

2. 薄肉版築壁吊上げ実験の二次元 FEM 解析

Two-Dimensional FEM Analysis of Thin Rammed-Earth Wall Lifting Experiment

老藤 慎也*1 森 浩二*1

要 旨

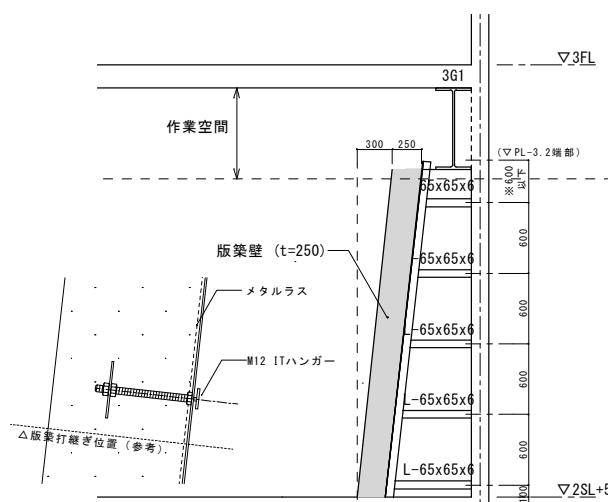
前報¹⁾では、薄肉版築壁内にアンカーに埋め込んだ試験体について吊上げ実験を行い、1.0G 相当の荷重に対して定着部が破壊しないことを確認した。試験体重量の 1/2 の積載荷重が加わった場合についても同様に実験を行い、損傷がないことを確認したが、1.5G の加速度が作用する場合との関係は明らかではない。そこで本報では、吊上げ実験について試験体重量の 1/2 の積載荷重が載荷された場合と、1.5G の加速度が加わった場合を含む種々のケースについて FEM 解析を行い、試験体内部の応力状態について検討を行った。解析の結果、吊上げ時の最大引張応力は版築の曲げ引張強度に比べて十分小さく 1/10 以下であること、鉛直方向の引張応力は定着板の端部に集中し、応力分布の特徴には大きな違いはないことを確認した。

キーワード：版築／アンカー／定着板／積載荷重／加速度／応力分布

1. はじめに

版築は土を突き固めて壁などを構築する伝統工法である。屋内の仕上げ材として薄肉版築壁を設置する場合、版築壁単体では地震時に自立しないため、図-1のような転倒防止対策が必要となる。前報¹⁾では、アンカーを版築壁内に定着した構造について吊上げ実験を行い、地震による慣性力に対して版築壁のアンカー定着部が破壊しないことを確認した。

当該実験では、1.0Gの加速度が作用した状態に対しての検証に加え、余裕度について検討するために錘を積載した条件についても検討を行ったが、加速度に倍率を与えた状態と、積載荷重とでは等価な条件とはならない。そのため、FEM解析によって、両者の応力状態などについての比較検討を行った。本報ではその結果について述べる。



図一 1 薄肉版築壁の転倒防止対策

2. 薄肉版築壁吊上げ実験

ここでは前報¹⁾で報告した薄肉版築試験体の吊上げ実験の概要について述べる。

試験体は版築壁のアンカー周辺部を対象とした実大要素試験体で、形状は600mm×600mm×250mm、アンカーボルトを取り付けた厚さ3.2mmの定着板を埋め込み深さ150mmの位置に設置している。試験体は写真-1に示す向きに土を積層して製作し、実験時はアンカーボルトが上部となるように試験体を横転させ、吊上げによる実験を行った。錘を積載した場合の載荷状況を写真-2に示す。

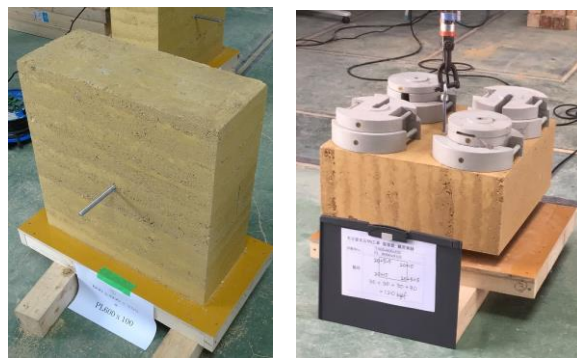
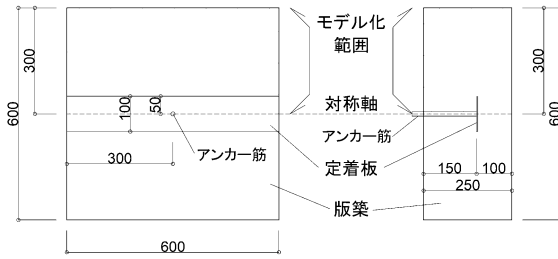
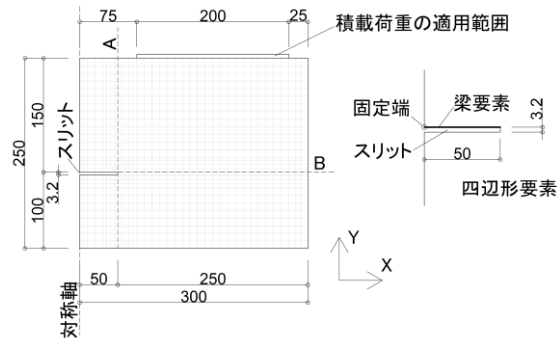


写真-1 試験体 (No. 3) 写真-2 載荷状況

*¹技術研究所建築構造研究グループ



図－２ 解析対象試験体の形状 (No. 3)



図－３ FEM モデル概要

実験は錘がなく慣性力 1.0G 相当の場合と、試験体重量の 0.2 倍、0.5 倍の錘を積載した場合について行い、アンカー周辺のひび割れなどが生じないことを確認した。

3. FEM 解析の概要

3.1 解析方針

アンカーで吊上げた薄肉版築壁試験体を鉛直・水平方向の二次元でモデル化した。奥行方向は拘束がないため、二次元弾性の平面応力問題 (z 方向の応力が 0) として解析を行った。版築の非線形特性については不明な点が多いが、吊上げ実験では過大な変形やひび割れなどの発生が確認されていないことから、試験体に作用した荷重は小さく、弾性解析によっても吊上げ時の応力分布などの特徴は十分に確認できるとし、線形弾性解析による検討を行うこととした。計算には MSC Marc 2021 を用いた。

3.2 材料モデル

材料モデルは版築、定着板のいずれも線形弾性体とした。試験体に使用した版築材料の特性は圧縮強度と密度のみ判明しているため、ヤング係数は、既往の研究²⁾から得られる圧縮強度とヤング係数の関係より算出した $2.95 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ とし、ポアソン比は、地盤などで用いられる値 0.3 とした。定着板材料の特性値は、鋼材の一般的な値を用いた。解析に用いた材料の諸元を表－１に示す。

表－１ 材料諸元

	版築	定着板
密度 $[\text{g/cm}^3]$	2.00	7.85
ヤング係数 $[\text{N/mm}^2]$	2.95×10^3	2.05×10^5
ポアソン比	0.3	0.3

表－２ 解析ケース

	荷重条件 自重＋積載	右端の 境界条件
1	1.0G	自由
2	1.0G＋0.5G	
3	1.5G	
4	1.0G	X 方向 変位拘束
5	1.0G＋0.5G	
6	1.5G	

3.3 試験体の FEM モデル

前述したように、試験体はアンカーで吊上げた状態について鉛直・水平方向の二次元でモデル化を行った。モデル化の対象は、定着板の長さが試験体全長と一致する試験体 No. 3 とした。

試験体 No. 3 の形状を図－２に示す。試験体はアンカー筋を含む平面を対称面として、右側の断面図のハッチングで示した部分についてモデル化を行った。図の上下は試験体製作時の上下関係を表し、試験時は断面図のアンカー筋側が上方向である。

FEM モデルの概要を図－３に示す。FEM モデルは水平および鉛直方向をそれぞれ座標軸の X 、 Y とした二次元モデルとし、図左側のアンカー筋位置の軸を対称軸とした。版築部分は四辺形要素、定着板は梁要素とし、いずれも紙面奥行方向の厚さは試験体全長 (600mm) とした。アンカー筋はモデル化せず、定着板との接合点の変位を拘束することによって表現した。

吊上げ時に、定着板下面と版築は変形によって剥離が生じ、引張方向の応力伝達は生じないと考えられるため、定着板の下部には定着板厚に相当する 3.2mm 幅のスリットを設けた (図－３右)。

3.4 荷重条件・境界条件

荷重条件は、吊上げ実験の条件に対応する「自重 1.0G」「自重 1.0G＋積載 0.5G」の 2 通りに、慣性力 1.5G の場合を想定した「自重 1.5G」を加えた計 3 通りとした。自重は試験体の質量に重力加速度を乗じた物体力である。基準となる重力加速度は 9.8m/s^2 とした。「積載 0.5G」は

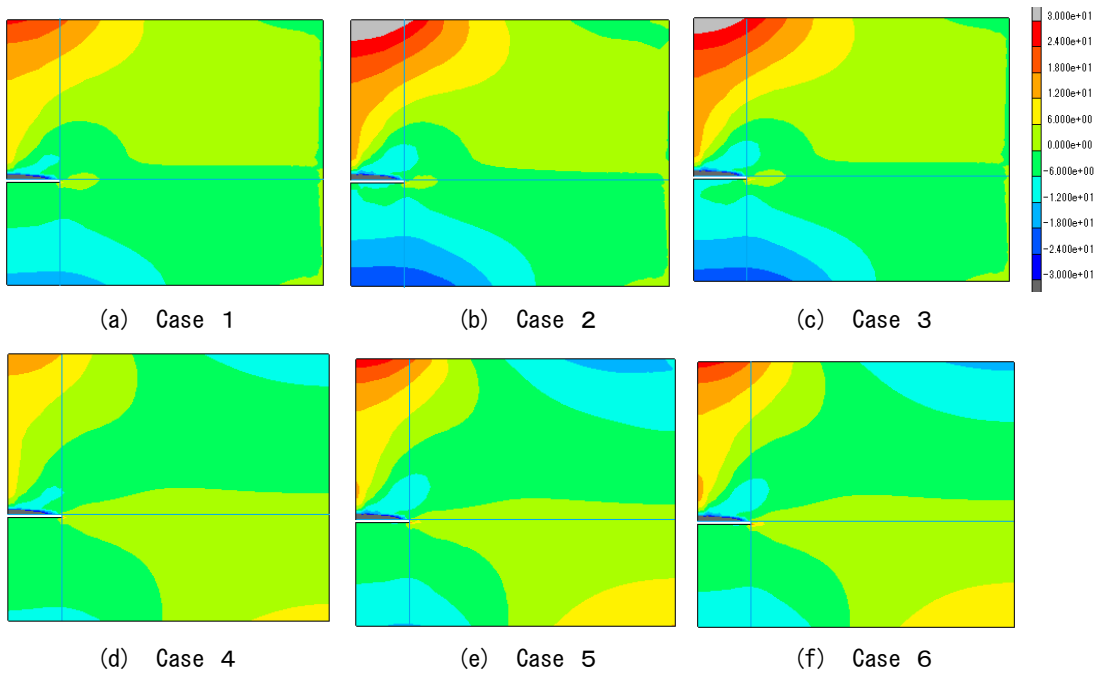


図-4 応力コンター図 (X 方向応力)

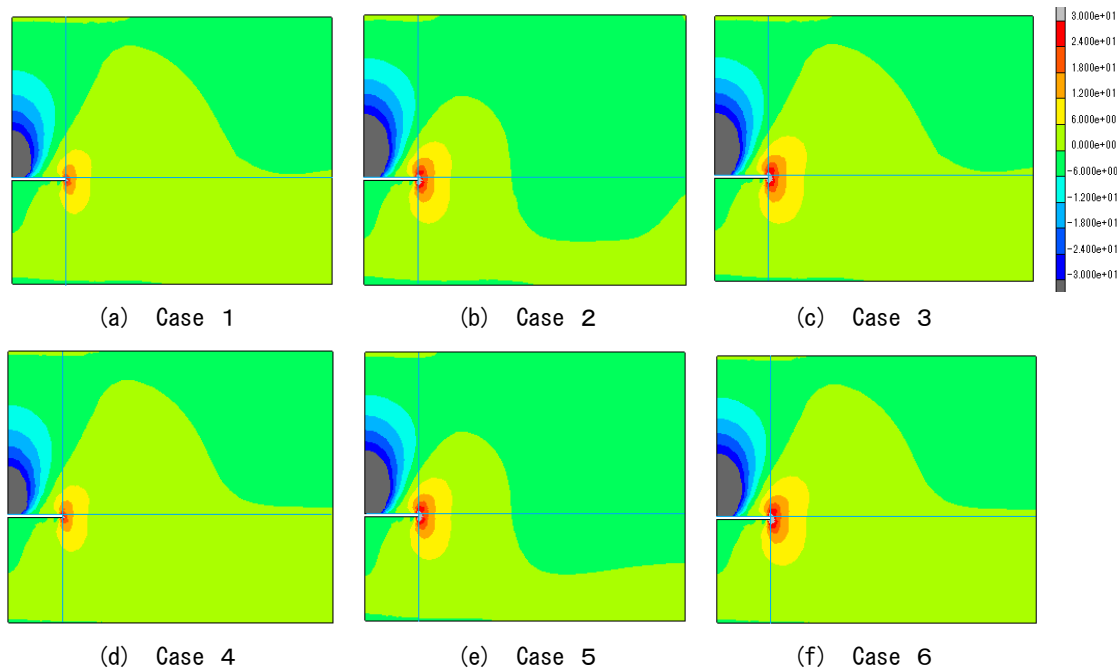


図-5 応力コンター図 (Y 方向応力)

試験体重量の 1/2 (0.5G 相当) の積載荷重を図-3 に示すモデル上端の範囲に作用させた状態である。

境界条件としては、吊上げ実験の条件と同等となるように、モデル左端の対称軸で X 方向の変位を拘束し、定着板とアンカー筋が接合する点の Y 方向変位を拘束した。この条件を「自由」とし、さらにモデル右端の X 方向変位を拘束した条件を「X 方向変位拘束」とし、境界条件は 2 通りとした。「X 方向変位拘束」はモデルが水平方向に繰り返し連続する状態を想定したものである。

解析ケースは、上記の荷重条件と境界条件の組み合わせとし、全 6 ケースとした。解析ケースの一覧を表-2 に示す。

4. 解析結果と考察

4.1 応力コンター図

水平 (X) 方向および鉛直 (Y) 方向の応力コンター図を図-4、図-5 に示す。対称軸や図-3 に示す A 軸における水平方向の応力は、モデル上端で引張、下端で圧縮と

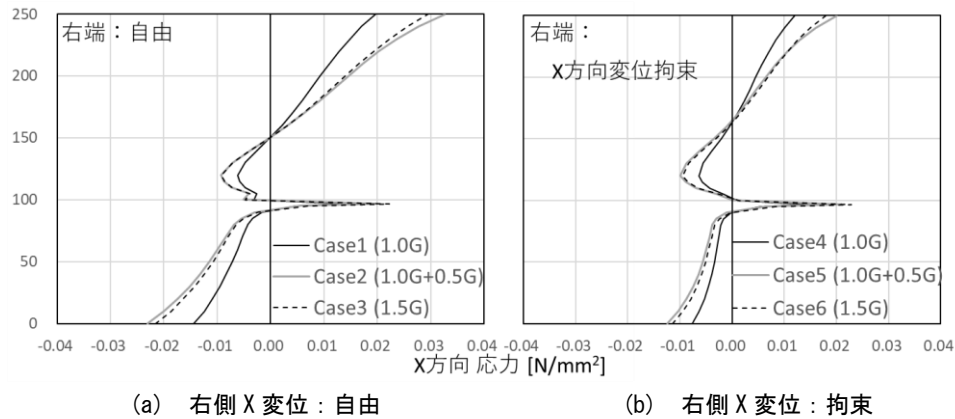


図-6 応力分布：荷重条件の比較 (X 方向応力)

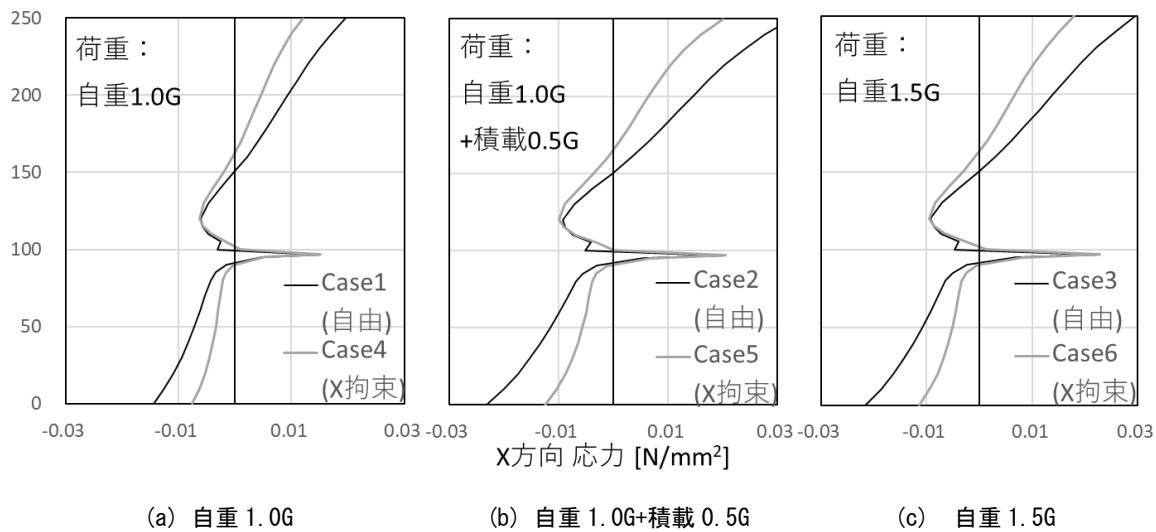


図-7 応力分布：境界条件の比較 (X 方向応力)

なっており、試験体は全体として曲げ変形を受けていることが分かる。また、鉛直変位を拘束したアンカー筋接合点の上部は、試験体の全荷重が作用するため、鉛直方向の圧縮応力が集中している。定着板の右端では、鉛直方向の引張力が集中する結果となった。これらは全解析ケースで同様の特徴であり、最大の引張応力は Case 6 の Y 方向応力で 0.044N/mm^2 であった。

材料試験から得られた版築の曲げ引張強度は 0.59N/mm^2 であり、吊上げ実験で生じる引張応力は、引張強度に対して 1/10 以下と十分に小さく、版築材料の引張破壊による影響は無視できる程度であったと考えられる。

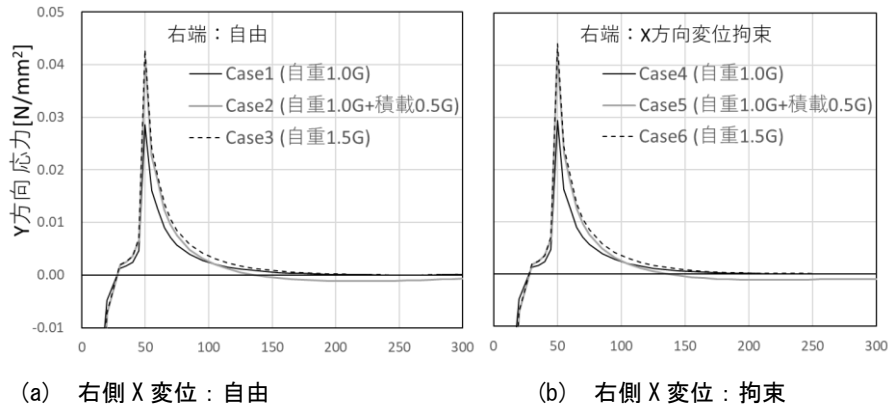
4.2 応力分布の比較

図-3 に示した A 軸、B 軸上における応力分布の比較を図-6～図-9 に示す。比較は荷重条件および境界条件が同じとなる解析ケースのグループごとに示した。検討の概要を以下に述べる。

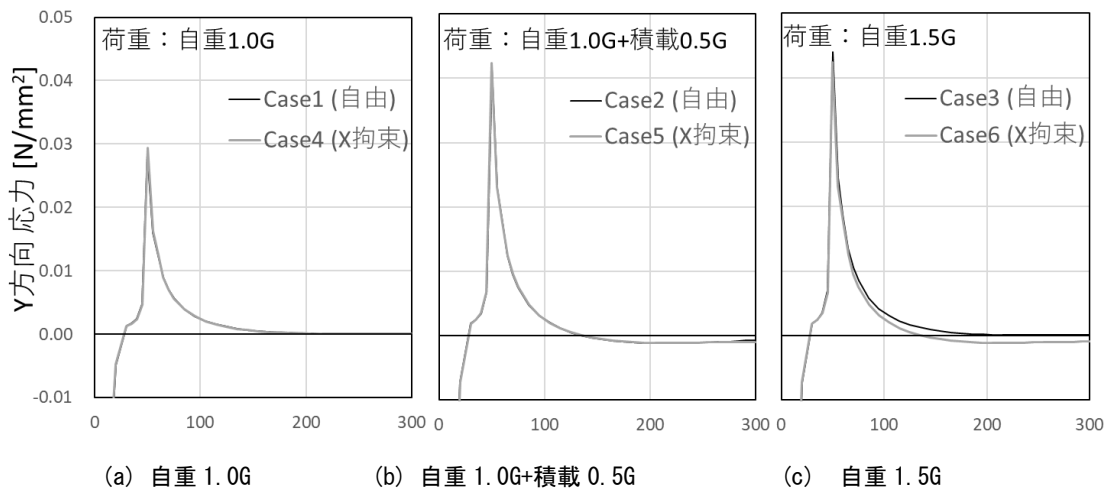
(1) 荷重条件の違いによる比較：X 方向 (図-6)

荷重 1.0G (Case 1) に対し、1.5G (Case 2, 3) では、上端および下端に生じている引張応力および圧縮応力それぞれの最大値が増加している (図-6 (a))。Case 2 と Case 3 とでは応力分布および最大値に大きな差はなく、荷重の与え方の違いによる影響は小さいことが分かる。モデル Y 方向全長 (0～250mm) の応力分布から、全体に曲げモーメントが生じていることが確認できるが、定着板より上部の 100～250mm の範囲に限定した場合でも、曲げモーメントが生じており、その中立軸は荷重条件が異なってもほとんど変化しないことが分かった。また、境界条件が異なる「右端 X 変位拘束」についても、同様の特徴がみられた (図-6 (b), (c))。

実際の版築壁は連続し、右端の回転が拘束されているため、境界条件は X 変位を拘束した場合がより近いものと考えられる。したがって、壁の曲げに対しては吊上げ実



図－8 応力分布：荷重条件の比較（Y方向応力）



図－9 応力分布：境界条件の比較（Y方向応力）

験は実際の版築壁よりも過大な応力となり、安全側の評価を与えることになる。

(2) 境界条件の違いによる比較：X方向（図－7）

右端の境界条件の違いに着目して比較すると、右端を拘束しない場合（Case 1）に対し、X方向変位を拘束した場合（Case 4）では、モデルの上端・下端に生じている引張・圧縮応力が減少しているが、全体としての中立軸の位置には大きな差はない（図－7 (a)）。また、定着板の上部に生じている圧縮応力は、最大値とその位置ともに大きな差はなかった。荷重条件が異なる「自重 1.0G + 積載 1.5G」、「自重 1.5G」についても同様の特徴がみられた（図－7 (b), (c)）。

(3) 荷重条件の違いによる比較：Y方向（図－8）

4.1 節で述べたように、モデル左端から 50～100mm の範囲に Y 方向の引張応力が集中し、150mm より右の範囲では Y 方向の応力は小さい。荷重 1.0G（Case 1）に対し、1.5G

（Case 2, 3）では、Y 方向引張応力の最大値が増加している（図－8 (a)）。Case 2 と Case 3 とでは最大値に大きな差がなく、荷重の与え方の違いによる影響は小さいことが分かる。境界条件が異なる「右端 X 変位拘束」についても、同様の特徴がみられた（図－8 (b), (c)）。

(4) 境界条件の違いによる比較：Y方向（図－9）

「自重 1.0G」の場合について、右端を拘束しない場合（Case 1）と X 方向変位を拘束した場合（Case 4）の Y（鉛直）方向応力を比較すると、ほぼ一致しており、モデル右端の拘束条件の違いが Y 方向応力にほとんど影響を与えていないことが確認できる（図－9 (a)）。このことは「自重 1.0G + 積載 0.5G」についても同様であった。「自重 1.5G」では応力の小さい領域（100～300mm）でやや差が生じ、拘束のない Case 3 の Y 方向応力がほぼ 0 であるのに対し、X 方向変位を拘束した Case 6 が圧縮側の応力となっている。

5. まとめ

薄肉版築壁に対するアンカーの定着性能を確認した吊上げ実験について FEM 解析を行い、荷重条件・境界条件の違いが応力分布に与える影響について検討した。

- 1) 最大引張応力は、材料試験から得られる版築の曲げ引張強度 0.59N/mm^2 に対して $1/10$ 以下と十分に小さく、引張破壊による非線形性の影響は小さいと考えられる。
- 2) 1.5G の加速度を与えた場合 (Case 2, 3) と自重の $1/2$ の積載荷重を与えた場合 (Case 5, 6) の比較において、X, Y 方向ともに最大応力の分布に大きな差が見られなかったことから、積載荷重の実験によって慣性力に対する安全率の評価が可能と考えられる。
- 3) 試験体右端を拘束しない場合では、X 方向変位を拘束した場合と比較して、上端の引張応力が大きくなる。実際の版築壁では X 方向変位を拘束する条件に近いため、壁の曲げに対しては安全側の検討となっている。

今後はアンカーピッチや定着板の大きさ、定着板前後の版築厚さの影響などについての検討を行っていく。

[参考文献]

- 1) 森浩二，古東英文，山内豊英，山崎順二，加藤猛：版築により構築した薄型壁に対するアンカー定着性能，浅沼組技術研究報告，No. 33，pp. 2-1-2-4，2021
- 2) 杉山晴香，今本啓一，清原千鶴：版築ブロックの強度特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 40，No. 1，2018