

石積み擁壁の道路構造物への適用に対する課題と展望*

The subject and a view to an application to a road structure of a stone-blocks retaining wall*

池谷清次**・梁川俊晃***・西山哲****・関文夫*****

By Seiji IKEYA**・Toshiaki YANAGAWA***・Satoshi NISHIYAMA****・Fumio SEKI*****

1. はじめに

石積み擁壁は、現地で発生する転石等を有効に利用でき、景観面でも自然と調和し共生し得る優れた構造物である。しかし、力学的に不明な点が多く、特に空積み構造においては、耐震性の観点から、原則として道路構造物としての使用が認められていない。その一方で、度重なる地震を受けつつも、数百年にも渡り健全性を保持してきた石垣も数多くある。

本研究では、まず道路構造物としての石積み擁壁、及び同義的にまとめられるブロック積み擁壁に関する指針類の記載内容の変遷をまとめ、昨今における空石積みの適用の難しさを明らかにした。次に、既存研究、及び文献調査により、石積み研究の現状を把握し、石積み工法として伝統的に確立されている「穴太衆積み」をモデルとした、地震被災履歴等の実態調査、実物大モデル実験による耐力評価、及び理論解析により、石積み構造の力学的メカニズムを明らかにし、道路構造物としての適用評価を行った。

一連の研究を通じ、石積み工法の設計手法や仕様等の確立を目指し、石積み構造物が、柔軟に選択され得る環境を整えることを、第一の目的としている。

2. 石積み擁壁に関する指針類の変遷

石積み擁壁の道路構造物への適用に関する、指針

* キーワード：景観、土木史

** 正員、工修、大成建設株式会社土木本部土木設計部
(東京都新宿区西新宿 1-25-1 新宿センタービル
TEL03-5381-5423, FAX03-3345-1914, ikeyas@ce.taisei.co.jp)

*** 非会員、工業高等専門学校、日本道路公団関西支社
(滋賀県大津市一里山 3-40-25
TEL077-547-2429, FAX077-548-1351)

**** 正員、工博、京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻
(京都府京都市左京区吉田本町
TEL075-753-5129, FAX075-753-5129)

***** 正員、工学、大成建設株式会社土木本部土木設計部
(東京都新宿区西新宿 1-25-1 新宿センタービル
TEL03-5381-5423, FAX03-3345-1914)

類の記述に関する変遷を整理した。

「道路土工 - 擁壁・カルバート・仮設構造物工指針」(S62 .5)によると、空積みの石積み擁壁は、3m以下(裏込め土が良好な場合)に限定されており、積み石の控え長35cm、一個当たり重量30～55kgf程度、施工1m²当たり使用量7～12個程度で350kgf/m²以上、といった内容が記されている。約15年前の指針では、3m以下の空積みは認められていた事がわかる。

10年余の時を経る間に、兵庫県南部地震(H7.1)を経験し、指針類の記述も耐震性の観点から大きく変化した。分冊化され、より具体化された「道路土工 - 擁壁工指針」(H11.3)によると、ブロック積み(石積み)擁壁は一般的に、直高7m以下、積み石の控え長35cm、施工1m²当たり350kgf/m²以上で、胴込めコンクリートを設ける「練積み」と記されている。別に控え長35cmで個々のブロックを大型化したものや、控え長が35cm以上のものは、大型ブロック積み擁壁と分類し、直高15m程度まで可能なものもあり、ブロック積み(石積み)に準じた構造と考えてよいとするものの、設計に際しては「空積みによる構築を行ってはならない」と明記されている。事実上、空積みによる石積み擁壁の構築は行うことができないことになったと言える。

3. 実態調査

(1) 既存研究及び文献調査

「穴太衆積み」を始めとし、石積みに対するこれまでの研究では、1995年頃から土木史の研究において、城郭石垣を中心として、その安全性の評価や、積み方に対する文化的意義をまとめた論文が多かった。後に、安全性の評価を目的とした非破壊検査、評価手法にFEMを導入した研究等も行われている。これらは、既に築城された城郭の石垣を対象としたもので、

石積みの設計的根拠や、地震時の動的安全性等についての研究は、事例が殆どないのが実状であった。

(2)地震被災履歴調査

そこで、既存の「安太衆積み」がいかに耐力を有しているかについての知見を得るために、地震被災履歴調査を行った。本調査は、穴太衆積みの施工実績、及び地震の規模等が明らかな、昭和45年以降のものを対象に行った。施工実績は、東は福島県田島町、西は山口県下関市まで全国50箇所以上上っていたが、穴太衆の地元である滋賀県の33箇所を始めとして、そのほとんどが関西、中国、四国地方に分布していた。

一方、昭和45年以降発生したM6.0以上の地震は、全国で91回に上る。これらを地図上で重ね合わせた結果、施工位置と施工時期、震央位置と発生日時から、穴太衆積みの施工実績に対し大きな影響を及ぼしたと考えられる地震として、兵庫県南部地震(H7.1.17, M7.2)と、芸予地震(H13.3.24, M6.7)の2つを抽出した。これら2つの地震による被害の有無に関して、調査を行った結果、調査対象箇所(昭和45年以降の施工)の内、13地点で震度5以上の地震を受けたと推定されたが、被害報告は1件も無かった。対象箇所以外では、明石城で石垣が崩れ落ちる



図-1 兵庫県南部地震において震度5以上の地域の施工実績

等、大きな被害があったが、崩壊した箇所は築城以来約400年を経過した石垣で、石垣の上部2/3が盛土の場所であったことが、被災を機に行ったボーリング調査で判明した。図-1は、兵庫県南部地震に対する、兵庫県での穴太衆積みの施工実績位置と震度の関係を示したものである。

今回の調査対象となった施工実績は、古くからある石垣の補修工事が多かったが、補修を必要とした大きな要因は、長年に渡る経年変化の中で起こったいわゆる「はらみだし」の修復、及び積み石自体の風化による傷みがほとんどであった。「はらみだし」の原因としては、樹木の根の成長による押し出しや、集中豪雨等による裏込土の過剰な水分吸収と排水不良によるものが多いことが分かった。

3. 実物大モデル実験

(1)実験概要

本実験は、実物大の供試体に対し、載荷装置による載荷を行い、各載荷重での変位量の自動計測を行ったものである。詳細は、池谷らの論文¹⁾を参考とする。図-2は、本実験に用いた供試体、及び計測機器設置位置概要を示す断面図である。

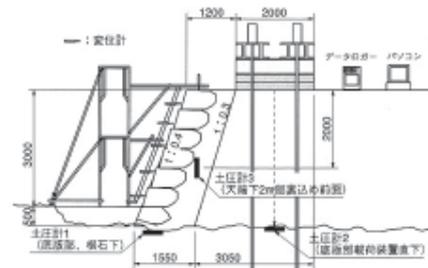


図-2 実物大モデル実験概要断面図

(2)実験結果

図-3は、石積み、ブロック積みの各供試体に対する、載荷重と変位量との関係を示したグラフである。同じ載荷重における石積みの変位量は、ブロック積みの約2.4倍の値を示している。

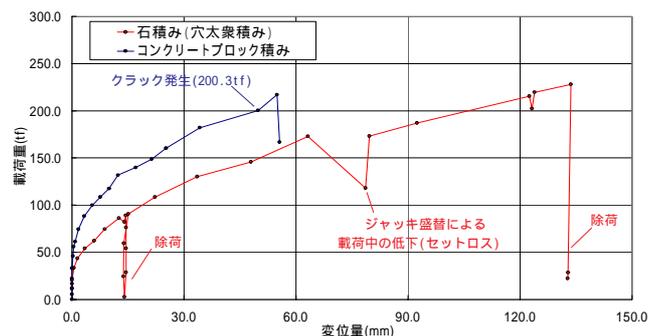


図-3 各供試体の載荷重と変位量の関係

シミュレーション結果の定量的な検証を行うため、実験で得た変位と、シミュレーション結果とを比較した。図-7は、その結果であり、実験による実測値を点線で、解析値を実線によって示している。

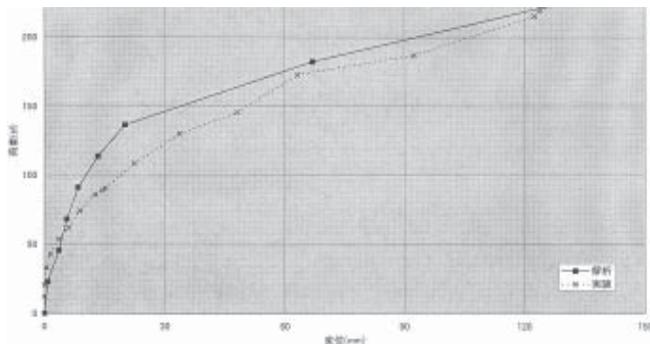


図-7 実測値と解析値の比較

これらより、解析結果と実測値がよく一致しており、擁壁挙動のシミュレーションが、定量的にも高精度で実際の構造物の挙動を再現していることが実証された。また、個々の石の挙動が正確にシミュレーションされることにより、「はらみだし」現象が生じる荷重の値を検知することや、構造物の安定性に影響を与える荷重の値を具体的に予測すること等が可能となる。これらより、構造物の設計に必要な各種の値を具体的に考察することを可能にする解析手法を、DDAによって実現できたと言える。

(4) 耐震評価シミュレーション

この解析手法を用い、レベル1、及びレベル2地震動の波形を入力し、動的応答解析を行った。入力した地震動の最大加速度は、レベル1で102gal、レベル2で812galであり、解析においては波形を2回積分することで、変位データとしての入力を行った。

図-8は、レベル2地震動を25秒間加えた後の状態を示したものであり、30cmの「はらみだし」を生じ、補修の必要を生じるが、落石や崩壊にまでは至らな

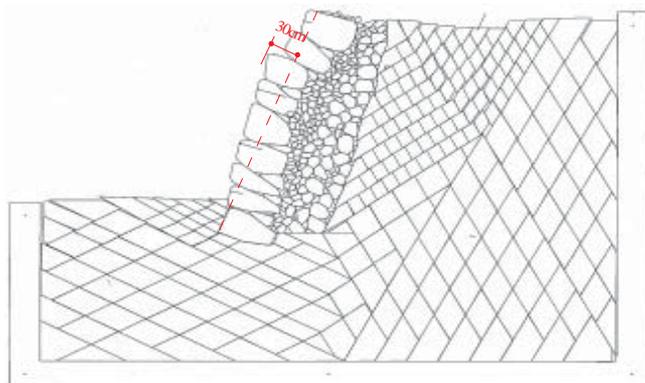


図-8 レベル2地震25秒間発生後の擁壁の状態

いことが分かる。一方、レベル1地震発生後は、最大残留変位約5cmを生じつつも原形をとどめほぼ安定していることが分かった。

個々のブロック挙動の定量的把握により、安定性を考察する必要のある石積み擁壁等の構造物に対し、本解析のような、対象を忠実に再現するモデル作成法と組み合わせたDDAによる解析は、非常に有効であることを示すことができた。また、DDAは地震波形の入力に対応した動的解析を可能にし、構造物の耐震評価にも適した手法であると考えられる。

5. まとめ

一連の研究を通じて、石積みの耐力性能の高さを改めて確認出来たと共に、伝統技術に工学的解釈を与えることが出来たと考える。そして、現段階では設計指針が示されていない特殊条件下でも、空石積みの安定性を検討でき、設計に活かすことを可能とし、また、経年劣化及び地震等の外力による「はらみだし」の見られる既存石垣に対しても、その段階で有する石垣の耐力評価や、修復時期、修復方法の検討に役立てられると考える。

石積みが、工学的視点により安全性ばかりを追求しただけの「空積み風」の練積み擁壁となることなく、数百年に及ぶ伝統文化技術の真実性が守られながら、次世代に継承されることを願う。また、石積み工法の設計手法及び仕様の確立を目指し、地域性、環境、景観に優れた地球に優しい構造物として、石積みが選択の対象となる環境が整うことを切に願うものである。

参考文献

- 1) 池谷、梁川、関、内田、栗田：石積み擁壁の道路構造物への適用に関する研究(2)～石積み(安太衆積み)の耐力評価実験について～、土木学会第58回年次学術講演会講演概要集、-322、pp.643-644、2003
- 2) 亀村、大津、関、梁川、西山：石積み擁壁の道路構造物への適用に関する研究(3)～不連続変形法(DDA)による耐震評価とその適用性について～、土木学会第58回年次学術講演会講演概要集、-323、pp.645-646、2003