

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 19 日現在

機関番号：31302

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560593

研究課題名(和文) 著しい非線形領域における土の繰返しせん断特性試験法の開発

研究課題名(英文) Development of cyclic shear deformation characteristics test of soil under extreme nonlinear region

研究代表者

吉田 望 (YOSHIDA, NOZOMU)

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：50405891

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：286の地盤に、11の地震波を作用させ地震応答解析を行うと、等価線形解析、全応力非線形解析、有効応力解析の順で変位を除く地震動指標が大きくなった。地震応答解析でよく用いられる双曲線モデルとR-0モデルの適用性を、482の繰返しせん断試験結果を用いて評価したところ、後者の方が大ひずみ域では適合性が悪いことが分かった。基準ひずみとせん断強度のみをパラメータとするシンプルで適用性の広いモデルを提案した。実地盤の初期応力状態と地震時の応力の載荷状態を再現するための試験方法を考案し、K0応力状態で地震動を受けた際の挙動を調べたところ、条件によって大きな差があり、既往の試験法と結果が異なることも指摘した。

研究成果の概要(英文)：Seismic response analysis on 286 sites is made under 11 earthquake motions showed that earthquake motion indices except displacement are largest in equivalent linear analysis, then total stress truly nonlinear and effective stress analyses. Applicability of frequently used stress-strain model such as the hyperbolic and the R-0 models are examined by using 482 cyclic shear deformation characteristics test data. The R-0 model shows less applicability at large strains than the hyperbolic model. Considering this, a new stress-strain model which uses only the reference strain and the shear strength is proposed. A new test method is developed in order to reproduce in-situ stress state and loading condition during earthquakes. Test results under K0 site condition showed somewhat different cyclic shear deformation characteristics compared with conventional test result under isotropic stress conditions.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：繰返しせん断特性 大ひずみ K0応力状態 等価線形化法 非線形解析 有効応力解析 地震動指標

1. 研究開始当初の背景

ごくまれにしか起こらない非常に大きな地震が設計で考慮されるようになった。この様な地震の基では、地盤材料にも大きなひずみが発生する。しかし、この様な大ひずみは従来考えられてきた想定外であり、その挙動を実験的に求める方法、また、地震応答解析の方法や精度などはほとんど研究されていなかった。

2. 研究の目的

- (1)地震応答解析の分野では、波形が似ているとか最大加速度が同じ程度であるなど、精度評価に客観性が無かった。そこで、妥当な精度評価の方法を提案する。
- (2)実務でよく用いられる土の応力 - ひずみ関係モデルの大ひずみ域での適用性を明らかにするとともに、より適用性の高いモデルを提案する。
- (3)実地盤の応力状態を再現した状態で繰り返し載荷試験を行う試験法を開発し、従来の試験法による結果と比較する。

3. 研究の方法

- (1)多くの地震動指標に関する論文を集め、その有効性を検討し、最適な評価法を議論する。また、多くの地盤調査の結果を集め、地震応答解析を行い、
- (2)多くの過去に行われた繰返しせん断特性試験の結果を集め、既往の土の応力 - ひずみ関係モデルの適用性を評価する手法を提案するとともに、その評価法に基づき、モデルの適用性を検討する。また、さらに適用性の判断を基にして、より精度の高い応力 - ひずみ関係モデルを提案する。
- (3)なるべく実地盤の応力状態を再現できる試験方法として、既往の試験に改良を加えた中空ねじり試験に加え、ほぼ完全に再現できる試験法を考案し、これらを用いて繰り返し載荷試験を行い、その結果を従来からの試験方法で得られた実験結果と比較し、また、新しい試験法による特徴を整理する。

4. 研究成果

(1) 地震動は複雑な揺れであり、時刻歴は系を見てもその影響を定量的に把握することは困難である。それを小数の指標（地震動指標）で表すと把握しやすい。そこで、過去に用いられた多くの地震動指標に関する論文を集め、その適用性を検討した。これらは最大値（最大加速度、最大速度、最大変位）とエネルギーに関するものに大きく分けることができ、それぞれ、異なるタイプの構造物の被害を表現するのに適当とされている。ということは、一つの指標で表現することは困難ということである。しかし、これまで、地震応答解析の精度の評価は、たとえば、波形が似ているとか、最大加速度が合っているとか、定量的な評価とはほど遠い者であった。そこで、地震応答解析の精度を評価する手法

としてレーダーチャートを使う方法を提案した。これにより解析結果を多角的に評価することが可能になる。

(2) 地震応答解析には、砂地盤の過剰間隙水圧の発生（液状化の発生）を考慮する有効応力解析と、土と間隙水を一体として扱う全応力解析があり、後者はさらに、非線形挙動に伴う力学特性の変化を逐次考慮する非線形解析と、平均的な力学特性を用いる等価線形解析がある。このうち、技術者が良く用いるのが、一番使い方の楽な等価線形解析である。しかし、その適用性はこれまでは何となく雰囲気はあるという程度で、定量的な評価は行われていなかった。他の解析手法との比較をした研究が無いわけではないが、ごく小数の事例しか扱っていない、定量的な評価が行われていないなどの問題もあった。そこで、過去の研究等で用いられた 268 サイトの柱状図を集め、定まった方法で解析用のモデルを作った。また、地震動の特性が解析結果に影響を及ぼさないように、過去の大地震で観測された内陸型、海溝型の 11 の地震波を集め、合計約 3000 ケースの解析を行った。

図 1 に最大加速度を比較して示す。図の縦軸は等価線形による結果、横軸は理論的に厳密な非線形法による結果であるが、等価線形法は最大加速度を相当大きく評価する。一方、

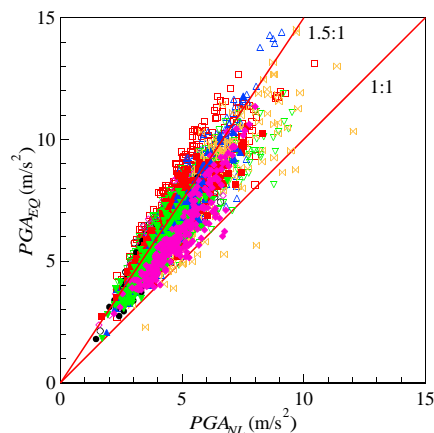


図 1 最大加速度の比較

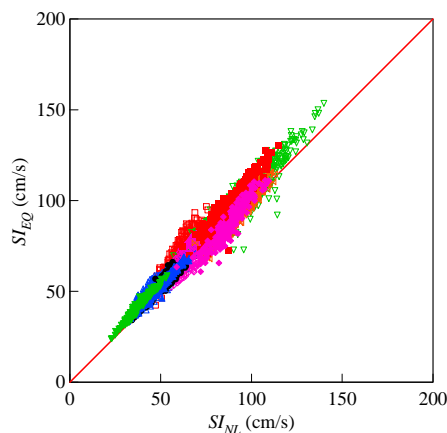


図 2 SI 値の比較

図2は地震被害との相関が大きいといわれている SI 値を比較したものであるが、解析による差は小さい。その他の指針でも比較したが、最大値を意識する指標では二つの解析にかなり差があるが、被害に着目した指標では解析間の差は小さいことが分かった。また、設計の観点で見ると、変位を除く指標では等価線形法は大きめの評価となった。これらを考えると、等価線形法は、危険度評価には適用でき、設計では変位以外を使うのであれば、安全側の評価となるといえる。

(3) 地震が大きくなると、砂地盤では過剰間隙水圧が発生し、液状化が発生する。液状化が発生するようなケースでは当然、有効応力地震応答解析を用いる必要があるが、その使用には高度な技術が要求されることから多くの技術者は避ける傾向がある。そこで、先に用いたのと同じ地盤を用いて、有効応力地震応答解析を行い、全応力非線形法と比較した。

図3に最大加速度、図4に SI 値を比較して示す。縦軸が有効応力解析、横軸が全応力解析による値であるが、全応力解析の方がいずれも小さくなっている。その他の指標でも変位やひずみなどの変形に与えるものを除けば、全応力解析の方が大きく、その意味では設計では安全側といえるが、その程度は非常に大きいこともあり、その

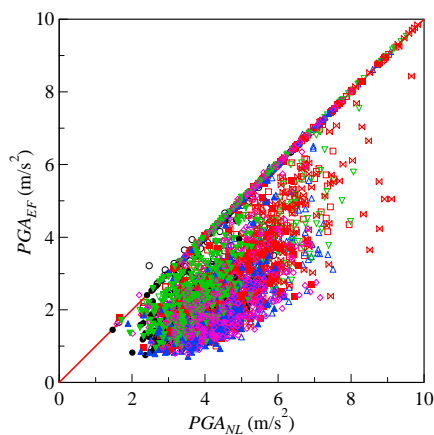


図3 最大加速度の比較

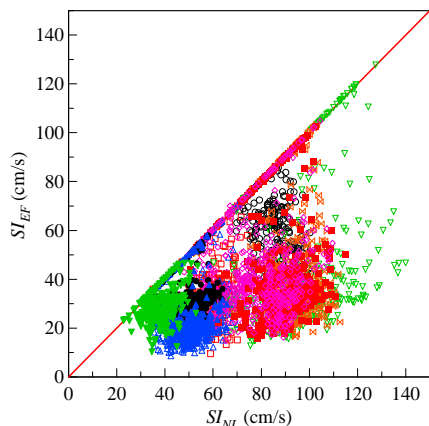


図4 SI 値の比較

場合には過剰設計となる可能性もある。また、変形では全応力解析の方が過小評価するので、設計に用いるのは危険である。(4) 多くの地震応答解析では次式で表される双曲線モデルや Ramberg-Osgood モデルが用いられてきた。

$$\tau = G_0 \gamma / (1 + \gamma / \gamma_r), \quad \gamma = \tau / G_0 \cdot (1 + \alpha \tau^{\beta-1})$$

ここで、 τ 、 γ はせん断応力とせん断ひずみ、 G_0 はせん断弾性定数、 γ_r は基準ひずみ、 α 、 β はパラメータである。双曲線モデルは過去の土の解析では多く用いられてきたが、非線形特性を制御するパラメータが一つしかないことで、繰返し載荷後の挙動（減衰特性：減衰定数 h と γ の関係）が制御できないこと、一方 Ramberg-Osgood モデルはパラメータの数が一つ多いことと、減衰特性との相性が良いことから、適用性があると考えられてきた。しかし、これらの精度を体系的に研究したものは無い。

そこで、関東地方の 95 地点で採取した 482 の繰返しせん断試験の結果を集め、モデルの適用性を検証した。この際、検討の対象とするひずみ領域を、大地震を想定し、また、現行の試験法の限界と考えられる 1% に設定した。

なお、検討に際して、土をよく行われる、粘性土、砂質土という単純な分類のみならず、地質・堆積環境を考慮して 26 の詳細に分類する他、より粗い分類として、更新世、完新世の地質年代による分類、また、粘性土では塑性指数による分類も行い検討した。

図5に各分類ごとの適合性を示す。図の縦軸は誤差で、小さい方が適合性が高いことを示している。横軸は各種分類で、All soil より右は詳細分類、左は粗い分類である。図より適合性が悪い順に、減衰を考慮した Ramberg-Osgood モデル、骨格曲線のみに着目した Ramberg-Osgood モデル、基準ひずみに基づく双曲線モデル、最適化した双曲線モデルとなる。

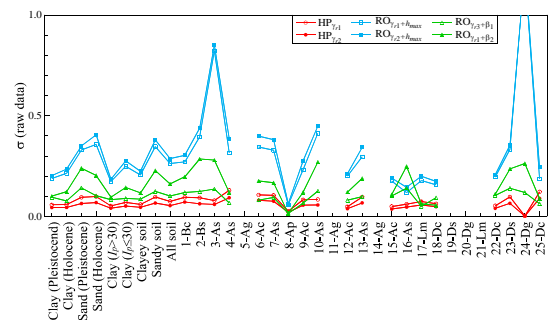


図5 各種分類ごとのモデルの適用性

モデルパラメータの数が多く、適合性が良いと考えられてきた Ramberg-Osgood モデルが一番悪い結果となったのは、図6で明らかとなる。図には誤差が最も小さかったときと大きかったときの応力 - ひずみ関係（左図）と誤差を示しているが、誤差が大きいのは応力 - ひずみ関係で応力が頭打ちになっている時、小さいのは、頭打ちが

無くかなりの勾配で応力が大きくなっているときである。前者のケースでは誤差は1%を過ぎる頃から急に大きくなる。ところで、図7は全てのデータの応力 - ひずみ関係であるが、砂質土ではほとんど全て、粘性土でもかなりのデータが頭打ちがあり、これが Ramberg-Osgood モデルの適合性が大きいひずみ領域では悪くなった理由である。

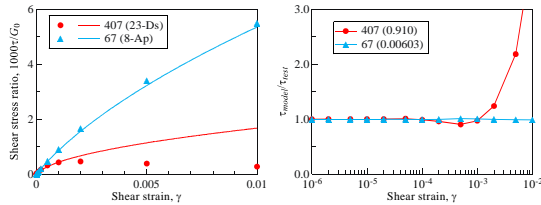


図6 Ramberg-Osgood モデルの適合性

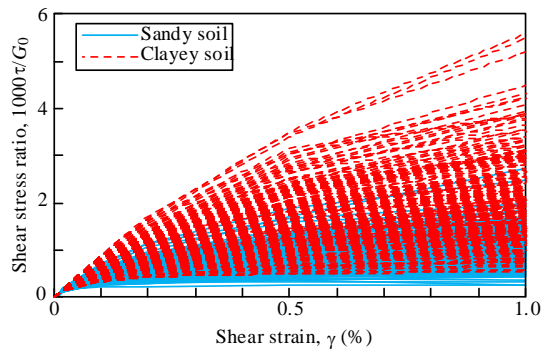


図7 全てのデータの応力 - ひずみ関係

次に、繰返しせん断特性に影響を与えるといわれている拘束圧 σ_m 、塑性指数 I_p の他、平均粒径 D_{50} 、細粒分含有率 F_c を変数として各モデルのモデルパラメータを決める試みを行った。すなわち、各試料ごとに求めたパラメータを図5の分類ごとに統計処理し、モデルパラメータの決定法を検討した。図8に全試料を対象とした際の結果を示す。誤差の順序は図5と同様であるが、全体的に少し大きくなっている。また、拘束圧と塑性指数の重相関でパラメータの値を決定するのが最も誤差が小さいことが分かった。

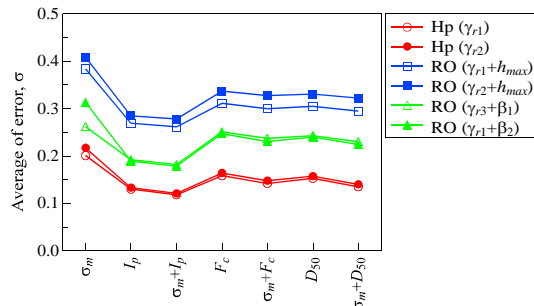


図8 統計処理後のモデルの適合性

(5) 解析に用いられる応力 - ひずみ関係の選択には二つの方法がある。一つは繰返しせん断試験が行われ、実験値がある場合である。この場合、研究代表者が以前提案したモデルを用いれば、完全に挙動を再現で

きる。しかし、実務では実験が行われないときも多々ある。その場合には、既知の量、たとえば土質分類と N 値などからモデルパラメータを決めて数式モデルを使う必要がある。この場合には、多くのパラメータを持っているモデルは好ましくはない。一方、前項で見たように、既往の双曲線モデルや Ramberg-Osgood モデルは必ずしも適合性が高いとはいえなかった。これは、大ひずみ域で強度付近の挙動の再現性が低いためであった。

そこで、双曲線モデルよりパラメータの数を一つ増やした Double hyperbolic モデル (重双曲線モデル) を提案した。双曲線モデルの検討より、 γ_r より小さいひずみ領域のこのモデルの適合性は良かったので、それを用いることにして、一方、 γ_r より大きいひずみ領域では強度 τ_f に着目した双曲線モデルを用いる。すると、モデルは次のように表される。

$$\tau = \frac{G_0(\gamma - \gamma_0)}{A + B(\gamma - \gamma_0)} \quad (\gamma > \gamma_r)$$

$$\tau = \frac{G_0 \gamma_r (\gamma / \gamma_r + 1 - k)}{(2 - k)^2 + k(\gamma / \gamma_r + 1 - k)} \quad (\gamma > \gamma_r)$$

ここで、 $k = G_0 \gamma_r / \tau_f$ は二つの双曲線モデルの強度の比である。これを制御することによって、図9に示す様な応力 - ひずみ関係を作ることができる。図7と比較すると、このモデルが大きな適用性を持っている可能性があることが分かる。

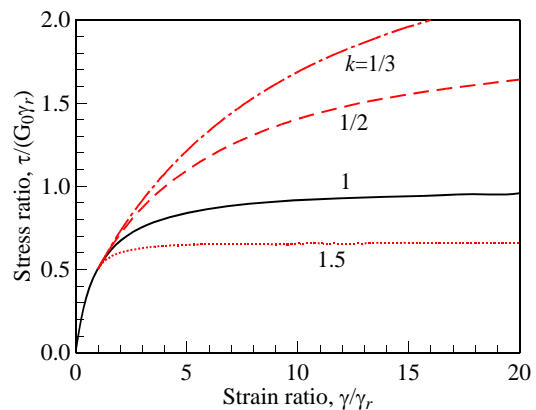


図9 kによる応力 - ひずみ関係の変化

(6) 地盤は水平成層といえども、上載圧と側圧が異なるので、地震前の状態でも初期せん断を受けている(K_0 応力状態)。また、地震時は側方への変位が発生しないで水平方向のせん断を受ける、いわゆる単純せん断状態の変形をする。しかし、通常の試験では初期せん断は考慮されていない(等方応力状態)し、単純せん断状態も実現されていない。なお、過去の研究で K_0 応力状態と等方応力状態で繰返しせん断特性が変わらないという報告もあるが、これは整理法の問題であることが分かっている。

そこで、単純せん断状態を再現できる試

験法を考案し、繰返しせん断試験を行い、得られる特性を検討した。

単純せん断状態とは、長方形が平行四辺形に変形する単純な形状変化であるが、これを試験室で再現させるのは容易ではない。まず、鉛直方向、水平方向のひずみを拘束する等体積法による試験を行った。この際、試験装置で水平方向の変位を拘束する方法を用いると初期状態の K_0 の値を制御することができない。そこで、鉛直ひずみを拘束した状態で水平ひずみが 0 になるように手動で設定した試験をまず予備試験として行った。しかし、この方法では鉛直応力も変化する可能性があり実地盤とは異なる可能性があるため、鉛直応力を一定とし、試験体の断面積が変わらない様に側圧を制御する方法を本試験では採用した。

図 10 に単調載荷試験の結果を比較して示すが、両試験法で結果に大きな差がある。図 11 には繰返し載荷の例を示す。低压法では履歴曲線は紡錘型であるが、定体積法で

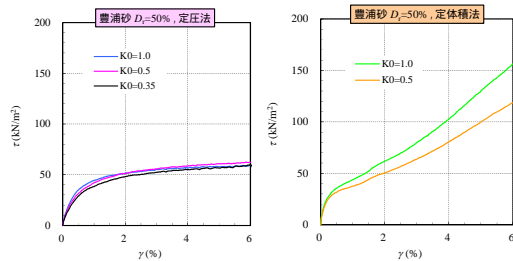


図 10 定圧法（左）と体体積法（右）

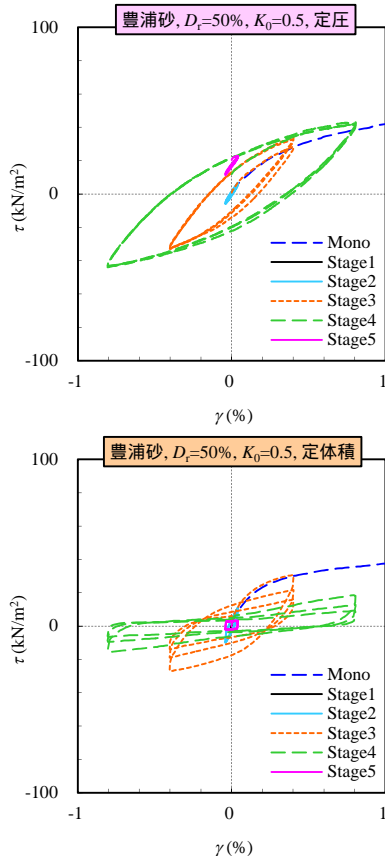


図 11 定圧法（上）と体体積法（下）の比較 ($K_0=0.5$)

は過剰間隙水圧の発生による影響が明瞭に見られる。次に、図 12 には低压試験の際の K_0 の値の変化を示す。 K_0 の値はひずみを大きくしても 1 になることはない。また、1% 程度のひずみであれば、それほど大きく変化しない。

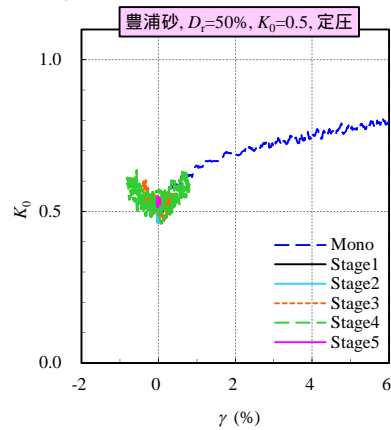


図 12 K_0 の変化

(7) 繰返しせん断試験は、通常はステージテストという方法で行われる。これは、一つの試料に小さいひずみから順番にひずみを大きくしながら試験を行う方法で、一つの試料で大きいひずみ領域までの試験ができるという点が便利であり、実務ではほとんどがこの方法である。しかし、先にも見たように、繰返しせん断特性は履歴の影響を受ける。そこで、 K_0 応力状態を再現しながら、常に新しい試料を使うフレッシュテストを行い、その挙動を比較した。

図 13 に二つの試験法による結果を比較して示すが、両者にはかなりの差がある。一方、等方応力状態ではステージテストとフレッシュテストの結果に大きな差が無いことが報告されており、この差は K_0 応力状態に起因するものと考えられる。ただし、 K_0 以外の要因が含まれていないことを実証するには、もう少し検討が必要と考えられる。

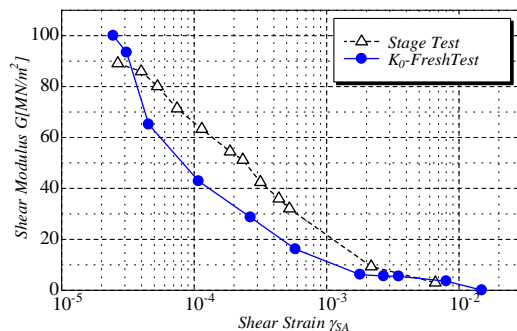


図 13 剛性のひずみ依存性の比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

Yoshida, N.: Comparison of Seismic Ground

Response Analyses Under Large Earthquakes, Indian Geotechnical Journal, DOI 10.1007/s40098-014-0104-8, Vol. 3, No. 2, 2014, 119-131

大矢陽介, 野津厚, 吉田望, 小濱英司, 菅野高広: 地盤の地震応答解析の精度評価ツールとしてのレーダーチャートの提案と各種解析手法の適用限界の検証, 日本地震工学会論文集, 第14巻, 第1号, 2013, pp. 97-116

吉田望, 若松加寿江: 土の繰返しせん断特性のモデル化と地質年代・堆積環境の影響, 地盤工学ジャーナル, Vol. 8, No. 2, 2013, pp. 265-284

[学会発表](計 15 件)

Yoshida, N. (2013): Applicability of total stress seismic ground response analysis under large earthquakes, Proc. International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 12-14, June, 2013, Kos Island, Greece, Paper No. C1059

Yoshida, N. and Wakamatsu, K. (2012): Modeling of cyclic deformation characteristics considering geological age and depositional conditions, Proc. 2nd International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, May 28-30, Taormina, Italy, pp. 455-466

山口恵美, 規矩大義, 小林陵平, 安田悟: K_0 圧密した豊浦砂の大ひずみ領域における動的変形特性, 第48回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 167-168, 2013

吉田望: 小ひずみから大ひずみまで適用可能な応力 - ひずみ関係モデルの提案, 第49回地盤工学研究発表会

三上武子, 吉田望, 大塚浩二: K_0 圧密地盤の繰返しせん断特性に関する検討, 第49回地盤工学研究発表会

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 望 (Yoshida Nozomu)

研究者番号: 50405891

(2) 研究分担者

規矩 大義 (KIKU Hiroyoshi)

研究者番号: 70251759

(3) 連携協力者

若松 加寿江 (関東学院大学)

三上 武子 (応用地質)

大矢 陽介 (港湾空港技術研究所)