

アルミ棒積層体模型による多数アンカー式補強土擁壁の安定性の検討

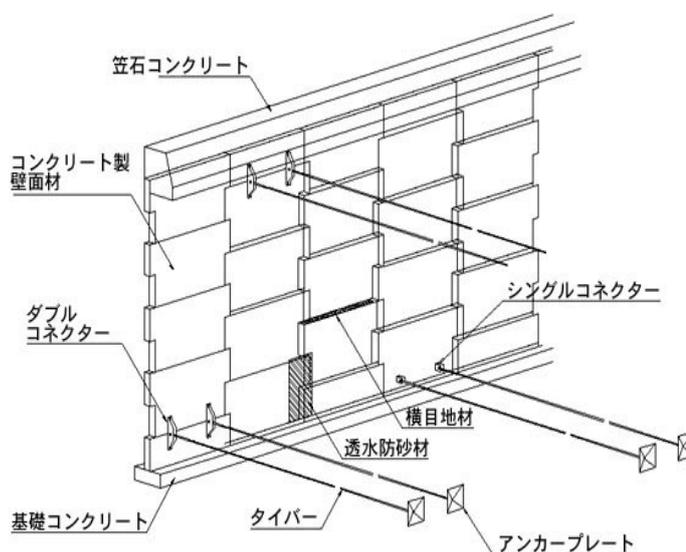
豊橋技術科学大学	正会員	三浦 均也
豊橋技術科学大学	学生員	森政 信吾
豊橋技術科学大学	学生員	村田 和也
豊橋技術科学大学	学生員	チン ホック
岡三リビック 株式会社	正会員	小浪 岳治
豊田高専	正会員	小林 睦

1. はじめに

多数アンカー式補強土壁工法は直壁を有する盛土を構築するための、テールアルメやジオテキスタイルと並ぶ補強土工法の一つである¹⁾。図-1のように複数のアンカーを補強材として用い、鉄筋コンクリート製の壁面パネルとアンカープレート群の間に挟まれた土塊をアンカーの引き抜き抵抗により拘束し補強している。同時に、壁面パネルで構成する直壁に作用する土圧はアンカー群が発揮する引抜き抵抗力の合力によってバランスしている。この場合、引き抜き抵抗は土と補強材の摩擦ではなく、むしろアンカーの支圧（土の受働土圧）のメカニズムによって発揮されるので、摩擦に比べると比較的大きな支持力が期待できる。このため、盛土材料の剛性或強度が比較的低く液性限界の低い粘性土のような場合でも、直壁を支持するには十分な引抜き抵抗が得られる可能性が高い。したがって、アンカープレートのサイズや配置間隔を調整することによって、より広い性質の土質と盛土の形状および高さに対応でき、他工法と比較しても「幅広い現地発生土を有効に利用できる」ことを特徴としている。

このような補強土擁壁の安定性は、「補強土の一体性確保」と「補強土全体の外力に対する安定性確保」の2つの観点から検討され、これら両検討を軸に設計・施工法が組み立てられている。これらの検討は通常アンカーや剛な擁壁の場合と同様に剛塑性解析をベースに構築されて整合性の取れた体系となっはいるが、連結された一連の壁面パネルが示す大きなたわみ性（曲げ剛性がほとんど期待できないこと）や、土の中に剛性の異なる補強材が介在する場合の相互作用とその影響を受けた補強メカニズムを的確に評価することは有限要素法を持ってしても困難であるため、一連の設計や施工においては少なくない仮定（設計におけるいわゆる見做し）が依然として残されており、安定性の評価手法は悲観的であって控えめで、それゆえ全体としては不経済な設計となっていることは否めないのが現状である。したがって、このような工法のより合理的で経済的な設計を確立するためには原位置における観測が重要であり、豪雨や強震の前後における追跡的な調査も欠かせないものとなっている。このように現場あるいは実物主義によって安定性評価法のバランスを常に検証することも重要であるが、一方では、単純化したモデルについての室内実験等により基本的なメカニズムを限界まで追求する努力も必要である。

本研究では、土の基本的な応力-ひずみ関係の検討、トンネル建設や地盤掘削に伴う地盤変形の問題などに広く用いられてきたアルミ棒積層体による模型を、研究対象である多数アンカー式補強土壁の安定



図□1 多数アンカー式補強土壁の構成¹⁾

性の検討に適用した。本報告では、先ず、補強土壁の安定性評価法の概要を解説するとする。その後、作成した実験装置の概要と実験方法を説明する。そして、一連の実験結果とその検討結果を示す。

2. 多数アンカー式補強土壁の安定性評価

表-2は多数アンカー式補強土壁の安定性の評価手法の体系を示している¹⁾。全体は「内部安定性の検討」と「外部安定性の検討」の二本の柱からなっている。前者の「内部安定性の検討」では、補強土体の内部における抵抗力と外力のバランスを照査することによって、補強土体の一体性を検討するものである。後者の「外部安定性の検討」では内部安定性のチェックによって補強土体の一体性が確保された後に、補強土体全体を剛体とみなし、その全体の安定性を検討するものである。地震時に対しても、同様な検討を実施している。

2.1 内部安定性の検討

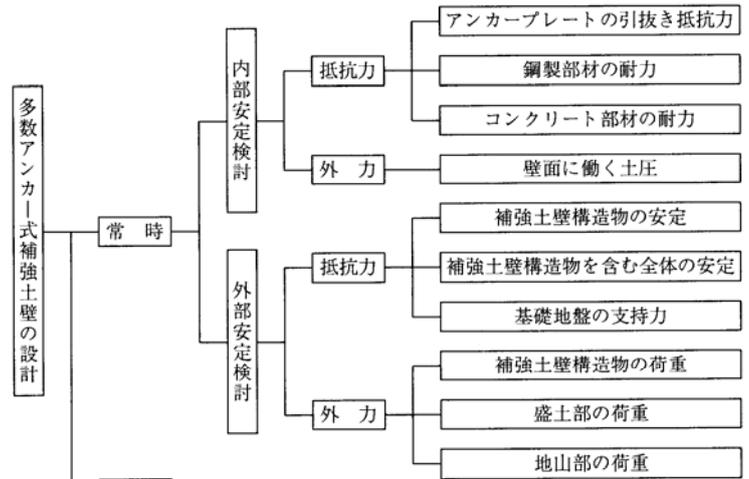
内部安定性の評価における外力は補強土体内部に発生する土圧であり、それにバランスする抵抗力はアンカーの引抜き抵抗力と各部材の耐力である。外力としての土圧は剛な擁壁の理論であるクーロンの土圧論を援用して図-2のように算定している。これにより得た土圧にタイバー1本あたりが分担する面積を乗じれば、タイバーに発生する張力 T_i を算定できる。

$$T_i = P_i \cdot \cos \delta \times \Delta H_i \times \Delta L_i$$

ここで、 P_i と δ はタイバーのレベルにおける土圧強度と壁面摩擦角である。

一方、アンカープレートに期待できる極限土圧応力 Q_u は、杭の支持力算定にしばしば用いられる、すべり線法を軸対称条件で展開することによって得られる次式によって算定することができる²⁾。

表-1 多数アンカー式補強土壁の安定性検討のフロー¹⁾



(注) 地震時設計外力および短期の抵抗力を用いた検討を行う。検討項目は常時を参照のこと。

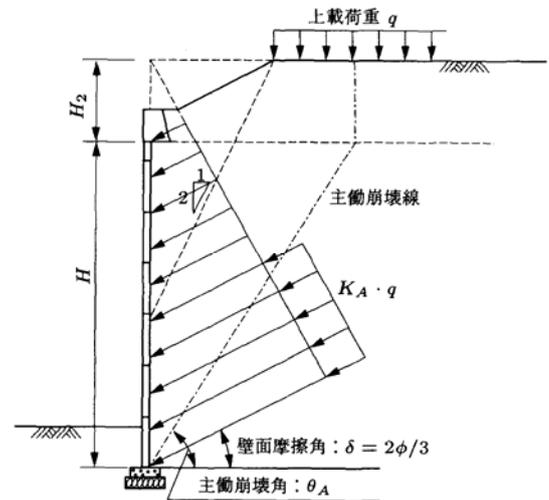


図-2 内部安定における土圧算定方法¹⁾

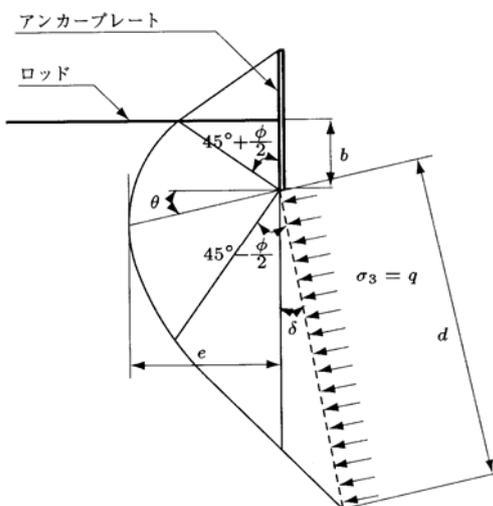


図-4 アンカーの引抜き抵抗算定法¹⁾

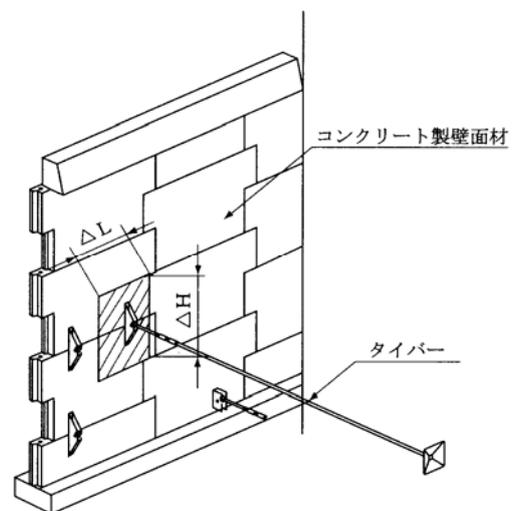


図-3 単一タイバーに働く引張力¹⁾

$$Q_{pu} = c \cdot N_c + q_p \cdot N_q - q_p$$

ここで、 N_c と N_q は数値的に得られた支持力件数である。

コンクリートと鋼材の破壊・破断の検討を除けば、土質工学的な内部安定性は次式の安全率 F_s で評価することができる。

$$F_s = Q_u A_p / T_i$$

ここで、 A_p はアンカープレートの面積である。

2.2 外部安定性の検討

内部安定性が保証される補強土体は一体となって運動し、その挙動を剛体とみなしている。よって、その安定性は通常の剛な擁壁と同様に、滑動と転倒に対する安定性評価が中心である。(図-5参照；安全率の算定方法は省略する)。この場合の安全率は複数の因子路と仮定の影響が絡み合った、複合的なものでありその定量的な評価が難しいところであるが、図示のように補強土体はタイロッドの長さの違いに合わせていびつであるので、この領域をどのように単純化して考慮するかについて、検討を要するところである。本研究の目標としては、補強土体の一体化と合間って、この補強領域の算定方法とその設計における位置付けを明らかにすることを挙げている。

実際の設計では、さらに、補強土体直下の支持力安定性と補強土体を含むより広い範囲のすべりに対する安定性の検討も含まれるが、ここでは説明を省略する。

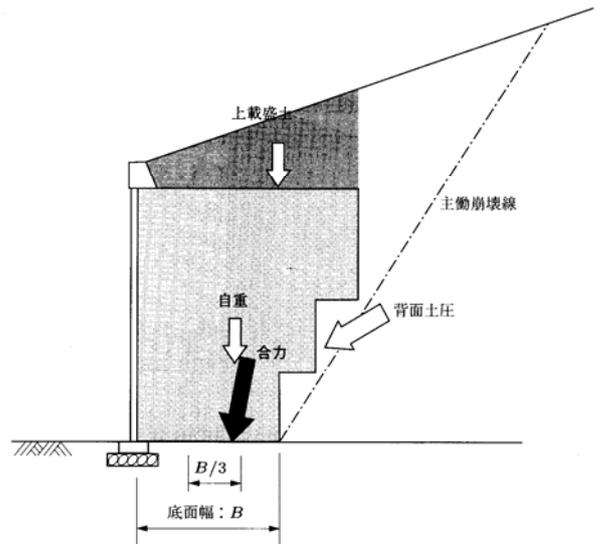


図-5 補強領域の滑動・転倒の検討¹⁾

3. アルミ棒積層体模型実験装置

本研究のために開発したアルミ棒積層体モデル実験装置を図-6に示す。十分に重量と剛性を有する架台上に固定した、上部を開放した剛な模型フレーム(幅100cm, 高さ60cm, 奥行き10cm)上にアルミ棒モデルを作成した。模型フレームは底部の左端がヒンジで固定され、もう一端をジャッキで支える構造にしている。作成後に模型を徐々に傾けることにより、は地震衝撃力や浸透力に対応する水平成分を有する物体力を作用させることが可能である。

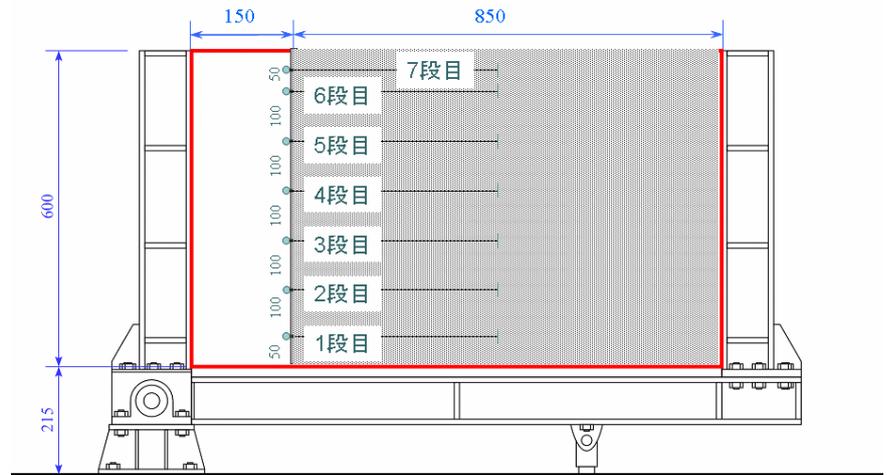


図-6 アルミ棒積層体モデル実験装置；正面図

本研究で準備した模型材料のアルミ棒は2種類で、長さは10cm(共通)、直径1.6mmと3.0mmの2種類を重量比で3:2に混合した状態で用いた。製造過程において、アルミ棒を切断すると端部に歪みが残るため、ドラムで研磨することによって慎重に整形した。しかし、その過程では、アルミ棒に塑性的な曲げが発生する場合も多く、最終的には、傾斜台を用いてアルミ棒の曲がり測定し、曲げの閾値を超えるものを選抜して除去し(直径1.6mmのもので10%程度)、残ったものを最終的に採用した。アルミ棒の密度は実験時における使用量から算定して、密度は約 20kN/m^3 であると判断し、また、せん断強さは岐阜高専吉村先生の研究室の設備を半日お借りして一面せん断試験を実施し、内部摩擦角 $\phi=20^\circ$ との結果を得た(上載荷重 $8.5\sim 17.0\text{kPa}$ の範囲で)。

補強土壁模型作成時の状態を次ページ写真1に示す。この完成状態の補強土壁模型は全体を6段に分けて(6本のアンカーで)補強している。高さ60cmで、幅は85cmである。完成後は、鉛の散弾粒子を袋に小分けした状態で上面に敷き並べて重ね、所定の上載圧のレベルまで載荷し、等分布荷重あるいは任意の分布荷重を与えて安定性を評価した。

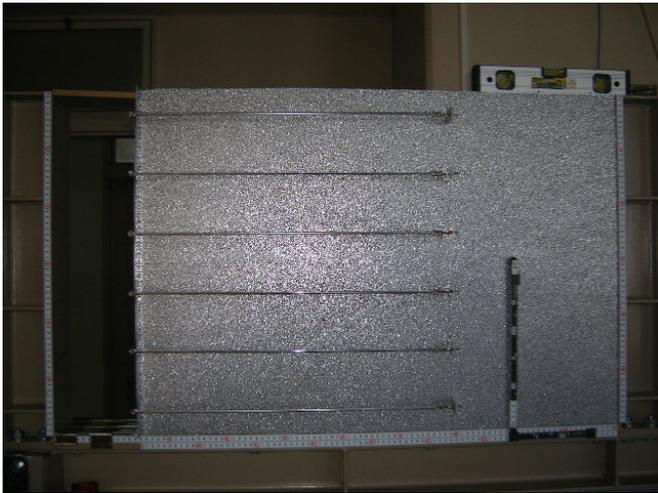


写真1 アルミ棒積層体モデル完成時正面



写真2 壁面パネルとタイバー接合部の状態



写真5 アンカープレートの結合状態；上から

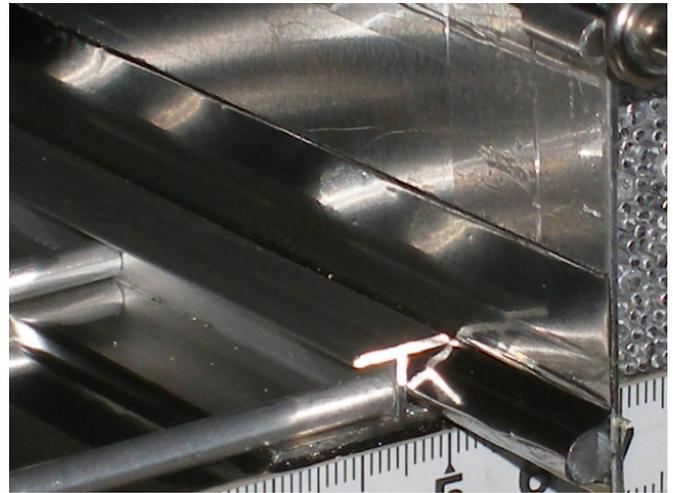


写真3 壁面パネル最下端でのヒンジ結合状態



写真6 盛土建設中の状態



写真4 盛土側面の拡大写真

壁面材は厚さ 3mm のアルミ板で、7枚の壁面パネルを粘着テープで接続することによって、曲げには抵抗しないようにした(写真2参照)。壁面パネルの接続部からは水平にロッドを張り出し、タイバーを取り付けた。タイバーは中空のアルミ棒(内径 3.0mm, 外径 4.0mm)で、両端には予め金属製のフックを接着し、補強土壁本体の両外側で壁面材とアンカープレートを連結した。アンカープレートは厚さ 3.0mm のアルミ板で、奥行き 20cm, 高さがことなる数種類(15, 20, 25, 30mm)を準備した(写真3参照)。なお、アンカープレートは奥行き方向で若干たわむ傾向が見られたので、そのたわみを押さえるために、鉄棒で補強した(図上では省略)。図-7は壁面材とアルミ棒、タイロッド、アンカープレートの相対的な寸法と位置関係を斜め上方から模式的に示したものである。

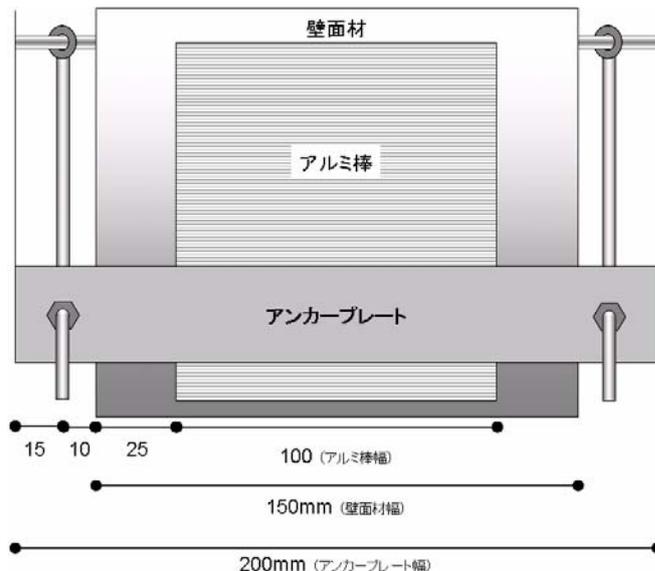


図-7 模型部材の模式図

補強土壁模型の作成時と載荷時の挙動は、タイバーの相対する側に取り付けたひずみゲージによる張伸びずみ測定(温度補正を実施)と各段階で撮影した写真の画像解析による変形の測定により観察した。予備的に実施したタイバーのひずみと張力の関係を図8に示す。そこで得られた校正係数を用いて実験データを整理した。なお、タイバー張力から壁面に作用する土圧を算定することが可能である。画像解析では、壁面パネルの接合部および補強土壁盛土完成時に格子点に貼るターゲット(直系 3mm の黒い円形シール)を追跡する。

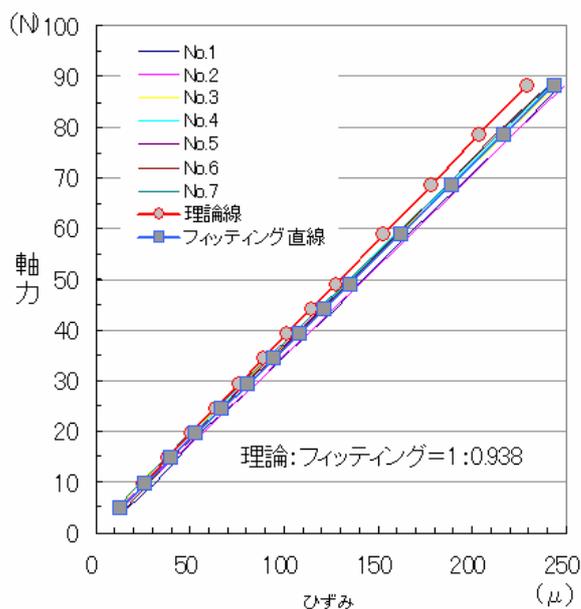


図-8 タイバー張力のキャリブレーション

4. モデル実験の内容と目的

本研究で実施した実験ケースを一覧表として表-2に示している。実験パラメータとしては、

- ① 補強領域の形状と寸法(外部安定で支配的な要因)
- ② アンカープレートの幅(内部安定で支配的な要因)
- ③ 布による補強の有無(内部安定に効く要因)

を考慮して、実験ケースを選定した。

本研究の目的は、内部安定の照査において確認できる補強領域をどのように算定し、その上で外部安定性においてその補強領域をどのように設定し、設計に考慮すべ

表-2 実験ケース一覧

ケース名	実験日	タイバー長		アンカープレート幅	布	施工	載荷				傾斜(度)	備考
		下	上				補強領域	除荷①	全面	除荷②		
01_Case 50	2007.11.20	54	54	1.0								
	2007.11.21	54	54	1.5								
02_Case 40	2007.12.03	40	40	1.5								
03_Case 40-40-20.1	2007.12.17	40	40	2.0		○	○	○	20	○		
04_Case 40-40-20.2	2007.12.20	40	40	2.0	●	○	○	○	○	○	2	(全面に対し)4/5載荷
05_Case 40-40-20.1	2008.01.08	40	40	2.0		○	○	○	25	○		
06_Case 40-40-25.1	2008.01.10	40	40	2.5		○	○	○	60	○		
07_Case 30-40-25.1	2008.01.17	30	40	2.5		○	○	○	○	○	3	ここから全面載荷は20kgまで
08_Case 30-40-20.1	2008.01.18	30	40	2.0		○	○	○	20	○		
09_Case 30-40-20.2	2008.01.23	30	40	2.0	●	○	○	○	○	○	2	
10_Case 20-40-25.1		20	40	2.5								ロッド長一定で30cmは、 工程上組み入れるのが難 しいのでやめる。
11_Case 20-40-20.1		20	40	2.0								
12_Case 20-40-20.2		20	40	2.0	●							
13_Case 20-30-25.1		20	30	2.5								
14_Case 20-30-20.1	予定	20	30	2.0								
15_Case 20-30-20.2		20	30	2.0	●							
15_Case 20-30-20.3		20	20	2.5								
15_Case 20-30-20.4		20	20	2.0								
15_Case 20-30-20.5		20	20	2.0	●							

きかを検討することであり、今回はその目標に向かう第一歩として、基礎的なケースを選択した。

補強領域に関する基本的な設定を模式的に示したのが図-9である。既存の設計においては、補強領域背面の傾斜に係なく、外部安定では補強領域を最もコンパクトな（控えめな）直方体としている。しかし、実験によって、図-9に右2つのケースのように傾斜させることが安定性の評価において許されるのならば、設計をより合理的で経済的な方向に進めることが可能になる。このようなことを論点として、実験を計画し、実施・解析した。

補強領域の形状(タイバー長さ)

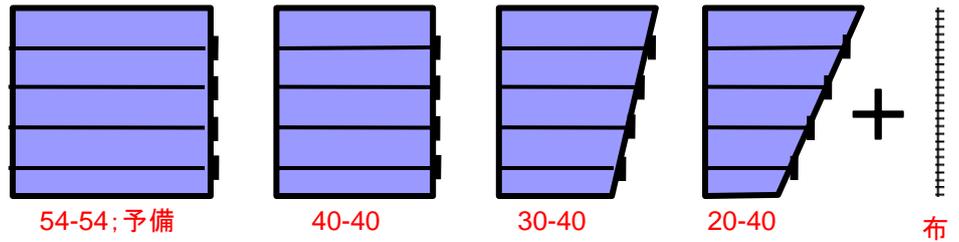


図-9 実験条件における補強領域の設定

5. モデル実験の結果および考察

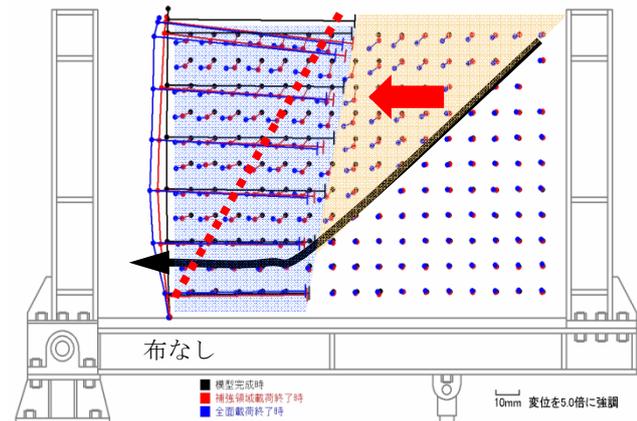
スペースの関係で、すべてのケースを縦横に比較して紹介することは難しいが、これから下記に示すいくつかのポイントについて実験結果を比較して示し、要点をまとめてみる。

一覧表として表-2に示している。実験パラメータとしては、① タイロッドの長さ（補強領域の形状と寸法）、② アンカープレートの幅、③ 布による補強の有無の三種類とした

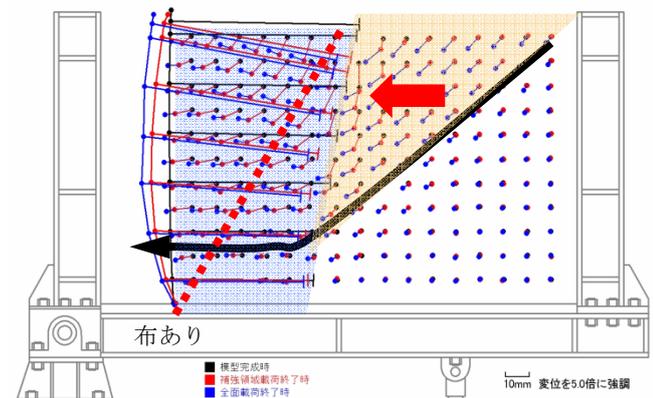
5.1. 壁面変位と変形

図-10には布の有無だけが異なるが、他の条件はほぼ等しいケースの破壊時の変形性情を示している。表-2にも変形の性情を読み取ることができるので、布のあるほうが拘束効果が幾分大きいように感じられるが、アンカープレートがこのケースのように2.0cm程度あれば、布の影響が一般的には見られなかった。アンカープレートが2cm幅のこのケースでは内部安定の安全率はおよび3.5程度であり、これ以上の安全率であれば補強領域内に明瞭なすべり面は見られなかったが、これ未満のアンカープレート幅では、周辺のアルミ棒とアンカープレートの相対的な動きが目立ち、引抜き抵抗が不足しているために自立しないケースがすべてであった。

変形の性情にも布の影響やアンカープレートの影響は小さいと見られるが、補強領域が直立するケースではやはり壁の頭部付近で変位量が最大になる傾向が全体として見られた。



タイバー長(30cm-40cm) アンカープレート2cm 布なし



タイバー長(30cm-40cm) アンカープレート2cm 布あり

図-10 壁面変位と変形挙動

5.2. 壁面に作用する土圧あるいはタイバーの張力分布

多数アンカー式補強土壁の場合、壁面パネル背後に作用する土圧すべて、タイバーの張力でバランスされるので、今回の実験のようにタイバーの張力をモニタリングすることによって、内部安定における外力に当たる、土圧の分布と大きさを知ることができる。また、これは直接アンカーに作用している引抜き力でもあ

るので、設計において最も重要な情報にもなっている。図-11~13はそれぞれ、補強土壁の完成直後と、壁面とアンカープレート群の間の補強領域にのみ载荷した状態、その後さらに一旦除荷した後で全面に载荷した時の張力分布を比較して示している。図には計算結果も一緒に示しているが、設計で採用している算定方法では補強領域の寸法や形状に関係なく、補強材の存在を一旦無視して土圧を算定している。このため、各図では計算結果は同じ値となっている。

まず、図-11を見ると、補強領域の大きさによらずほぼ主働土圧に相当する土圧が補強土度領域の内部で発生していると考えられる。実験ケースが限られていて、実験の再現性についても十分な考察ができていないが、現時点ではアンカープレートの大きさにも、布による拘束にもあまり影響されないように見える。

図-12に示した補強領域に载荷した場合には、計算値をやや下回るレベルまでにタイバー張力は増大していることが分かる。この場合も同様にアンカープレートの寸法や布による補強の影響は顕著に見られない。

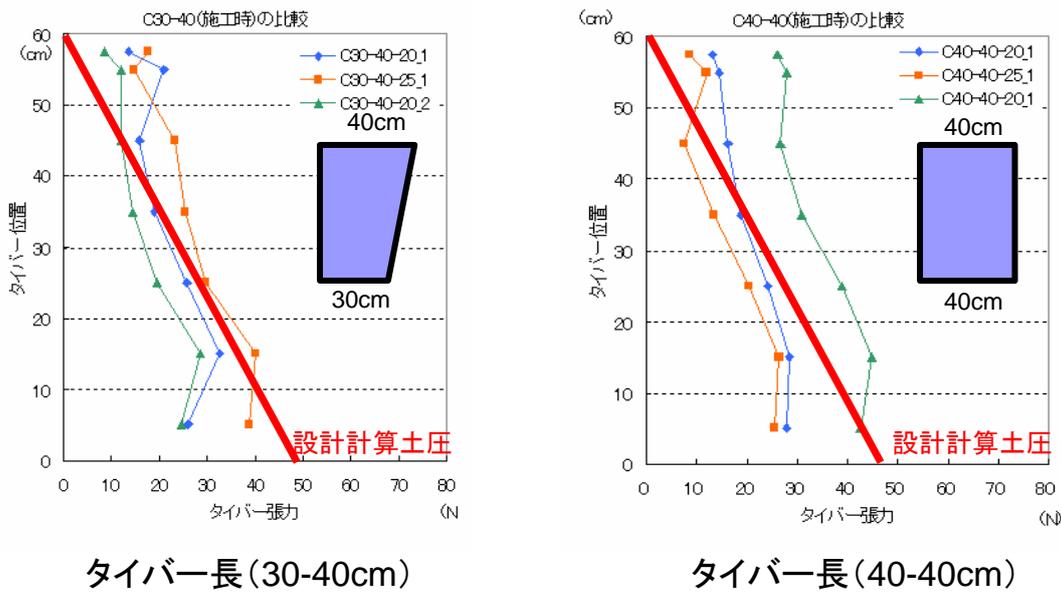


図-11 補強土完成時（载荷重なし）のタイバー張力分布

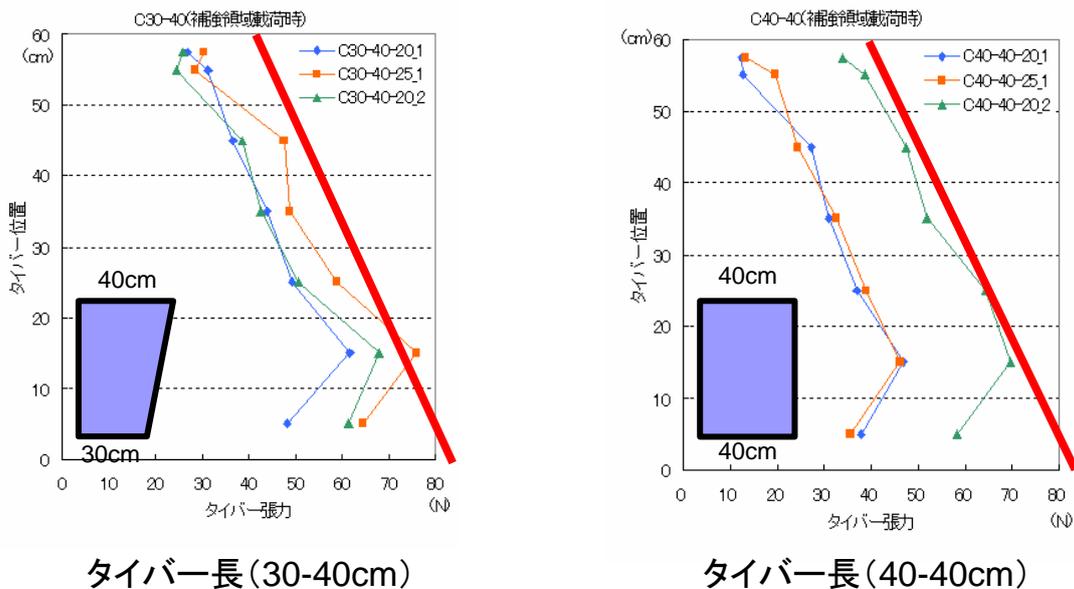


図-12 補強領域のみ载荷時のタイバー張力分布

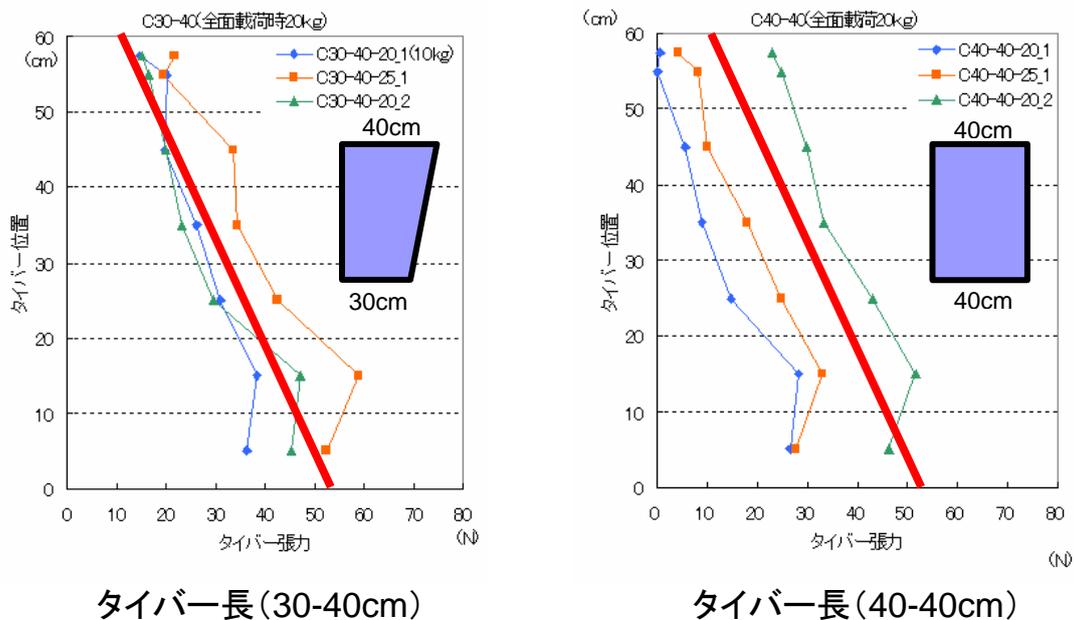


図-1 3 全面載荷時における張力分布

ただし、左右の比較からは補強領域がコンパクトであり、上に開いている左側のケースの方が張力の増分は大きいとあって良いと思われる。ちなみに、補強領域にのみ載荷する場合にはタイバーの張力が敏感に反応して補強効果が発揮されるため、すべての実験においてこの段階で破壊した例はなかった。

最後に、図-1 3の比較では、この場合の全面載荷も補強領域載荷と同様に、補強領域がコンパクトで上に開いている方が張力の増大は大きく、載荷段階でも補強効果が得られる可能性が高いと考えることができると考えられる。

6. おわりに

昨年度は、紹介した新しい実験装置を用いた実験シリーズの初年度にあたるため、実験手法の検討や試行錯誤にも時間を費やした。しかし、所定のケースをこなすことが可能であることも分かり、今後の展望を開くことはできた。今後は、実験の再現性をどのように保つかなどの問題も検討しながら実験を進めていく予定である。できるだけ定量的な検討が可能になるよう注意深く進める必要がある。

アルミ棒を用いたモデル実験の可能性としては、新しい形式の補強土壁の設計や施工に際しての適用を考えている。実験条件をパラメトリックに変化する検討が必要であるから、機会を見つけては新しいアイデアでチャレンジすることが可能になると考えている。

参考文献

- 1) 財団法人 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3版），2002
- 2) 野田太門：“すべり線法を用いた支圧支持力に関する研究，”豊橋技科大修士論文，2007