2.3.3. 補強材の引抜き抵抗力の評価手法の前提条件

(1) はじめに

補強材の引抜き抵抗力の評価手法の前提条件に関する懸案として、①補強材どうしの相 互影響と、②締固め施工品質、③補強材等の劣化が挙げられる。これらのうち、①では、補 強材の引抜き抵抗力の評価手法において想定している前提条件と、補強材どうしが相互に 影響しあうなど補強材が置かれる条件が異なる場合において、どのような措置をしておけ ば前提条件が守られるのか、または必要な抵抗が得られるか、引抜き試験結果等に基づいて 検証を行った。②では、壁面材の向きが一様でないことから狭隘であるなど、通常の施工が 行えない場合において、通常の施工と同等の品質を達成するための標準的な材料、施工方法 を既往の知見から整理した。③では、補強土壁に一般的に用いられる補強材の中でも鋼製補 強材(帯鋼および丸鋼)に着目し、まず、鋼材の土中腐食に関する既往研究を整理し、及び 現状行われている鋼製補強材の耐久性を確保するための方法を整理した。また、近年認めら れた著しい腐食が生じた事例についてその要因を整理し、同様の要因による腐食を生じさ せないために前提となる条件を明確にした。なお、②については2.3.7 項に、③については 2.3.10 項に示している。

なお、本報告書では帯状鋼材及びジオテキスタイルを摩擦型補強材、アンカープレート付 棒鋼を支圧型補強材と定義して整理を行った。

(2) 補強材が近接する場合の引抜き挙動の検証

1) 異なる方向へせん断される土の挙動

異なる方向へせん断される土の一般的な挙動について、既往の文献を整理した。複数の補 強材どうしがごく近接する部分の周辺の盛土材は、異なる補強材の引抜きに起因して複数 の方向へせん断される。一般に土のせん断において、載荷の途中で別の方向に載荷方向が変 化(反転等)しても、図-2.3.3.1 に示すとおり、基本的には一方向に載荷された時と同じ骨 格曲線に沿って挙動することが示されている^{2.3.3-1)}。したがって載荷方向の変化の影響は問 題となるものではないと考えられる。



図-2.3.3.1 土のせん断における載荷方法の影響 2.3.3-1)より引用加筆

また、補強土壁の場合には、その締固めは、通常の盛土よりも高い締固め度の規格値で管理されている^{2.3.3-2})。図-2.3.3.2 に示すとおり、一般的にはよく締め固められた砂質土の場合には、載荷方向の変化に起因した正のダイレイタンシー(体積膨張)により拘束圧が高まるため、せん断強度が高くなる^{2.3.3-3})。



図-2.3.3.2 任意方向にせん断される場合の土粒子の挙動のイメージ 2.3.3-3) より引用加筆

ここでは個別要素法(DEM)により、砂の要素試験のシミュレーションを実施した(図-2.3.3.3)。直径 1.4~2.2mm、数量 5000 個の粒子から構成される一辺約 28.2mm の直方直方体 の供試体を仮定した。間隙比は 0.5915 である。ステップ1として供試体に 50kPa の等方圧 縮力を作用させ、ステップ2としてz方向もしくはx方向に載荷及び除荷を行った。その結 果、途中で載荷条件が変化(X方向/Z方向、載荷/除荷)しても、破壊の挙動に大きな影 響は認められなかった。



図-2.3.3.3 個別要素法 (DEM) による砂の要素試験のシミュレーションの概要

2) 近接する摩擦型補強材の引抜き特性

補強土壁の補強材は一定の離隔を確保して配置されることが一般的である。しかし橋台 アプローチ部に用いられる補強土壁については、両側に壁面を有する構造、もしくは壁面に 隅角を有する構造で補強材が近接しているケースが少なくない。補強材の引抜き抵抗力が 想定通りに発揮できる条件を明らかにする目的で、複数の補強材が隣接している状態での 補強材の引抜き抵抗力について、既往研究の整理、引抜き試験及び補強材の引抜きを模擬し た個別要素法による解析を行った。

a) 摩擦型補強材の引抜きによる影響範囲に関する既往研究

個別要素法(以下、DEM と記す)シミュレーションを用いて摩擦型補強材の引抜きによ る影響範囲に関する既往研究を整理した^{2.3.3-4,2.3.3-5)}。これらはいずれもジオテキスタイルの 引抜き過程を模擬した2次元および3次元での解析である。その結果、摩擦型補強材の引抜 き時には、補強材に沿って土粒子が回転し顕著なひずみが集中すること、顕著なひずみが集 中する範囲の厚さは土粒子数粒分程度であり、近接する補強材への影響範囲はごく限定的 であることが確認された(図-2.3.3.4、図-2.3.3.5)



図-2.3.3.4 摩擦型補強材引抜き試験の DEM シミュレーション例(2次元)^{2.3.3.4)}



Fig. 4. Initial DE specimen (partial view for illustration purpose).



Fig. 14. Strain field within the soil domain at $U_x = 10$ mm and $\sigma_v = 49$ kPa.

図-2.3.3.5 摩擦型補強材引抜き試験の DEM シミュレーション例(3次元)^{2.3.3-5)}

b) 摩擦型補強材(ジオグリッド)の引抜き試験

2 枚以上の面状補強材が近接する条件における補強材の引抜き抵抗特性について、補強材 の引抜き試験によってその影響を検証した。ここでは、補強材を 2 枚または 3 枚近接して 設置した条件における引抜き試験の結果を示す。

まず、補強材を2枚設置し、補強材の間に盛土材を挟まず補強材どうしが直接接した状態 で引抜き試験を実施した(図-2.3.3.6)。この実験では盛土材として関東ロームを用い、引抜 き速度を1mm/minとした。その結果、補強材を1枚敷設した場合(通常)と2枚重ねて敷 設した場合(A,B)とで、摩擦抵抗に大きな傾向の違いは認められなかった(図-2.3.3.7)。



図-2.3.3.6 2枚の摩擦型補強材が直接接した状態の引抜き試験の概要



図-2.3.3.7 2枚の摩擦型補強材が直接接した状態の引抜き試験の結果

上記とは別に、補強材を2枚または3枚設置し、補強材の間に盛土材を挟まず補強材どうしが直接接した状態で引抜き試験を実施した(図-2.3.3.8)。本実験では盛土材として豊浦砂を用い、引抜き速度を1mm/minとした。その結果、こちらも同様に補強材を1枚敷設した場合(通常)と2、3枚重ねて敷設した場合で、摩擦抵抗に大きな傾向の違いは認められなかった(図-2.3.3.8、図-2.3.3.9)。



図-2.3.3.8 複数枚の摩擦型補強材が直接接した状態での引抜き試験の概要



図-2.3.3.9 複数枚の摩擦型補強材が直接接した状態での引抜き試験の結果

c) 摩擦型補強材(帯鋼補強材)の引抜き試験

ここでは、隅角部や両面に壁面の有する構造などの2本以上の帯鋼補強材が近接する条件における補強材の引抜き抵抗特性について、補強材の引抜き試験によってその影響を検証した結果を示す。

図-2.3.3.10 に試験ケースを示す。試験は、近接する補強材の配置条件をパラメーターに 4ケースについて実施した。Case.1 は、単独に設置した1本の補強材を引抜いたケースであ る。Case.1 を基本ケースとし、Case.2 及び Case.4 は両側に壁面を有する構造の場合の補強 材の重なりを想定して、近接する補強材どうしの軸方向が一致するように補強材を配置し た(図-2.3.3.11)。Case.3 は隅角部を有する構造の場合の補強材の重なりを想定して、近接 する補強材どうしが直交するように補強材を配置した。なお、すべてのケースにおいて盛土 材は細粒分含有率 25%の砂質土を用い、締固め度 95%、拘束圧 80kN/m²、引抜き速度を 1mm/min として実施した。

引抜き試験で得られた、荷重と変位の関係を図-2.3.3.12 に示した。図によると、Case.1 と それぞれを比較したとろ、荷重変位関係の形状や引抜き荷重の最大値に大きな違いは確認 されなかった。これは前述の摩擦型補強材(ジオグリッド)の試験結果と同様の傾向である。



図-2.3.3.10 引抜き試験ケース概要



(a) 引抜き試験装置
 (b) 試験補強材設置状況(Case.4 平行)
 図-2.3.3.11 引抜き試験装置および試験補強材設置状況



図-2.3.3.12 試験結果(荷重-変位の関係)

以上のことから、摩擦型補強材の引抜きによる影響範囲は土粒子数粒分であること、さら に、別の補強材が極めて近い位置にあったとしても、補強材と盛土材が接触する条件が確保 (盛土材が安定して存在)されていれば、摩擦抵抗に大きな傾向の違いは認められず、補強 材の引抜き抵抗メカニズムが発揮されると考えられる。ただし、補強材どうしが直接接触し ていることで、補強材に予期せぬ損傷が生じる可能性も考えられることから、現状では、補 強材どうしが直接接しないよう補強材が見えなくなる程度に盛土材を撒きだしており、今 後もこれを継続するのがよいと考えられる。 3) 近接する支圧型補強材の引抜き特性

補強土壁を橋台アプローチ部等に適用する場合、両面に壁面を有する構造や隅角を有す る構造を採用し、各壁面を支える補強材が近接することがある。このうち、支圧型補強材を 用いる場合で、2つの支圧プレートが近接する条件における補強材の引抜き特性について、 DEM シミュレーションにより引抜き挙動を考察した。具体的には、図-2.3.3.13 に示すとお り両側に壁面を有する場合の近接する支圧プレートの相互作用を考察するために、支圧プ レートと相対する支圧プレートに見立てた剛境界の離隔をパラメーターとした引抜き挙動 について3次元 DEM シミュレーション(使用ソフト:LAMMPS)を実施した^{2.3.6}。なお、 ここでは粒子形状を剛接された2つの球形粒子を仮定した。これは、同様のモデルで遠心模 型実験を行った結果と整合がつくことがその理由である。

このDEM シミュレーションの結果を図-2.3.3.14 及び図-2.3.3.15 に示す。図-2.3.3.14 より、 引抜き力と変位の関係に大きな傾向の違いは認められなかったが、c) L=2.0m (2.5D)のケー スでは変位 0.45m 程度(剛境界まで約 1.9D)からわずかに増加した。また、図-2.3.3.15 に示 すように、剛境界と支圧プレートの離隔によらず、粒子間接触力の傾向に変化は認められな かった。このことから、プレート前方の強固な粒子間接触が形成されている領域(くさび) が剛境界に達すると影響を受け始めると考えられる。

以上のことから、支圧プレートの寸法の2倍(2.0D)程度以上の離隔があれば、補強材の 近接による影響は軽微であり、単独の支圧プレートとして扱うことができると考えられる。 なお、補強材の近接により引抜き力が増加することは抵抗が増大することに相当し、補強材 の引抜き抵抗の観点では大きな問題にはならない。一方で、支圧プレートどうしが 2.0D よ りも近接した場合において、設計で想定している作用よりも過大な力が作用したとき、プレ ートの引抜けよりも補強材の破断が先行する可能性が高くなるため留意が必要である。

また、隅角部のように補強材が交差する場合には、プレートが近接することで抵抗領域が 重複し、引抜き抵抗のメカニズムが単独の補強材の場合とは異なるものとなり、引抜き抵抗 力に影響を与える可能性がある。これについては、データを収集し引き続き検討していく。

114



※図中のせん断層(赤破線)は、既往の実験結果^{2.3.3-7)}に基づいて仮定したもの 図-2.3.3.13 支圧プレートの引抜き挙動の3次元 DEM シミュレーションの概要



図-2.3.3.14 3次元 DEM シミュレーション結果(引抜き荷重-変位関係)^{2.3.3-6)}



図-2.3.3.15 0.9m 変位時の粒子間接触力^{2.3.3-6)}

(3) まとめ

本項で得られた知見をまとめると以下のようである。

- 摩擦型補強材については、隣接する補強材が極めて近い位置にあったとしても、補強材 と盛土材が接触する条件が確保(盛土材が安定して存在)されていれば、摩擦抵抗に大 きな傾向の違いは認められず、単独の摩擦型補強材としての引抜き抵抗メカニズムが 発揮されると考えられる。ただし、補強材どうしが直接接触していることで、補強材に 予期せぬ損傷が生じる可能性も考えられることから、現状では、補強材どうしが直接接 しないよう補強材が見えなくなる程度に盛土材を撒きだしており、今後もこれを継続 することが望ましい。
- 支圧型補強材については、平行に隣接する補強材と支圧プレートの寸法の2倍(2.0D)
 程度以上の離隔が確保されていれば、支圧抵抗に大きな傾向の違いは認められず、単独の支圧型補強材としての引抜き抵抗メカニズムが発揮されると考えられる。
- 支圧型補強材については、隅角部においてプレートが近接することで抵抗領域が重複し、引抜き抵抗力に影響を与える可能性がある。これについては、データを収集し引き続き検討していく。

参考資料

- 2.3.3-1) Masuda et al. Stress-Strain Behavior of Sand in Plane Strain Compression, Extension and Cyclic Loading Tests, Soils and Foundations, 1999.
- 2.3.3-2) 公益社団法人日本道路協会:道路土工-擁壁工指針, 丸善出版, 2012.
- 2.3.3-3) 福武毅芳,松岡元:任意方向単純せん断におけるダイレイタンシーの統一的解
 釈,土木学会論文集第412号,Ⅲ-12,1989
- 2.3.3-4) Zhijie Wang, Felix Jacobs 1, Martin Ziegler : Visualization of load transfer behavior between geogrid and sand using PFC2D, Geotextiles and Geomembranes, 2014.
- 2.3.3-5) V.D.H. Tran, M.A.Meguid. L.E.Chouinard: A finite-discrete element framework for the 3D modeling of geogrid-soil interaction under pullout loading conditions, Geotextiles and Geomembranes, 2013.
- 2.3.3-6) Sawamatsu, Nitta, Miyatake and Otsubo, Bearing resistance property of diameterexpanded anchorage in sandy ground, E3S Web of Conferences 92:17003, IS-Glasgow 2019.
- 2.3.3-7) 澤松俊寿,小堀秀俊,宇田川義夫,小林悟史,林豪人,岡崎賢治:砂地盤における拡径型アンカーの引抜き特性,土木学会論文集 C Vol. 66 No. 4, 845-858, 2010