

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04406

研究課題名(和文)土構造物レジリエント化へ向けた速やかな損傷度評価と修復法の構築

研究課題名(英文)Evaluation of extent of damage of soil structure and its repair

研究代表者

桑野 二郎 (Kuwano, Jiro)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：30178149

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：地震や豪雨などの一時的過大作用による補強土壁の被災を模型実験により模擬し、補強土構造物の耐力、被災後の残存耐力、補修後の性能などを検討した。壁面の損傷に関しては、壁面傾斜を用いて補強土壁の被災度を評価するために、傾斜実験・振動実験を実施した。初期に壁面が垂直な場合と予め壁面を傾斜させた場合の比較から、壁面のその時点での傾斜ではなく、壁面傾斜の増分が被災度を評価する際の指標となることが示された。さらに被災後の補修を考慮して、ジオグリッド-ネイル複合補強土壁の振動台実験を実施したところ、ジオグリッドをまたぐようにネイルを配置することで、補強土壁の耐震性が向上する可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

安定性が高いことから、道路盛土構築に際して近年使用されることが多い補強土壁構造であるが、大地震や大雨などの過大な外力が作用した場合に、ある程度損傷を受けることがある。被災後速やかに被災度を評価することは、交通の確保や速やかな復旧へとつながる。また追加的な補修を行うことで十分な安定性が確保できれば、速やかな復旧を経済的に行うことができる。本研究では補強土壁の安定性指標と追加補強法について検討を行い成果を得た。

研究成果の概要(英文)：This study focuses on the assessment of seismic stability of geogrid reinforced soil walls using a vertical wall and inclined wall to simulate initial damage. The walls were tilted or shaken to be damaged and finally collapsed. From the deformation of the facing panels and distribution of strain in the backfill, it was found that the increment of tilting angle of facing panel could be a good index to estimate stability of the geogrid reinforced wall. Shaking table tests on MSE/Soil nailed hybrid reinforced soil retaining walls were then carried out. It was shown that the nailing was effective to increase stability of damaged reinforced soil wall.

研究分野：地盤工学

キーワード：補強土壁 被災度評価 ジオグリッド ネイリング 地震 壁面傾斜 すべり面

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

1960年代の高度成長から約半世紀を経て、当時盛んに建設された各種構造物の劣化が問題となっている。2012年12月の中央高速道路笹子トンネル天井板崩落事故は、構造物の劣化と維持管理が喫緊の課題であることを強く印象付けた。土構造物についても長期性能と維持管理は重要な課題ではあるが、コンクリート構造物などと比べると経年変化は目に見えにくく、維持管理や長寿化に関する取り組みは、必ずしも十分に進んでいないのが現状と思われる。

本研究では、土構造物の中でも補強土壁を主な研究対象とする。補強土壁は通常の土構造と異なり、土以外に補強材や壁面材を組み合わせた複合構造物となっているのが特徴であり、各構成材料の長期性能に加え、複合構造物としての長期性能や、その特徴を踏まえた維持管理が必要となってくる。そうやって補強土壁を調べることで得られる知見は、一般土構造物へも適用できるものと考えられる。

補強土壁の長期挙動には様々な要因が関係する。計画・設計に始まり、建設、供用開始と続く。その後の長きにわたる供用期間中には、時間の経過に伴う材料特性の変化など様々なことが考えられる。その中でも、一時的過大作用にどのように対処するかが、構造物を長期間安定的に使用する際の鍵となる。

対処するにあたっては、被災した際の性能評価が重要となるが、盛土材(土)、補強材(合成樹脂・鉄)、壁面材(コンクリート・鉄)など、各部材についてはかなりの知見が蓄積されているが、それらの部材より構成される複合構造としての補強土壁全体としての性能評価については、未だ知見は十分ではなく、被災した際の性能評価法は確立されていない。

### 2. 研究の目的

上記の研究背景を踏まえ、地震や豪雨などの一時的過大作用による補強土壁の被災を模型実験により模擬し、補強土構造物の耐力、被災後の残存耐力、補修後の性能などを検討する。具体的には、地震などの一時的過大作用による補強土壁の被災を模型実験により模擬し、その被災の程度を判定する指標を検討する。さらに、被災後の強化復旧を考え、ネイリングなどにより補強した構造物の性能を、模型実験などを通し検証する。

### 3. 研究の方法

研究は大きく2つの段階に分けられる。1つは補強土構造物の被災度評価の指標を検討するもの、もう1つは被災後の強化復旧法として想定されるネイリングによる補強の効果を検討するものである。

第1段階の実験は、補強土壁模型は図1に示すように壁面高さ50cm、基礎地盤厚さ5cm、補強材敷設間隔6cm、気乾状態の豊浦砂を空中落下法により相対密度約90%となるように作製し、傾斜・振動実験を重力場で行った。画像解析により模型の破壊現象を可視化するために壁面と地盤内に標点を設置した。標点は地盤の変形に追従して動くので、画像解析ソフトによりその動きを自動追尾し、移動前と移動後の標点の実座標から壁面変位と傾き、地盤内ひずみを計測した。また、実験に使用した補強材は剛性・引き抜き強度の異なる補強材Aと補強材Bの2種類とし、それぞれ補強材長を20cm、30cmの2種類とした。このような模型に対し、耐震設計では一般に水平慣性力を作用させる震度法が用いられるが、これを模擬するために模型全体を傾ける傾斜実験を実施するとともに、振動台実験も実施し、破壊モードや耐震性を検討した。

第2段階の実験では、被災後の補修・補強を考慮し、一部をネイリングにより補強した図2のような模型について、第1段階と同様に振動台実験を実施した。新規の補強土壁であれば、壁体背面の裏込めを段階的に盛り立てるため、ジオグリッドを層状に配置できるが、既設の補強土壁の場合は裏込め土内部のジオグリッドを交換したり追加したりはできないため、既設補強土壁でも追加施工が可能であるネイリングを用いることとした。

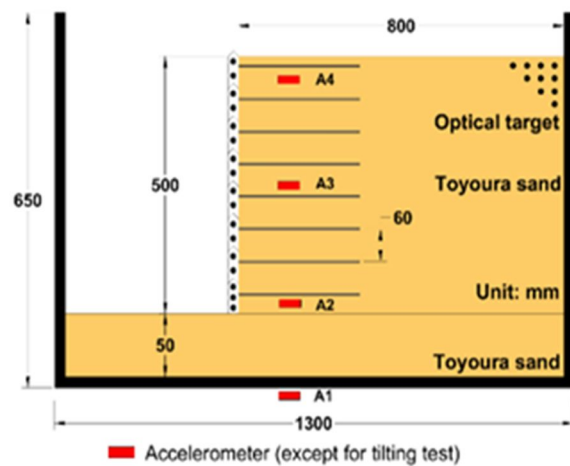


図1 ジオグリッド補強土壁模

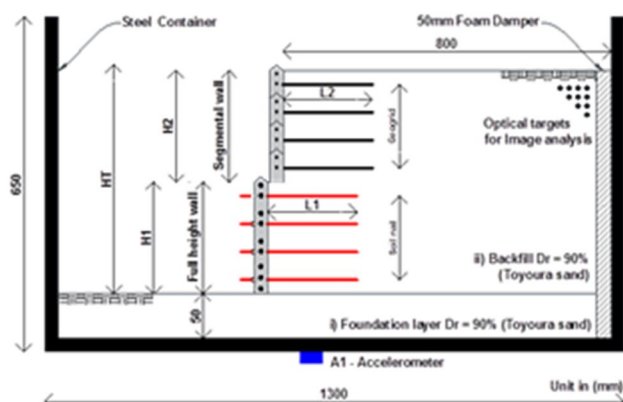


図2 ネイル-ジオグリッド複合補強土壁模型

## 4. 研究成果

### (1) 補強土壁の被災度評価

耐震設計では、一般に水平慣性力を作用させる震度法が用いられるが、これを模擬するために模型全体を傾ける傾斜実験を実施した。本研究では、模型を毎分1°ずつ傾斜させ破壊に至った段階で実験を終了した。補強土壁の変形モードは、まず補強領域が壁面と一体となってせん断変形し、それに伴い無補強領域にはすべり線が形成された。すべり線発生後は、補強領域下部と無補強領域にせん断ひずみが卓越し、壁面変位が急増し崩壊した。この結果より補強土壁の被災度を示す指標として、すべり線の発生の有無を考え、壁面傾斜と裏込め土のせん断ひずみを関係付けて、すべり線の発生を推測することで補強土壁の被災度を評価することとした。図3に水平震度 $k_h (= \tan \alpha, \alpha: \text{傾斜角度})$ と壁面傾斜 $\theta$ (壁面の上下端の水平変位/壁面高さ(%))で定義)の関係を示す。どの実験ケースも $\theta = 2.5\%$ に達した後に壁面傾斜が急増している。この時の最大せん断ひずみ分布の一例(図4(a))を見るとすべり線が形成されている。

Bolton et al.は剛な壁に支えられた体積変化のない三角形の理想地盤を仮定した場合、壁面傾斜 $\theta$ とせん断ひずみ $\gamma$ の関係が概ね $\gamma = 2\theta$ で表せるとした。一方、豊浦砂に関する三軸圧縮試験から得られる最大せん断ひずみと軸差応力の関係から、豊浦砂のピーク強度は $\gamma_{max} = 5.0 \sim 6.0\%$ で生じる。 $\gamma_{max} = 5.0\%$ を上記式 $\gamma = 2\theta$ に代入すると $\theta = 2.5\%$ となり、これは前述の壁面傾斜が急増した値に一致する。従って、この式を使用してすべり線の発生が推測でき、補強土壁の被災度を評価できる。

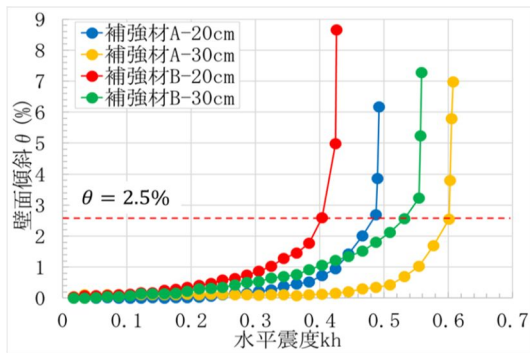


図3 水平震度  $k_h$  と壁面傾斜 $\theta(\%)$ の関係

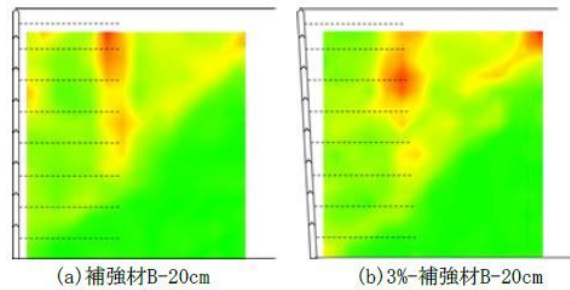


図4  $\Delta\theta=2.5\%$ に達した時の最大せん断ひずみ分布(%)

補強土壁は建設時に壁面の傾きがある程度許容されるため、被災度を評価する際に壁面傾斜が被災によるものなのか、構築時からのものなのか分からない場合もあり得る。そこで壁面が最初から傾斜していた場合にも、被災度を評価する際に $\gamma = 2\theta$ を適用できるのか実験を行った。最初の構築時に壁面が $\theta=3\%$ 傾いた状態で作製した補強土壁模型を、さらに  $\theta$ だけ傾斜を増加させた場合の、水平震度 $k_h$ と壁面の傾きの増分  $\Delta\theta(\%)$ の関係を図5に示す。前述の実験と同様に  $\theta = 2.5\%$ に達したとき壁面傾斜は急増する。この時の最大せん断ひずみの分布の一例(図4(b))を見ると、最初の構築時の壁面が垂直な場合(図4(a))と同様な分布を示すすべり線が形成されている。つまり、補強土壁の被災度を評価する際は、壁面の現在の傾斜よりも壁面傾斜の増分が重要な指標となる。従って先の式は増分を考慮した式にする必要がある。

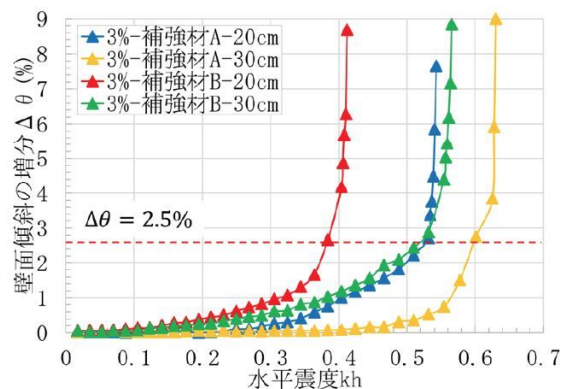


図5 水平震度  $k_h$  と壁面傾斜増分 $\Delta\theta(\%)$ の関係

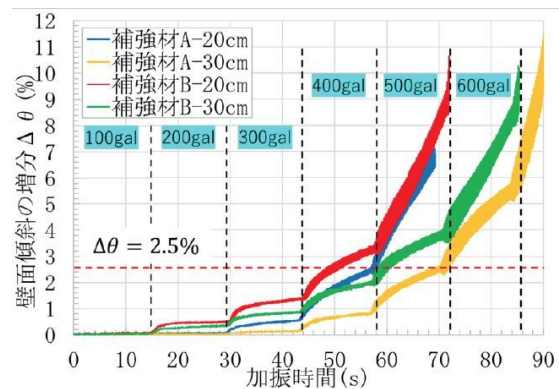


図6 加振時間(s)と壁面傾斜増分 $\Delta\theta(\%)$ の関係

次に振動台実験を行った。加振条件は、周波数5Hzで正弦波を15秒毎に100gal毎増加させ、模型が崩壊したら実験を終了した。図6に加振時間(s)と壁面傾斜の増分  $\theta(\%)$ の関係を示す。 $\theta = 2.5\%$ に達するまでは、入力加速度を段階的に増加させると、加速度振幅を増加させた加

振初期に壁面傾斜が急増している。そして  $\theta = 2.5\%$ に達した後は壁面傾斜が急増している。これは前述の傾斜実験で壁面傾斜がある閾値を超えると急増するという結果と一致しており、振動実験でも式  $\gamma = 2\theta$  の関係を適用できる。壁面を予め 3% 傾斜させた補強土壁模型でも振動実験を行った。振動実験でも壁面傾斜の増分が被災度を評価する際の指標となったことから、被災による増分を知るためには、補強土壁の初期形状を把握することが重要となる。

### (2) 被災後の補修・補強を考慮したネイリングを用いた複合補強土壁の耐震性

新規の補強土壁であれば、壁体背面の裏込めを段階的に盛り立てるため、ジオグリッドを層状に配置できるが、既設の補強土壁の場合は裏込め土内部のジオグリッドを交換したり追加したりはできないため、既設補強土壁でも追加施工が可能であるネイリングをジオグリッドと併用した複合補強土壁の耐震性について検討を行った。

複合補強土壁は図 2 のような断面を有し、補強土壁模型の制約からジオグリッドとソイルネイルを同一高さに配置できないため、下半分がネイリングによる補強、上半分がジオグリッドによる補強となっている。ジオグリッドは最初のシリーズと同じく高密度ポリエチレンを二軸延伸したもので、目合が  $40\text{mm} \times 28\text{mm}$ 、引張剛性が  $300\text{kN/m}$  のものを用いた。ソイルネイルには径  $5\text{mm}$  の鋼棒(ねじ切り棒)の周囲にエポキシ樹脂でグラウトを模擬し径  $12\text{mm}$  としたものを用いた。実際の補強土壁では後施工が可能であるが、模型実験では壁面パネルとの関係で困難であるため、ジオグリッドと同様に裏込め土と並行して敷設した。振動台実験においては、 $5\text{Hz}$  の波を 10 秒間 (50 波) とし、 $100\text{gal}$  から段階的に  $100\text{gal}$  ずつ増加させた。

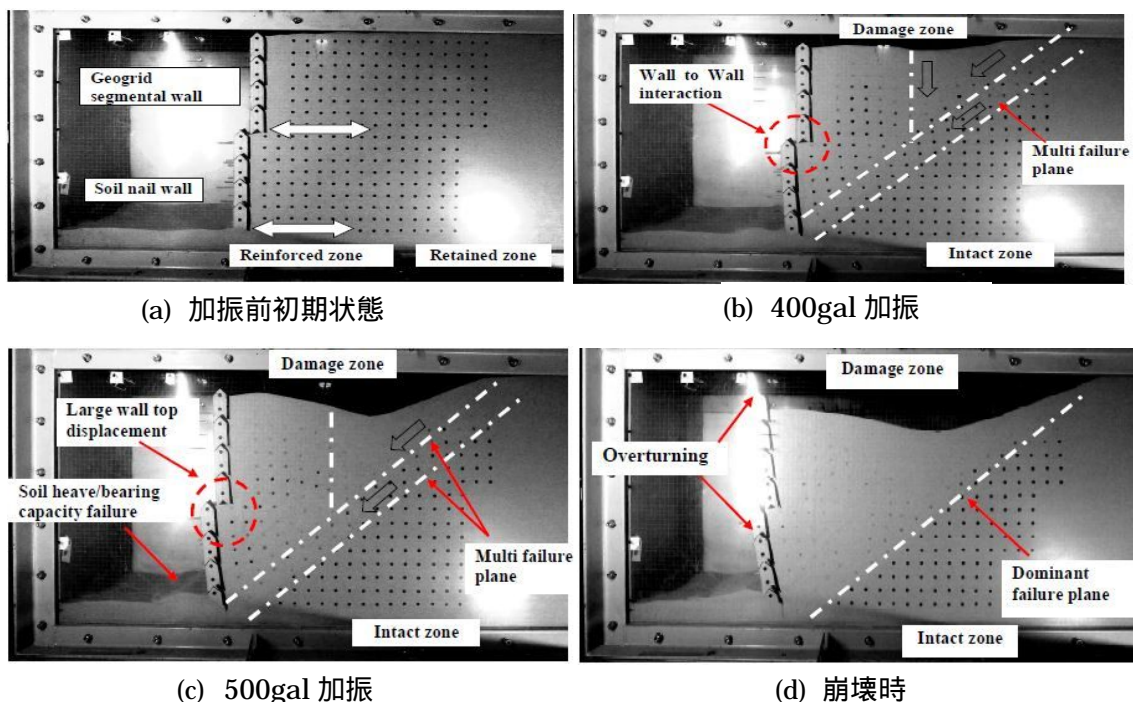


図 7 ジオグリッド-ネイル複合補強土壁の振動に伴う変形の進行

図 7 にジオグリッド-ネイル複合補強土壁の振動に伴う変形の進行を示す。ネイル補強領域の転倒モードがまず進行し、上部のジオグリッド補強領域は一体となって水平移動するモードを示した。ネイル補強領域の変形がさらに進行し破壊に近い状態になると、ジオグリッド補強領域も転倒破壊へと進行し、最終的に全体的な破壊へと至った。この実験の場合、模型実験の制約上、下半分はネイルのみの補強となりジオグリッドは敷設されていなかったため、ネイル補強領域の一体化が必ずしも十分ではなく、その結果ネイル補強領域の壁面下端を通るすべり線が早く現れ、転倒モードの変形が早期から卓越したものと思われる。研究の背景で述べたように、被災したジオグリッド補強土壁の補修の場合、ジオグリッド自体は被災後も残っているため、ジオグリッドが引き抜ける、あるいは破断する、といった損傷を受けていても、その部分をまたぐようにネイルが配置され一体化を増強することにより、耐震性はさらに向上することが期待される。

### (3) まとめ

本研究では、壁面傾斜を用いて補強土壁の被災度を評価するために、傾斜実験・振動実験を実施した。その結果、壁面傾斜の増分が被災度の評価指標となること、ネイリングによる追加補強により被災した補強土壁の耐震性が向上する可能性があること、などの結果を得た。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ajuda, A.A., Kuwano, J. and Hoshina, K.	4. 巻 34
2. 論文標題 Seismic behaviour of geogrid reinforced soil wall constructed with multiple reinforcement stiffness	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ジオシンセティックス論文集	6. 最初と最後の頁 129-136
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ajuda, A.A., Kuwano, J., Takamine, S. and Yasukawa, K.	4. 巻 33
2. 論文標題 Evaluation of seismic stability of an initially tilted geogrid reinforced soil wall	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ジオシンセティックス論文集	6. 最初と最後の頁 9-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ho, M.H., and Kuwano, J.	4. 巻 32
2. 論文標題 Effects of overburden on behavior of confined-reinforced earth under differential settlement	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ジオシンセティックス論文集	6. 最初と最後の頁 39-44
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Ajuda, A.A., Kuwano, J., Takamine, S. and Yasukawa, K.
2. 発表標題 Shaking table test on seismic performance of geogrid reinforced soil wall
3. 学会等名 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ajuda, A.A., Kuwano, J. and Hoshina, K.
2. 発表標題 Effect of reinforcement stiffness arrangement on seismic performance of geogrid reinforced soil wall
3. 学会等名 5th International Conference on Science, Engineering & Environment (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ajuda, A.A., Kuwano, J. and Hoshina, K.
2. 発表標題 Effect of Reinforcement stiffness arrangement in the performance of segmental geogrid reinforced soil wall under seismic loading
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ho, M.H., and Kuwano, J.
2. 発表標題 Effect of lateral confining condition of behaviour of confined-reinforced earth
3. 学会等名 9th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ho, M.H., Kuwano, J. and Tachibana, S.
2. 発表標題 Confining tie rods in confined-reinforced earth method to reduce differential settlement
3. 学会等名 11th International Conference on Geosynthetics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高嶺周平, 桑野二郎, Ajuda, A.A.
2. 発表標題 予め壁面を傾斜させた補強土壁の地震時被災度評価
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高嶺周平, 桑野二郎
2. 発表標題 傾斜実験による補強土壁の破壊モードと震度法の検討
3. 学会等名 第14回地盤工学会関東支部発表会
4. 発表年 2017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