

論文の内容の要旨

論文題目

版築による土塀の材料特性と地震時挙動

(Material Properties and Seismic Performance of Rammed Earth Walls)

氏名

荒木 裕行

版築技法は礫、砂、粘土等の土質材料を層状に突固めることによって基壇や壁材を構築する古典的な建築技法のひとつであり、紀元前から土塁、山城、住居の壁材等の築造に用いられてきた。我が国においては、版築技法は基壇や土塁、寺社等を取り囲む築地塀を作製する際に使用され、歴史的価値の高い版築構造物も数多く現存している。伝統的に継承されてきた版築技術における経験や感覚に基づく情報に対して、最新知見に基づく工学的な解釈を加えることは、歴史的にも貴重な版築構造物を適切に維持・管理、補修・改修を行う上で重要である。

また、1995年兵庫県南部地震では、重要文化財に指定されている西宮神社の大練塀が大きな被害を受けた。2008年には中央防災会議から文化財構造物の将来の被災可能性が発表されており、木造建築物の耐震性評価が急務課題として進められている。しかし、主として締固め土からなる版築構造物の地震時挙動は未解明であり、耐震性に関する検討も進められていない。そのため、地盤工学の知見を活かすことで、版築構造の耐震性評価と必要な対策の実施を推し進めていくことが必要である。

一方で、近年では自然材料への関心が高まりから土質材料を建材として個人住宅や公共施設に使用する動きが世界各地で見られる。このため、版築壁が室温や湿度などの住環境に及ぼす影響に関しては研究が進められているものの、地震時挙動や不飽和土としての強度変形特性などについてはほとんど検討されていない。

以上の背景を踏まえ、本研究では①石灰等の改良剤を添加していない伝統的版築材料のせん断・引張強度の把握、②気中で養生された不飽和石灰改良土のせん断・引張強度の把握、③数値解析による版築塀の地震時挙動の評価手法の検討と補強材を用いた耐震化対策の評価、④既存版築塀の地震時挙動の評価、を目的とした。

本研究で対象としたのは、伝統的版築材料 (Case H) と石灰改良土 (Case M) の2種類の材料である。Case H はわが国の伝統的版築塀の改修工事で使用された材料であり、含水比調整に際して蒸留水を用いたケース (Case H-1) と、伝統的版築技法でしばしば用いられる

にがり水に相当する 3%の塩化マグネシウム水溶液を用いたケース (Case H-2) を準備した。また、Case M は千葉県で採取された細粒分質砂と生石灰を用い、その混合率 (生石灰質量 / 土材料質量) は当該細粒分質砂に関する既往研究から得られた最適値である 11.4%とした。供試体は最適含水比に調整した材料を修正プロクター相当のエネルギーを用いて突き固めることで作製した。

版築材料のせん断強度、引張強度、初期剛性を明らかにするため、Case H-1、Case H-2 および Case M の室内気中養生供試体を対象として、一軸圧縮試験、一軸引張試験、割裂引張試験を実施した。

Case H-1 および Case H-2 の一軸圧縮強度は含水比の低下に伴って増加し、含水比 10%程度で 500kPa、含水比 1%程度で 4500kPa 程度となることが確認された。Case M の一軸圧縮強度は養生日数の増加に伴って増加し、養生日数 84 日以降では 4000kPa 程度ではほぼ一定となった。各材料の初期剛性についても、一軸圧縮強度と同様の増加傾向を示した。

Case H-1、Case H-2 に関しては、一軸・割裂引張強度においても含水比の低下に伴う強度増加が確認された。同じ含水比で比較すると、一軸引張強度は一軸圧縮強度の約 5.0~10.0%であった。一方、Case M については養生日数 28 日で比較すると、圧縮強度の 15~21%であった。いずれの供試体も供試体作製時に形成された突固め層境で引張破壊が生じており、層境が弱部となっていることが確認された。

不飽和条件下での版築材料の強度特性には含水比の低下に伴うサクシジョンの増加が顕著に作用していると考えられる。そこで、版築材料の水分特性曲線を評価するため、蒸気圧法を用いて保水性試験を実施した。Case H-1 と Case H-2 の水分特性曲線を比較すると、塩化マグネシウムの添加による保水性の向上が確認された。Case M については、Case H-1、H-2 よりもヒステリシスが顕著であり、一度排水されると吸水し難い性質があることが明らかとなった。また、相対湿度 11~98%rh の間で乾湿サイクルを 3 回与えた場合、いずれの材料においても 1~3 サイクル目の吸水曲線はほぼ一致し、乾湿履歴の回数は吸水過程の水分特性に影響しないことが明らかとなった。

強度とサクシジョンの関係を評価するため、蒸気圧法でサクシジョンを制御した供試体を作製し、一軸圧縮試験を実施した。土中水が各湿度条件と平衡状態となったとみられる養生日数 140 日以上の供試体の試験結果で比較すると、相対湿度 75%rh 以下 (サクシジョン 38.3MPa 以上) で管理した供試体の一軸圧縮強度は Case H-1、Case H-2 とともにほぼ同じであったが、湿度 93.1%rh 以上 (サクシジョン 9.53MPa 以下) で管理した供試体の一軸圧縮強度は Case H-2 の方が小さかった。また、養生中に湿度条件を変えることで排水・吸水履歴を与えた Case H-1・H-2 の供試体は、同じサクシジョン状態で比較すると排水過程だけを与えた供試体よりも含水比は低いものの強度はほぼ同じであり、強度特性は相対湿度によって定まるサクシジョンに依存していることが明らかとなった。

Case M についても蒸気圧法を用いてサクシジョンを制御した供試体を作製したが、含水比

の変化は養生日数 140 日時点においても明確に収束しなかった。養生日数 140 日における含水比は、前述した室内気中養生を行った供試体よりも高く、一軸圧縮強度も最大で約 2000kPa 大きかった。Case M はサクシオンよりもセメンテーションの発現の影響を顕著に受け、高含水比が長期にわたって保持されると強度の増加も継続するものと考えられる。

室内試験の結果を基に、版築材料のせん断・引張破壊基準を設定した。Case H-1・H-2 については、マトリックサクシオンとせん断強度の関係を非線形関数で、マトリックサクシオンと引張強度の関係を線形関係で定式化した。また、排水過程の水分特性曲線を用いてサクシオンの影響を補正した排気三軸圧縮試験結果を用い、内部摩擦角を Case H-1 が 49.4°、Case H-2 が 52.7°と評価して、せん断破壊基準に使用した。

一方、Case M については、セメンテーションの発現の影響が顕著であったため、室内気中養生供試体の一軸圧縮強度と養生日数の関係を基に、養生日数を変数としてせん断・引張強度式を定めた。なお、内部摩擦角は一定と仮定し、養生日数 28 日で評価した 45.3°とした。

Case H-2 および Case M を用いて作製された版築塀試験体の既往振動台実験を再現するため、有限要素解析を実施した。Case H-2 についてはサクシオン、Case M については養生日数を用いて、前述したせん断・引張強度式で求めた材料定数を入力した。また、層境要素を設けることで、層境の強度を変更可能とした。

Case H-2 および Case M を用いた試験体が破壊した加振ケースを再現したところ、層境要素の引張強度、粘着力、弾性係数、破壊エネルギーをその他の要素の 0.2 倍（強度低減係数 $\alpha = 0.2$ ）程度とすると、振動台実験を概ね良好に再現できた。

α を 0.2 とし、Case M を用いて竹筋およびジオグリッドで補強した試験体の振動台実験の再現を行った。竹筋で補強した試験体では竹筋を導入した箇所付近に引張応力が選択的に生じ、ジオグリッドで補強した試験体ではジオグリッドよりも内側の版築要素に引張応力が生じた。補強材周辺の層境で部分的な破壊は生じたものの、補強材を用いることでその破壊の進行が抑制されていることが確認された。

次に、実在する版築塀を参考に数値モデルを作製し、有限要素解析を用いて実大版築塀の地震時挙動の評価を行った。版築材料は Case H-2 とし、材料定数は外気の湿度変化を考慮して定め、 α は 0.2 とした。外気の相対湿度が 15%rh まで低下し、これと版築塀の土材料内の水分が平衡状態となっていると想定した解析ケースでは、加速度レベル 207.3gal の L1 地震動 (BCJ-L1 波) を入力しても破壊は見られなかったが、加速度レベル 355.7gal の L2 地震動 (BCJ-L2 波) を入力すると約 340gal の入力で版築塀下部において破壊が生じた。また、外気の相対湿度が 78%rh と高い状態を想定した解析ケースでは、BCJ-L1 波を入力したところ約 200gal の入力加速度で破壊が発生した。つまり、外気の湿度が 15%rh から 75%rh に上昇することで、破壊が生じる加速度レベルは約 140gal 低下することが明らかとなった。

本研究で明らかとなった知見の中でも、伝統的版築材料の強度特性は湿度によって生じるサクシオンに依存して変化する点、塩化マグネシウムの添加は強度特性の向上には寄与しない点、不飽和石灰改良土の強度特性はセメンテーションの発現に依存する点に関しては、版築構造の強度を検討する上で重要な工学的知見である。また、層境の強度を低減することで版築塀の地震時挙動を評価可能であった点に関しては、既存版築塀の耐震性評価を行う上で有用な知見である。