

既設土留め擁壁の耐震補強法の開発

構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
副主任研究員 中島進

1. はじめに

既設土留め擁壁は全国に25万箇所以上存在し、特に標準図に準拠して構築された古い形式の土留め擁壁では、過去の大規模地震で甚大な被害が生じている。本発表では、土留め擁壁の地震被害に関する分析の結果から、脆性的な破壊の恐れがあることが分かった石積み壁・もたれ壁について、振動台実験から得られた破壊メカニズムに関する知見を紹介し、得られた知見を活用して開発した耐震補強法について紹介する。

2. 土留め擁壁の地震時被害形態の分析

土留め擁壁には多様な構造形式が存在し、形式により土圧に対する抵抗メカニズムも異なっている。このうち、図1に示すもたれ壁、石積み壁は、背面地盤にもたれかかりながら、自重と壁面の剛性により安定を保つ構造形式であるが、過去の大規模地震で甚大な被害が報告されている¹⁾。さらに、過去に実施した4万6千箇所の土留め擁壁に関する実態調査の結果、石積み壁、もたれ壁は合わせて全体の80%以上を占め、膨大な数量が存在することが分かっている²⁾。このため、耐震補強においては、最も危険な破壊形態を抽出した上で、効率的な耐震補強が求められている。

そこで、1923年関東大震災から2011年東北地方太平洋沖地震までの大規模地震について、地震被害に関する文献調査を行い、被害形態を分析した。もたれ壁、石積み壁の被害形態の内訳を図2に示す。石積み壁では壁体の破壊が全体の62%を占めており、もたれ壁では壁体の破壊または転倒破壊が全体の82%を占めている。図3にもたれ壁の転倒破壊事例、石積み壁の壁面破壊の事例を示す。このような破壊は列車の走行安全性だけではなく、公衆の安全性にも影響を及ぼすため、第一に回避すべき破壊形態と位置付けられる。

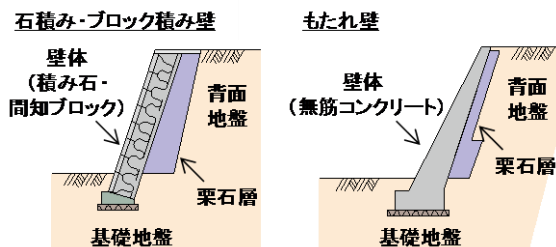


図1 もたれ壁・石積み壁の構造

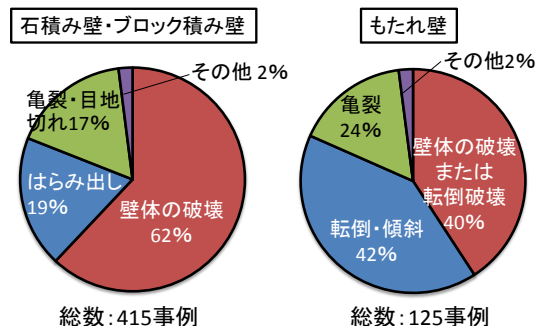


図2 被害事例の分析結果



図3 もたれ壁・石積み壁の破壊事例¹⁾

以下では、破壊メカニズムの確認および補強法開発を目的として実施した振動台実験について述べる。

3. 破壊メカニズムの確認

地震時被害形態の分析において抽出した危険な破壊形態について、その破壊メカニズムを確認することを目的として、石積み壁、もたれ壁の振動台実験を実施した^{3) 4)}。実験には鉄道総研所有の中型振動台を使用した。標準図に準拠した高さ 5m 程度の石積み壁、もたれ壁を対象として、石積み壁については高さ 721 mm (縮小率: 約 1/7) に、もたれ壁については高さ 530 mm (縮小率: 約 1/10) に縮小した。実験模型の概要とともに、最終加振 (5Hz10 波の正弦波, 400gal) 後の実験模型の状況を図 4, 図 5 に示す。加振は実物に対する模型の縮尺率を考慮して、5Hz10 波の正弦波を用いて実施し、段階的に 50~100gal ずつ最大加速度を増大させる形式で実施した。

石積み壁模型については、300gal で壁面に大きなはらみ出しが生じ、図示した 400gal 加振においてははらみ出した積み石の一部が抜け出した後、全体的な崩壊に至った。もたれ壁については、250gal 加振時に基礎のかかと部で浮き上がりが生じ、その後の加振で傾斜が急増し、400gal 加振後には転倒破壊に近い状態となったために実験を終了した。

計測した力や加速度、変位応答から石積み壁、もたれ壁の破壊メカニズムがそれぞれ図 6, 図 7 に示す通りであることを確認した。

石積み壁については、背面地盤からの地震時土圧と慣性力の作用により、積み石のはらみ出しに伴う水平変位が生じ、栗石に沈下が生じる (図 6 中、①から②)。はらみ出しが大きくなると、積み石が壁面から抜け出すことにより脱落し、背面の栗石が流出する (図 6 中、③、④)。栗石の流出により、背面地盤にもたれかかることで安定を保っていた積み石は急速に安定性を失い、壁体が全体的な崩壊に至る (図 6 中、⑤)。

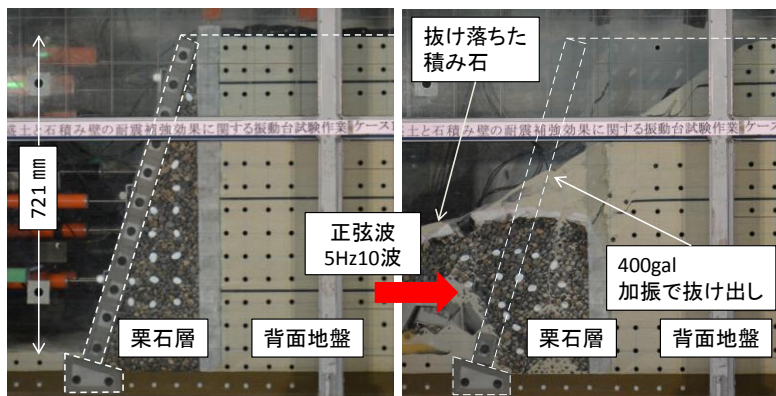


図 4 石積み壁の振動台実験
(左: 加振前、右: 400gal 加振終了後)

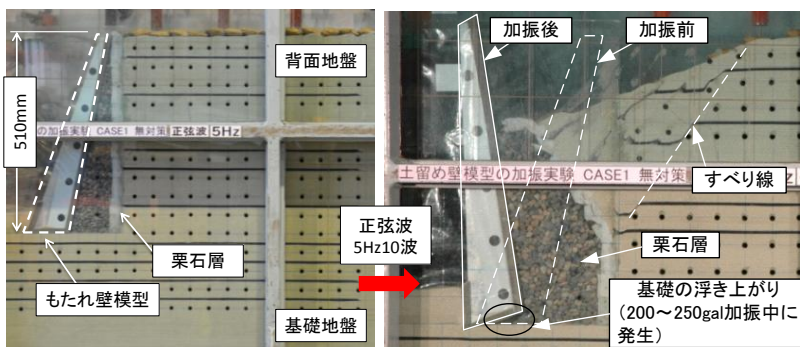


図 5 もたれ壁の振動台実験
(左: 加振前、右: 400gal 加振終了後)

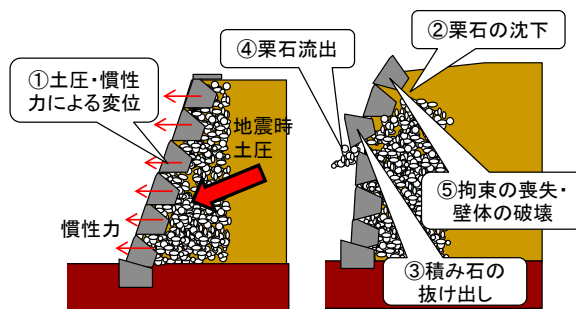


図 6 石積み壁の破壊メカニズム

もたれ壁の場合は、地震時土圧と慣性力の作用により壁体にわずかな変位が生じると、壁体天端背面の裏栗石が沈下する（図7中、①から②）。これにより、もたれ壁上部の変位が不可逆的に進行する結果となり、傾斜が徐々に増大する（図7中、③）。傾斜が進行すると、基礎の安定性が徐々に低下するとともに、重心が前方に移動するために、背面地盤にもたれかかりながら安定を保っていたもたれ壁の安定性がさらに低下する（図7中、④）。これを繰り返すことにより、安定性が不可逆的・加速度的に低下し、最終的には転倒破壊に至る（図7中、⑤）。

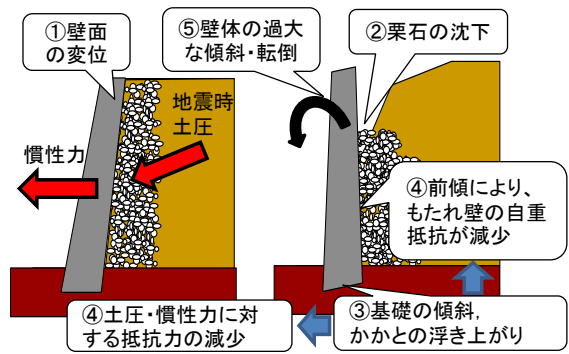


図7 もたれ壁の破壊メカニズム

以上の破壊メカニズムに関する分析から、石積み壁については、全体的な破壊の引き金となる積み石の抜け落ちを防止することが、もたれ壁については基礎の安定性低下と、もたれ壁の自重による抵抗の低下の原因となる壁体の傾斜を抑制することが効果的であることが示唆された。

4. 崩壊防止ネットと地山補強材による石積み壁の耐震補強法³⁾

石積み壁の破壊メカニズムを考慮して、崩壊防止ネットと地山補強材による石積み壁の耐震補強方法を提案した。図8に提案する補強方法の概念図を示す。提案する補強方法では、石積み壁の前面に積み石の抜け出しを防止することを目的としたネットを敷設し、必要に応じて地山補強材によって背面地盤の安定化を図る。ネットには積み石の抜け出しを防止する崩壊防止の効果に加えて、離散的に打設する地山補強材の抵抗力を石積み壁全体に伝達させるために個々の積み石を拘束する効果を期待している。

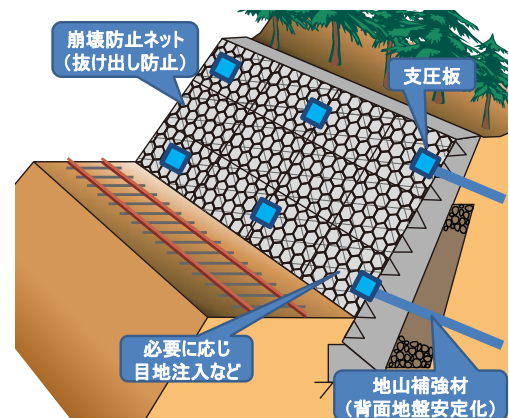


図8 崩壊防止ネットと地山補強材による耐震補強工法の概念図

従来の石積み壁の耐震補強方法では、積み石の抜け出しを防止するために、地山補強材を密に打設する方法や、壁面の前面にRC壁体を打設して一体化を図った上で、地山補強材を打設する方法などが採用されていたが、これらの工法と比較すると、背面地盤の安定性に応じて補強仕様を適切に選定できる事が特徴である。

補強効果を確認することを目的として、提案工法で補強した石積み壁の模型振動台実験を実施した。図9に加振後の残留変位と振動台加速度の関係および対策試験における800gal加振終了後の模型石積み壁の状況を示す。無対策では300galで壁面に大きなはらみ出しが生じ、400gal加振で崩壊に至ったのに対して、対策実験では800gal加振後も水平変位が

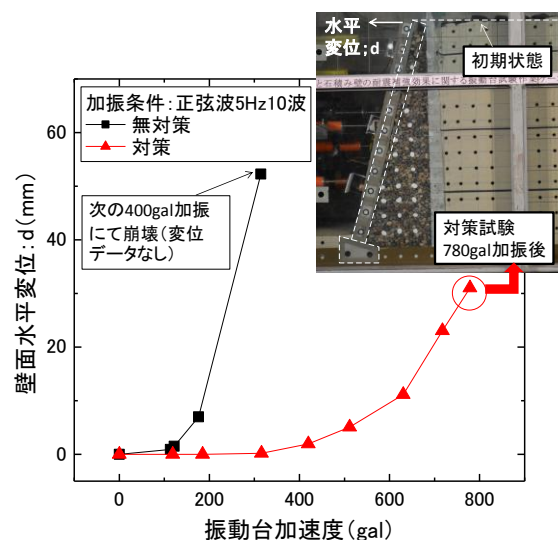


図9 水平変位と振動台加速度の関係

20mm 程度にとどまっており、L2 地震動相当の大規模地震に対しても高い耐震補強効果が期待できることが確認された。また、実務設計が可能なように「崩壊防止ネットと地山補強材による石積み壁の耐震設計マニュアル（案）」をとりまとめた。

5. 地山補強材によるもたれ壁の耐震補強⁴⁾

もたれ壁は石積み壁とは異なり、壁体に一定の剛性があるために、地山補強材で発揮される抵抗力を全体に伝達することができる。このため、転倒破壊を抑制するためには地山補強材を壁体の上部に打設し、抵抗モーメントを増大させる耐震補強法が有効である。地山補強材の配置を変えて実施した振動台実験の結果を図 10 に示す。無対策の試験では 400gal 加振終了時に 20° を超えていた傾斜角度が、壁体の上部に地山補強材を一段設置するのみで 1.2° 程度まで減少しており、上部に地山補強材を打設することで、効率的に転倒破壊を抑制できることが確認できた。また、上下 2 段に地山補強材を打設すると、さらに傾斜角が減少し、800gal 加振終了時でも傾斜角は 1.6° 程度にとどまっていた。以上より、もたれ壁の転倒破壊を回避するためには、上部に優先的に地山補強材を打設した上で、必要に応じて地山補強材を増量する方針が効率的であることが確認された。

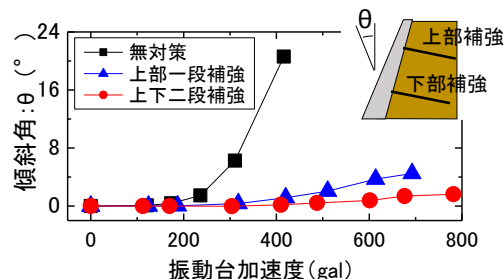


図 10 地山補強材によるもたれ壁の補強効果（傾斜角と振動台加速度の関係）

6. まとめ

既設土留め擁壁の耐震補強方法の開発に関わる鉄道総研の取り組みについて紹介した。本研究では、第一に地震時被害形態の分析を行い、石積み壁の壁体の破壊、もたれ壁の転倒破壊を回避すべき脆性的な破壊形態として抽出した。次に、破壊メカニズムの確認試験を行い、石積み壁については積み石の抜け出しを、もたれ壁については壁体の傾斜を抑制することで、脆性的な破壊を回避できる可能性があることを把握した。

以上の破壊メカニズムを踏まえて、石積み壁については崩壊防止ネットと地山補強材を併用することで、積み石の抜け出しを防止しながら背面地盤の安定化を図る耐震補強法を、もたれ壁については、壁体の上部に地山補強材を打設することで転倒破壊を回避する耐震補強法を提案した。

参考文献

- 1) 地盤工学会阪神大震災調査委員会：阪神・淡路大震災調査報告書（解説編），Vol.2，1996
- 2) 篠田昌弘，中島進，阿部慶太：鉄道もたれ壁の安定性に係わる健全度診断法の開発，土木学会論文集 C，Vol.68，No.2，pp.433-450，2012
- 3) 中島進，窪田勇輝，佐々木徹也，渡辺健治，藤原寅士良，池本宏文：崩壊防止ネットと地山補強材による石積み壁の耐震補強工法に関する実験的検討，鉄道工学シンポジウム論文集，第 18 号，pp.125-132，2014
- 4) 中島進，阿部慶太，江原季映，窪田勇輝，渡辺健治，篠田昌弘：既設鉄道土留め壁の耐震補強工法に関する振動台実験，第 57 回地盤工学シンポジウム，平成 24 年度論文集，pp.239-246，2012