

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	宅地擁壁背面地盤の補強による影響評価と細径鋼管を用いた新工法の提案 (Evaluation of the influence of ground reinforcement on the back of residential retaining walls and proposal for a new method using small diameter steel pipes.)
氏 名 (Name)	小川 正宏

2016 年熊本地震をはじめとする近年の震度 6 強を超える大地震において、傾斜地の擁壁の倒壊と、それによる擁壁背面に位置する住宅の被害が顕在化している。被災宅地擁壁の構造種別では、空石積造擁壁や二段積み擁壁、増積み擁壁など、築造後に構造計算によらず変更が加えられた既存不適格擁壁において被害率が高くなっている。これらの擁壁は、擁壁自体が十分に強度を有しているとは言えず、地震時に擁壁が倒壊し、それに伴う地盤変状により住宅が損壊する被害が生じている。ここで、既存不適格擁壁とは、現行法に適合していない擁壁のことであり、安全性に対する検討が十分されているとは限らない。したがって、再び同程度以上の地震が起きた時には、他の地域においても同様の被害が発生することが危惧される。また、築年数が古い老朽化した擁壁でも同様の被害が発生することが危惧される。そのため、このような既存擁壁を補強し、宅地および住宅の安全を確保することが急務となっている。

さらに、擁壁背面埋戻し土は十分な締固めがなされていない場合が多く、埋戻し土にかかる部分に住宅を建設する場合は、地盤の支持力確保および住宅の不同沈下対策のため、地盤補強が施されることが多い。しかし、地盤補強による既存擁壁への変状事故も発生しており、既存擁壁背面で施工する場合は注意を要する。

以上のことから、本研究は、既存擁壁背面地盤の新たな補強方法を提案し、補強効果について明らかにすることを目的としている。まず、住宅の基礎および地盤についての現状をアンケート調査により把握した。次に、住宅の地盤補強として採用されている既存工法が、擁壁に及ぼす影響について確認した。そして、新たな既存擁壁背面地盤補強工法を提案し、その補強効果について静的載荷実験および振動台実験により確認した。

本論文の概要および研究成果について各章ごとに総括して以下に示す。

第 1 章では、本研究の背景と目的を述べ、地震による擁壁の被害事例や、擁壁近傍での柱状改良工事における変状事例について概説し、本研究の位置づけを明らかにした。最後に、本論文の構成ならびに各章の概要を述べた。

第 2 章は、小規模建築物基礎に携わる実務者を対象として実施したアンケートの結果を基に、小規模建築物基礎設計の現状について分析し、今後 10 年間を見据えた技術指針改訂の参考のために各課題について述べた。

1) 本アンケートの回答者は、地盤に関連した業務に携わる者が多かった。逆に住宅供給者からの回答が少なく、その理由の一つとして、基礎の設計についての多くは地盤関連の専門者に依存している可能性が挙げられる。

- 2) 地盤補強工法として、「柱状改良」の採用が最も多く、続いて「小口径鋼管」が多い。「表層改良」は採用実績があるものの、採用率は低い。
- 3) 既存擁壁に関しては、設計時の資料入手が困難な場合が多く、さらに既存擁壁の健全性を評価する方法が確立されていない。そのため、安息角を確保せざるを得ないケースが多くあるが、宅地の広さの事情から地盤補強等の工事の採用率が高くなることが判明した。

第 3 章では、実物大の擁壁を用いた柱状改良体の施工実験を行い、擁壁に作用する土圧、擁壁の変位等を計測し、擁壁の変状発生メカニズムを解明することを試みた。

- 1) ロッド引上げ時に攪拌翼が擁壁底版付近を通過する際に、擁壁底版かかと部に 100kN/m^2 程度の大きな土圧が擁壁の変状の原因と推定される。
- 2) 施工土圧、施工機荷重による変位量について2次元弾性FEM解析により擁壁の変位量を求めたところ、離間距離を 4m にすれば 1.5mm の変位まで抑えることができることがわかった。

第 4 章では、細径鋼管を擁壁背面に配置した 3 通りの補強仕様それぞれについて、擁壁背面地盤の補強効果を確認した結果をまとめた。

(1) 静的载荷実験

各補強材配置パターンにおける最大荷重時の水平変位コンター図から、補強なしの場合は、载荷板の背面から擁壁下端まで直線すべりと思われる破壊領域が現れる。一方、補強材がある場合には、破壊領域が補強材の位置で止まる様子が観察される。また、補強材と擁壁の間に I 型補強 < II 型補強 < A 型補強の順の大きさとなる非破壊領域の形成が観察され、補強材により周辺の土塊が一体化することで、直線的なすべりからより大きなすべり面を形成することが明らかとなった。

(2) 振動台実験

- (1) 本実験条件における(a)無補強の場合は、振幅 30mm の段階で擁壁が倒壊し、载荷板が大きく沈下する結果となった。一方、補強材を配置した場合は振幅 30mm では擁壁は倒壊せず、補強材による擁壁背面土への補強効果が発揮されたと考えられる。(d)A 型補強ではその効果が顕著であり、振幅 60mm でも擁壁の変位量および载荷板の沈下量が小さくなっている。
- (2) 加速度の測定結果から、(a)無補強は早い段階で擁壁および载荷板の傾斜が生じていたのに対し、(d)A 型補強の場合は補強材による効果により、振動台と地盤、擁壁および载荷板が一体となって振動していることが考えられる。

第 5 章 結論では、上述した第 1~4 章の本研究の特徴および成果について記し、さらに今後に残された課題等について述べ、本論文の結論とした。

(2032 字)

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	宅地擁壁背面地盤の補強による影響評価と細径鋼管を用いた新工法の提案 (Evaluation of the influence of ground reinforcement on the back of residential retaining walls and proposal for a new method using small diameter steel pipes.)
氏 名 (Name)	小川 正宏

In recent major earthquakes exceeding intensity 6 on the Japanese seismic scale, such as the 2016 Kumamoto earthquake, the collapse of retaining walls on sloping land and the resulting damage to houses located behind the retaining walls have become apparent. In terms of the structural types of retaining walls on affected housing sites, the damage rate is higher for existing non-conforming retaining walls that have been modified after construction without structural calculations, such as masonry retaining walls, double-storey retaining walls and additional-storey retaining walls. These retaining walls themselves are not sufficiently strong, and the retaining walls collapse during earthquakes, causing damage to houses due to the associated ground deformation. There is therefore an urgent need to reinforce such existing retaining walls to ensure the safety of residential areas and houses.

In view of the above, the aim of this study is to propose a new method of reinforcing the ground behind existing retaining walls and to clarify the effectiveness of the reinforcement. First, the current status of the foundations and ground of the houses was ascertained by means of a questionnaire survey. Next, the effects of the existing methods used to reinforce the ground of houses on the retaining walls were identified. A new method of reinforcing the ground behind existing retaining walls was then proposed, and the effectiveness of this method was confirmed by static loading tests and shaking table tests.

The outline and research results of this thesis are summarised in the following chapters.

Chapter 1 describes the background and objectives of the study, outlines examples of earthquake damage to retaining walls and deformations in columnar improvement works in the vicinity of retaining walls, and clarifies the position of the study. Finally, the structure of the paper and the chapters are outlined.

Chapter 2 analyses the current state of small-scale building foundation design based on the results of a questionnaire survey of practitioners involved in small-scale building foundations, and describes each issue for reference in the revision of the technical guidelines for the next ten years.

(1) Many respondents to the questionnaire were involved in geotechnical work. Conversely, there were few responses from housing providers, and one reason for this is that many of them may rely on geotechnical specialists for the design of foundations.

(2) 'Columnar improvement' was the most frequently adopted ground reinforcement method, followed by 'small-diameter steel pipes'. Although 'surface improvement' has been adopted, the adoption rate is low.

(3) For existing retaining walls, it is often difficult to obtain data at the time of design, and no method has been

(和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度)
(about 800 words)

established to assess the soundness of existing retaining walls.

In Chapter 3, a construction experiment of a columnar improvement using a full-scale retaining wall was carried out to measure the earth pressure acting on the retaining wall, displacement of the retaining wall, etc., and to elucidate the mechanism of the occurrence of deformation of the retaining wall.

1) When the agitator blades pass near the retaining wall base plate during rod raising, a large earth pressure of about 100 kN/m^2 at the heel of the retaining wall base plate is presumed to be the cause of the retaining wall deformation.

2) The displacement of the retaining wall due to the construction earth pressure and construction machine load was determined by 2D elastic FEM analysis, and it was found that the displacement could be reduced to 1.5 mm if the separation distance was 4 m.

Chapter 4 summarises the results of the reinforcement effect on the ground behind the retaining wall for each of the three reinforcement specifications with small diameter steel pipes placed behind the retaining wall.

(1) Static loading tests

The horizontal displacement contour maps at maximum load for each reinforcement placement pattern show that, without reinforcement, a failure zone appears from the back of the loading plate to the bottom of the retaining wall, which appears to be a straight line slip. On the other hand, with reinforcement, the failure zone stops at the position of the reinforcement. It was also observed that between the reinforcement and the retaining wall, a non-destructive zone was formed, which was in the order of size of Type I reinforcement, Type II reinforcement and Type Λ reinforcement, indicating that the reinforcement integrates the surrounding soil mass, forming a larger slip surface instead of linear slip.

(2) Shaking table experiments

Under the conditions of this experiment, (a) in the case of no reinforcement, the retaining wall collapsed and the loading plate settled significantly at an amplitude of 30 mm. On the other hand, when reinforcement was placed, the retaining wall did not collapse at an amplitude of 30 mm, indicating that the reinforcement had a reinforcing effect on the soil behind the retaining wall. (d) In the case of Λ -type reinforcement, the effect was remarkable: the displacement of the retaining wall and the settlement of the loading plate were smaller even at an amplitude of 60 mm.

Chapter 5: In the conclusion, the characteristics and results of the research described in Chapters 1-4 above are described, and the remaining issues for the future are also discussed.

(849 words)

(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	小 川 正 宏
審 査 委 員	主 査： 中 田 幸 男
	副 査： 麻 生 稔 彦
	副 査： 鈴 木 素 之
	副 査： 吉 本 憲 正
	副 査： 太 田 遥 子
論 文 題 目	宅地擁壁背面地盤の補強による影響評価と細径鋼管を用いた新工法の提案 (Evaluation of the influence of ground reinforcement on the back of residential retaining walls and proposal for a new method using small diameter steel pipes)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>2016 年の熊本地震のように近年の大地震において、傾斜地盤上の宅地に設置された擁壁が倒壊し背面の住宅被害が多発している。擁壁背面の埋戻し土は十分に締固められていない場合が多く、埋戻し地盤上に住宅を建設する場合には、地盤補強が必要となる。この施工において既存擁壁に変状が発生することが、課題の一つにあがっている。地震による宅地被害については、擁壁自体が十分な強度を有しておらず、擁壁の倒壊に伴い住宅が損壊する被害が生じている。今後の大地震においても、同様の被害が発生することが危惧されるため、不適格な既存擁壁を補強し、宅地および住宅の安全を確保することが急務となっている。</p> <p>本論文は、宅地の既存擁壁背面地盤に対する補強工法施工時の擁壁変状の解明と、新たな補強工法を提案する。まず、アンケート調査により小規模建築物基礎設計に対する地盤補強の現状や既存擁壁の課題について調査した。次に、実施件数が多く、変状事故の多い柱状改良体に対する実大試験が行われ、背面地盤を補強する際の既存擁壁への影響を確認した。さらに、細径鋼管を用いた既存擁壁背面地盤の新たな補強工法を、静的載荷および FEM 解析、振動台実験により補強メカニズムを確認した上で、提案した。</p> <p>以下、各章の概要を章別に示す。</p> <p>第 1 章では研究の背景および、目的と構成について述べた。まず、法律上の擁壁の設置条件を明示した。そのうえで、研究の背景に関わる地震における宅地擁壁の被害状況の概要を説明した。また、既存擁壁に対する柱状改良工法にともなう変状事例について調査結果を紹介した。これらをもとに、新たな既存擁壁背面地盤の補強工法の必要性について述べた。</p> <p>第 2 章では、小規模建築物基礎に携わる実務者を対象として実施したアンケート結果を説明した。このアンケートは、小規模建築物基礎設計に対する地盤補強の現状や既存擁壁の課題について分析した。この結果、新設住宅の地盤補強には柱状改良工法が多いこと、を示</p>	

(様式 9 号)

した。また、既存擁壁の設計時の設計図書や構造計算書等の資料が入手困難であることも示した。このことから、既存擁壁の健全性が評価できない可能性があることを示した。

第 3 章では、背面地盤を補強する際の既存擁壁への影響を把握するための実大実験について述べた。ここでは、実施件数が多く、変状事故の多い柱状改良体に対する実大実験を行った。実大実験では、擁壁に作用する土圧、擁壁の変位等が計測され、擁壁の変状が発生する施工段階を議論した。さらに、実大実験で得られたデータを基に、2 次元弾性 FEM 解析を用いて検討した。この解析結果に基づいて、擁壁前面天端からの離間距離による影響を議論した。

第 4 章では、細径鋼管を用いた既存擁壁背面地盤の補強工法を提案した。この工法の補強効果を明らかにするために静的模型実験、その FEM 解析さらに振動台模型実験を行った。これらの検討を通じて、擁壁背面に配置した 3 通りの補強材挿入パターンについて擁壁背面地盤の補強効果を確認した。3 通りの補強材挿入パターンのうち、2 本の補強材を±10 度傾斜挿入させて補強する△型補強が最も補強効果があること、このパターンはそれ以外と異なる変状傾向を示し、実際の補強に最適なパターンであることが明らかした。また、△型補強については、住宅側の補強材の挿入が最も寄与していることや、頭部連結、補強材の摩擦、補強材の長さなどがその次に補強に寄与していることも明らかにした。

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 61 名の参加があった。

公聴会における主な質問内容は、擁壁の実物大実験の変状に対して最も大きい要因は何か、新しい補強工法には、適用可能な宅地地盤の土質やその強度条件があるのではないかと、提案工法は擁壁が適格性によらないのか、細径鋼管の挿入による乱れを考慮すべきではないのか、△型の補強効果が補強材による土の拘束効果によるものか、それとも曲げ剛性によるものか、この設計の考え方は拘束効果を考慮するものになるのか、設計には補強によるすべりメカニズムの変化を考慮したものなのか、についてであった。いずれの質問に対しても発表者からの確な回答がなされた。

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 4 編）

- 1) 小川正宏, 藤井衛, 金哲縞, 柱状改良体施工時の側圧が既存擁壁に及ぼす影響, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.3, pp.417-426, 2014.
- 2) 小川正宏, 黒柳信之, 中田幸男, 兵動正幸, 細径鋼管挿入による擁壁背面土の補強効果に関する振動台実験, 第 63 回地盤工学シンポジウム, セッション 4-3.3, 2022.
- 3) 小川正宏, 酒匂教明, アンケートによる小規模建築物基礎設計の現状と判明した今後の課題, 日本建築学会技術報告集, Vol.29, No.72, pp.719-724, 2023.
- 4) M. Ogawa, M. Hyodo, Study on reinforcement of existing retaining walls with small diameter steel pipes, Smart Geotechnics for Smart Societies, Proceedings of the 17th ARC on SMGE, pp.676-679, 2023.