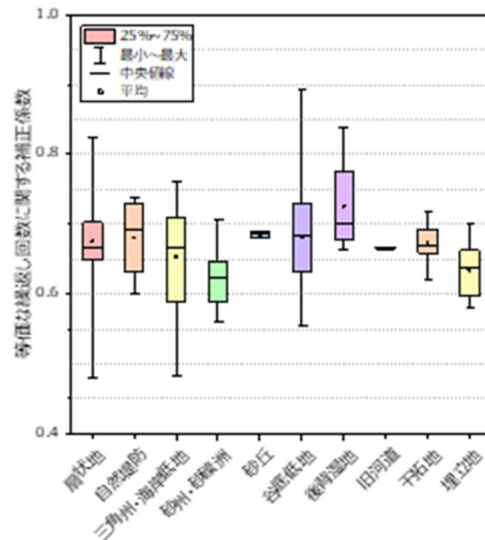


図5 微地形と等価繰返し回数に関する補正係数

程度の最大加速度が作用した場合に氾濫平野や谷底/海岸低地といった軟弱な地盤構造の方が等価繰返し回数は多くなるようである。また、最大加速度が 150cm/s^2 程度の東京低地の観測地点に着目すると、自然地盤と人工改変地（埋立地・干拓地）で違いがあり、同程度の最大加速度が作用した際に自然地盤では等価繰返し回数が多い地点の周辺で液状化が生じていることがわかる。図5は、各地震波形から求めた等価繰返し回数を用いて等価な繰返し回数に関する補正係数 ($r_n = 0.65 \times (\text{等価繰返し回数}/15)^{0.2}$) を求め、観測地点の微地形分類ごとにまとめたものである。これより、同補正係数は微地形による大きな違いはなく、検討に用いた地震波の形状では $r_n = 0.6 \sim 0.7$ の範囲に分布する。そして、建築基礎構造設計指針の液状化判定手法を用いて、東日本大震災の規模 ($M_w = 9.0$ や $M_s = 8.4$) に対する同補正係数を求めると $r_n = 0.74 \sim 0.80$ となり、観測地震波形から求めた補正係数の最大値程度となっている。このことは、同手法による現行の液状化判定が安全側の評価となっていることを意味する。なお、同指針での地震のマグニチュード (M) と M_w や M_s は厳密には異なる指標であることに留意する必要がある。

(2) 砂質土の液状化強度比に及ぼす地震波形の不規則性の影響

図6は、豊浦砂の各密度における最大両振幅せん断ひずみあるいは両振幅せん断ひずみに基づく液状化強度曲線の集積図である。図7は、浦安砂の同関係である。各図において、黒色は正弦波、青色は海溝型、赤色は内陸型直下型の各タイプの波形特性を色別している。図6より、相対密度が50%~70%の緩い状態から中密な状態では、正弦波、K-NET 原町波、大正関東地震想定波が最も液状化強度比が低く、次いでK-NET 浦安波が位置する。東京湾北部想定地震波による液状化強度比は、KiK-net 益城波による液状化強度比よりも小さいことが分かる。相対密度が90%と密な状態では、供試体の作製方法によって液状化強度比が大きく異なるが、海溝型タイプの長時間継続地震波による液状化強度比は正弦波と同等かそれ以下となった。図7より、細粒分を含んだ浦安砂でも豊浦砂と同じ傾向を示すことがわかる。しかし、内陸直下型の継続時間が短い地震波では、相対密度が大きく供試体密度が大きくなるにつれて、液状化強度曲線はせん断ひずみが大きくなると最大せん断応力は急激に増加することが特徴である。図8は、各不規則波の最大せん断応力の60%以上のゼロクロス回数(有効波数)と地震波荷重の不規則性に関する補正係数の関係である。地震波荷重の不規則性に関する補正係数 C_2 は、地震波と正弦波の液状化強度比の比として定義される⁶⁾。これより、 C_2 は有効波数に依存していることがわかり、有効波数

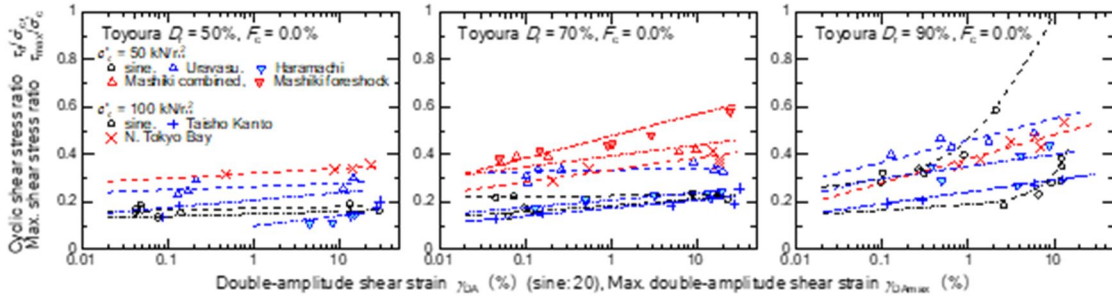


図6 豊浦砂のせん断ひずみに基づく液状化強度曲線

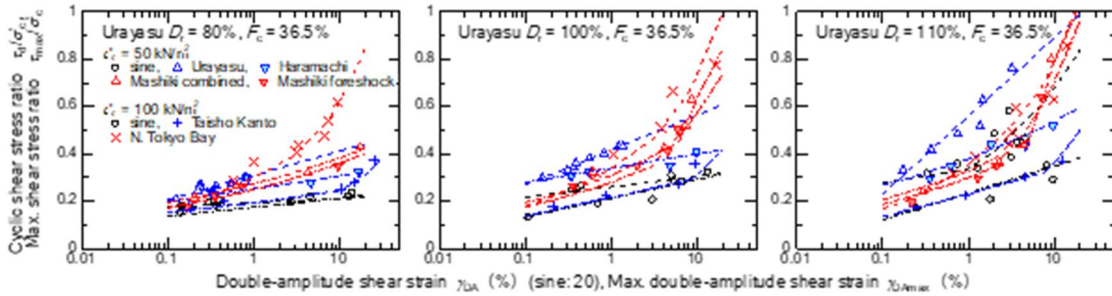


図7 浦安砂のせん断ひずみに基づく液状化強度曲線

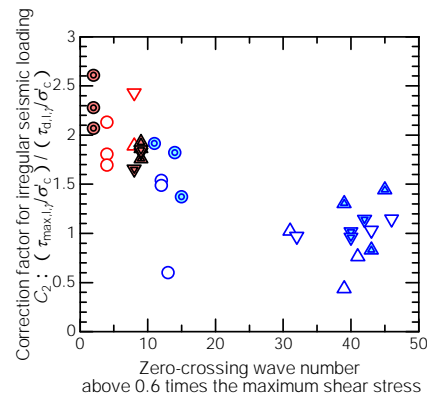


図8 ゼロクロス回数と地震波荷重の不規則性に関する補正係数の関係

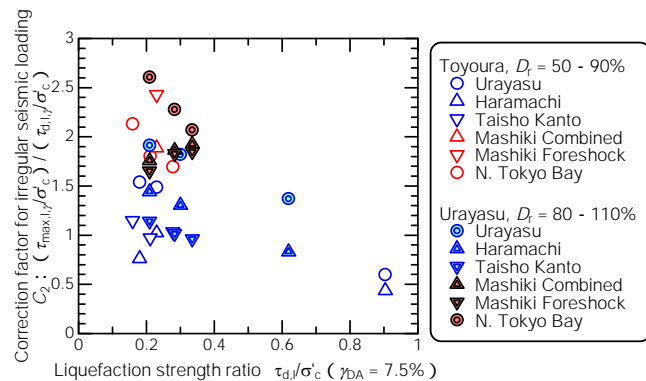


図9 正弦波による液状化強度比と地震波荷重の不規則性に関する補正係数の関係

が最も少ない東京湾北部想定波で C_2 は 1.7-2.6 の範囲に分布し、有効波数が約 40 回付近で C_2 は 1.0 前後に分布している。 C_2 と有効波数には相関が認められるが密度や粒度特性によるバラツキがあるため、有効波数のみで C_2 を評価することは難しい。図 9 は、正弦波による液状化強度比と C_2 の関係である。これより、 C_2 は有効波数が多く、細粒分を含まない均質な砂の場合に最も小さくなるのがわかる。また、有効波数が少なくなると C_2 は増加し、細粒分を含むと C_2 はさらに大きくなる。また、海溝型タイプの長時間継続する地震波の場合は、正弦波による液状化強度比が大きくなるほど、不規則波形の影響を強く受けて C_2 が小さくなる傾向がある。現行の道路橋示方書の液状化判定で用いられている海溝型地震時の補正係数 C_2 は 1.67 であり、K-NET 原町や大正関東想定波のような有効波数が多い地震波形の補正係数 C_2 は 0.5~1.0 となることから、同手法で海溝型地震動に対する液状化判定を実施した際に危険側の評価となる可能性を含むことが実験的に解明された。

<参考文献>

- 1) 防災科学技術研究所：強震観測網, <https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>, (2019年8月)
- 2) 若松加寿江, 松岡昌志：地形・地盤分類 250m メッシュマップの更新, 日本地震工学会誌, No.40, pp.24-27, 2020.
- 3) Seed et al.: Representation of irregular stress time history by equivalent uniform stress series in liquefaction analyses, EERC75-29, Univ. Calif. 1975.
- 4) 東京都港湾局：<https://www.kouwan.metro.tokyo.lg.jp/business/12.html>, (2019年8月)
- 5) G 空間情報センター：https://www.geospatial.jp/gp_front/, (2019年8月)
- 6) Ishihara K. and Yasuda S.: Sand Liquefaction due to irregular excitation, *Soils and Foundations*, Vol.12(4), 65-78, 1972.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 石川敬祐, 安田進 |
| 2. 発表標題 砂質土の液化化強度比に及ぼす不規則波の影響 |
| 3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Keisuke Ishikawa, Susumu Yasuda, Kousuke Oikawa |
| 2. 発表標題 Liquefaction characteristics of sand due to various irregular waves by cyclic torsional shear test |
| 3. 学会等名 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Keisuke Ishikawa, Susumu Yasuda, Kousuke Oikawa |
| 2. 発表標題 Effect of irregular waves on liquefaction strength of sandy soil |
| 3. 学会等名 3rd European Conference on Earthquake Engineering & Seismology (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 及川晃介, 石川敬祐, 安田進 |
| 2. 発表標題 密度条件を変化させた種々な不規則波による砂の液化化特性 |
| 3. 学会等名 第18回地盤工学会関東支部発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 石川敬祐, 安田進, 青山すみれ |
| 2. 発表標題 東日本大震災の観測地震動による等価繰返し回数の特徴 |
| 3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石川敬祐, 安田進 |
| 2. 発表標題 繰返しねじりせん断試験による種々な不規則波による砂の液状化特性 |
| 3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
| | | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |