地盤のせん断変形を受ける 補強洪水吐の挙動メカニズムの検討

河端俊典¹・岩崎善之²・毛利栄征³・百々宏晶⁴

1995年の兵庫県南部地震では、多くのため池洪水吐が被災した。一般的に重量構造物である洪水吐は、地震時に大きな慣性力を受けることで破壊・変位を生ずることがその主因とされている。筆者らは、ジオグリッドを取り付けた耐震性を有する軽量洪水吐を提案し、振動台実験によりその有効性を明らかにしたが、メカニズムは未だ解明されていない。本研究では、地震時の地盤のせん断変形に着目し、提案工法に対して繰返し単純せん断試験を行った。アルミ棒積層体を用いた模型実験、および個別要素法（DEM）を用いた数値解析の双方から、その挙動メカニズムを検討した。実験および解析の結果から、洪水吐側壁に取り付けた補強材の引抜き抵抗により、洪水吐の変位が抑制されることが明らかになった。

キーワード：洪水吐，ジオグリッド，繰返し単純せん断，アルミ棒積層体，DEM

1. はじめに

地震時の地中構造物の被災事例として、地震動の衝撃による構造物の破壊、地盤の液状化による構造物の浮上などが挙げられる。これらの被害の原因の一つとして、周辺地盤と構造物の相互作用による影響が考えられている¹⁾。

一方、1995年の兵庫県南部地震では多くの農業用ため池が被災し、特に付帯施設である洪水吐の被害は甚大であった。一般的に洪水吐は、コンクリート製の重量構造物であることから、地盤材料で建造されるため池堤体との重量や剛性に大きな相違があり、地震時に大きな慣性力を受けることで破壊・変位を生ずることが指摘されている。被災事例としては、ため池洪水吐と堤体間のはく離やそれに伴う地盤の破壊が挙げられる²⁾。

河端ら³⁾は、側面にジオグリッドを取り付けたPVC製の軽量洪水吐（写真-1）を提案し、振動台実験によりその耐震性を検討した。その結果、提案工法では周辺地盤との一体化により、洪水吐の変位や堤体からの剥離が抑制されることが明らかになった。しかし、その補強効果のメカニズムに関しては未だ明らかになっていない。

本研究では、埋設管の繰返し単純せん断試験⁴⁾と同様のアプローチから、地盤のせん断変形時の補強洪水吐の挙動を検証した。補強材の長さや取り付け位置の変化に伴う変位抑制効果のメカニズムを明らかにするために、アルミ棒積層体を用いた模型実験、および個別要素法（DEM）を用いた数値解析の双方から検討を行った。

写真-1 振動台実験に用いた補強洪水吐

2. アルミ棒積層体を用いた模型実験の概要

(1) 試験装置

図-1に本研究で用いた単純せん断試験装置の概略を示す。せん断槽（800×200×550 mm）には、左右の境界を交互に傾斜させることにより繰返しせん断変形が作用する。モータによりスライドガイドを介して、槽の底面から高さ500 mmの位置に水平方向のサイン波が作用させることができる。本研究では、この位置に0.5 Hz、10波、振幅10 mmのサイン波を作用させた。このとき、アルミ棒積層体に与えるせん断ひずみは±20%である。

¹正会員，神戸大学大学院農学研究科 食料共生システム学専攻，准教授（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

²地盤工学会学生会員，神戸大学大学院農学研究科 食料共生システム学専攻，学生（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

³正会員，農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所 施設資源部 部長（〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6）

⁴地盤工学会学生会員，神戸大学農学部食料生産環境工学科，学生（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

図-1 繰返し単純せん断試験装置

(2) アルミ棒積層体

実験に用いたアルミ棒積層体を写真-2に示す。アルミ棒積層体は、密度 2.651 g/cm^3 、長さ 100 mm 、直径 6.9 mm のアルミ棒を重量比 $2:1$ で構成した。この割合は6-7混合珪砂の粒度分布を参考に決定した。しかし、本研究の目的はメカニズムの解明が目的であるため、実地盤を厳密に模擬しておらず、後に記すDEM解析の便宜性を考慮して決定した。アルミ棒は、槽の底面から 500 mm の高さまで、層厚 50 mm 毎にDEMの密詰め地盤と比較してアルミ棒の本数を調整し、同様に密詰めとなるように埋戻した。

(3) 洪水吐および補強材

洪水吐モデルはアルミ棒積層体の中央上部に配置させた。過去の振動台に用いたPVC性の矩形モデルを参考にし、PVCとほぼ密度が同等な木製の剛体モデルを用いた。奥行きはアルミ棒積層体に等しく、幅 200 mm 、高さ 100 mm 、厚さ 10 mm である。

実験に用いた補強材とその概略を写真-3、図-2に示す。直径 6 mm のアルミ棒を 5 mm の間隔でワイヤーで繋げてジオグリッドのリブを模擬した。なお、引張特性については次節において解析モデルを含めて示す。

(4) 試験ケース

試験ケースを図-3に示す。本研究では、実際の施工条件を考慮して、補強材の長さや土被り厚の効果を確認するため、5種類の洪水吐モデルに対して試験を行った。Case-Aは補強材を取り付けないケースで、Case-B～Case-

Eが洪水吐モデルの両側面に補強材を取り付けたケースとなっている。

写真-2 アルミ棒積層体

図-3 試験ケース

写真-3 試験に用いた補強材

図-2 補強材の概略

3. 個別要素法（DEM）を用いた数値解析の概要

模型実験を写真撮影することにより、洪水吐および補強材の挙動を観察することが可能となるが、これらに作用する力や積層体内の微小変形を観察することは不可能である。そこで二次元個別要素法（DEM）による数値解析を用いて、これらについての検討を行った。

(1) アルミ棒積層体のモデル化

DEM においてアルミ棒をモデル化するために、一面せん断試験のシミュレーションを行い、実験結果との比較を行った。

一面せん断試験は、高さ 220 mm、幅 270 mm のせん断箱に、アルミ棒を密な状態になるよう詰め、可動箱をジャッキにより 1.0 mm/min の速度で水平方向に載荷し、アルミ棒積層体の中央部をせん断させた。上載圧は 2.0 kPa で実験を行い、せん断変位量とせん断応力を計測した。

DEM による一面せん断シミュレーションの解析モデルを図-4 に示す。可動箱は微小粒子をバネで連結したのとなっており、供試体上面に 2.0 kPa の圧力がかかるものとしている。せん断条件や粒子のサイズは実験と同じである。

アルミ棒の DEM パラメータを表-1 に示す。これは図-5 に示すせん断変位量とせん断応力の関係において、解析結果が実験結果にフィッティングするように決定したものである。これより、解析は一面せん断試験をシミュレートできており、アルミ棒を DEM により精度良くモデル化することができたと考えられる。

(2) 補強材のモデル化

補強材をモデル化するために、図-6 に示す引張試験のシミュレーションを行い、実験結果との比較を行った。

補強材のパラメータを表-1 に示す（表面の摩擦はアルミ棒と等しい）。これは図-7 に示す引張変位量と引張強度の関係において、解析結果が実験結果にフィッティングするように決定したものである。これより、補強材の DEM によるモデル化ができたものと考えられる。

(3) 単純せん断試験のシミュレート

図-8 に単純せん断試験の解析モデルを示す。要素数は約 10000 個となっている。左右の境界の上端要素を 0.5 Hz、振幅 12 mm のサイン波で水平方向に強制変位させることにより、実験と同じく ±20 % のせん断ひずみを与えた。なお、洪水吐は微小粒子を強固なバネで連結した剛体モデルとしている。

(4) 解析ケース

本研究では洪水吐モデルの両側面の下部、または中間部に補強材を取り付けたケースに対して DEM 解析を行った。補強材の長さは 0, 33, 67, 100, 133, 167, 200 mm と変化させた。なお、100, 200 mm のものは、試験ケースの Case-B～Case-E に対応している。

図-4 一面せん断試験の解析モデル

表-1 DEM パラメータ（アルミ棒）

要素密度	2.651 g/cm ³
法線方向バネ定数	3.40×10^6 N/m
接線方向バネ定数	8.50×10^4 N/m
法線方向粘性定数	2.52×10^2 N sec/m
接線方向粘性定数	9.58×10^4 N sec/m
要素間摩擦角	18.0 deg
転がり摩擦角	18.0 deg

図-5 せん断変位とせん断応力の関係

図-6 引張試験の解析モデル

表-2 DEM パラメータ（補強材）

法線方向バネ定数	3.20×10^6 N/m
接線方向バネ定数	8.00×10^4 N/m
法線方向粘性定数	2.45×10^2 N sec/m
接線方向粘性定数	9.29×10^4 N sec/m

図-7 引張変位と引張強度の関係

4. 試験結果および解析結果

(1) 洪水吐の変位

図-9に模型実験における洪水吐の鉛直変位の時間変化を示す。どのケースにおいても時間の経過とともに洪水吐が上方へ変位していくことがわかる。無補強のCase-Aが最も大きく上方へ変位している。側面下部に長さ193 mmの補強材を取り付けたCase-Cの浮上量が最も小さく、Case-Aと比較して約20 mm減少している。同じ位置に長さ94 mmの補強材を取り付けたCase-Bの浮上量はCase-Cよりも大きい。また、側面中間部に補強材を取り付けたCase-D、Case-Eは、下部に補強材を取り付けたCase-B、Case-Cよりも浮上量は大きくなっている。

図-10に実験および解析終了時における洪水吐の浮上量と補強材の長さの関係を示す。当実験および解析の条件下においては、補強材を長くするほど洪水吐の浮上量が小さくなる傾向が確認できる。また、側面下部に補強材を取り付けたケースは、側面中間部に取り付けたいケースと比較して、浮上量は著しく小さくなっている。これらの結果より、位置や長さの違いによる補強材に作用する土圧の変化が、洪水吐の変位抑制効果に影響を及ぼしているものと考えられる。

(2) 地盤の変形

Case-AとCase-Cの実験終了時のアルミ棒積層体の状態、および解析モデルの状態を図-11に示す。なお、洪水吐底面と同じ高さにあるアルミ棒は、端面を着色しておき、洪水吐周辺のアルミ棒の移動の様子を確認できるようにした。Case-Aにおいては、洪水吐側方のアルミ棒が洪水吐の下部へと移動し、洪水吐が積層体外へ押し出されるように変位していることが確認できる。一方、Case-Cにおいては、実験の前後を比較すると底版の下部の様子はほとんど変化しておらず、洪水吐の浮上量も小さくなっている。これは、補強材により洪水吐側方のアルミ棒が底版の下部へと回り込むことが抑制されたためであると考えられる。

図-8 単純せん断試験の解析モデル

図-9 洪水吐の鉛直変位の時間変化

図-10 洪水吐の最終浮上量

図-11 アルミ棒積層体の変形

図-12 洪水吐周辺の粒子間接触力分布図 (8.4秒後)

(3) 補強材の作用

図-12 に DEM 解析における Case-A と Case-C の洪水吐周辺の粒子間接触力分布図 (8.4 秒後) を示す。試験開始から 8.4 秒後には、地盤は左方向にせん断変形している。このとき、洪水吐の挙動は安定しており、左上方向に変位する段階となっている。Case-A においては、地盤の右下部から洪水吐の右面下部へと斜め上方向の接触力が発達していることがわかる。これにより、洪水吐の右側が押し出されるような形で洪水吐そのものが上方へと変位したものと考えられる。一方 Case-C では、補強材の上部において、右の境界から発達してきた接触力が下方向へと向きを変えていることがわかる。大きな接触力は補強材の周辺へと集中しており、洪水吐の右面へ伝わる接触力は Case-A と比較して小さくなっている。これらの結果から、補強材は洪水吐側面への力の伝達を抑制し、補強材そのものの引抜き抵抗により洪水吐が地盤外へと押し出されるのを抑制しているということが示唆される。

図-13 に各ケースにおける洪水吐右側の補強材に発生するひずみ分布図 (8.4 秒後) を示す。このとき、地盤は左方向にせん断変形している。洪水吐側面下部に補強材を取り付けた Case-B および Case-C では、補強材の洪水吐との取り付け部から長さ 100 mm の部分にかけて、引張ひずみが発生していることがわかる。Case-C においては、図-12(2)と比較すると、補強材周辺の大きな接触力が発生している箇所と引張りひずみが発生している箇所はほぼ一致している。これは、この位置において補強材の引抜き抵抗が作用しており、洪水吐の変位を抑制しているものと考えられる。また、地盤の境界に近い位置では、圧縮ひずみが発生している。これは、この位置において、洪水吐が地盤外へ押し出される際に補強材に作用する引抜き抵抗よりも、境界が補強材の方向へと変位することによる地盤の圧縮の影響を強く受けているためであると考えられる。一方、洪水吐側面中央部に補強材を取り付けた Case-D および Case-E では、補強材全体で

図-13 補強材に発生するひずみ分布

引張りひずみはほとんど発生していない。これは、上載圧が小さくなったことにより補強材の引抜き抵抗が減少し、その結果、図-9 および図-10 に示すように、側面中央部に補強材を取り付けたケースでは変位抑制効果が小さくなったものと考えられる。

5. 結論

本研究では、地震時の地盤のせん断変形に着目し、提案された補強洪水吐を含む地盤に対して、繰返し単純せん断試験を行った。アルミ棒積層体を用いた模型実験、および個別要素法 (DEM) を用いた数値解析の双方から、その挙動メカニズムを検討した。得られた知見を以下に記す。

- (1) 本実験および解析の条件下においては、洪水吐側方に取り付ける補強材は、その長さがながいほど、また取り付ける位置が下部であるほど、変位抑制効果が大きい傾向がある。

- (2) 補強材は、洪水吐側方の地盤の底版下部への回り込み変位を抑制することにより、洪水吐の浮上量を減少させる。
- (3) 補強材は、洪水吐側面への力の伝達を抑制し、補強材そのものの引抜き抵抗により洪水吐が地盤外へと押し出されることを抑制する。

謝辞：DEM解析には、京都大学澤田純男教授の開発した「DEMS」を改良して使用した。記して感謝致します。

参考文献

- 1) たとえば、末広俊夫，中瀬仁，毛利栄征，安田進：大型振動台実験による埋設管の浮上と個別要素法によるシミュレーション，地震工学論文集，Vol.27，pp.243-248，1997.
- 2) 兵庫県農林水産部農地整備課：兵庫県南部地震農地農業用施設震災記録誌，1998.
- 3) 河端俊典，内田一徳，北野知洋，渡邊康治，毛利栄征：ジオシンセティックにより補強したため池洪水吐の動的挙動，ジオシンセティックス論文集，Vol.22，pp.243-248，2007.
- 4) 河端俊典，大石順司，中瀬仁，毛利栄征，内田一徳：繰返し単純せん断を受ける埋設管の浮上メカニズム，農業土木学会論文集，No.239，pp.59-66，2005.

DYNAMIC BEHAVIOR FOR SPILLWAY WITH GEOSYNTHETICS SUBJECTED TO SIMPLE SHEAR

Toshinori KAWABATA, Yoshiyuki IWASAKI,
Yoshiyuki MOHRI and Hiroaki DODO

At the 1995 Hyogo Nanbu Earthquake, the spillways on small earth dam were seriously damaged. In general, spillways are made of heavy concrete materials. Therefore, if they are subjected to earthquake vibration, they can be displaced and failed due to inertia force. The authors of the study proposed the quakeproof lightweight spillway with geogrids and verified its validity by shaking table test. However, the mechanism of reinforced effect remains to be clarified. In this study, the shear deformation of surrounding ground was focused and the cyclic simple shear test was conducted against the proposed method. The small-scale tests with aluminum rods layer and the numerical simulations using the 2-dimensional discrete element method were conducted and mechanism of spillway behavior was clarified by these approaches. Both experiments and analyses found that the spillway displacement is decreased by pull-out resistance of reinforcement materials.