

# 多数アンカー式補強土壁の大規模地震時挙動の FEM シミュレーション

FEM Simulation of Multi-anchor Reinforced Soil Walls During a Huge Earthquake

小 浪 岳 治 (こなみ たけはる)  
岡三リビック㈱

林 豪 人 (はやし たけと)  
岡三リビック㈱

三 浦 均 也 (みうら きんや)  
豊橋技術科学大学

宮 田 喜 壽 (みやた よしひさ)  
防衛大学校

## 1. はじめに

日本の国土は地形が急峻で、地質や土質が複雑なうえ、台風や梅雨等の気象条件も厳しく、地震の発生頻度も極めて高い。このような自然環境の影響を大きく受ける社会基盤整備では、所定の要求性能を合理的な調査・設計・施工によって担保することが重要である。道路土工構造物に対しては、国で定められた技術基準<sup>1)</sup>において要求性能が明示されている。多数アンカー式 (MA) 補強土壁では、上記技術基準が求める性能を満足するための設計・施工方法がマニュアル<sup>2)</sup>に提示されている。

MA 補強土壁も含め各種補強土壁は、十分な耐震性を有すると認識されている。2011年東日本大震災においても、その認識の妥当性を裏付ける調査結果が得られている<sup>3)~5)</sup>。一方で性能設計の普及に向けて、想定地震に対する変形量を評価することで、補強土壁の耐震性能を明示することが期待されている。残念ながら、その実務的な評価手法については十分に確立されていないのが現状である。

補強土壁の地震時変形量を精度良く推定するには、他の照査法同様、解析法の妥当性に関する検討が重要である。そのような場合、模型実験の結果が有用になる。既往の研究において、壁高 5 m の実大振動台実験により、壁天端の最大応答加速度が 420 gal 程度までの条件に対する MA 補強土壁の耐震性能が検証され、補強領域が一体となって応答していることが確認された<sup>6)</sup>。しかし、この実験では、終局状態の検討はできていなかった。その後、20 G 場での動的遠心模型実験により、実規模換

算高さが 8 m の MA 補強土壁の耐震性が検討された<sup>7)</sup>。一連の実験では、最大入力加速度を 1 000 gal 程度まで作用させて、終局状態の観察に成功している。

本稿では、MA 補強土壁の性能設計法の確立に貢献することを目的に、MA 補強土壁の大規模地震時挙動を FEM で再現する方法について検討した結果を紹介する。

## 2. 動的遠心模型実験の概要

遠心力载荷実験装置を用いて 20 G の遠心場で動的遠心模型実験を行った。内寸の高さ 500 mm、幅 1 500 mm、奥行き 300 mm の鋼製大型土槽を用いて、図-1 に示す MA 補強土壁の模型を作製した。基礎及び盛土部には、珪砂 7 号を使用し、相対密度 90% となるように地盤を作製した。写真-1 にアンカー式補強材の模型を示す。高さ 50 mm、幅 73 mm、厚さ 6 mm のアルミ製壁面材に L 型金具を用いたアンカー式補強材をボルトで上下方向に回転可能となるように取り付けた。その 1 ユニット構造を多層に積み上げることで MA 補強土壁の模型を作製した。表-1 に模型の補強条件と実験での加振条件を示す。補強材の敷設長さは「多数アンカー式補強土壁設計・施工マニュアル<sup>2)</sup>」に記載されている設計方法 (設計水平震度  $k_h = 0.15$ ) にしたがって設定した。加振過程では、20 G の遠心場において、所定の最大加速度となる正弦波を周波数 40 Hz (実スケールで 2 Hz に相当) の条件で 20 波作用させた。

最大加速度は 200 gal から段階的に 200 gal ずつ増加させた。STEP 5 (最大水平応答加速度 979 gal) における入力加速度時刻歴を図-2、同じステップでの加振後状況を図-3 に示す。補強領域内部にすべり面が発生し、補強土壁全体が前面に大きく変形したことが確認された。

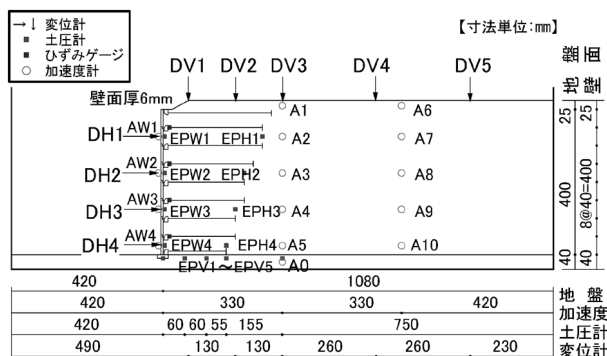


図-1 多数アンカー式補強土壁の模型概要

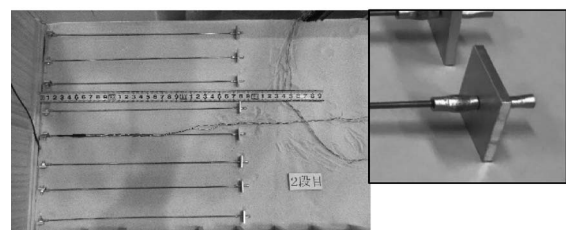
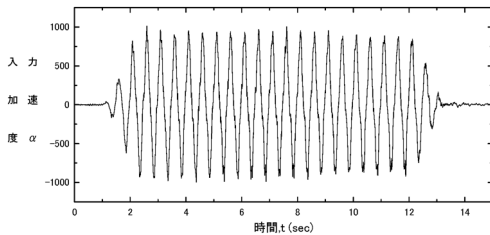


写真-1 アンカー式補強材の形状と配置状況

表一 動的遠心模型実験における補強条件と加振条件

STEP	遠心加速度 (G)	補強材仕様	加振条件			
			入力波形	最大加速度 (gal)	最小加速度 (gal)	主要動平均加速度の絶対値 (gal)
1	20	①補強材：鋼棒 ②補強材直径：φ1.2mm ③補強材長 ・1段目：300mm ・2段目：275mm ・3段目：275mm ・4段目：250mm ・5段目：225mm ・6段目：225mm ・7段目：200mm ・8段目：200mm ・9段目：175mm	正弦波20波 (周波数40Hz)	208	-219	205
2				408	-429	397
3				598	-645	578
4				804	-836	761
5				979	-996	930
6				1186	-1211	1040



図一 動的遠心力载荷実験における入力加速度の時刻歴 (STEP5)

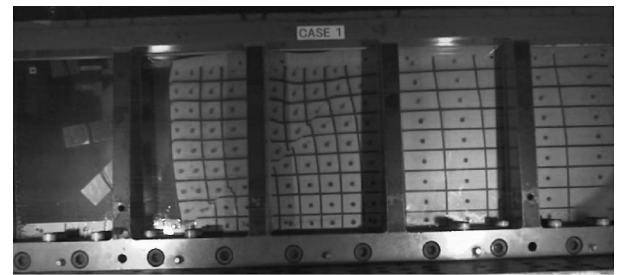
### 3. 解析手法の選定

補強土壁は、盛土材-補強材-壁面材の相互メカニズムによって高い耐震性能を発揮する。数値解析においては、震度が小さいときは補強領域が一体となって挙動し、震度が大きくなると補強領域外で塑性的な挙動が卓越し始め、最終的には補強領域内部にすべりが発生する様子を再現する必要がある。様々な地盤解析プログラムが使用できる昨今において、解きたい問題に応じて適宜プログラムを選定する必要がある。MA 補強土壁の大規模地震時挙動の解析を始めるにあたり、計算条件について以下のとおり整理した。

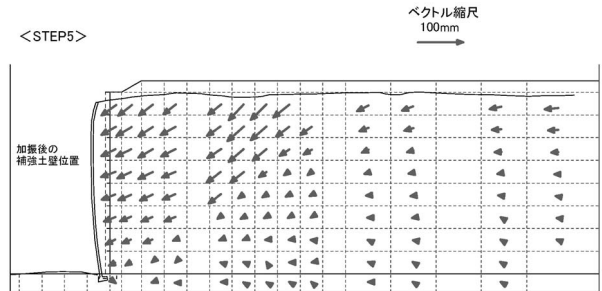
- a. 微小変形からある程度の変形レベルまで表現可能。
- b. 繰り返し構成モデルが組み込まれている。
- c. アンカープレートの支圧効果を表現可能なこと。

以下、それぞれの課題について検討した内容を示す。

- a. について：ニューマーク法と FEM がある。このうち前者は多くの設計コードで採用されている実用性の高い解析法であり、その妥当性は模型実験などで明らかにされている。本研究においては、MA 補強土壁で用いられるアンカー補強材への適用性と最近の汎用プログラムの普及を考慮し、FEM で解析を行う。
- b. について：MA 補強土壁の挙動を終局状態に近いところまで再現するとなると、繰り返し作用応力条件において、土の挙動を再現できる構成モデルが必要になる。大規模地震では、主応力の卓越方向が大きく変化する。そのような応力条件に対する土の挙動の再現性に有利な構成モデルを用いる必要がある。
- c. について：Siemen ら<sup>8)</sup>は、アンカー式補強材を梁要素などの構造要素でモデル化すると、アンカー周辺で過度な応力集中が計算されることを明らかにした上で、補強材要素と土要素の接続条件を工夫して、上記問題を



(a) 変形状況写真



(b) 変位ベクトル図

図一 動的遠心力载荷実験における模型地盤の変形 (STEP5 加振後)

クリアにする方法を提案している。一連の解析では同種の対応が可能な解析プログラムを用いる必要がある。

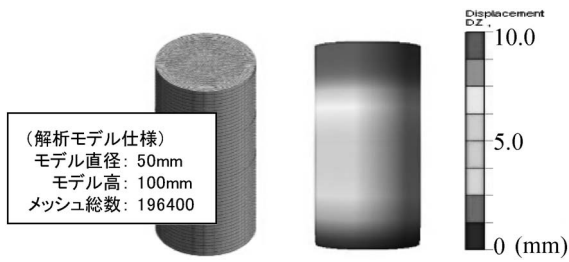
上記の問題に加えて、MA 補強土壁の解析では二次元解析か三次元解析なのかという問題がある。補強効果を生み出すアンカープレートの支圧効果は三次元性を有する。そのような問題を解くことができる三次元商用プログラムも急速に普及している。一方で、その種の解析の実務への適用性を考えると、計算コストやモデル構築において、少なからず課題があることも確かである。そこで、本検討では、三次元効果が発揮される室内引抜き試験を二次元解析で再現する解析モデルを用いる方法で、地震時挙動を解析するようにした。

以上の検討をふまえ、多重せん断モデルを土の構成モデルとして組み込んだ二次元有効応力解析プログラム FLIP ROSE<sup>9)</sup>を用いることとした。この解析プログラムのシリーズには三次元対応や有限変形理論に対応するものも用意されており、将来の拡張性も視野に入れたことを付記する。なお、FLIP ROSE は飽和砂の挙動の再現に大きなアドバンテージを有するが、今回の解析では、間隙水圧の発生を伴わない設定で解析を行った。

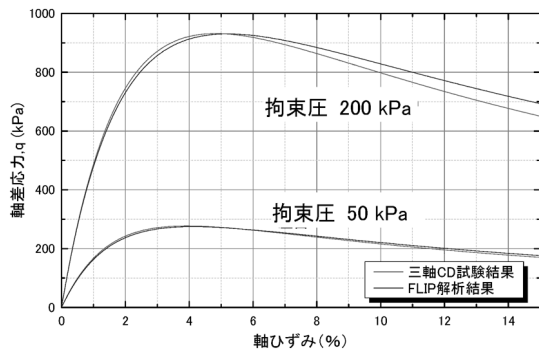
### 4. 解析パラメータの同定

#### 4.1 盛土材

多重せん断モデルには多くの発展形があるが、砂質土の正負のダイレイタンスや排水時の土の体積剛性等を詳細に再現可能なカクテルグラスモデル<sup>10)</sup>を用いて解析することとした。本研究では、動的遠心実験で用いられた 7 号珪砂の応力-ひずみ関係を再現できる解析パラメータを同定するために、圧密排水三軸圧縮試験 (CD 試験) の再現解析を行った。三軸圧縮試験の解析モデルを図一 4 に、等方圧密時の解析結果を図一 5 に示す。解析モデルは、弾性的な挙動、ピーク強度とそのときのひ



図—4 要素試験の解析モデル（左）と解析結果（右，軸変位分布）



図—5 三軸圧縮試験における応力-ひずみ関係の解析結果

ずみレベル，ピーク強度発揮後，ゆるやかに残留強度へと漸近していく挙動をうまく再現できている。

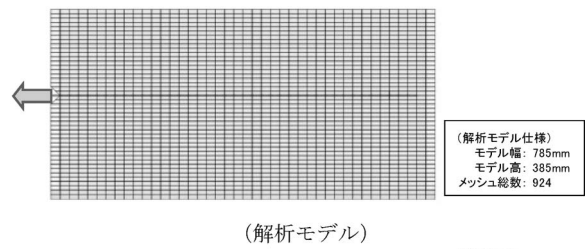
#### 4.2 補強材

アンカー式補強土壁のアンカープレート模型形状は，実大規模換算で0.3 m × 0.3 m の正方形である。この形状によってもたらされる補強効果を二次元解析で表現する方法として，アンカープレートの大きさ（二次元解析ではアンカーの高さに相当する）を調整することにした。具体的には，室内引抜き試験で得られた荷重-変位関係<sup>11)</sup>を解析で説明できるプレートの大きさを選んだ。一連の解析において，アンカー式補強材のモデル化では，タイバーとアンカープレートを梁要素で，土との境界はジョイント要素で表すことにした。土-タイバー間での摩擦はないものとし，アンカープレート及びタイバーの全重量はタイバーに保有させ，ジョイント要素の鉛直剛性についてはタイバーの直径とタイバーの水平間隔を考慮して設定した。引抜き試験の解析モデルと解析結果を図—6及び図—7に示す。

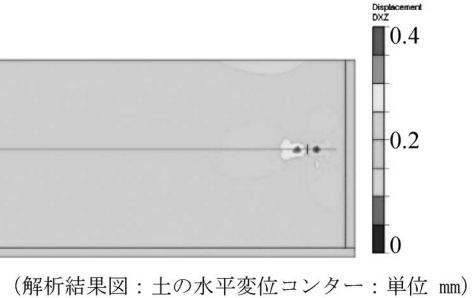
解析モデルは，アンカー周辺で変位が集中する様子，実験で得られた引抜き変位-引抜き荷重の関係を，比較的大きな変位レベルまで再現できている。

### 5. 動的遠心力载荷実験による補強土挙動の再現解析

以上の検討をもとに，MA補強土壁の動的遠心力载荷実験の再現解析を行った。解析条件の概要を表—2に示す。一連の解析では，まず，支持地盤にK0条件を仮定した初期応力を与えた。次に，MA補強土壁の段階施工過程を解析で再現するために，パネル一層ごとに要素を増やしていく解析を行った。続いて，遠心模型実験

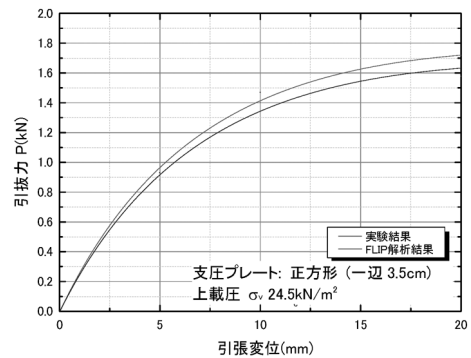


(解析モデル)



(解析結果図：土の水平変位コンター：単位 mm)

図—6 引抜き試験における解析モデルと解析結果図



(引抜き変位-引抜き荷重関係)

図—7 引抜き試験の解析結果

表—2 動的遠心模型実験における補強条件と加振条件

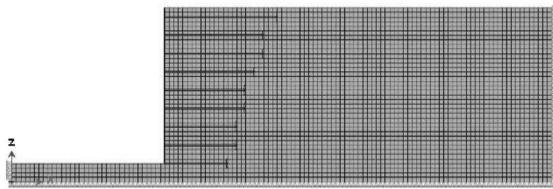
節点総数：3615，要素総数：7090
土・補強材のモデル化：本文4.1，4.2のとおり
壁面パネルのモデル化：梁要素でモデル化
壁面パネルと補強材の接合方法：ピン結合
壁面と壁面の接合方法：ジョイント要素で接合

で重力加速度を1 G から 20 G まで上げていく解析を行い，解析領域全域に対する初期応力場を確定させた。その後，実際の加振条件（表—1）を段階的に作用させて，壁面の変形や解析断面の変形モードについて，解析と実験とを比較した。

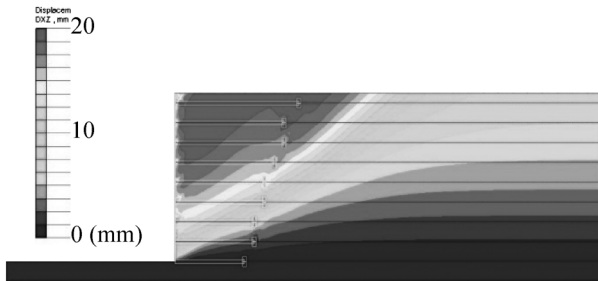
解析モデルを図—8に，解析結果を図—9に示す。変位分布については，図—3と同様な結果を得ることができた。壁面パネルの変位については，最終段階における実測値と計算値の比較のみを同図に示した。変形モードはよく一致しており，その大きさも，模型断面の複雑さ，段階的な荷重履歴を考えると，比較的良好に合致しているといえよう。

### 6. おわりに

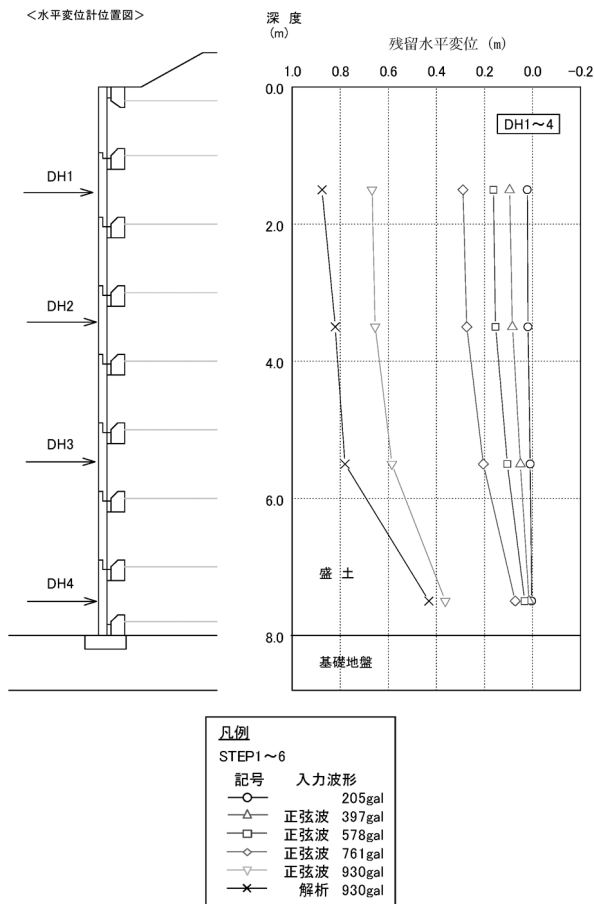
本稿では汎用のFEM解析ツール<sup>9)</sup>を用いた動的遠心



図—8 動的遠心模型実験の解析モデル



(a) 水平変位のコンター図



(b) 壁面パネル前面の水平変位

図—9 動的遠心模型実験の解析結果

全体の変形モードをよく再現できた。適切なモデルを選択し、土の要素試験や補強材の引抜き試験の結果を用いて合理的にパラメータを算定すれば、三次元性を有するMA補強土壁の大規模地震時挙動を二次元解析で近似的に表現可能という知見を得た。今後は、実物大模型モデルへの適用性を検証し、大規模地震の作用を受けたMA補強土壁について解析を進める予定である。

最後に、今回の研究で使用した解析プログラムを開発したFLIPコンソーシアム関係者の協力に感謝を表したい。

参 考 文 献

- (公財)日本道路協会：道路土工構造技術基準・同解説，2017.
- (一社)土木研究センター：多数アンカー式補強土壁設計・施工マニュアル，第4版，2014.
- Miyata, Y.: Reinforced soil walls during recent earthquakes in Japan and geo-risk-based design, Earthquake Geotechnical Engineering Design, Michele Maugeri and Claudio Soccodato (eds.), Springer, 20p., 2014.
- Kuwano, J., Miyata, Y. and Koseki, J.: Performance of reinforced soil walls in the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Geosynthetics International, Vol. 21, No. 3, pp. 179-196, 2014.
- 平原直征・小浪岳治・林 豪人：アンカー補強土壁 東日本大震災被災度調査報告，第47回地盤工学研究発表会，pp. 529~530, 2012.
- Futaki, M., Aoyama, N., Misawa, K., Konami, T., Sato, M., Tatsui, T. and Mikami, K.: Dynamic behavior of multi-anchored reinforced soil wall in large-scale shear box, Proc. of the International Symposium on Earth Reinforcement, Kyushu, Japan, pp. 351-357, 2001.
- 林 豪人・小浪岳治・三浦均也・小林 睦：両面アンカー補強土壁を対象とした動的遠心模型実験—安定性と残留変形—，第53回地盤工学研究発表会，pp. 1675~1676, 2018.
- Siemen, G., Bathurst, R. J. and Miyata, Y.: Numerical simulation and parametric analysis of multi-anchor walls using the finite element method, Transportation Geotechnics 15, pp. 57-69, 2018.
- (一社)FLIPコンソーシアム：液状化による構造物被害予測プログラム FLIPROSE® (Ver.7.4) 取扱説明書
- Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K.: Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 35, No. 3, pp. 360-392, 2011.
- 三浦均也・西田康人・森政信吾・小浪岳治・工藤章光：アンカープレートの引抜き強度と地盤特性の力学的・統計的検討，第41回地盤工学研究発表会，pp. 1817~1818, 2006.

(原稿受理 2019.7.29)

力載荷実験の二次元再現解析を実施した。解析結果は、動的遠心力載荷実験で観察された累積壁面変位及び断面