

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360208

研究課題名(和文) 補強土構造物を対象とした被災後の残存性能評価及び復旧方法選定の最適化に関する研究

研究課題名(英文) Evaluation of extent of damage in geogrid reinforced soil walls subjected to earthquakes

研究代表者

桑野 二郎 (KUWANO JIRO)

埼玉大学・地圏科学研究センター・教授

研究者番号：30178149

研究成果の概要(和文)：補強土擁壁は地震時に高い耐震性を示し、破壊には至らず軽微な変形にとどまることが多い。補修の必要性を検討する際、地震によって構造物がどの程度の損傷を受けているかを適切に評価する必要がある。さらに壁面変位や沈下といった計測の容易な事項から構造体全体の損傷を評価する必要もある。本研究では、分割パネルを有する補強土擁壁の地震時損傷度評価について検討し、下部パネルの水平変位から補強領域内のすべり線発生の有無を評価し、また滑り線位置についてはTwo-Wedge法によって評価する手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：In this study, evaluation of degree of damage in GRSW is discussed. Shear strain of backfill material in the reinforced area is evaluated from the horizontal displacement of the wall. Then, occurrence of the slip line is decided based on the simple plastic theory. Since the past studies show that seismic stability of the GRSW depends upon the pullout resistance between geogrid and backfill material after the generation of slip line in the backfill, seismic stability of the GRSW having slip line in the reinforced area is evaluated from the results of the pullout test. Finally, the validity of the proposed method was verified with results of some centrifuge shaking table tests.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	9,200,000	2,760,000	11,960,000
2009年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

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：地盤工学，地盤防災，補強土，被災，ジオグリッド，除荷再載荷，残存性能

1. 研究開始当初の背景

補強土構造物は、軟弱地盤や急傾斜地など地盤条件の厳しい場所においても適用できることから、近年広く施工されている。その中でも補強土壁は、垂直に近い法面を安定的に構築できるため、鉄道や道路などの重要構造物への適用が増えている。

補強土構造物の耐震性に関しては、1995年兵庫県南部地震において、周辺家屋がごとごとく倒壊した激震地でも高さ約5mの補強土壁鉄道盛土が最大20cm程度の水平変位に

とどまったのに対し、重力式擁壁など従来型の工法で作られた鉄道盛土が崩壊してしまったことから、補強土壁構造物の高い耐震性が広く認められ、その後施工事例が一層増加した。2004年新潟県中越地震では道路や鉄道などの盛土で多くの被害が生じたが、被災地域内の補強土壁は、地山や隣接した無補強盛土の崩壊に巻き込まれた事例を除くと、ほとんどが軽微な変形にとどまっていた。補強土構造物は、このように高い耐震性を示したことや、新潟県中越地震後の原型復旧から強

化復旧への流れの中で、災害復旧工事に多く採用されるようになってきた。

補強土壁工法は、設計マニュアルなど新規建設時の技術的な標準は各種機関でまとめられているものの、既設補強土の性能の把握および保守方法などについては技術的にいまだ確立されていない現状にある。近年、地震や降雨災害等において、補強土壁工法の被災状況調査は実施されているものの、被災構造物の性能評価にはいたっていない。このため、災害発生時に、構造物の管理者が補強土構造物の被災度を評価し、災害直後の安全管理や災害復旧に関する検討を行なうための被災度判定（健全度評価）手法および被災状況別復旧方法の検討が必要となる。これが無ければ、多少の変形が生じた際、構造物の使用の制限が行なわれ、あるいは実際には安定性に問題が無くても過剰な不安感から造り直すようなこととなり、高機能ではあるが工費のかかる補強土工法は甚だ不経済なものとなりかねない。よって、被災の程度を判定するとともに、被災構造物の性能評価を適正に行えるようにする事が極めて重要となる。

2. 研究の目的

地震などの災害を受けた補強土構造物の災害後の残存耐力を検討し、災害後の被災度を的確に評価し、補修・改修の必要性の有無あるいは造り替えの判断と工法の選定を適正に行い、土構造物を長期間に亘り安全かつ経済的に維持することに資することを目的とする。

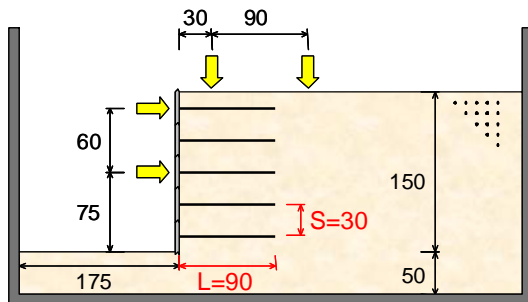


図1 補強土壁模型概要

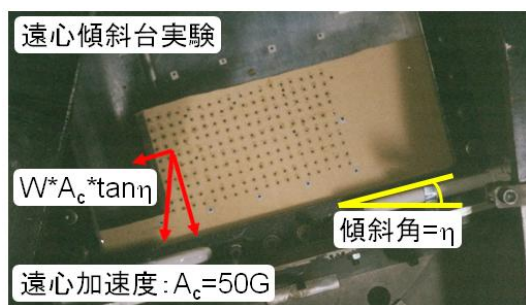


図2 遠心傾斜台実験

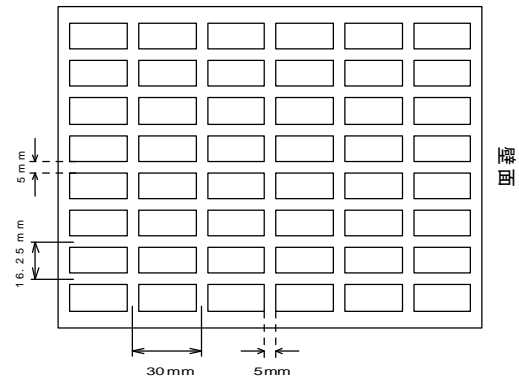


図3 模型ジオグリッド

3. 研究の方法

補強土壁の地震による変形および破壊特性を把握するため、遠心傾斜台実験および遠心振動台実験を実施した。実験で作製した補強土壁は全て図1に示す形状で高さ150mm。アクリル製壁面パネル5段は溝により接合されており、それぞれに1枚ずつ長さ90mmの模型ジオグリッドを接着した。図中矢印の位置での変位計測に加え、地盤内に設置したターゲットを撮影し画像処理して変位を計測した。遠心加速度は全て50Gであり、1G場での実スケールに換算すると、補強土壁の高さは7.5mに相当する。遠心傾斜台実験では、図2に示すように、傾斜角 η とすると、水平震度 $k_h = \tan \eta$ を作用させられる。傾斜台実験では、表面載荷などと異なり、震度法で考える通りの静的水平物体力を作用させることができる。

盛土材料と模型ジオグリッドの両方を変えて一連の実験を行ったが、ここでは図3の平面形状を有する厚さ1mmのポリカーボネイト製の模型ジオグリッド（破断強度20kN/m、引張剛性506kN/m）を、表1に示す3種類の砂とともに用いた実験結果のみを紹介する。補強材の引抜き特性を表2に示す。

表1 砂試料特性

	豊浦砂	珪砂5号	珪砂3号
平均粒径(mm)	0.19	0.52	1.40
均等係数	1.56	1.38	1.27
最大間隙比	0.973	1.107	1.009
最小間隙比	0.609	0.720	0.697
間隙比(D _r =80%)	0.682	0.797	0.759
内部摩擦角(°)	43.0	45.0	46.0

表2 引抜き特性

	豊浦砂	珪砂5号	珪砂3号
粘着力(kPa)	0.19	0.52	1.40
摩擦係数	1.56	1.38	1.27
摩擦係数比	0.973	1.107	1.009

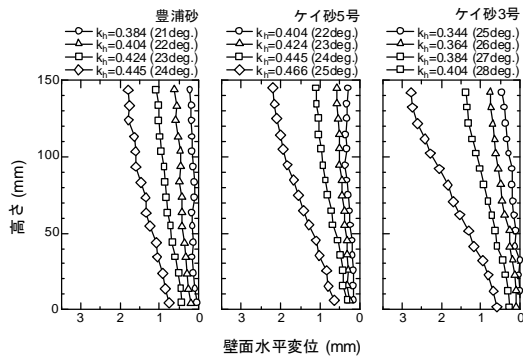


図4 傾斜台実験における壁面水平変位分布

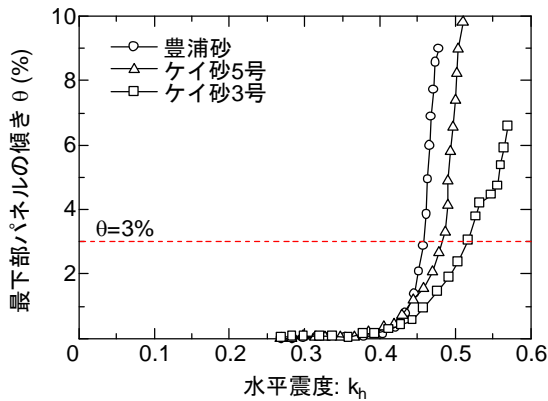
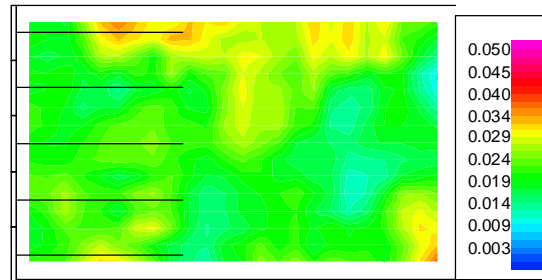


図5 傾斜台実験における水平震度と最下部パネル傾き

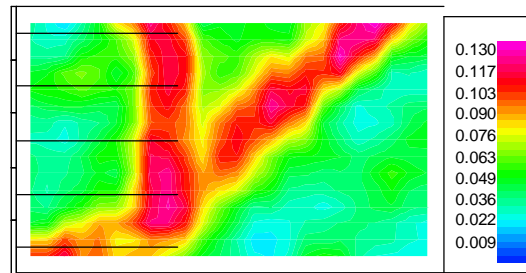
4. 研究成果

図4に遠心傾斜台実験においてターゲットから得られた壁面変位分布を示す。このように分割パネルを有する補強土壁では、傾斜の増加（水平震度の増加）とともに下部の変形が卓越してくる。そこで、最下部パネルの傾き θ と水平震度 k_h の関係を図5に示す。最も粒径の大きな珪砂3号ではややはっきりしないが、豊浦砂と珪砂5号では水平震度 $k_h=0.45$ 付近でパネルの傾きが急増し、破壊に至る。その付近での最大せん断ひずみ分布を、豊浦砂、珪砂5号のそれぞれについて図6、図7に示す。いずれの場合も、傾斜が 23° ($k_h=0.424$) あるいは 25° ($k_h=0.466$) を超えてからせん断ひずみが集中する直線的な領域が見られる。即ち、最下段補強材を貫くすべり線と補強領域背面の鉛直すべり線及び背面盛土内の直線的すべり線が現れ、図5でも見られるように急激なすべり破壊が発生した。なおこのときの最下部パネルの傾きは概ね $\theta=3\%$ となった。このように、壁面パネルの傾きは、補強土壁全体の安定性を示す指標となり得ると考えられる。

振動台実験では100Hzの正弦波（振動台実験では100Hzの正弦波（実スケールで2Hz相当）を振幅、波数を変えて入力した。この場合、地震波のような不規則波形でのように最

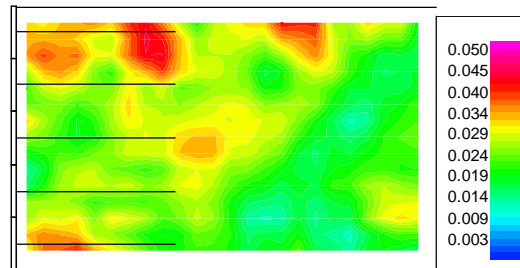


(a) $\eta=23^\circ$, $k_h=0.424$

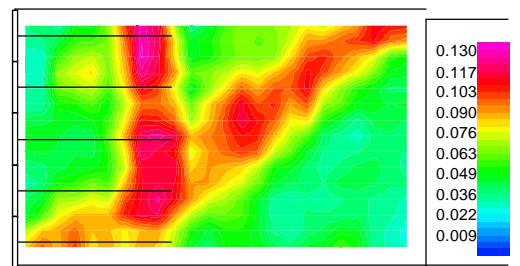


(b) $\eta=24.5^\circ$, $k_h=0.456$

図6 傾斜台実験での最大せん断ひずみ分布（豊浦砂）



(a) $\eta=25^\circ$, $k_h=0.466$



(b) $\eta=26^\circ$, $k_h=0.488$

図7 傾斜台実験での最大せん断ひずみ分布（珪砂5号）

大振幅を入力動の指標とすることは出来ない。そこで式(1)に示す加速度パワーの累積値を指標とした。加速度パワーは、入力動の大きさだけでなく継続時間も考慮できる指標として用いている。

$$I_E = \int_0^T a^2(t) dt \quad (1)$$

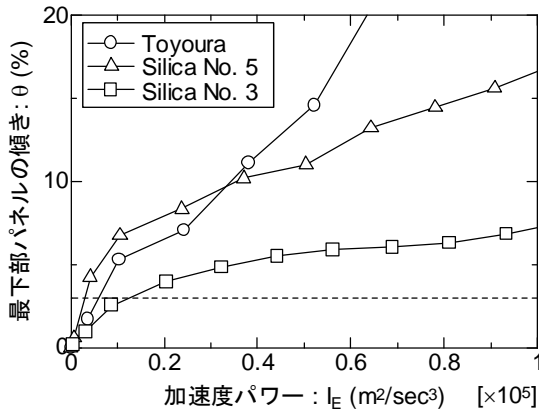
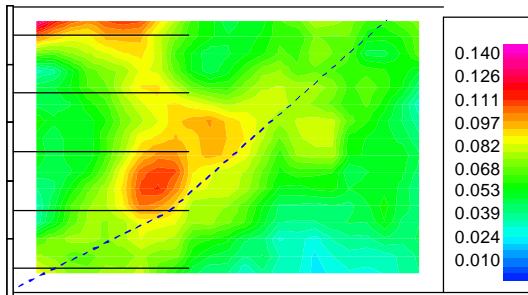
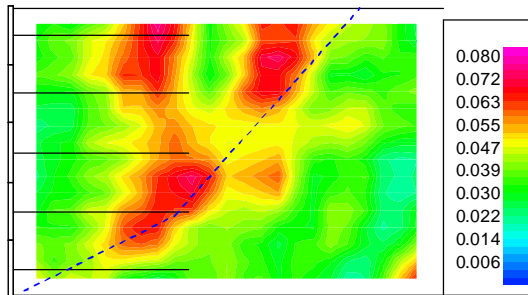


図8 パネル傾きと入力動加速度パワー



(a) 豊浦砂 Step3



(b) 珪砂5号 Step2

図9 遠心振動台実験での最大せん断ひずみ分布

ここで、 a : 入力加速度 (m/sec^2)

T : 振動継続時間 (sec)

図8に遠心振動台実験において得られた最下部パネルの傾き θ と入力動の加速度パワー I_E の関係を示す。

実験では入力振幅や波数を増やしながら段階的に载荷を行った。豊浦砂のStep3と珪砂5号のStep2で得られた残留最大せん断ひずみの分布を図9に示す。傾斜台実験ほど明瞭ではないが、同様なすべり線が見られる。この時の最下部パネルの傾き θ は図8に見られるように3%を超える。しかしその後 θ が傾斜台実験のように急激に増加して破壊に至ることはない。これは傾斜台実験では水平力がかかり続けるのに対し、振動台実験では盛土材強度がピーク後に急減しない限り、振動

終了後に鉛直加速度(実スケールでは1G)のみが作用して平時の釣り合い状態にほぼ戻るためと考えられる。

上で述べたように、壁面パネルの傾き θ が約3%で盛土材にすべり線が見られた。実構造物では補強土壁内部を見られないが、壁面変位から地震などに起因する補強土壁の損傷の程度を評価できると考えられる。

Bransbyらは片持ち梁式シートパイル模型の壁面変位と背面地盤に生じるひずみの関係について考察し、壁面の傾き θ と裏込め土に生じている最大せん断ひずみ γ_{max} の関係は裏込め土のダイレイタンシー角 ϕ を用いて次式のように表せ、実験結果とも一致すると述べている。

$$\gamma_{max} = 2\theta / \cos\phi \quad (2)$$

式(2)はダイレイタンシー角 ϕ を含んでいるが、通常考えられる ϕ の範囲ではその影響は小さいため、

$$\gamma_{max} = 2\theta \quad (3)$$

を用いることができる。これはBoltonらの体積変化の無い地盤での壁面の傾きとひずみについての関係式と一致する。

図10に三軸圧縮試験から得られた相対密度80%の豊浦砂、珪砂5号、珪砂3号の軸差応力と最大せん断ひずみの関係を示す。遠心模型実験における模型補強土壁の下部における上載圧はおよそ100kPaであるため、ここでは拘束圧 $\sigma_c=98kPa$ における結果を示した。豊浦砂、珪砂5号は、それぞれ最大せん断ひずみが6.2%と5.7%のときに強度はピーク値を示した。補強土壁下部でこのようなせん断ひずみが生じたとすると、その時の壁面の傾きは式(3)よりそれぞれ3.1%と2.9%となる。この壁面の傾きは、遠心傾斜台実験や遠心振動台実験においてすべり線が発生した時点での壁面の傾きとほぼ一致している。従って、盛土材の室内試験から得られる破壊時せん断ひずみと壁面の傾きを比較する事で、補強土壁内部のすべり線の発生を評価する事ができる。珪砂3号については三軸試験では明確なピークは見られず、また遠心傾斜台実験においても明確なすべり線は見られなかった。このような場合には、許容変形量などを考慮した判断が必要となる。

上で述べたように、式(3)を用いることで壁面変位と盛土材の破壊ひずみからすべり線発生の有無を評価できる。ここでは、そのときのすべり線位置について検討する。安定解析はTwo-Wedge法を用いて行った。解析では、盛土材の c と ϕ 、およびジオグリッドの引抜き抵抗が用いられる。即ち盛土材の特性とジオグリッドの特性が考慮される。

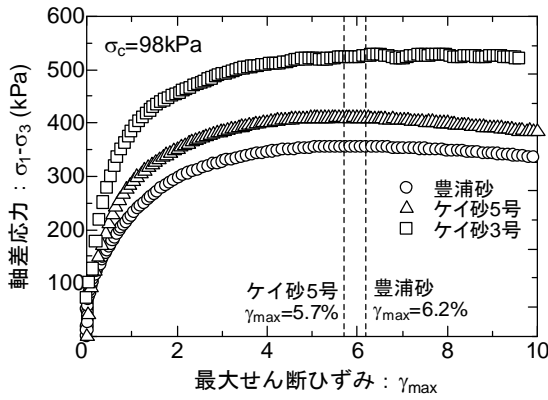


図 10 三軸圧縮試験結果

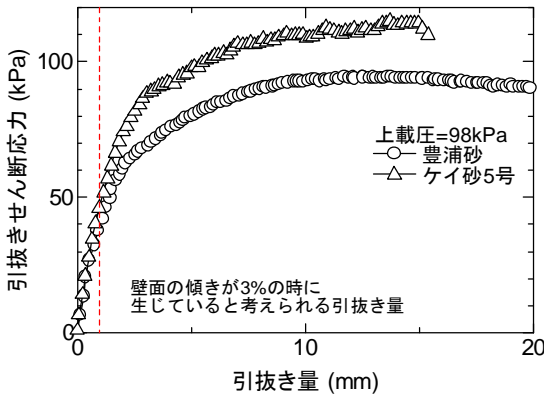


図 11 引抜き試験結果

補強土壁の地震時安定性に及ぼすジオグリッド特性の影響に関する検討より、軟らかいジオグリッドを用いた場合、引抜き抵抗のピーク値を得るには大きな引抜き量を必要とするが、それだけ引抜ける壁面変位では、盛土材は既に破壊している。盛土材が破壊した時点では引抜き抵抗はピーク値よりはるかに小さい。盛土材と引抜き抵抗のどちらもピーク強度を用いると、すべり線が寝て破壊領域が大きくなり、破壊時の水平震度を過大に見積もることになる。盛土材のピーク強度とすべり線が生じる壁面変位に対応する引抜き量での引抜き抵抗を用いると、破壊時水平震度とすべり面形状の両方とも、傾斜台実験結果と良く一致する。

ここで紹介している実験は、同一のジオグリッドを異なる盛土材とともに用いているが、この場合も同様なことが言える。図 11 に引抜き試験結果の一例を示す。引抜き抵抗は引抜き量とともに増加し、ピーク値を得るには 10mm 以上引抜く必要がある。しかし、先に述べたように、最下部パネルが約 3%傾いた時点ですべり線が発生している。そこで、その時点での補強材の引抜き量に相当する引抜き量 1mm のときの引抜き抵抗を求め、それを用いて Two-Wedge 法による安定解析を行った。得られた破壊面を図 12 に示す。安全

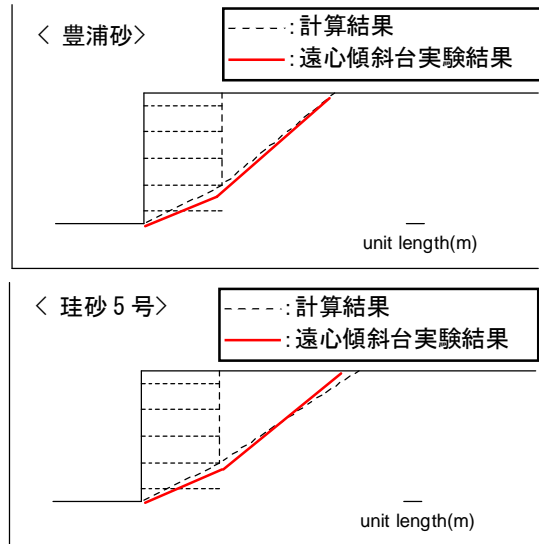


図 12 実験と解析で得られた破壊面

率が 1 となる水平震度は豊浦砂で 0.38、珪砂 5号で 0.49 となった。遠心傾斜台実験ではそれぞれ約 0.45 と約 0.48 であり、両者は良い対応を示している。また破壊面についても概ね一致している。

以上述べてきたように、模型実験のように極力不確定要素を排除した場合、限られた範囲内ではあるが、盛土材料、補強材、補強材と盛土材料の相互作用、が異なる事例に対して、盛土材強度や引抜き抵抗に適切な値を用いれば、破壊は十分に説明できる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Giang, H. N., Kuwano, J., Izawa, J., and Seki, S. : Centrifuge tests on seismic stability of the damaged geogrid reinforced soil wall, ジオシンセティックス論文集, 査読有, Vol. 25, 2010, 197-202.
- ② Giang, H. N., Kuwano, J., Izawa, J., and Tachibana, S. : Influence of unloading-reloading processes on the pullout resistance of geogrid, Geosynthetics International Journal, 査読有, Vol. 17, No. 4, 2010, 242-249.
- ③ Izawa, J. and Kuwano, J. : Centrifuge modelling of geogrid reinforced soil walls subjected to pseudo-static loading, International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 査読有, Vol. 10, No. 1, 2010, 1-18.
- ④ 桑野二郎 : 補強土壁工法の耐震性に関する課題, 基礎工, 査読無, Vol. 38, No. 2, 2010, 12-17.
- ⑤ Nguyen, G. H., Kuwano, J., Izawa, J., Seki, S. and Tachibana, S. : Shear strain

distribution in soil around geogrid during the unloading-reloading pullout test, ジオシンセティックス論文集, 査読有, Vol.24, 2009, 69-74.

- ⑥ Izawa, J., Ito, H., Saito, T., Ueno, M. and Kuwano, J. : Development of rational seismic design method for geogrid-reinforced soil wall combined with fibre-mixed soil-cement and its applications, Geosynthetics International, 査読有, Vol.16, No.4, 2009, 286-300.
- ⑦ Nguyen, G.H., Kuwano J., Izawa, J. and Seki, S. : Effects of transverse ribs on pullout resistance and deformation during the unloading-reloading process, ジオシンセティックス論文集, 査読有, Vol.23, 2008, 37-44.
- ⑧ 桑野二郎 : 補強土工法の災害への対応, ジオシンセティックス技術情報, 査読無, Vol.24, No.1, 2008, 1-4.

[学会発表] (計 17 件)

- ① Kuwano, J. and Izawa, J. : Evaluation of seismic stability of reinforced soil wall, 5th Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, 2011年1月13日, Santiago.
- ② Kuwano, J. and Izawa, J. : Seismic stability of submerged reinforced soil walls, Int. Symp. on Geotechnical and Geosynthetics Eng.: Challenges and Opportunities on Climate Change, 2010年12月7日, Bangkok.
- ③ Kuwano, J. and Izawa, J. : Seismic stability of saturated reinforced soil walls, 3rd Korea-Japan Geotechnical Engineering Workshop, 2010年9月9日, Ansan.
- ④ Kuwano, J. and Izawa, J. : Evaluation of slip surface formation in saturated backfill of reinforced soil walls based on wall displacement, 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, 2010年6月28日, Zurich.
- ⑤ Izawa, J., and Kuwano, J. : Evaluation for damage of geogrid reinforced soil walls subjected to earthquakes, 9th International Conference on Geosynthetics, 2010年5月25日, Guaruja.
- ⑥ Nguyen, G.H., Kuwano, J., Izawa, J. and Seki, S. : Evaluation of the confining effect on geogrid pullout test under unloading-reloading history, 9th International Conference on Geosynthetics, 2010年5月24日, Guaruja.
- ⑦ Izawa, J. and Kuwano, J. : Evaluation of

damage in geogrid reinforced soil walls based on wall displacement, 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009年10月8日, Alexandria.

- ⑧ Nguyen, G.H., Kuwano J., Izawa, J. and Seki, S. : Shear strain distribution in soil around geogrid during the unloading-reloading pullout test, First African Regional Conference of the International Geosynthetics Society, 2009年9月3日, Cape Town.
- ⑨ Izawa, J. and Kuwano, J. : Evaluation of damage of geogrid reinforced soil wall based on wall displacement, 4th European Geosynthetics Conference, 2008年9月10日, Edinburgh.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桑野 二郎 (KUWANO JIRO)

埼玉大学・地圏科学研究センター・教授

研究者番号 : 30178149

(3) 連携研究者

齊藤 正人 (SAITO MASAHIRO)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号 : 40334156

井澤 淳 (IZAWA JUN)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号 : 70345388

橋 伸也 (TACHIBANA SHINYA)

埼玉大学・地圏科学研究センター・助教

研究者番号 : 90432567