

論文の内容の要旨

論文題目

支持地盤と背面盛土の変形特性を考慮した擁壁の地震時残留変位量計算手法の構築
(Development of Procedures to Evaluate Residual Displacements of Retaining Walls under
Seismic Loading Considering Deformation Properties of Subsoil and Backfill)

氏名 中島 進

1995年に発生した兵庫県南部地震では当時の耐震設計での想定地震動を大きく上回る規模の地震動が作用したことにより、無補強の従来型擁壁（重力式擁壁、もたれ式擁壁、L型擁壁）が甚大な被害を受け、多くの擁壁が再建設を要した。一方で、剛な一体型壁面工を有するジオテキスタイル補強土擁壁では簡単な補修でその供用を再開できる程度の、軽微な変位が発生するにとどまった。兵庫県南地震以後は、高い耐震性を示した補強土擁壁の施工実績が増大すると共に、レベルⅡ地震動が設定され重要な社会基盤構造物を支える擁壁などの抗土圧構造物に要求される耐震性が高まった。

設計地震動の増大に伴い、震度法と極限釣合い解析による従来の耐震設計では非経済的な設計になってしまう事に加えて、性能照査型設計法への移行が社会的なニーズとして高まっていることにより、地震後に生じる残留変位量を評価する事が重要となっている。擁壁の地震時残留変位量を評価する手法として、擁壁と支持・背面地盤を共に剛体と想定した Newmark 法がある。Newmark 法では閾値として用いる加速度、あるいはモーメントを設定すれば変位を評価できるが、地盤の変形を考慮していないために閾値以下では変位が発生しない。

しかし、締め固めた密な地盤材料を想定した支持・背面地盤条件で実施した擁壁の地震時挙動に関する模型実験では、閾値よりも十分に小さい加速度レベルにおいても変位量が生じる事が確認されており、地盤変形の影響を無視した Newmark 法ではこの変位量増分を評価する事は出来ない。

また、前述した補強土擁壁の施工実績増大や設計地震動の見直しに伴い、新設の擁壁構造物は比較的高い耐震性を具備する様になったが、依然として無補強従来型擁壁の方が絶対数は多く、こうした無補強擁壁が重要な社会基盤構造物下部の盛土を支えている場合には、耐震補強を行う必要がある。

以上を背景として、① 支持地盤・背面盛土の変形を考慮した地震時残留変位量を評価する手法を構築すること、② 耐震補強工を有する擁壁に関する振動台実験を実施し、効果的な耐震補強工法を提案するとともに、その補強メカニズムを解明すること、③ ①と②を組み合わせることにより、耐震補強工を有する擁壁の地震時変位量計算手法を構築することの3点を主な目的として、研究を行った。研究の結果、得られた知見及び成果は以下の通りである。

(1) 従来型擁壁の地震時変位量計算手法の構築・妥当性検証に関して

・変位量計算手法の構築

模型振動台実験の結果より従来型擁壁の地震時挙動として、①滑り面発生前の非線形な変位量の増大傾向、②擁壁の変位に伴う背面地盤の変形による滑り面の発生、③滑り面発生後の線形的な変位量の急増傾向、の三点が特徴的である事が分かった。

上記の知見を活かして提案手法は、滑り面発生前の変位量評価(Step1)、滑り面発生の判定(Step2)、滑り面発生後の変位量評価(Step3)に分かれている。

Step1 では、①で述べたすべり面発生前の低加速度レベルで生じる非線形な変位量増分を評価するために擁壁支持地盤の変形による影響を考慮して、擁壁の滑動は支持地盤がせん断変形することによって、転倒は支持地盤がモーメント変形することによって発生すると想定した。前者に関しては、振動台実験の実測値と中空ねじりせん断試験によって、後者については振動台実験の結果とモーメント載荷試験の結果を用いてモデル化した。これらの地盤変形による変位量増分に加えてピーク強度を用いた Newmark 法を用いて擁壁の剛体的な滑動、転倒量増分も併せて考慮した。

Step2 では、②で述べた背面地盤でのすべり面発生に関して Step1 で求めた変位量から背面地盤の影響領域における平均的な最大せん断ひずみ γ_{max} を評価して、 γ_{max} が 5%を超えるとすべり面が発生するとその挙動をモデル化した。

Step3 では③で述べたすべり面発生後の変位量急増傾向を再現するために、Step2 での滑り面発生と、ひずみ軟化挙動の影響を考慮して、残留強度を用いた Newmark 法を用いて変位量の評価した。

・変位量計算手法の妥当性の検証

提案手法を支持地盤条件や加振条件、擁壁タイプが異なる既往の模型振動台実験に対して適用し、その妥当性を検証した結果、提案手法で評価した変位量は実測値の 0.5 から 3 倍程度の範囲に収まり、比較的良好に変位量进行评估する事が出来た。

擁壁・背面地盤の応答の位相差やひずみ速度の影響、負の過剰間隙空気圧の影響など提案手法で考慮していない要因の影響が変位量の過大評価の原因として考えられる。

これらの影響を考慮して、提案手法での計算に用いる入力値を補正することによって計算値は実測値の 0.5 から 2 倍程度の範囲に収まり、その精度は向上した。

(2) 補強土擁壁の地震時変位量計算手法の構築・妥当性検証に関して

・変位量計算手法の構築

補強土擁壁に関する模型実験では、従来型擁壁のように支持地盤にめり込みながら擁壁が転倒していく挙動(支持地盤のモーメント変形)は確認されなかったが、背面補強領域のせん断変形に伴い壁面が転倒していく挙動が見られた。

これを踏まえて、補強土擁壁の変位量进行评估する提案手法では支持地盤のモーメント変形で

はなく、補強領域のせん断変形に伴い擁壁が転倒すると想定した。補強土壁の支持地盤、背面補強領域のせん断変形特性に関しては、補強材を配置した中空ねじり試験や **Lumped mass model** によって変形特性のモデル化を試みた結果、**Lumped mass model** によって得られた支持・背面補強領域の平均的なせん断変形特性の包絡線を多項式で近似することによって、その変形特性をモデル化した。

また、無補強領域まで延長されている補強材がある場合には、擁壁の変位に伴い補強材の周面で引き抜き抵抗が発揮されるので、補強材の土中引抜き試験の結果からバイリニアモデルを用いて、引き抜き変位と引抜き抵抗の関係を再現し、変位量計算手法に引き抜き抵抗の効果も導入した。

・変位量計算手法の妥当性の検証

提案手法を補強材の配置や加振条件の異なる模型実験に適用して検証解析を実施した結果、延長された補強材が無いタイプの補強土擁壁に関しては、滑り面発生後の滑動量を過大評価する傾向があったが、提案手法による計算値は実測値と比較的良好に一致した。滑り面発生後の滑動量を過大評価した理由としては、補強領域の変形性を無視して剛体の釣合いのみによって閾値を算出したためだと考えられる。

延長された補強材がある場合には引き抜き抵抗の影響を無視すると変位量を過大に評価する傾向があったが、バイリニアモデルで再現した引抜き抵抗の影響を考慮することによって、計算値は実測値と良好に整合した。

(3) 耐震補強工を有する擁壁の地震時挙動に関して

・矢板補強に関して

もたれ式擁壁、補強土擁壁のつま先部に鋼矢板を根入れすることによって、擁壁の耐震性を向上させることを目的とした補強工法を考案し、その効果を確認するために振動台実験を実施した。

その結果、支持地盤が水平であれば矢板補強によって擁壁の転倒角度が減少する傾向が確認され、その効果は補強土擁壁においてより顕著だった。一方で、支持地盤が斜面の場合には矢板による補強効果は発揮されなかった。

水平地盤上のもたれ式擁壁に対して、矢板の諸元を変化させて振動台実験を実施した。その結果、剛性が高い矢板を用いると無補強の場合と比較して滑動量は減少したが、転倒量は逆に増大した。一方で、根入れ長を長くすることによって、特に大震度レベルにおいて滑動量、転倒量が減少した。

・ネイリング補強に関して

斜面上の擁壁を補強するための工法として、大口径ネイリングの補強効果を確認するためにもたれ式擁壁の壁面、底版にネイリングを設置して振動台実験を実施した。その結果、底版に

設置したネイリングにより効果的に支持力破壊が抑制され、無補強の場合と比較して、滑動量、転倒角度共に効果的に減少した。

・補強効果のモデル化について

矢板模型、ネイリング模型に貼り付けたひずみゲージや擁壁との接合部に設置した二方向ロードセルでの計測値により矢板、ネイリングによる補強メカニズムについて考察した。

矢板に関しては水平抵抗と鉛直抵抗が発揮されることによって、ネイリングに関しては周面摩擦により発揮される引抜き抵抗によって擁壁が補強されていた事が分かった。耐震補強効果の変位量計算手法への導入を行うために、実測値に基づいてこれらの抵抗力-変位量の関係をバイニアモデルによって再現した。

(4) 耐震補強工の効果を導入した擁壁の地震時変位量計算手法に関して

・矢板による補強効果の変位量計算手法への導入について

矢板による補強効果として、矢板に作用する水平抵抗と鉛直抵抗を考慮できる変位量計算手法を構築した。水平抵抗は作用方向に応じてそれぞれ擁壁の滑動、転倒に抵抗すると想定すると共に、鉛直抵抗は擁壁の転倒に抵抗すると想定して、変位量計算手法に矢板の補強効果を導入した。矢板による補強効果を導入した変位量計算の結果、矢板の剛性の変化に伴う補強効果の変化を定性的には再現する事が出来た。定量的にも、計算値は若干変位量を過少評価する傾向があるものの、実測値に対して 0.5 から 2 倍程度の精度で変位量を評価できた。

・ネイリングによる補強効果の変位量計算手法への導入について

ネイリングによる補強効果として、引抜き抵抗を考慮できる変位量計算手法を構築した。ネイリングによる引抜き抵抗が滑動、転倒の両方に抵抗すると想定して、変位量計算手法にネイリングの補強効果を導入した。ネイリングによる補強効果を導入した変位量計算の結果、滑り面発生後の転倒量を若干過大評価する傾向があったものの、計算値は実測値と良好に整合した。

(5) 提案手法の実構造物に対する適用性の検証に関して

兵庫県南部地震において被災した重力式、もたれ式、L 型擁壁及び剛壁面を有するジオテキスタイル補強土擁壁に対して、提案手法を適用して検証解析を実施した。地盤の物性値は被災擁壁に対する既往の逆解析を参照し、本研究でモデル化した地盤の変形特性を用いた。計算結果と擁壁の被災の程度は一致し、実物大構造物に適用した場合でも少なくとも変位のオーダーはあう事が確認され、提案手法が実物大の構造物に対しても適用可能である事が分かった。

以上述べてきたような知見・研究成果が得られた。これらのうちで、前述した目的① 支持地盤・背面盛土の変形を考慮した地震時残留変位量を評価する手法を構築することに対応した研究成果は、擁壁の性能照査型設計法の確立に寄与できると考えられる。

また、② 耐震補強工を有する擁壁に関する振動台実験を実施し、効果的な耐震補強工法を提案するとともに、その補強メカニズムを解明することに関する研究成果は、効果的な耐震補強を行うことに貢献できると思われる。

それに加えて、③ ①と②を組み合わせることにより耐震補強工を有する擁壁の地震時変位量計算手法を構築することに関する研究成果により、既存擁壁に対して耐震補強を行った場合のコストと補強効果との関係を、変位量という指標で評価することが可能になると考えられる。