

相対湿度の変化に伴う版築塀の耐震性の変化

東京大学大学院工学系研究科 学生会員 ○荒木 裕行
 東京大学生産技術研究所 正会員 古関 潤一
 芝浦工業大学 正会員 並河 努
 複合技術研究所 正会員 佐藤 剛司

1. はじめに

土質材料を突固めることで積層構造をなす土構造物を築造する版築技法は、極めて古典的な建築技法のひとつである。我が国では主に寺社等における築地塀（版築塀）に用いられ、重要構造物に指定された歴史的価値の高い版築塀も数多い。近年では重要文化財構造物の地震被災想定が示され¹⁾、木造建築物を中心に耐震性評価が進められているが、版築塀は主として土質材料からなるという特殊性を有するため、十分な耐震性評価が進められていない。

伝統的な版築塀には石灰等の改良剤が使用されていないものがあり、このような版築塀は乾燥側の不飽和土で構成された締固め土であるといえる。本稿では、このような不飽和土からなる版築塀を想定し、その地震時変形挙動について有限要素解析を用いて検討を行った。

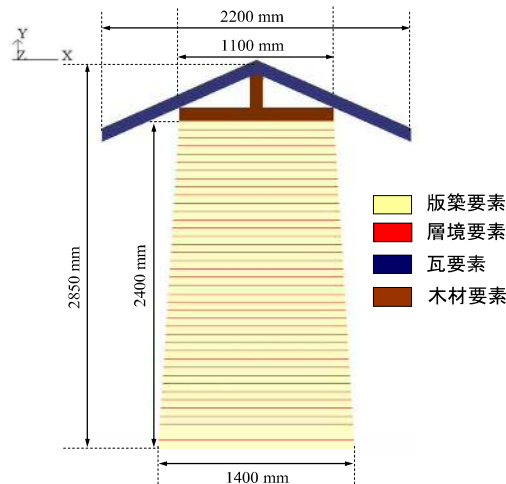


図-1 解析メッシュ

表-1 材料定数（屋根部分）

	瓦要素	木材要素
E [MPa]	10000	10000
ρ [g/cm ³]	2.80	0.60
ポアソン比	0.33	0.33

2. 解析メッシュおよび材料定数の設定

我が国の伝統的版築塀を参考に、2次元の解析メッシュを作製した。

屋根部分を構成する瓦要素は本瓦葺、木材要素はヒノキ材を想定し、弾性体としてモデル化を行った（表-1）。

版築要素は、伝統的版築塀で用いられている土質材料の室内土質試験結果に基づき、弾塑性材²⁾でモデル化した。ある相対湿度環境下で供試体の水分移動が平衡状態となっている場合、一軸圧縮強度、一軸・割裂引張強度、初期剛性はその相対湿度に起因して生じるマトリックスサクシオン ψ_M が支配的に影響し、 ψ_M が2.95~294MPaの領域においては ψ_M の増加に伴って強度が増加した^{3),4)}。この結果

表-2 材料定数（版築部分）

に基づいて、粘着力 c_{net} [kPa]、初期剛性 E [MPa]、一軸引張強度 T_{fd} [kPa]を次式の通り設定した。

$$c_{net} = 118.62 + 1.095(\psi_M)^{0.5090} \quad (1)$$

$$E = 67.89(\psi_M)^{0.3002} \quad (2)$$

$$T_{fd} = 89.2 + 9.292 \times 10^{-4} \cdot \psi_M \quad (3)$$

なお、 ψ_M [kPa]は式(4)により定まるトータルサクシオン ψ_T ⁵⁾ [kPa]から、当該土質材料の土中水の電気伝導度から推定される浸透サクシオン⁵⁾の平均値 47 kPa を差し引いたものである。

$$\psi_T = -\rho_w \frac{RT}{M} \ln \left(\frac{p}{p_0} \cdot \frac{1}{100} \right) \quad (4)$$

ここで、 R は気体定数[J/(K・mol)]、 ρ_w は水の密度[t/m³]、 T は絶対温度[K]、 M は水の分子量 [kg/mol]、 p/p_0 は相対湿度[%rh]である。参考とした版築塀が存在する地域での

要素種別	Case HS (15 %rh)		Case LS (78 %rh)	
	版築	層境	版築	層境
ψ_M [MPa]	252		33.0	
c_{net} [kPa]	733	147	337	67.4
ϕ [degrees]	52.7	52.7	52.7	52.7
E [MPa]	2840	568	1540	308
T_{fd} [kPa]	323	64.6	120	24.0
ρ [g/cm ³]	2.000	2.000	2.000	2.000
ポアソン比	0.33	0.33	0.33	0.33
硬化パラメータ ²⁾ a	1.05	1.05	1.05	1.05
硬化パラメータ ²⁾ e_v	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
破壊エネルギー ²⁾ G_r [N/m]	5.65	1.13	2.10	1.26
軟化パラメータ e_r	0.4	0.4	0.4	0.4
ダイレイタンシー係数 ²⁾ D_c	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
局所領域の幅 ²⁾ t_{so} [mm]	0.6	0.6	0.6	0.6
特性長さ ²⁾ l_c [mm]	24.00	2.00	24.00	2.00
第1次、第2次固有振動数 [Hz]	$f_1:32.29, f_2:66.21$		$f_1:23.45, f_2:61.99$	

キーワード 版築塀 地震時挙動 高サクシオン 相対湿度

連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 基礎地盤工学研究室 TEL 03-5452-6421

過去約 50 年の気象記録によると、相対湿度が最も高いのは 9 月で月平均湿度は平均 78 %rh、年最小湿度は平均 15 %rh であった。本研究では、78 %rh および 15 %rh に応じた材料定数を Case HS および Case LS として設定した。

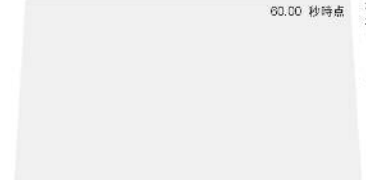

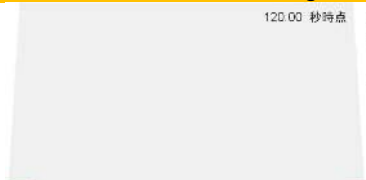
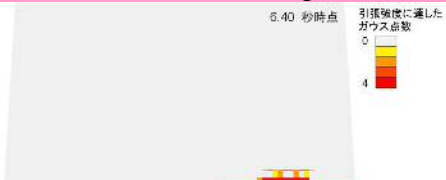
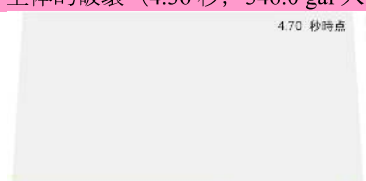

また、版築部分には突固め時に生じた層境を表現するために底部より 60 mm 毎に厚さ 2 mm の層境要素を挿入した。版築塼の 2 分の 1 スケール模型の振動台実験⁶⁾およびその数値解析結果より、地震時には層境から破壊が進行し、層境部分の強度を室内試験結果の 20 %程度とすると良好に解析可能であることが明らかとなっている⁴⁾。本解析でもこれにならない、層境要素の ψ_M , c_{net} , ϕ , E , T_{fd} , G_f は版築要素の各値に 0.2 を乗じた値を設定した。

3. 解析結果と考察

表-3 解析結果

入力波は日本建築センター模擬波 BCJ-L1, BCJ-L-2 波と、1995 年兵庫県南部地震 JMA-kobe 波 NS 成分を用いた。自重解析の後に、解析メッシュ底部を xy 方向固定として x 方向に地震波を入力し、地震応答解析を実施した。

解析結果の概要を表-3 に示す。版築塼が地震波を受けた場合、版築塼下部では引張応力が発生し、引張破壊が卓越した。各地震

入力波名 最大加速度 継続時間	Case HS (想定相対湿度：15 %rh)	Case LS (想定相対湿度：78 %rh)
BCJ-L1 207.33 gal 60 sec	破壊無し 	部分的破壊 (15.86 秒, 197.8gal 入力時～) 
BCJ-L2 355.66 gal 120 sec	部分的破壊 (6.18 秒, 339.6 gal 入力時～) 	全体的破壊 (5.34 秒, 201.5 gal 入力時～) 
JMA-kobe 820.57 gal 40 sec	全体的破壊 (4.36 秒, 346.0 gal 入力時～) 	全体的破壊 (4.27 秒, 208.7 gal 入力時～) 

波の最終時刻において損傷がなかったケースを破壊無し。部分的に引張破壊が生じたが崩壊には至らなかったケースを部分的破壊、破壊要素数が過多となり各地震波の最終時刻以前に計算が停止したケースを全体的破壊とした。破壊したケースには、解析メッシュ下端より 60 mm に位置する層境要素の端部で引張破壊が生じた時刻とその際の入力加速度を示した。また、部分的破壊ケースでは入力波の最終時刻、全体的破壊ケースでは計算が停止する時刻直前において、各要素内で引張強度に達しているガウス点数の分布図、すなわち引張破壊領域図を併せて示した。

破壊は層境要素を中心に版築塼側面から進行しており、全体的破壊となったケースでは破壊要素が水平方向に連続していることが分かる。また、入力波の違いによらず、Case HS では入力加速度が約 340 gal、Case LS では入力加速度が約 200 gal を超えたあたりで引張破壊が開始した。つまり、引張破壊の発生の有無は加速度の絶対値が支配的であり、相対湿度が 78 %rh から 15 %rh に低下すると破壊が開始する入力加速度は 140 gal 増加した。このため、特に L2 地震動においては相対湿度環境の違いが破壊の程度、崩壊の有無を左右する可能性がある。

4. まとめ

版築塼の地震時挙動を有限要素解析を用いて検討した。相対湿度が 15 %rh である場合は L2 地震動、相対湿度が 78 %rh である場合は L1 地震動で層境部分から部分的な破壊が生じた。相対湿度の変化に伴って破壊が生じる入力加速度は 140 gal 程度変化するため、相対湿度環境の違いが破壊の程度、崩壊の有無を左右する可能性がある。

参考文献：1) 中央防災会議：中部圏・近畿圏の内陸地震に係わる被害想定結果について～文化遺産の被災可能性～，2008。 2) Namikawa T. and Mihira S.: *Int. J. Nume. Anal. Meth. Geomech.*, 31, pp.71-107, 2007. 3) 荒木裕行・古関潤一・西村友良・佐藤剛司：版築材料の強度に及ぼす高サクシヨンの影響，地盤工学会第 47 回地盤工学研究発表会，投稿中。4) 荒木裕行：版築による土塼の材料特性と地震時挙動，東京大学博士論文，2012。 5) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp.162-176，2009。 6) 高辻暁子，腰原幹雄：版築塼における面外方向の耐震性能と補強方法に関する研究，生産研究，62(4)，pp. 163-167，2010。