

学位論文要旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	帯鋼補強土壁における補強材の地震時及び引抜き後の挙動特性に関する研究
氏名(Name)	志村 直紀
<p>補強土壁工法は盛土補強工法の一つとして特に法面は鉛直に近く、壁面材と補強材からなる土工構造物である。補強メカニズムは鉛直に近い壁面材に作用する土圧力に対して、盛土内に層状に敷設された引張り補強材の引抜き抵抗力によって釣り合いを保ち、抗土圧構造としての機能を発揮させるものである。補強土壁工法のうち、帯鋼補強土壁工法は、わが国において導入後50年が経過、4万件ほどの実績を有するが、構造物としての安全性・安定性、耐久性が高いことが経験的に明らかとなっている。</p> <p>このことは、2011年の東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震を始めとする大規模地震後の調査において、調査を行った帯鋼補強土壁のうち、98.2%が健全であったことが裏付けているが、一方で、一部の補強土壁において大規模な被災事例も確認された。比較的被災度の高い事例をいくつか取り上げ、被災要因を分析した結果、不適切な盛土材や排水機能不全、上載荷重、基礎地盤(軟弱地盤や断層)などの複合要因が重複したことで、補強材の引き抜けや壁面変位、崩壊などが生じたと考えられた。このうち、補強材の引き抜けについては、設計で照査を行っているものの、設計時の想定や前工程条件が異なった場合、地震動などの外力により変位を生じることがあることが示唆された。帯鋼補強土壁における補強材の引抜き抵抗特性については、変位制御による静的な引抜き試験等により既往の研究で明らかとなっているものの、一定の引抜き力が作用した状態での地震時挙動や、一定の変位が生じた場合や、引抜き力に応じた残留変位の特性は明らかとなっておらず、引抜きモードにおける評価手法は未確立であった。そこで、本研究では、地震動が引抜き抵抗特性に及ぼす影響および、任意の変位が生じた場合のその後の引抜き抵抗と残留変位特性を明らかにし、引抜き後の変位から補強材の残存性能を評価する手法を提案することを目的とした。</p> <p>まず、地震時の引抜き抵抗特性を明らかにするため、帯鋼補強土壁における補強材周辺の応力状態を再現し、補強材に一定の引抜き荷重を付与した状態のまま振動台上で加振可能な供試土槽を製作した。加振時に付与する引抜き荷重を設定するため、事前に荷重制御による引抜き試験を実施し、初期引抜き荷重 T_0 は最大引抜き抵抗 T_{max} の75%および85%に設定した。盛土材には千葉県で採取した山砂及び、美東粘性土を用いた。また、加振条件は、3Hzの正弦波で、最大加速度は1000galとした。加振試験の結果、上載圧 $\sigma_v=0\text{kPa}$ では、加振後10秒で引抜き抵抗を消失し、変位が拡大したが、上載圧 $\sigma_v=50\text{kPa}$ では180秒加振しても引抜き荷重に変化はみられず、加振による変位も微小であった。一方、美東粘性土では、上載圧条件下でも引抜きが発生したことから、上載圧が小さい条件下であれば、地震動の作用により引き抜けが生じることが示唆され、また、粘性土では、地震時に引抜き抵抗を消失する可能性が示唆された。さらに、初期引抜き荷重 T_0 の違いによる挙動差影響はみられなかったが、加速度を増加させた条件では、引抜き変位が増加する傾向が確認された。</p> <p>次に、補強材の引抜きによる壁面変位が生じた際の補強材の残存抵抗特性を検討するため、補強材周辺の応力状態を再現した供試土層を用いて、変位制御と荷重制御を任意の点で切り替え可能な機構を有する引抜き試験装置を開発した。予め、変位制御により引抜き抵抗特性を把握した上で、引抜き挙動における弾性的な挙動を示す第一領域、接線勾配が変化する第二領域、その後の第三領域の3種に区分し、それぞれの先行引抜き変位 ΔL_0 を与えた場合の、引抜き力 T と引抜き変位 ΔL の関係を検証した。盛土材には、豊浦標準砂及び宇部まさ土を用いた。結果、変位・荷重制御試験において、先</p>	

様式 7 号 (第 12 条, 第 31 条関係)

(様式 7 号) (Format No.7) 日本語版

先行引抜き変位 ΔL_0 が大きいほど, その後の引抜き力 T を一定に保持した際の残留引抜き変位 ΔL は増加する傾向にあった. また, 上載圧 σ_v が大きい程, 残留引抜き変位 ΔL は減少することが確認された. さらに, 先行引抜き変位 ΔL_0 と残留引抜き変位 ΔL の和である累加変位が大きい程, 大きな引抜き力が必要であることが確認された. このことから, 実際に補強材に作用する引抜き力 T が, 変位後に必要とされる抵抗力よりも小さければ, 残留変位は補強材長に対して微少となり, 仮に引抜きモードで変位が生じて, その後収束すると考えられる. さらに, 累加変位を補強材長で正規化した変位率から, 変位が引抜き過程におけるどの領域に進行しているかを評価することが可能と考えられる.

以上の結果より, 地震動などにより変形が生じた帯鋼補強土壁に対して, 引抜きモードとして生じた変位率から, 補強材の残存性能を評価する手法を提案した.

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Pull-out Behavior Characteristics of Strip During Earthquake and After Pulled out on Steel Strip Reinforced Soil Wall
氏 名 (Name)	SHIMURA Naoki
<p>The reinforced soil wall, which is composed of panels, steel strips (as reinforcements), and backfills, is one of the earthwork structures with its wall slope close to vertical. The corresponding reinforcing mechanism is to maintain a balance between the pull-out resistance and the tension of the strips laid in the backfill layers against the soil pressure acting on the facing wall. Among the existing reinforced soil wall methods, it has been 50 years since the steel strip reinforced soil wall method was first introduced in Japan and about 40,000 walls have been built ever since. Experimental results have shown that the steel strip reinforced soil wall possesses high structural stability and durability.</p> <p>The investigations conducted after the 2011 Tohoku Earthquake and the 2016 Kumamoto Earthquake proved that 98.2% of the installed steel strip reinforced soil walls were still in effect, although serious damages were also found for some reinforced soil walls. By analyzing the cases with comparatively high damages, it was shown that the pull-out of strips, wall deformation, collapse, and other types of damage were caused by a combined effect of inappropriate backfill materials, functional failure of drainages, high overburden load, and soft ground. Although the pull-out behavior of the reinforcement is commonly checked for the design, certain displacements may occur for the reinforcement due to external forces in cases such as earthquakes, where the stress condition is different from what was assumed at the time of the design. Furthermore, despite a sound understanding of the pull-out resistance characteristics of strips obtained from the static displacement controlled pull-out tests in previous studies, it remains unclear regarding the effect of the earthquake-induced constant tension on the strip and the characteristics of residual displacement under different pull-out forces. Moreover, there is no evaluation of the pull-out mode available in the existing studies. Therefore, this study aims to examine the effect of earthquakes on the pull-out resistance characteristics of the strip. The subsequent pull-out resistance and residual displacement characteristics when the displacement occurs are also assessed.</p> <p>First, to investigate the characteristics of the pull-out resistance during the earthquake, we developed a test apparatus with a soil tank to reproduce the stress state around the reinforcement in the strip-reinforced soil wall. A shaking table is included in the test apparatus to mimic the effect of the earthquake while applying a fixed pull-out load to the strip. To obtain the pull-out load used during the shaking table tests, a pull-out test was conducted by load control in advance, and the initial pull-out load T_0 was set at 75% and 85% of the maximum pull-out load T_{max}, respectively. The Chiba mountainous sands and Mito-clay soils were used as the backfills. Sinusoidal waves with a frequency of 3 Hz were used to create the shaking condition, and the maximal acceleration was set to 1000 gal. The results from the shaking table tests showed that the pull-out resistance disappeared as the displacement increased during 10 s of shaking under an overburden pressure of 0 kPa. However, the pull-out load changed insignificantly even after 180 s of shaking under an overburden pressure of 50 kPa, and the shaking-induced displacement was trivial. For the Mito-clay soils, strips were found pulled out even with the overburden pressure, suggesting that the pull-out can occur when the upper pressure was low. In the case of cohesive soils, however, the pull-out resistance may disappear during the earthquake. In addition, the pull-out behavior of the strip was not affected by the initial pull-out load, although the pull-out displacement tended to increase when the acceleration was increased.</p> <p>Second, to study the characteristics of the residual resistance of the strip when the wall displacement occurs due to reinforcement pull-</p>	

out, a pull-out test apparatus was developed to enable switching between displacement control and load for the soil tank used in the shaking table test. As a first step, the characteristics of the pull-out resistance were obtained by displacement control, and the relationship between the pull-out force and the pull-out displacement was categorized into three regions: the first region shows the elastic part of the pull-out behavior; the second region represents the change of the tangential slope; and the third region is for the residual behavior. The residual pull-out characteristics, which were obtained in advance, were verified by the preceding pull-out displacement ΔL_0 of each region. The Toyoura sands and Ube sandy soils were used as the backfills. Therefore, in the displacement and load control tests, larger the preceding pull-out displacement ΔL_0 can lead to larger residual pull-out displacements ΔL , when the initial pull-out load remained constant. It was also observed that the residual pull-out displacement ΔL decreased as the overburden pressure increased. In addition, it was confirmed that a greater pulling force was required to create a larger cumulative displacement (which is the sum of the preceding pulling displacement ΔL_0 and the residual pulling displacement ΔL). Therefore, if the pull-out force T acting on the strip is smaller than the required resistance after the displacement occurs, the residual displacement will be trivial compared to the reinforcement length. Moreover, even if the displacement occurs in the pull-out mode, it is still expected to converge afterward. Furthermore, the displacement ratio of the accumulated displacement normalized by the strip length can be used to evaluate which region the reinforcement is progressing during the pull-out process.

Based on the above results, it is possible to estimate methods of evaluating the residual performance of reinforcement in a steel strip reinforced soil wall that has been deformed by earthquake or external forces, based on the displacement generated as a pull-out mode.

(様式 9 号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	志村 直紀
審査委員	主 査：鈴木 素之 教授
	副 査：麻生 稔彦 教授
	副 査：中田 幸男 教授
	副 査：吉本 憲正 准教授
	副 査：森 啓年 准教授
論文題目	帯鋼補強土壁における補強材の地震時及び引抜き後の挙動特性に関する研究 (Pull-out Behavior Characteristics of Strip During Earthquake and After Pulled out on Steel Strip Reinforced Soil Wall)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>帯鋼補強土壁は、壁面に作用する土圧に対して、盛土中の補強材の引抜き抵抗で安定化を図った抗土圧構造物であり、1972年に国内に導入されて以降、全国的に普及が進み、最も古いものは50年を経過していることから、経年劣化が懸念され、適切な維持管理が求められている。一方、近年の大規模地震により補強材が引き抜けた事象や壁面変形が確認されているが、引抜きによる性能評価手法は未確立であり、従来からの変位に対する評価は経験的に施工管理値を準用したもので、性能を十分に反映したものではない。</p> <p>そこで本研究では、壁面変位の原因となる補強材の引抜きモードに着目し、地震時の補強材の引抜き挙動や引抜き荷重により生じる変位から、引抜き挙動に基づく地震後の性能評価法を提案したもので、成果を以下の5章にまとめている。</p> <p>第1章では、研究の背景と目的を述べるとともに、本論文の構成と内容を述べた。</p> <p>第2章では、2011年の東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震を始めとする大規模地震後の調査結果を述べ、一部の補強土壁において確認された補強材の引き抜けによる被災事例から被災要因を分析した。また、盛土材と補強材の引抜き抵抗特性を調べる土中引抜き試験において明らかにされた、盛土材の物性、飽和度、安定処理および補強材密度などが引抜き抵抗に及ぼす影響について整理した。</p> <p>第3章では、補強材の地震時の引抜き挙動を明らかにするため、補強材の抵抗領域部分の応力・変形状態を再現した供試土槽を開発し、振動台上で加振することにより、地震動の作用下での壁の変位等の挙動を検証した。その結果、砂質土では上載圧の荷重条件では地震動の作用による引抜けは抑制される一方、粘性土では上載圧の荷重条件でも引抜けが生じた。さらに、補強材の初期引抜き荷重は引抜き挙動に影響しないが、加速度の増加に伴い変位は増加した。</p>	

(様式 9 号)

第 4 章では、引抜き挙動において弾性的な挙動を示す領域、接線勾配が変化する領域および引抜き抵抗が一定に収束する領域の各領域における任意の荷重下において、引抜き後の荷重保持状態で生じる変位特性を変位・荷重制御による引抜き試験により明らかにした。その結果、先行引抜き変位が大きいほど、荷重保持後に生じる変位は増加し、上載圧の増加に伴って、荷重保持後に生じる変位は抑制される。また、実際の壁面変位は、先行引抜き変位と荷重保持後の累加変位の和であることから、累加変位を補強材長で正規化することで、現在の変位が引抜き挙動においてどの領域にあるのか評価可能であることを示した。

第 5 章では、本研究で得られた成果をとりまとめ、総括を行うとともに、実構造物における壁面変位を補強材抵抗長で正規化した値に基づく健全性評価手法を提案した。

本研究で得られた補強材の引抜き挙動に関する知見は、補強土壁の健全性評価手法において従来から経験的に運用されていた手法を見直し、技術的根拠に基づいて適切に性能を評価することを提案するものであり、現場観測と整合することから、妥当性を有するものである。

公聴会は対面およびハイブリッドの併用開催とし、学内外から 58 名の参加があった。公聴会における主な質問は、1) 評価における内的安定と全体安定の考え方、2) 連続する地震に対する評価、3) 降雨による飽和の影響、4) 乾湿繰り返しによる補強材の耐久性、5) 評価手法に補強材抵抗長を考慮した根拠などに関する事項であり、いずれの質問に対しても発表者からの確かな回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。（関連論文 計 5 編）

- 1) 浅田陵平, 鈴木素之, 大谷義則, 志村直紀: 変位・荷重制御土中引抜き試験による帯鋼補強土壁の残存耐力の評価, 地盤と建設, Vol.32, No.1, pp.21-28, 2014.
- 2) Motoyuki Suzuki, Naoki Shimura, Takuto Fukumura, Osamu Yoneda and Yukio Tasaka : Seismic performance of reinforced soil wall with untreated and cement-treated soils as backfill using a 1-g shaking table, Soils and Foundations, Volume 55, Issue 3, pp.626-636, 2015.
- 3) 鈴木素之, 内川浩樹, 大谷義則, 志村直紀: 補強土壁における先行引抜き変位が補強材の引抜け挙動へ及ぼす影響, 地盤と建設, Vol. 34, No. 1, pp. 91-98, 2016.
- 4) 志村直紀, 鈴木素之, 内川浩樹: 帯鋼補強土壁における先行引抜きが荷重保持後に発生する引抜け変位へ及ぼす影響, 土木学会論文集 C (地圏工学), 第 76 巻, 第 2 号, pp.110-121, 2020.
- 5) Motoyuki Suzuki, Ryohei Asada, Yoshinori Otani, Naoki Shimura : Evaluation of post-earthquake loading capacity of steel reinforced retaining wall by displacement and/or loading controlled pullout test, Proceedings of The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 2, Issue 64 pp.2186-2191, 2015.