

土木研究所資料

補強土壁工法のアンカープレート 引抜き抵抗メカニズムに関する実験的検討

平成13年3月

国土交通省土木研究所
材料施工部施工研究室

Copyright © (2001) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

補強土壁工法のアンカープレート 引抜き抵抗メカニズムに関する実験的検討

施工研究室	室長	大下	武志
	主任研究員	青山	憲明
	研究員	橋本	聖
	交流研究員	平澤	雅己 ¹⁾

要 旨

平成10年度に実施した『現地不良発生土を改良して用いる多数アンカー式補強土壁の大型室内実験』では、アンカープレート周辺の土を固化材で部分的に改良した二重壁構造の多数アンカー式補強土壁について、アンカー（タイバー）の引抜き実験を行ってその破壊形態を確認した。しかし、その破壊形態からはアンカー引抜き抵抗力式については3種類の算定方法を提案したのにとどまった。

本実験は、疑問が残されている部分改良土中に設置されたアンカープレートの引抜き抵抗メカニズムの解明と、その設計方法（引抜き抵抗力の算定方法）を提案することを目的とする。

キーワード：アンカー式補強土壁工法、改良土、引抜き抵抗力、引抜き抵抗メカニズム、塑性破壊式、コーン破壊式、パンチング破壊式

1) 交流研究員在職期間（平成11年4月1日～平成12年3月31日）

はじめに

多数アンカー式補強土壁工法は、1983年に建設省中国地方建設局（現国土交通省中国地方整備局）の道路改良工事で採用されて以来、施工実績が1,600件を越えており今日では既に一般的な工法として認知されている。最近の建設環境は、公共事業の工事費縮減や環境への影響対策を余儀なくされており、この傾向は今後も続くものと思われる。

多数アンカー式補強土壁工法は擬似2重壁構造を有しており、2重壁の内側の土は壁の拘束効果によって補強されている。このため、現場発生土（粘性土系）のような盛土材料を利用できることを特徴としているが、盛土材料として使用できない場合、アンカープレート周辺を部分的に土質改良して補強土壁を構築することによって、現場発生土をより有効利用できると考える。これは既に実大実験によって有効性や安定性が実証されている⁷⁾。

しかし、アンカープレート周辺の土質材料が改良土の場合、アンカープレートが引拔けの塑性領域の範囲は、通常の盛土材料とは異なると想定できることから、現行の Terzaghi の支持力公式が適用できない可能性があると考えた。

本報告書は、部分改良土中におけるアンカープレートの引抜き抵抗メカニズムを解明するため『不良土を改良して用いるアンカー式補強土壁に関する小型模型アンカー引抜き実験』を行い、改良土や砂質土で部分改良した場合の引抜き抵抗力の算定（修正式）方法を提案した。

平成13年3月

施工研究室	室	長	大下	武志
	主任研究員		青山	憲明
	研 究 員		橋本	聖
	交流研究員		平澤	雅己

目 次

はじめに

1. アンカープレートの引抜き抵抗	
1.1 現行の設計式	1
1.2 改良土の提案式	2
2. 小型模型引抜き実験の概要	
2.1 実験目的	3
2.2 概要	3
2.3 実験方法	4
2.3.1 実験装置	4
2.3.2 模型材料	8
2.3.3 実験ケース	9
2.3.4 盛土模型の作成方法	10
2.3.5 引抜き試験方法	15
3. 実験結果および結果の解析	
3.1 引抜き試験結果と考察	16
4. アンカープレートの極限引抜き抵抗の検討（実験値と計算値の比較）	
4.1 改良なしの場合	28
4.2 部分改良の場合	31
5. アンカープレートの引抜き変位量－引抜き抵抗関係の検討	
5.1 許容引抜き抵抗算定方法（設計法）の検討	36
5.2 実大実験結果による部分改良の引抜き抵抗算定法の検証	41
6. まとめ	43
7. あとがき	45
参考資料	46

1. アンカープレートの引抜き抵抗、現行の設計式と提案式

1. 1 現行の設計式

現行の設計式は、多数アンカー式補強土壁工法設計・施工マニュアル『以下、マニュアル』によるとアンカープレートの引抜き抵抗は「地盤を剛塑性とみなしたすべり線法によって求め」、「土の質量を無視しアンカープレート周辺が軸対象となっているものとして解析」することになっている。これは、杭の先端支持力を求める場合と同様にアンカープレートの前面に弾性楔領域が生じ、ここから放射状の塑性領域がプレートを回り込むように発達するものとして解析するものである(図-1.1)。

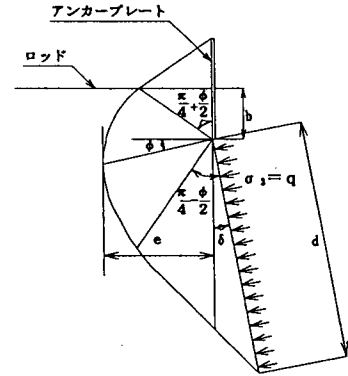


図-1.1 アンカープレート周りのすべり線

解析はプレート形状を円板に近似し、プレート周りの塑性領域発達形状がタイバーを軸とする軸対象と考える。しかし、盛土(剛塑性体)に対する軸対象の条件下での一般的な抵抗算出式(平衡条件式の数式解)を求めることは困難であるため、数値解析法(差分法)によりアンカープレートの単位面積当たりの引抜き抵抗を算出する方法を用いた。アンカープレートと土の摩擦を考慮すると、アンカーが引き抜かれる方向には角度 $(45^\circ + \phi/2)$ の楔状の剛領域が発生する。このとき、アンカープレートの単位面積当たりの引抜き抵抗 Q_{pu} は、Terzaghi の支持力と同様の以下の式として設計されている。

アンカープレート引抜き抵抗は、すべり線破壊線の状態を想定して次式により算定する。

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

$$Q_{ps} = Q_{pu} / F_s$$

$$T_a = Q_{ps} \cdot A_p$$

ここに、 Q_{pu} : アンカープレートの単位面積当たりの極限引抜き抵抗 (kN/m²)

c : 盛土材料の粘着力 (kN/m²)

q_p : 地盤の拘束圧 ($= \gamma \cdot Z_{pi} \cdot K_A + q K_A$) (kN/m²)

N_c 、 N_q : アンカープレートの引抜きに関する支持力係数

Q_{ps} : アンカープレートの単位面積当たりの許容引抜き抵抗 (kN/m²)

F_s : 安全率

T_a : アンカープレートの許容引抜き抵抗 (kN/本)

A_p : アンカープレートの面積 (m²)

1. 2 改良土の提案式

改良土に対するアンカープレートの引抜き抵抗力は、実物大の引抜き試験結果⁷⁾ からすべり線破壊の状態を次式により算定することを提案している。

改良土に対するアンカープレート引抜き抵抗力は、すべり線破壊線の状態を想定して次式により算定する。

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

$$= q_u / 2 \cdot 6.5 + q_p$$

$$Q_{pa} = Q_{pu} / F_s$$

$$T_a = Q_{pa} \cdot A_p$$

ここに、 Q_{pu} : アンカープレートの単位面積当りの極限引抜き抵抗力 (kN/m^2)

c : 改良土の粘着力 ($= q_u / 2$) (kN/m^2)

q_p : 地盤の拘束圧 ($= \gamma \cdot Z_{pi} \cdot K_A + q K_A$) (kN/m^2)

N_c, N_q : アンカープレートの引抜きに関する支持力係数 ($N_c=6.5, N_q=1.0$)

Q_{pa} : アンカープレートの単位面積当りの許容引抜き抵抗力 (kN/m^2)

F_s : 安全率

T_a : アンカープレートの許容引抜き抵抗力 (kN/本)

A_p : アンカープレートの面積 (m^2)

提案式は、地盤を剛塑性とみなしたすべり線法によって求めるものとし、施工管理が比較的容易な改良土の一軸圧縮強さから $c=q_u/2$ 、 $\phi=0$ を用いて、引抜き抵抗力を算出している。しかし、この提案式は、検証実験の事例数も少なく、塑性領域の発達域、進展角の度合いやその時の拘束効果などに対する明確な検証データが得られていないため、実験値に対してかなり安全側の設計値を算出している。

こうした背景から『不良土を改良して用いるアンカー式補強土壁に関する小型模型アンカー引抜き実験』を行い、部分改良土中におけるアンカープレートの破壊形状や長期・短期強度の地盤定数を用いて、上記想定式や他の計算式より引抜き抵抗力を算出し、実測値との相関関係を検証した。

2. 小型模型引抜き実験の概要

2. 1 実験目的

平成 10 年度に実施した「現地不良発生土を改良して用いる多数アンカー式補強土壁の大型室内実験」では、アンカープレート周辺の土を固化材で部分的に改良した二重壁構造の多数アンカー式補強土壁について、実大擁壁による載荷実験とともにアンカーの引抜き実験を行ってその挙動を確認した。しかし、アンカーの引抜き抵抗力については明確な算定方法を提案することが困難であった。

本実験は、疑問が残されている部分改良土中に設置されたアンカープレートの引抜き抵抗メカニズムの解明と、その設計方法（引抜き抵抗力の算定方法）の確立を目的とする。

2. 2 概要

本実験は、引抜き載荷装置及び上下拘束載荷装置の付いた土層内に疑似盛土を作成して、盛土内に設置したアンカープレートの引抜き試験を行い、盛土条件（部分改良の有無、土質・改良強度の違い）及び土被り（拘束圧）がアンカープレートの引抜け挙動（引抜き量と引抜き抵抗力の関係、破壊形態等の相違）に及ぼす影響について検証した。

実験に用いた引抜き試験装置の概要を図-2.1 に、実験ケース一覧を表-2.1 に示す。

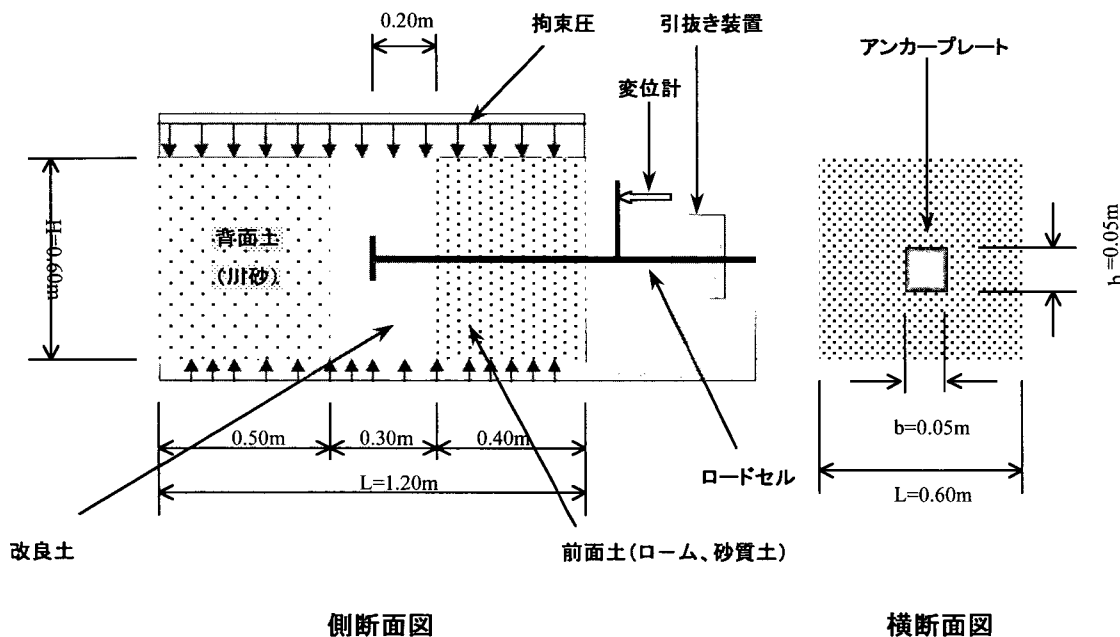


図-2.1 引抜き試験装置

表-2.1 実験ケース一覧

		前 面 盛 土	改良土強度 q_u (kN/m ²)	拘束載荷圧 w (kN/m ²)	検 討 内 容
基 準 試 験	CASE①	標準砂	—	10	盛土全体を標準砂、砂質土、高含水ロームとし、各々拘束圧を変化させ、引抜き抵抗力和土質試験結果を用いた極限引抜き抵抗力計算値との比較を行う。
	CASE②	標準砂	—	40	
	CASE③	標準砂	—	70	
	CASE④	砂質土	—	10	
	CASE⑤	砂質土	—	40	
	CASE⑥	砂質土	—	70	
	CASE⑦	高含水ローム	—	10	
	CASE⑧	高含水ローム	—	40	
	CASE⑨	高含水ローム	—	70	
部 分 改 良 試 験	CASE①	なし	50	—	セメント改良土の改良強度の違いによる引抜き抵抗力や破壊形態の相違を確認する。
	CASE②	なし	100	—	
	CASE③	なし	200	—	
	CASE④	なし	500	—	
	CASE⑤	なし	800	—	
	CASE⑥	なし	900	—	
	CASE⑦	高含水ローム	100	10	低強度の場合の拘束圧及び前面土の違いによる引抜き抵抗力や破壊形態の相違を確認する。
	CASE⑧	高含水ローム	100	40	
	CASE⑨	高含水ローム	100	70	
	CASE⑩	砂質土	100	70	
	CASE⑪	高含水ローム	500	10	高強度の場合の拘束圧及び前面土の違いによる引抜き抵抗力や破壊形態の相違を確認する。
	CASE⑫	高含水ローム	500	40	
	CASE⑬	高含水ローム	500	70	
	CASE⑭	砂質土	500	70	
	CASE⑮	なし	砂質土置換	—	改良土部を良質土で置き換えた場合の引抜き抵抗力について他の結果との比較を行う。
	CASE⑯	高含水ローム	砂質土置換	10	
	CASE⑰	高含水ローム	砂質土置換	40	
	CASE⑱	高含水ローム	砂質土置換	70	

※本資料は改良強度 $q_u=100\text{kN/m}^2$ を低強度、 $q_u=500\text{kN/m}^2$ を高強度と定義する。

2. 3 実験方法

2. 3. 1 実験装置

引抜き試験装置は、土槽（内寸法が幅 0.60m、高さ 0.60m、奥行き 1.20m）、引抜き装置、加圧装置、計測装置よりなる。引抜き試験装置等詳細は写真-2.1～2.5 に示す。

引抜き装置は、可変速モーターとスクリュージャッキから成り、引抜き速度を 0.5～10.0mm/min 程度に調整できる。

加圧装置は、土槽内上下部にあるゴム袋製の圧力室に空気圧をかけることにより、最大 100kN/m² 程度まで任意の拘束圧に調整できる機構となっている。

計測装置は、最大 20kN のロードセル、最大 100mm の差動トランス型変位計を装着した。

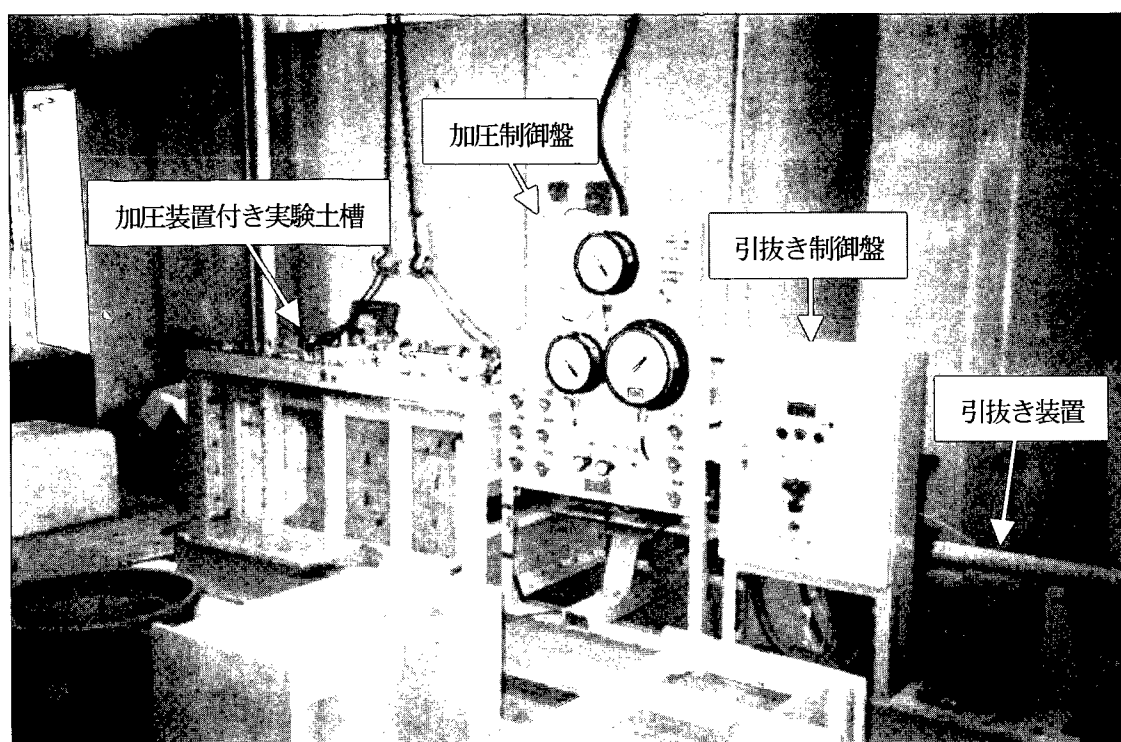


写真-2.1 実験装置全景

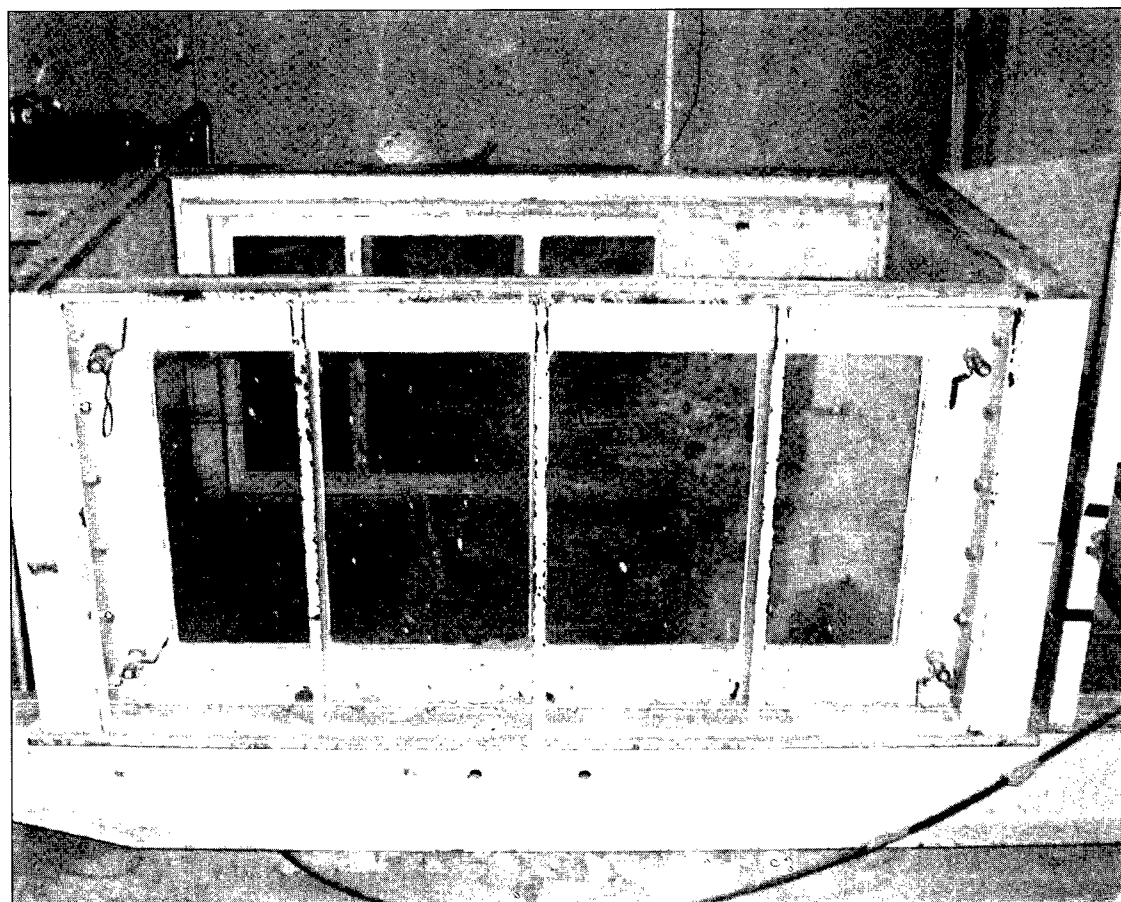


写真-2.2 実験土槽

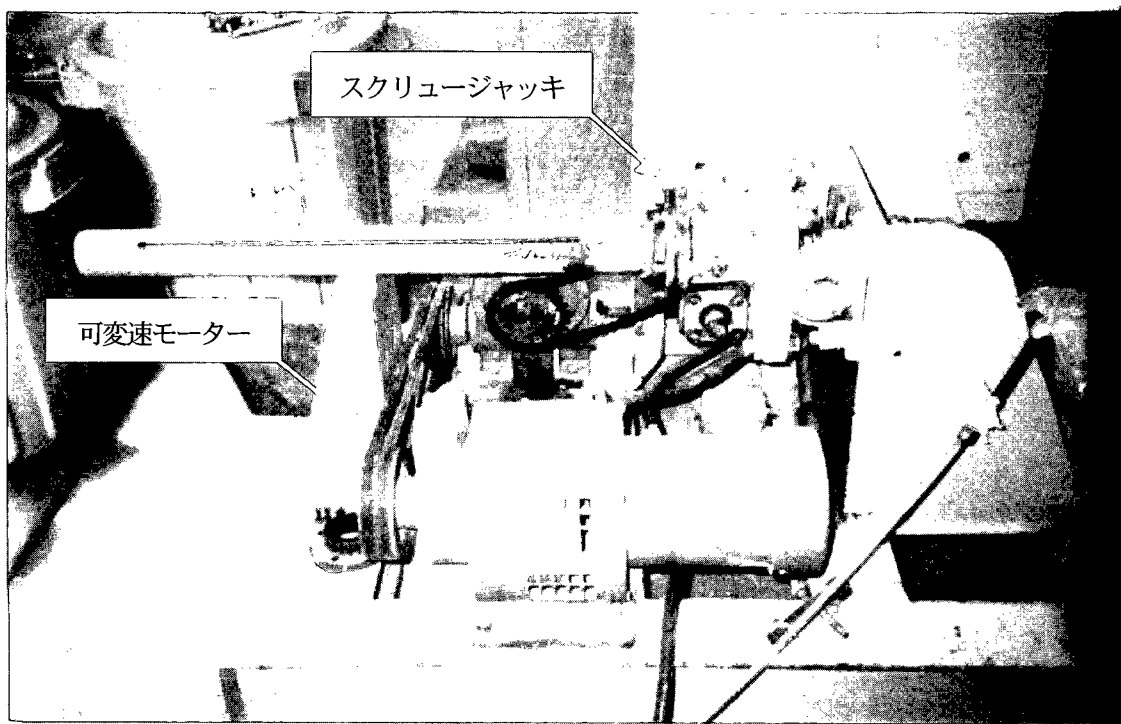


写真-2.3 引抜き装置

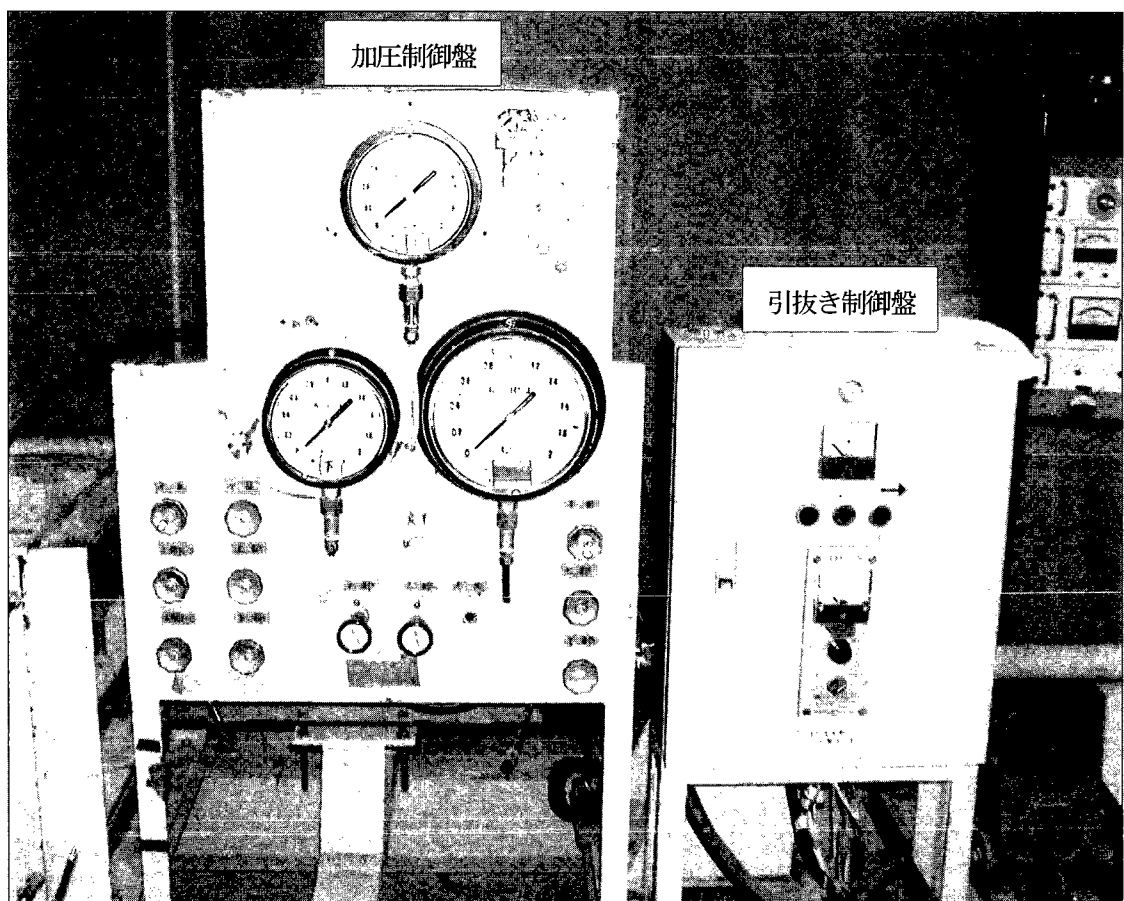


写真-2.4 加圧制御盤、引抜き制御盤

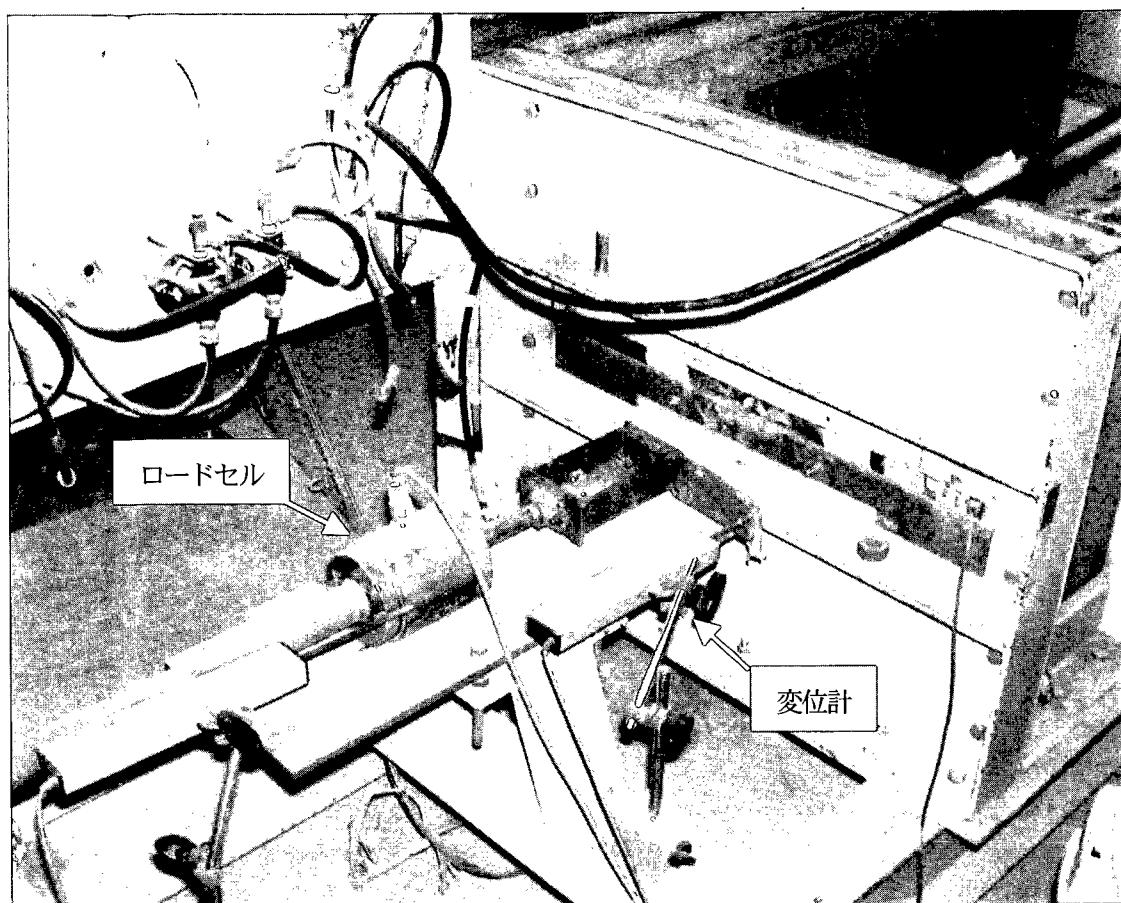


写真-2.5 計測装置

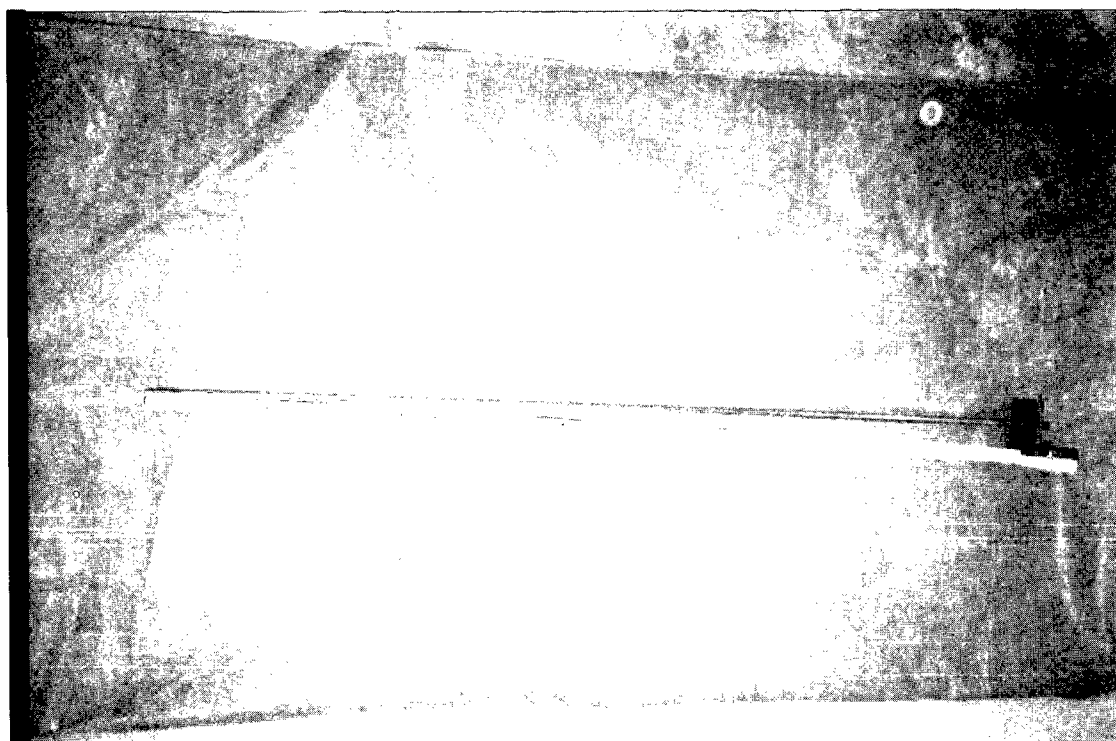


写真-2.6 アンカー模型

2. 3. 2 模型材料

(1) 盛土材料

盛土材料は、標準砂、砂質土、高含水ローム、セメント改良土（流動化処理土）を用意し、セメント改良土については、セメント配合率を変化させて強度を調整した。各材料の物性を表-2.2 に示す。

(2) アンカー模型

アンカー材の模型は、両端をネジ切りしたφ8mm・長さ 0.9m の鋼棒の一端にプレート寸法 0.05m×0.05m・厚さ 7mm の鋼板を中央に穴を開けて通してナットで固定し、反対側の一端を引抜き装置に連結できるように改良した。アンカー模型の写真は写真-2.6 に示す。

表-2.2 盛土材料の物性

材料名	標準砂	砂質土 (山砂)	高含水ローム (関東ローム)	セメント改良土（ローム）	
				低強度 (P*1=18%)	高強度 (P*1=28%)
産 地	豊浦	江戸崎	江戸崎		
土質分類	S P	S F	V H ₂		
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.57	1.80	1.42	1.35	1.37
含水比 W (%)	0	11	100*2		
相対密度 D_r	0.795				
締固め度 (%)		87			
一軸圧縮強度 (kN/m ²)				85	480
粘着力*3 (kN/m ²)	不飽和状態	0.0	17.2	29.6	133.5
	飽和状態		20.0 (0)	15.4 (9.5)	197.0 (78.9)
内部摩擦角*3 (度)	不飽和状態	38.0	34.4	20.1	30.5
	飽和状態		3.8 (35)	15.3 (38.4)	6.3 (47.0)

* 1 : セメント添加率 $P = \{ (\text{セメント}-土 (W/C=50\%) \text{の重量}) / (\text{流動化処理土} (W=173\%) \text{の重量}) \} \times 100$

* 2 : 高含水ロームは、関東ロームに水を加えて強制練りミキサーにより混練し、水分が自然に分離しない程度の含水比 ($w \approx 100\%$) に調整した。

* 3 : 標準砂—面せん断試験、砂質土・改良土（不飽和）—CD試験、ローム・改良土（飽和）—CU試験、
() 内 : 有効応力表示

2. 3. 3 実験ケース

実験ケースは次の通りである。

1. 基準試験
2. 部分改良試験

基準試験は3種類の盛土材を対象としている。

- i) CASE①～③の場合、前面盛土は標準砂、拘束圧は $10 \cdot 40 \cdot 70\text{kN/m}^2$ に変化させたパターン
- ii) CASE④～⑥の場合、前面盛土は砂質土、拘束圧は $10 \cdot 40 \cdot 70\text{kN/m}^2$ に変化させたパターン
- iii) CASE①～③の場合、前面盛土は高含水ローム、拘束圧は $10 \cdot 40 \cdot 70\text{kN/m}^2$ に変化させたパターン

検討内容は、3種類の盛土（標準砂、砂質土、高含水ローム）を3段階の拘束圧に変化させた時の引抜き抵抗力和、土質試験結果から得た土質定数（ c 、 ϕ ）を用いて算出した極限引抜き抵抗力計算値との比較を行うものである。

部分改良試験は4パターンの試験を検討する。

- i) CASE①～⑥は、前面盛土がなく、セメント改良土の改良強度の違いによる引抜き抵抗力や破壊形態の相違を確認する。
- ii) CASE⑦～⑩は、低強度の場合、拘束圧及び前面土の違いによる引抜き抵抗力や破壊形態の相違を確認する。
- iii) CASE⑪～⑭は、高強度の場合、拘束圧及び前面土の違いによる引抜き抵抗力や破壊形態の相違を確認する。
- iv) CASE⑮～⑱は、改良部を砂質土で置換えた場合の引抜き抵抗力を他の結果と比較する。

2. 3. 4 盛土模型の作成方法

(1) 基準試験用盛土

基準試験用の盛土模型は、砂質系の土材（標準砂、砂質土）については土槽内に所定量を4層（1層0.15m）に分けて投入し、各層を締め固めプレートで所定回数突き固めて作成した。（写真-2.7）

また、高含水ロームは手で押して容易に流動してしまうことから所定量を土槽内に少しずつ手で押し込んで作成した。

アンカーは所定の位置（プレート位置：土槽中央）に設置する際、引抜き方向に対してタイバー（鋼棒）軸がずれないように注意して設置した。（写真-2.8）

(2) 部分改良試験用盛土

セメント改良土による部分改良は、部分改良部を別型枠により流動化処理して打設し、7日養生したものを所定の位置に吊り込んでセット、その前面および背面に土材を詰めて作成した。

○流動化処理による部分改良部の作成は以下の通りである。

- ①自然含水比（ $W=73\%$ 程度）のロームを $\#10\text{mm}$ ふるいに通して粒径調整をする。
- ②粒径調整したロームを所定量バケツに移し、水を加えて所定の含水比（ $W=173\%$ ）に調整した後、1昼夜寝かせて水を十分になじませる。
- ③水浸した土をハンドミキサーによりよく混練した後、 $W/C=50\%$ のセメントペーストを所定量添加して再度ハンドミキサーによりよく混練して流動化処理土を作成する。（セメント添加量は、あらかじめ配合試験を行い決定）（写真-2.9）
- ④所定の位置にアンカーを設置した型枠（内寸 $0.3\text{m} \times 0.59\text{m} \times 0.6\text{m}$ ）内に流動化処理土を流し込んで改良体を作成する。このときアンカープレート位置およびアンカー軸がずれないように十分注意して施工する。（写真-2.10、2.11）
- ⑤改良体の作成と同時に一軸圧縮強度確認用の供試体を作成する。（写真-2.12）

○セメント改良土による部分改良盛土の作成は以下の通りである。

- ①セメント改良土は、型枠をつけたまま7日間自然養生した側面の枠のみを脱型し、底板に付けた吊り金具にワイヤーロープを取り付け、クレーンで試験装置土槽内の所定の位置に吊り込み、セットする。
- ②改良体の前面側には、高含水ロームないし砂質土を詰め、背面側に川砂を詰める。土材の投入・締め固めは、基準試験の際と同様に行う。（写真-2.13）

砂質土置換による部分改良盛土模型の作成は、先に置換部分を作成する方法を採った。（写真-2.14）

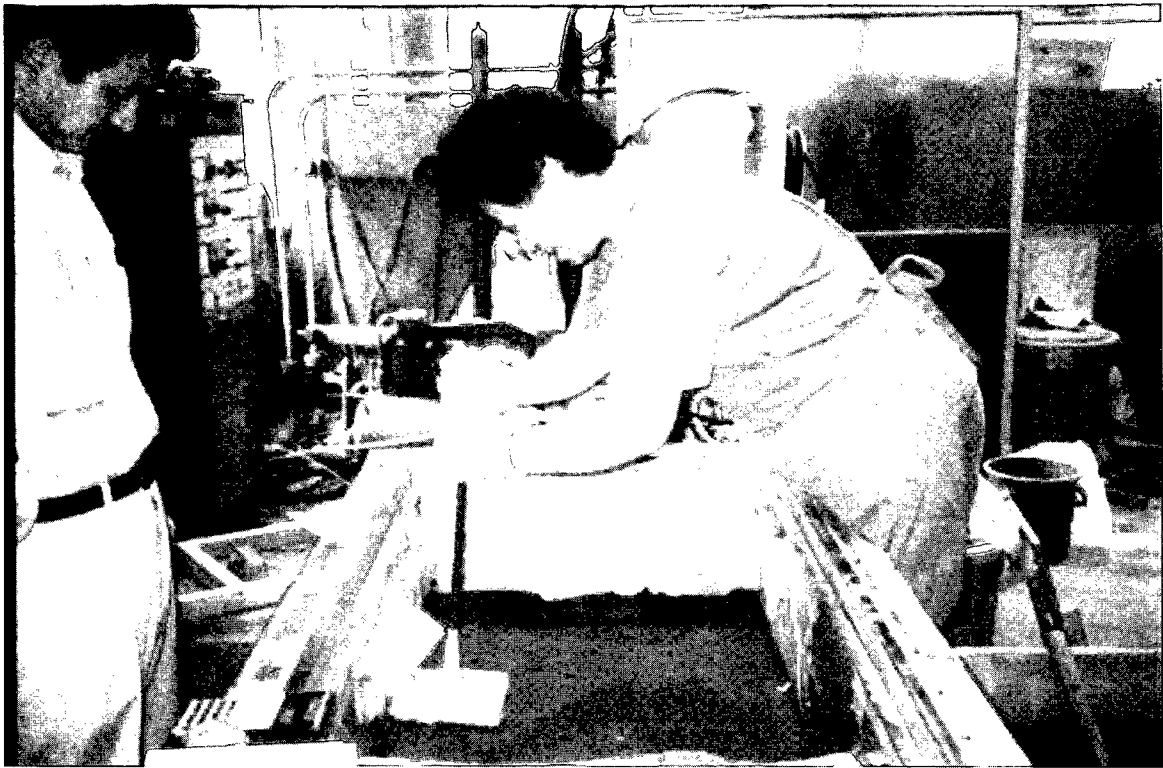


写真-2.7 砂質土締め状況

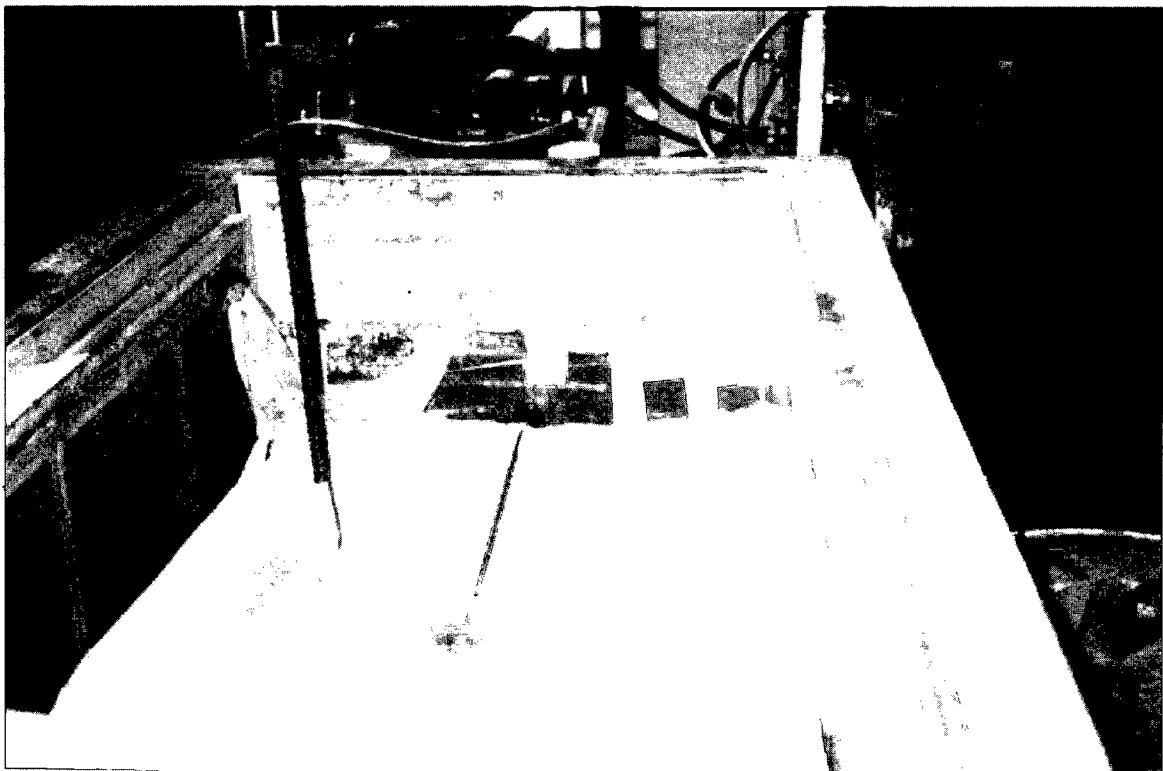


写真-2.8 アンカー設置状況

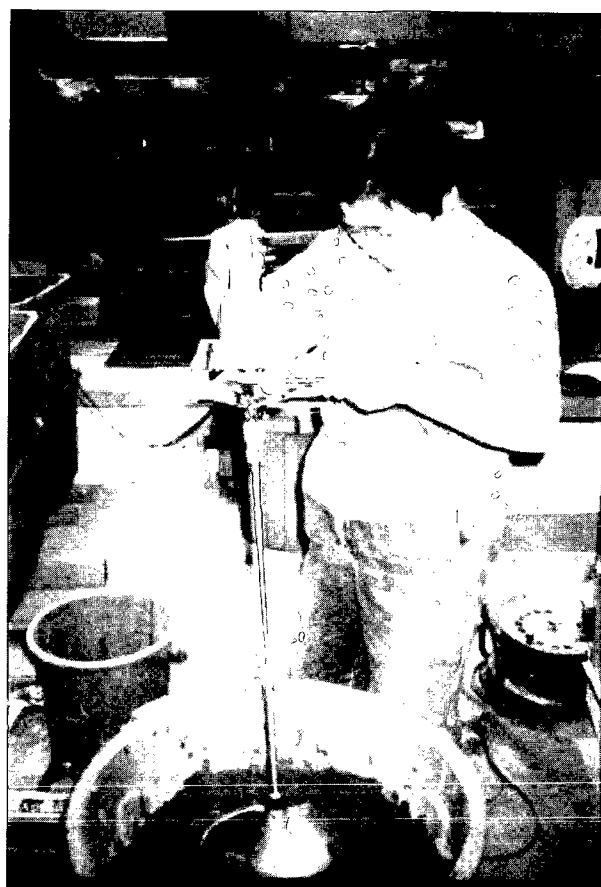


写真-2.9 流動化处理土作成状況

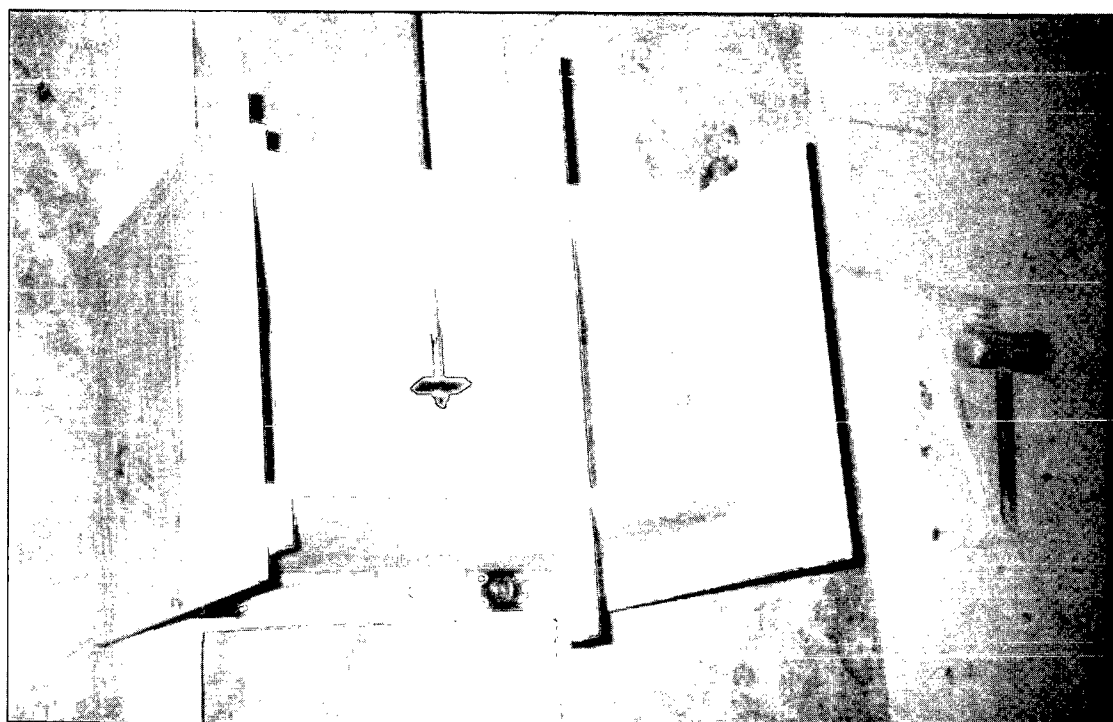


写真-2.10 改良体作成用型枠

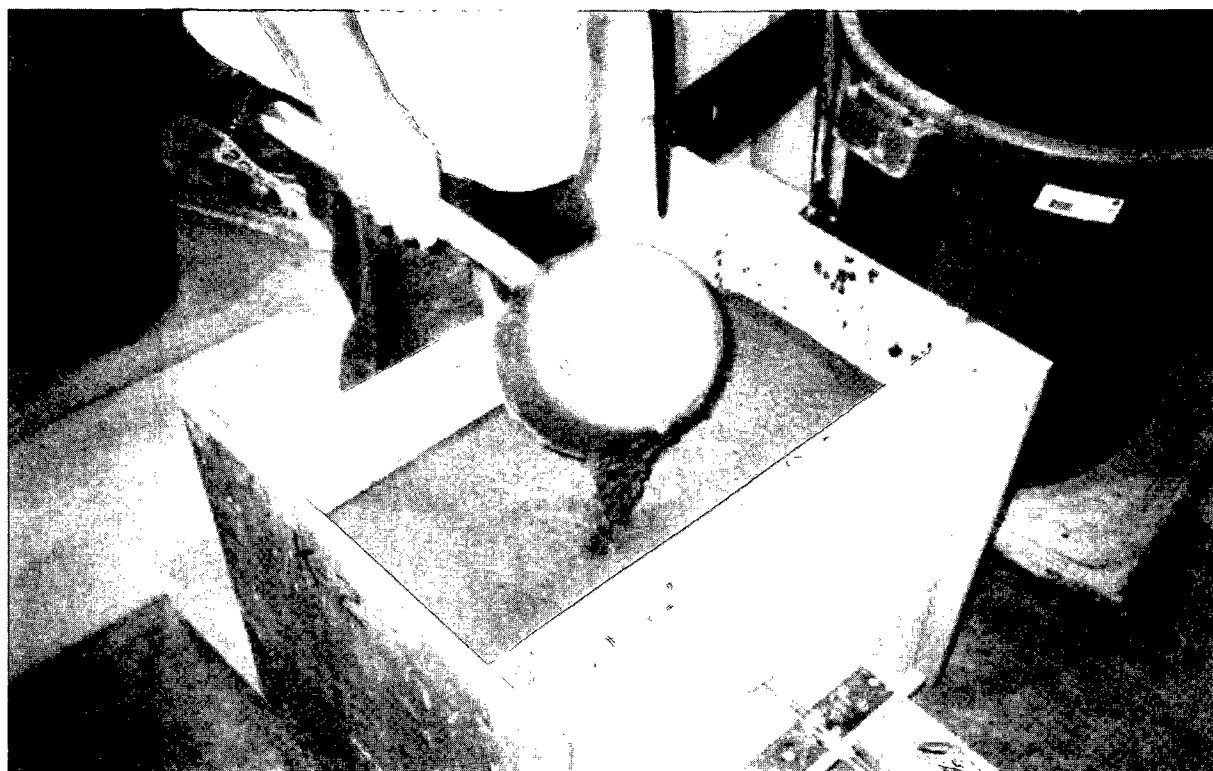


写真-2.11 改良体作成状況（流動化処理土打設）



写真-2.12 強度確認用供試体作成状況



写真-2.13 高含水口ム詰め込み状況



写真-2.14 砂質土置換部分改良試験用盛土模型作成状況

2. 3. 5 引抜き試験方法

(1) 引抜き試験方法

引抜き方法は変位制御方式（引抜き速度を $1\text{mm}/\text{min}$ ）とし、拘束圧制御盤で土槽内に所定の拘束圧をかけた後、引抜きを開始して、引抜き荷重とアンカー変位を5秒間隔で自動計測した。

(2) 改良体のみの引抜き試験方法

改良体のみ（前面土なし、拘束圧なし）の試験方法は、改良体を土槽内にセットし、改良体全体が変位しないように両端を栈木枠で支持して引抜き試験を行った。（写真-2.15）

(3) セメント改良土の強度確認

セメント改良土による部分改良を行ったケースは、改良体作成時に同時に採取した供試体の一軸圧縮試験を行って強度の確認を行った。

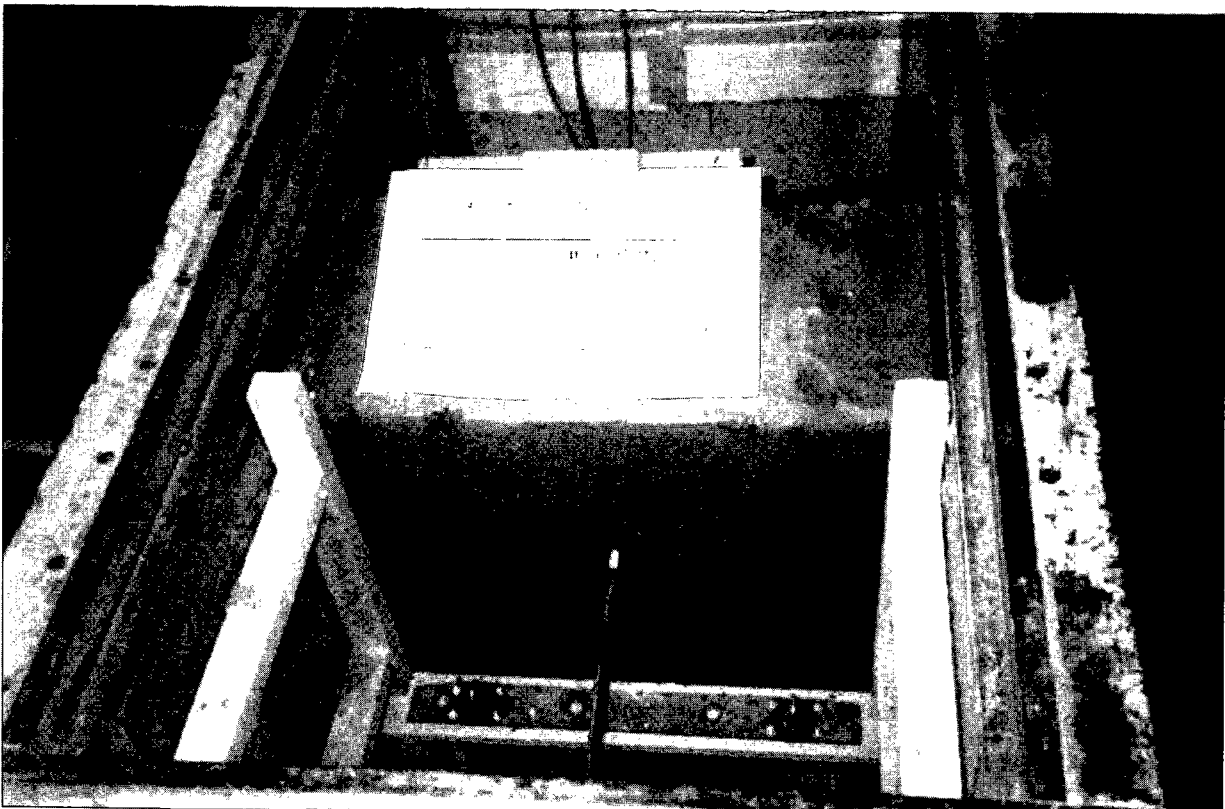


写真-2.15 拘束圧非載荷条件試験状況

3. 試験結果および結果の解析

3. 1 引抜き試験結果と考察

今回のアンカー引抜き試験結果から下記のことが分かった。

- ・ 変位－荷重曲線の形態や引抜き抵抗力の大きさは土質条件により異なり、各土質条件において、変位－引抜き力曲線は拘束圧が大きいほど勾配を増し、引抜き抵抗力は拘束圧が大きいほど大きくなる。この結果は既往の実験結果や引抜きメカニズム理論と合致している。(図-3.1～3.8 及び表-3.1)
- ・ セメント改良土中に設置したアンカープレート引抜き抵抗力は一軸圧縮強度にほぼ比例して増加する傾向である。(図-3.9)
- ・ 砂質土で置換して部分改良した場合の変位－引抜き力曲線は、各拘束圧において全体が砂質土の場合とほぼ同じ立ち上がりを示し、徐々に勾配をゆるめてピークを表す形となっている。(図-3.7)
- ・ セメント改良土で部分改良した場合、引抜き力がピーク値の引抜き量は、低強度では拘束圧が大きいほど大きくなり、高強度では拘束圧の大きさに関わらずほぼ一定である。
- ・ セメント改良土で部分改良した引抜き抵抗力は、低強度、高強度ともに拘束圧が大きいかつ改良体前面の土質の剛性が高いほど大きくなる傾向は見られる。しかし、それほど大きな違いは生じていない。(図-3.10、3.11)
- ・ 改良土のみのケースは、最初に左右に分断する亀裂が生じ、後に一方に半コーン状に抜ける破壊形態であった。(写真-3.1、3.2)
- ・ 改良土(低強度、高強度)、砂質土置換のいずれも、最終的にはタイバー(アンカーロッド)を中心としてコーン状に引き抜ける破壊形態であった。(写真-3.3～3.8)

表-3.1 アンカー引抜き試験結果一覧

		前面土	一軸圧縮 強度 (kN/㎡)	拘束 載荷圧 (kN/㎡)	土圧 初期値 (kN/㎡)	引抜き 抵抗力 (kN)	引抜き抵抗力に対する		備考
							変 位 (mm)	土 圧 (kN/㎡)	
基 準 試 験	①	全体標準砂		10	10	2.00	50	10	
	②			40	12	3.85	50	15	
	③			70	17	5.80	50	21	
	④	全体砂質土		10	9	5.75	50	16	
	⑤			40	14	9.50	50	31	
	⑥			70	20	13.00	50	48	
	⑦	全体ローム		10	13	0.11	50	13	
	⑧			40	39	0.12	50	38	
	⑨			70	67	0.13	50	65	
部 分 改 良 試 験	①	な し	43	なし	—	1.29	42	—	
	②		85			1.79 (1.79)	18		
	③		240			2.90	11		
	④		494			5.35 (7.06)	7		
	⑤		818			8.18	8		
	⑥		939			10.37	10		
	⑦	ローム	80	10	10	2.15 (2.22)	31	10	
	⑧		87	40	32	2.72 (2.69)	45	32	
	⑨		88	70	56	3.08 (3.02)	59	53	
	⑩	砂質土	75	70	31	2.90 (3.08)	55	36	
	⑪	ローム	478	10	11	9.22 (9.25)	36	18	
	⑫		483	40	36	10.03 (9.98)	35	36	
	⑬		487	70	61	11.08 (10.95)	34	58	
	⑭	砂質土	425	70	22	11.08 (12.29)	35	43	
	⑮	な し	砂質土 置換	なし	—	1.05	3	—	
	⑯	ローム		10	11	3.01	8	11	
	⑰			40	36	5.14	14	29	
	⑱			70	61	6.31	17	52	

注) 引抜き抵抗力は、基準試験においては引抜き量 50mm に対する引抜き力の値、改良体試験においては引抜き力の最大値を指す。

引抜き抵抗力における () 内の値は、土質定数を求めた供試体の一軸圧縮強度 (85 or 480 kN/m^2) に対する各ケースの一軸圧縮強度の比で補正した値を示す。

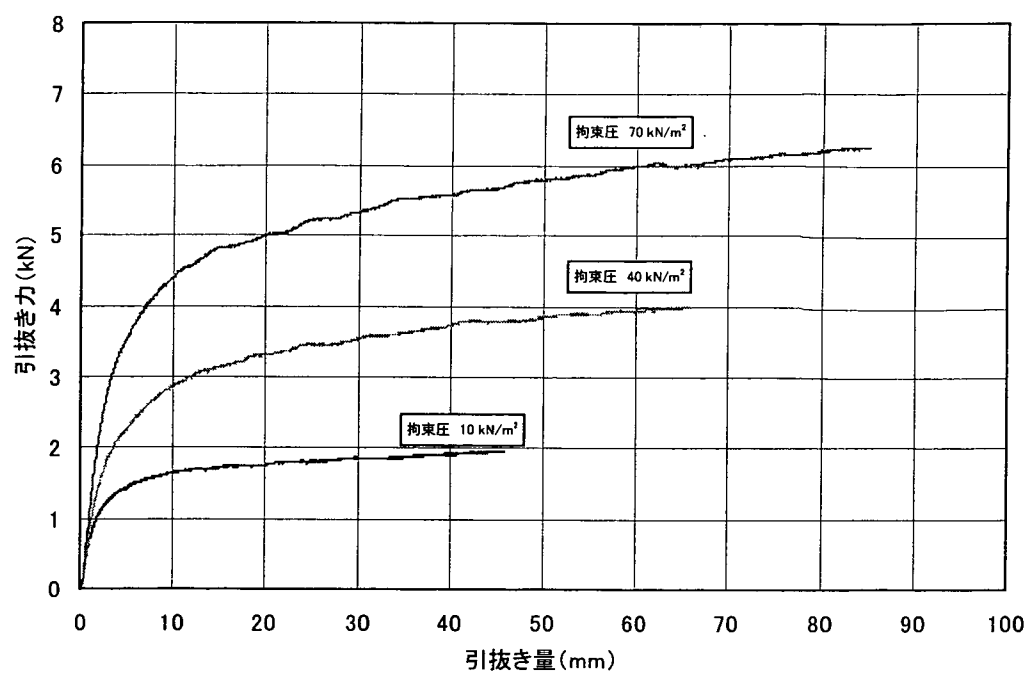


図-3.1 引抜き試験結果 (基準試験—標準砂)

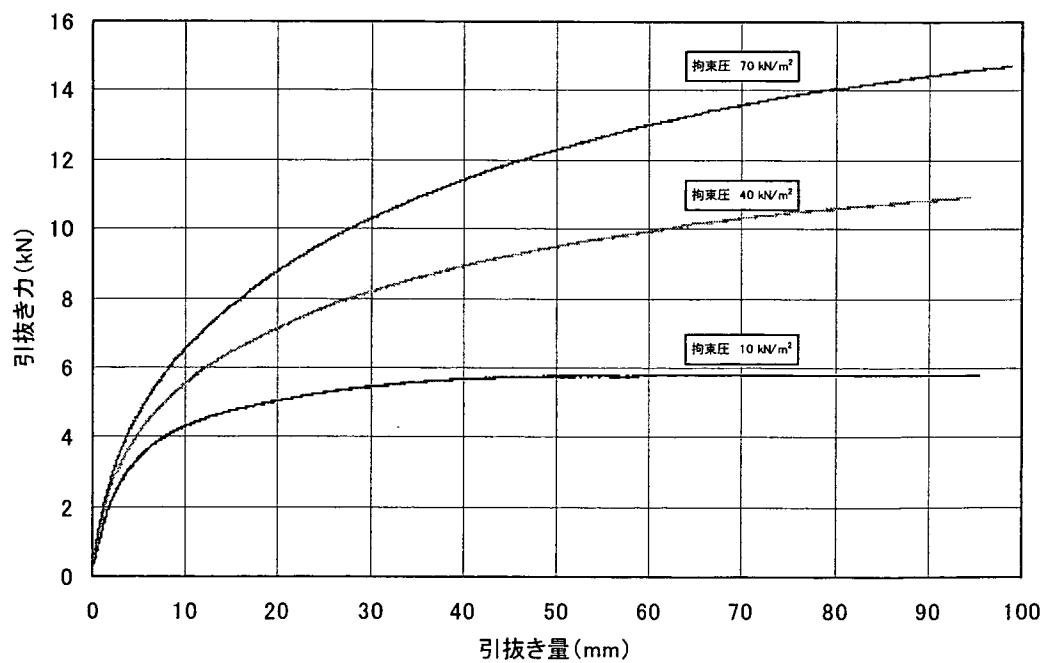


図-3.2 引抜き試験結果 (基準試験—砂質土)

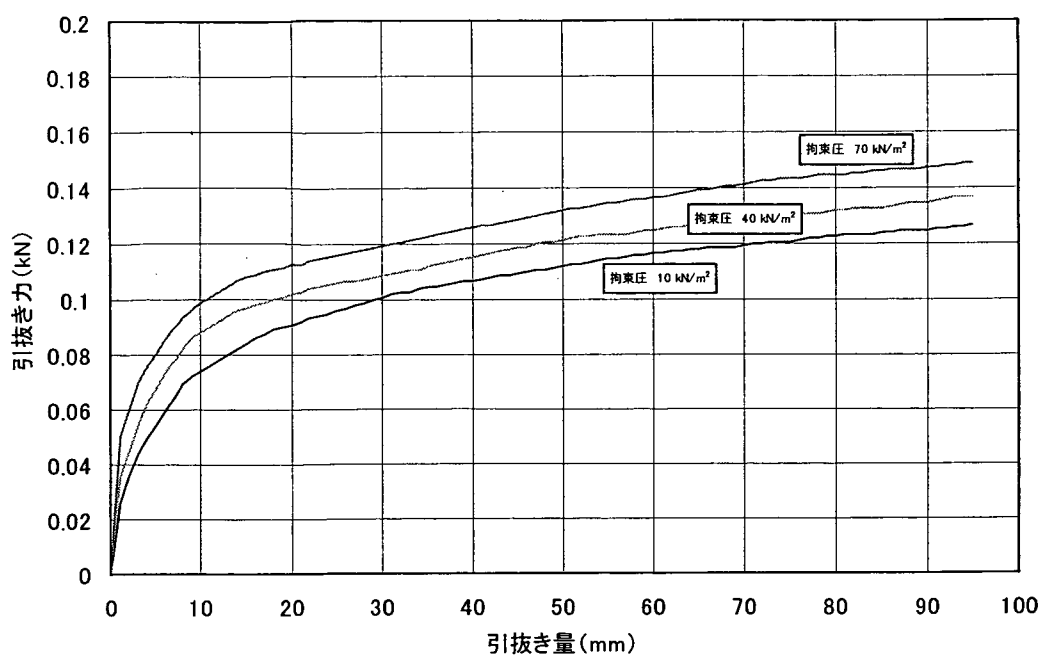


図-3.3 引抜き試験結果 (基準試験—ローム)

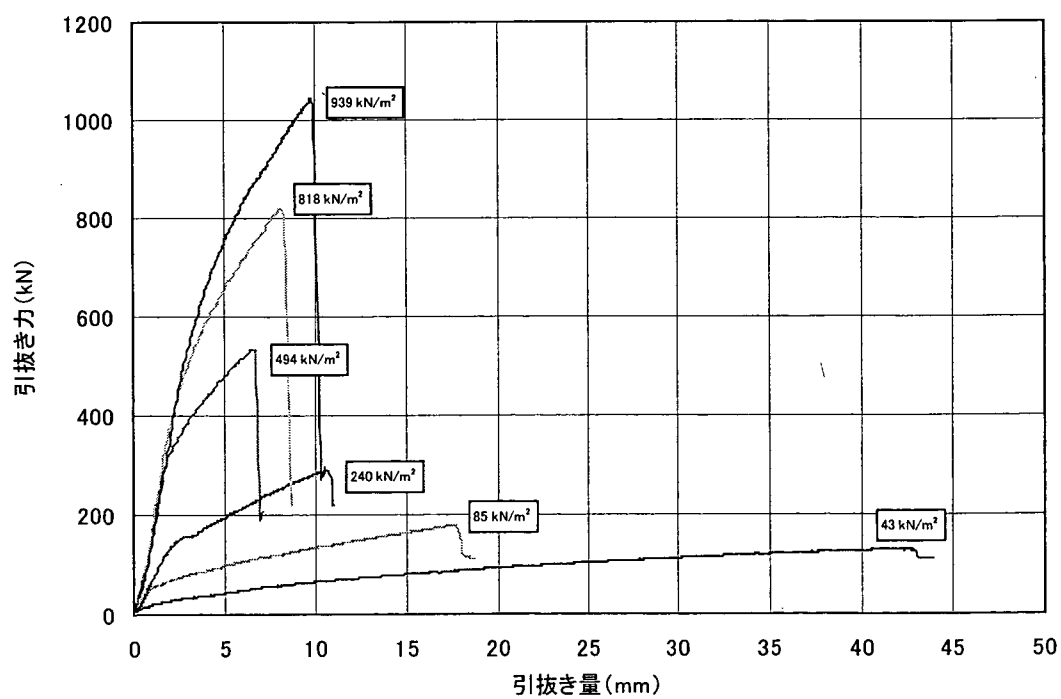
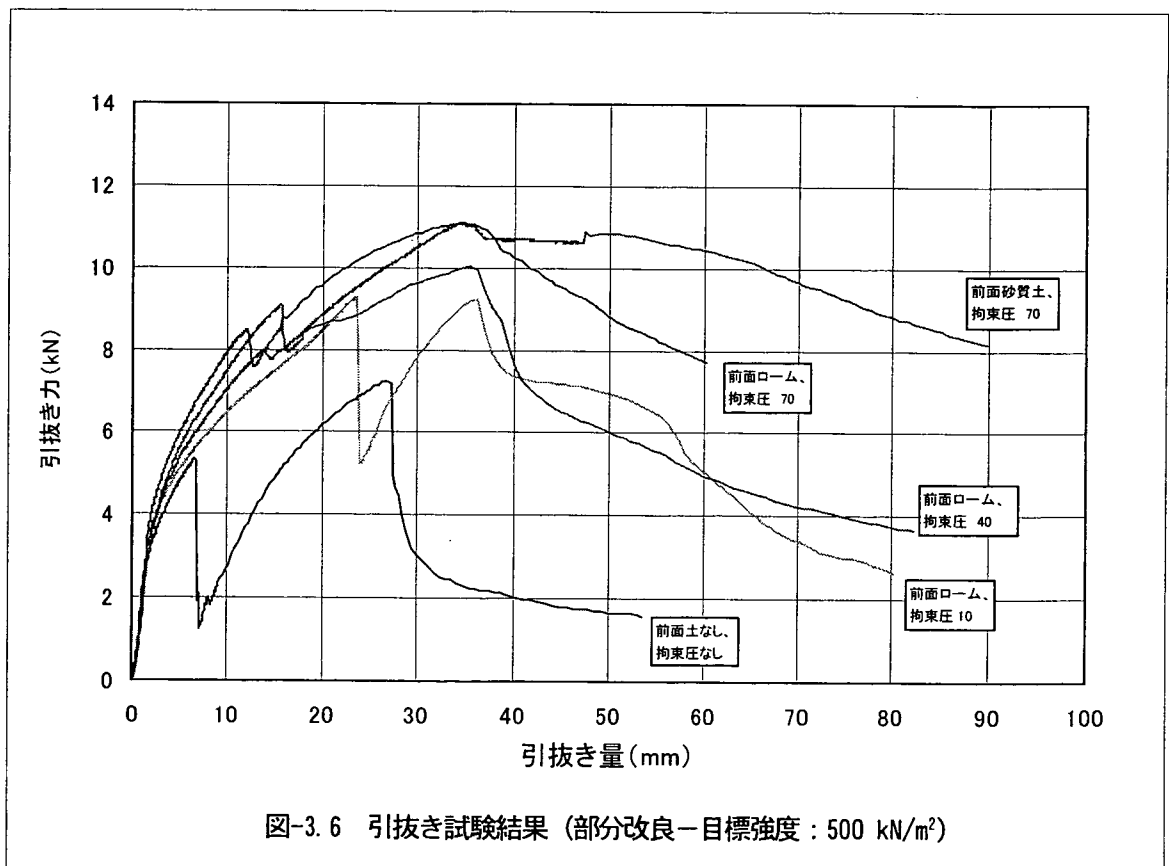
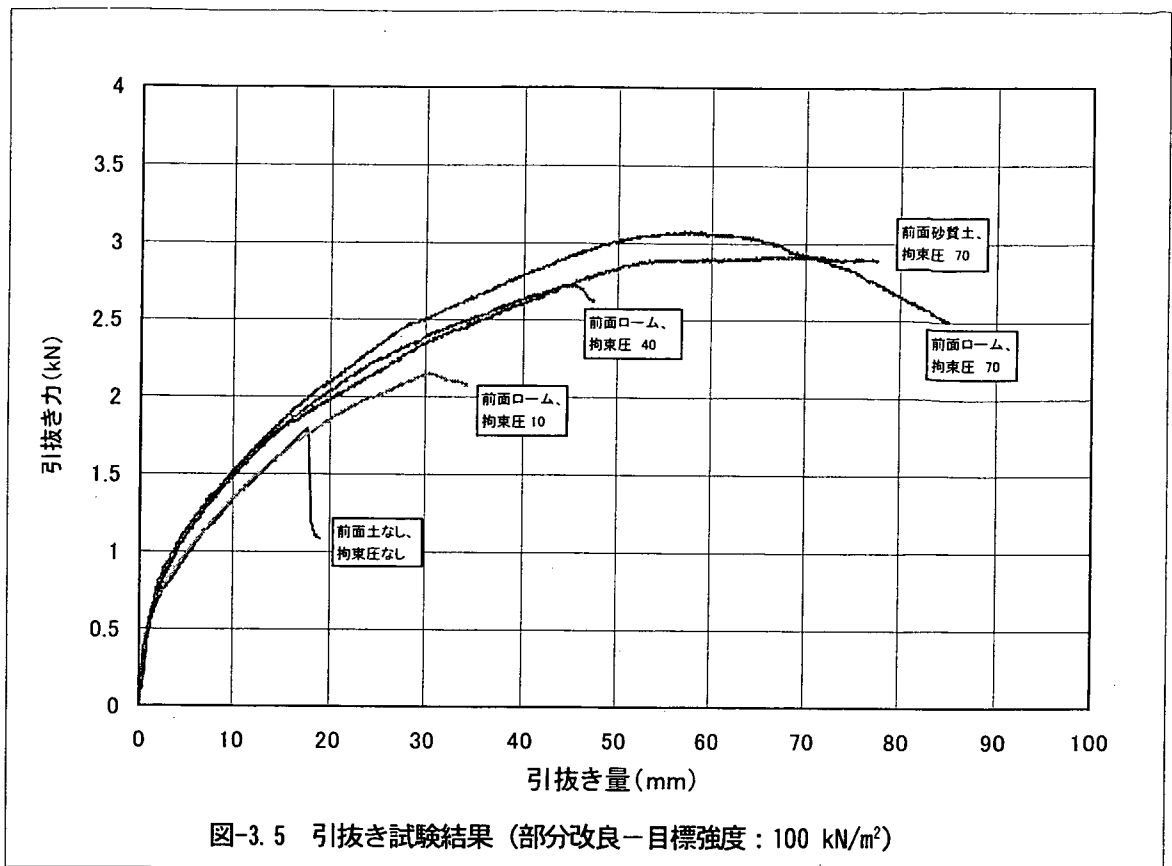


図-3.4 引抜き試験結果 (改良土改良部のみ、改良強度による比較)



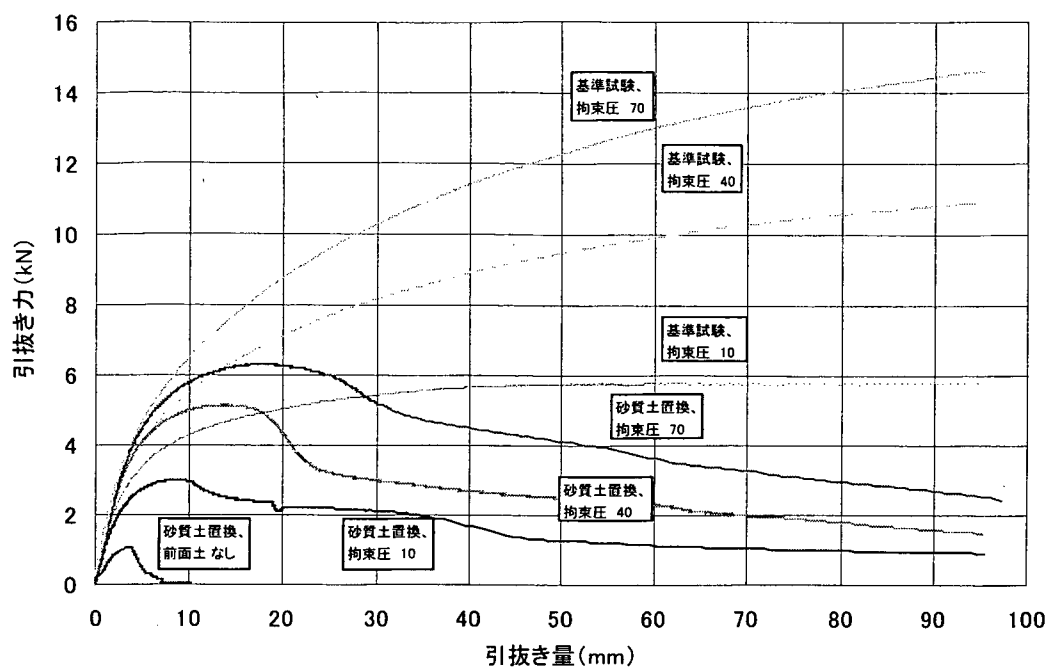


図-3.7 引抜き試験結果 (部分改良—砂質土置換)

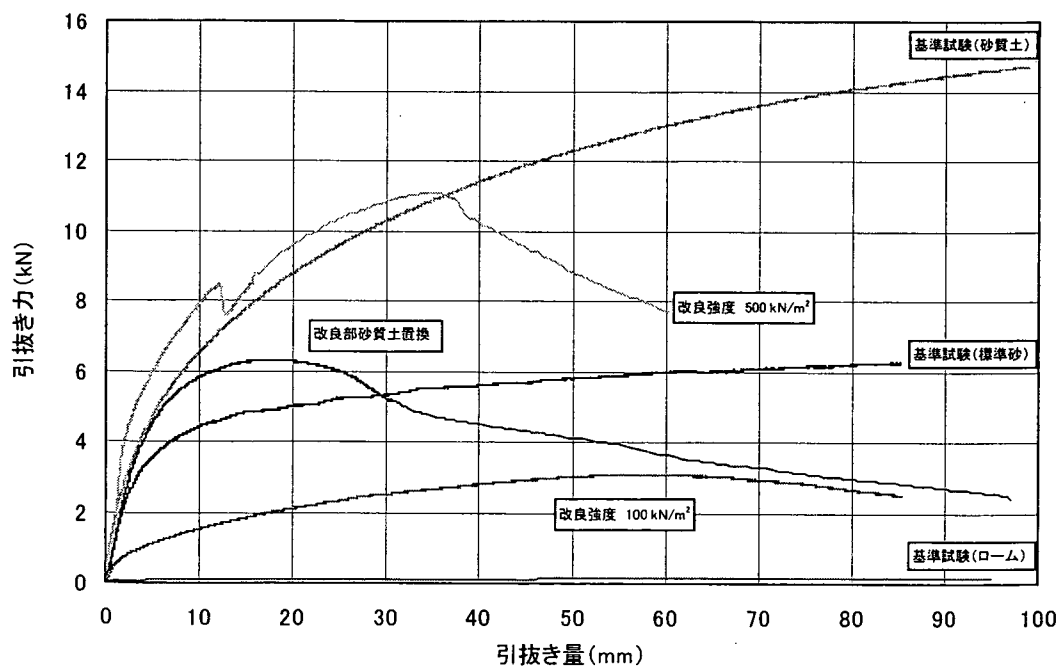
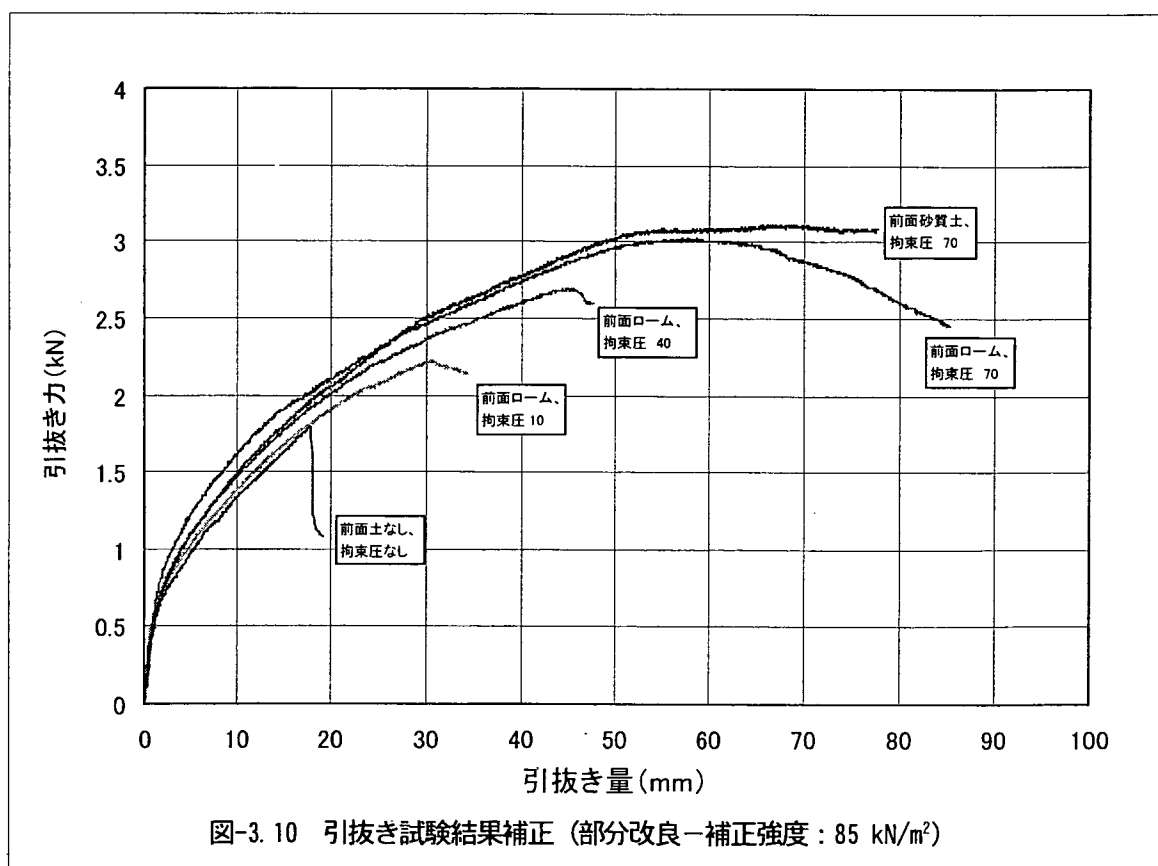
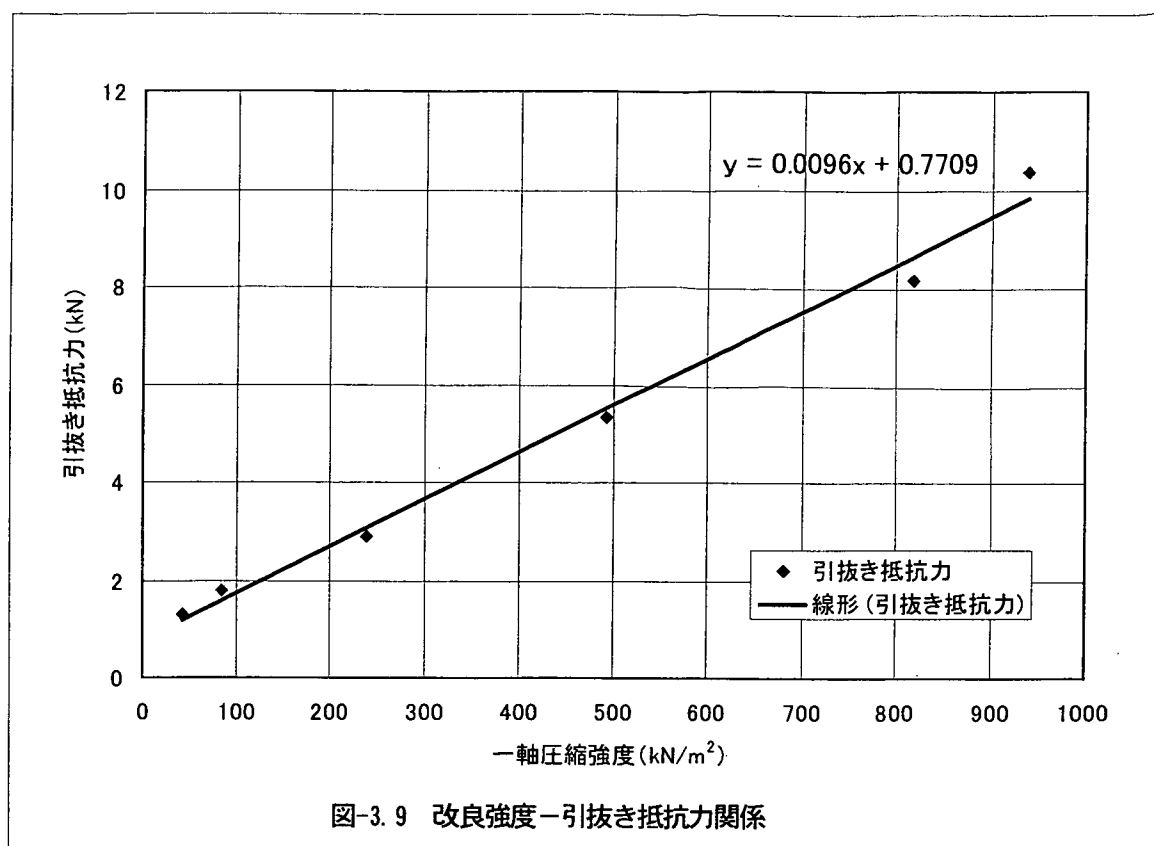


図-3.8 引抜き試験結果 (土質条件による比較 拘束圧 70 kN/m²)



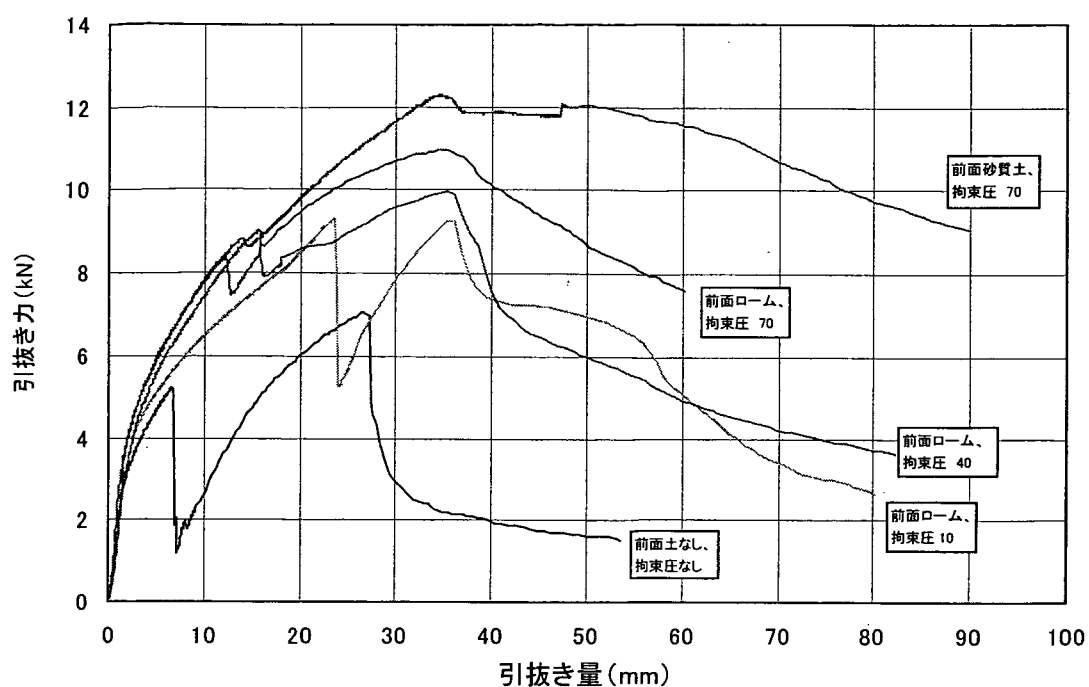


図-3.11 引抜き試験結果補正 (部分改良—補正強度 : 480 kN/m²)

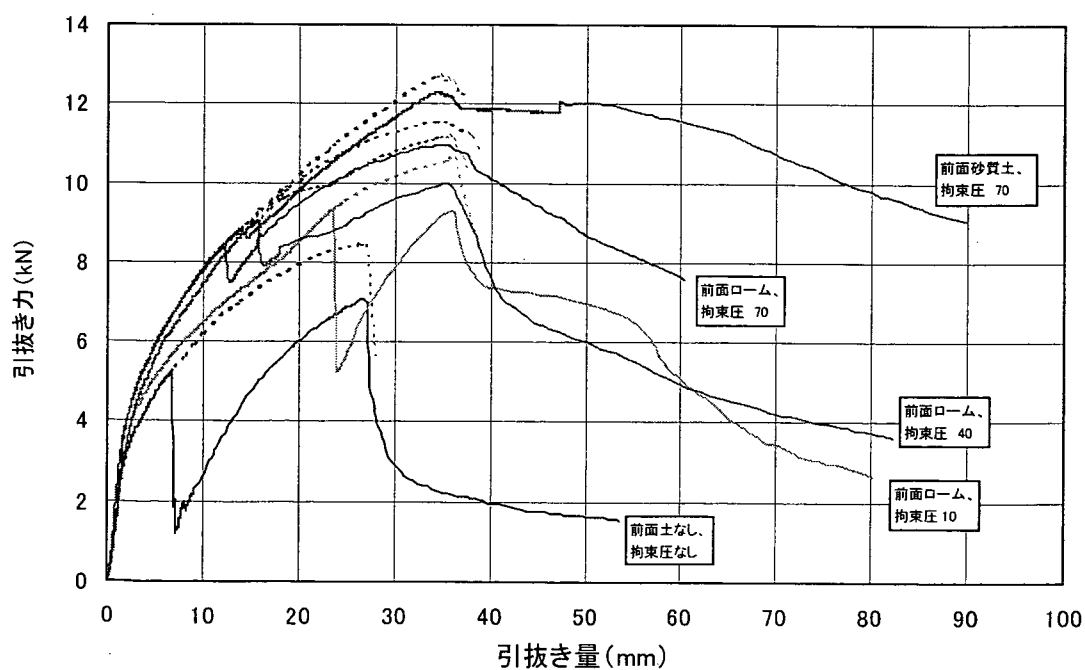


図-3.12 引抜き試験結果想定 (部分改良—補正強度 : 480 kN/m²)

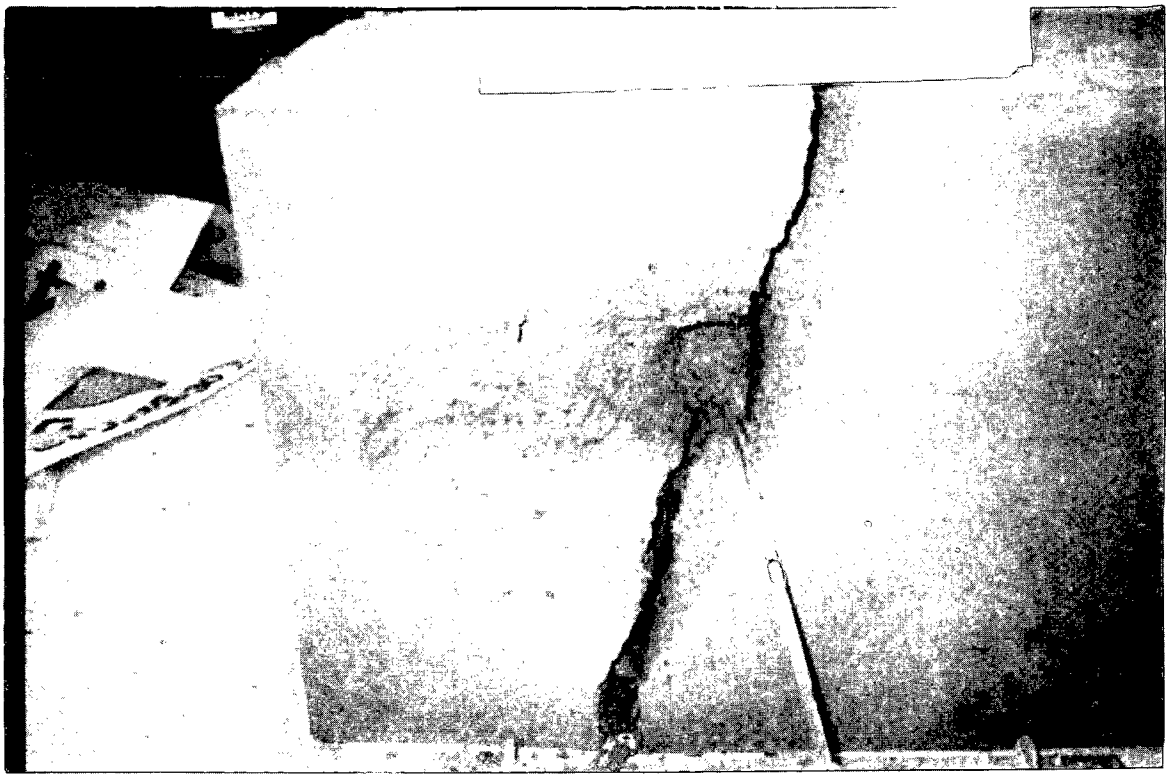


写真-3.1 改良土のみ（低強度・前面なし・拘束圧なし）破壊形態

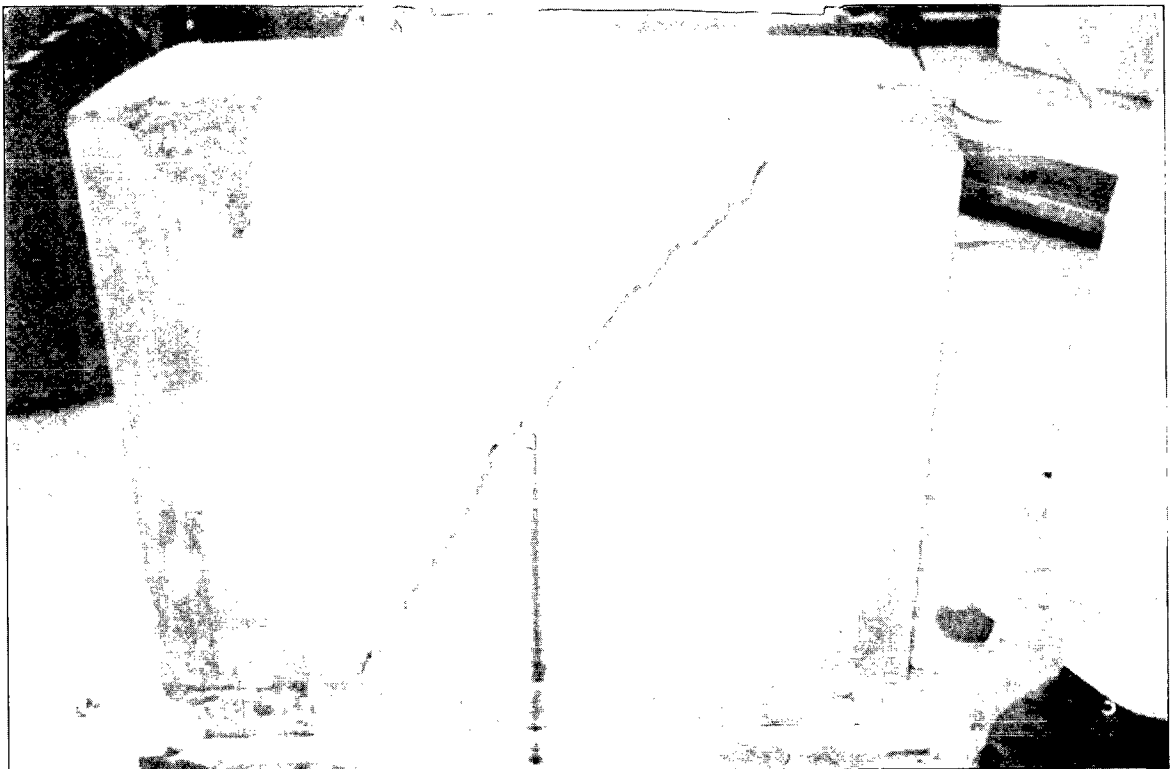


写真-3.2 改良土のみ（高強度・前面なし・拘束圧なし）破壊形態

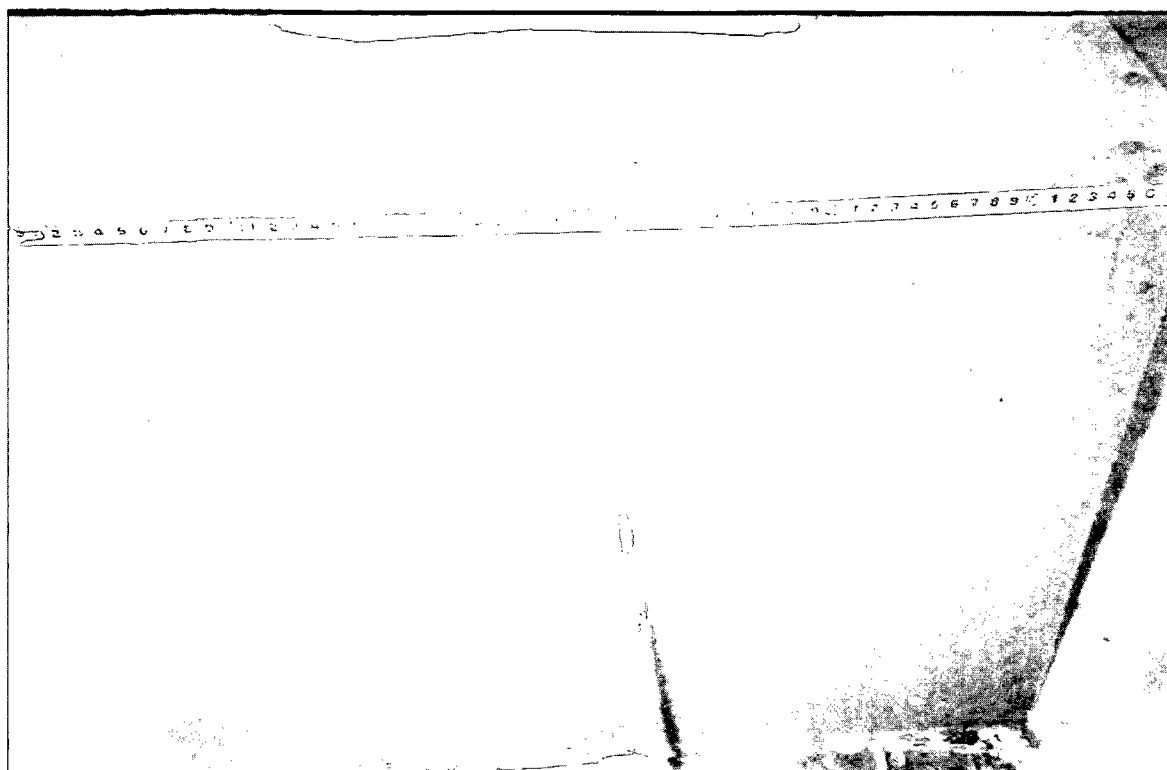


写真-3.3 改良土（低強度・前面口一ム・拘束圧 70kN/m^2 ）前面土撤去時

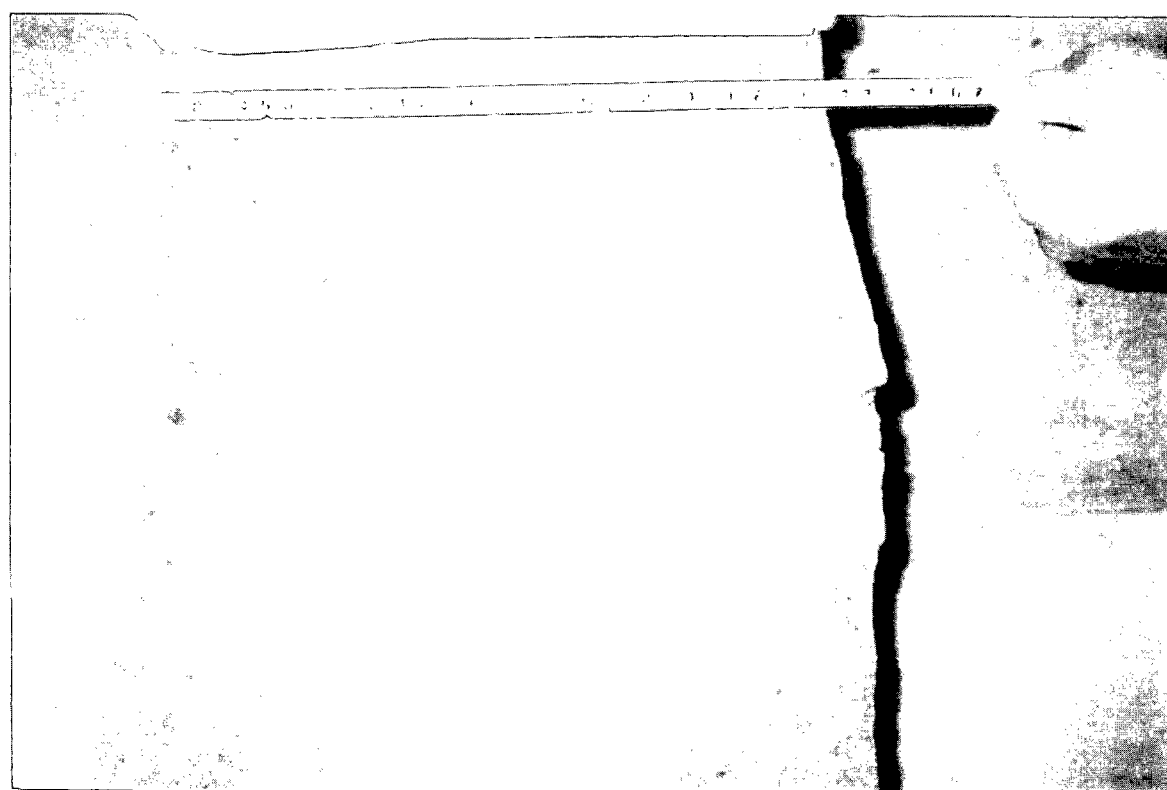


写真-3.4 改良土（低強度・前面口一ム・拘束圧 70kN/m^2 ）破壊形態



写真-3.5 改良土（低強度・前面口一ム・拘束圧 70kN/m^2 ）前面土撤去時



写真-3.6 改良土（高強度・前面口一ム・拘束圧 70kN/m^2 ）破壊形態



写真-3.7 砂質土置換（前面口一ム・拘束圧 70kN/m^2 ）前面土撤去時



写真-3.8 砂質土置換（前面口一ム・拘束圧 70kN/m^2 ）破壊形態

4. アンカープレートの極限引抜き抵抗力の検討（実験値と計算値の比較）

4. 1 改良なしの場合

基準試験（改良なしの場合）は、アンカープレートの極限引抜き抵抗力を既往の設計式（塑性破壊タイプ）より求めた計算値を表-4.1に、計算値と実験値とを比較したものを図-4.1～4.3に示す。

アンカープレートの極限引抜き抵抗力は、次式（1）で算定した。

《塑性破壊タイプ式（既往設計式）》

$$Q_u = c N_c + q N_q, A_p = b^2, T = Q_u \times A_p \quad \dots (1)$$

T : アンカープレートの極限引抜き抵抗力 (kN)

Q_u : アンカープレートの単位面積極限引抜き抵抗力 (kN/m²)

N_c, N_q : アンカープレートの引抜きに関する支持力係数

q : 盛土内の拘束圧 (kN/m²)

b : アンカープレートの幅 (m)

無改良条件の（極限）引抜き抵抗力の実験値と計算値の比較は、次の通りである。

- ・ 標準砂及び砂質土の引抜き抵抗力の実験値（引抜き量 50 or 30mm に対する値）は、既往の設計式に不飽和の土質強度定数より求めた計算値と比較的良好一致を示している。（図-4.1、4.2）
- ・ 標準砂の引抜き抵抗力は、低載荷圧（10kN/m²）で計算値より実験値の方が大きく、高載荷圧（40, 70kN/m²）で計算値より実験値の方が小さくなった。

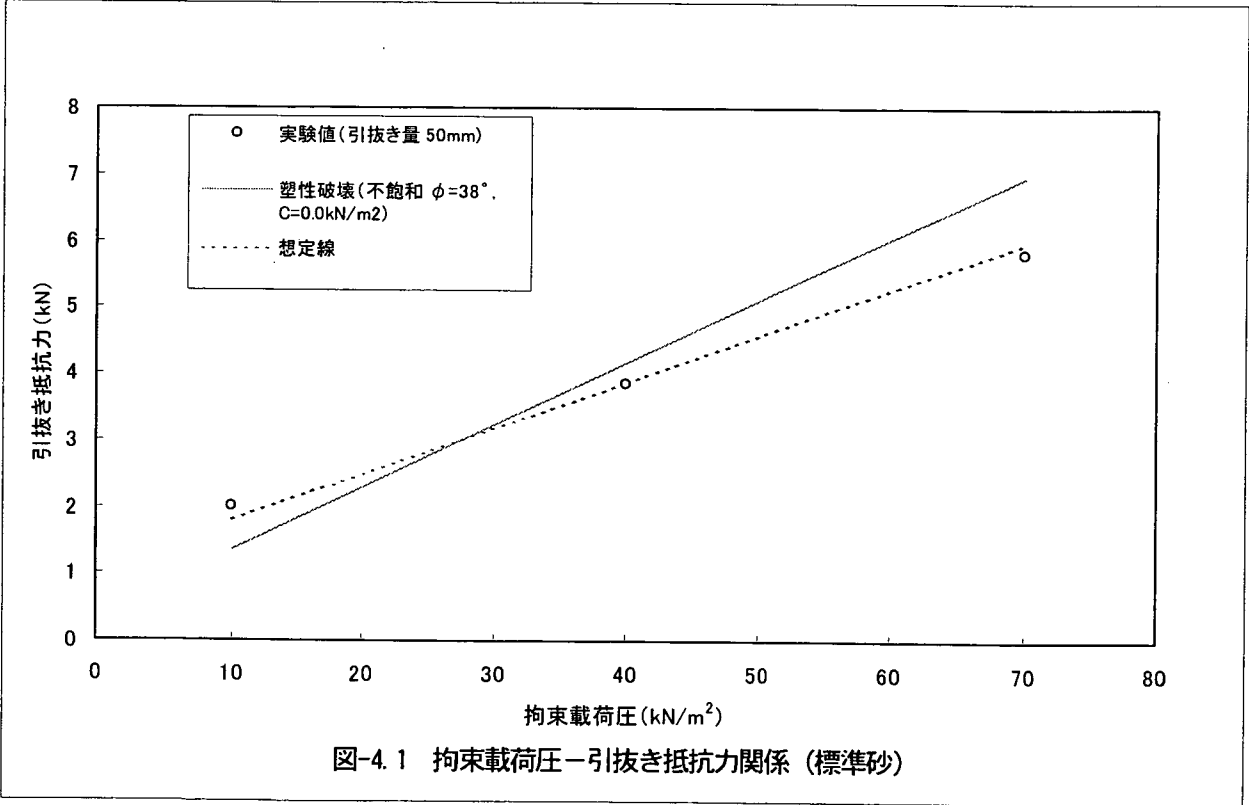
これは標準砂においても多少粘着力要素があると考え、土質強度定数を $\phi=36.0^\circ$, $c=2.0\text{kN/m}^2$ と想定すると更に良好一致を示している。（図-4.1）

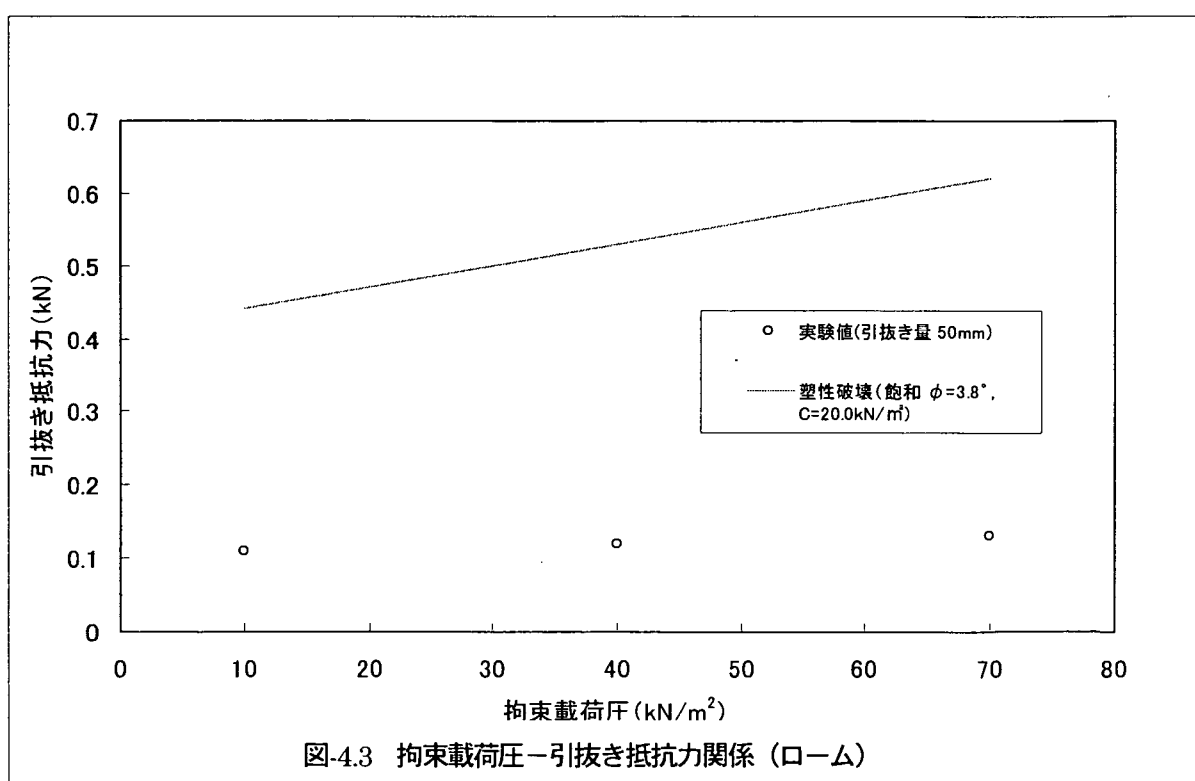
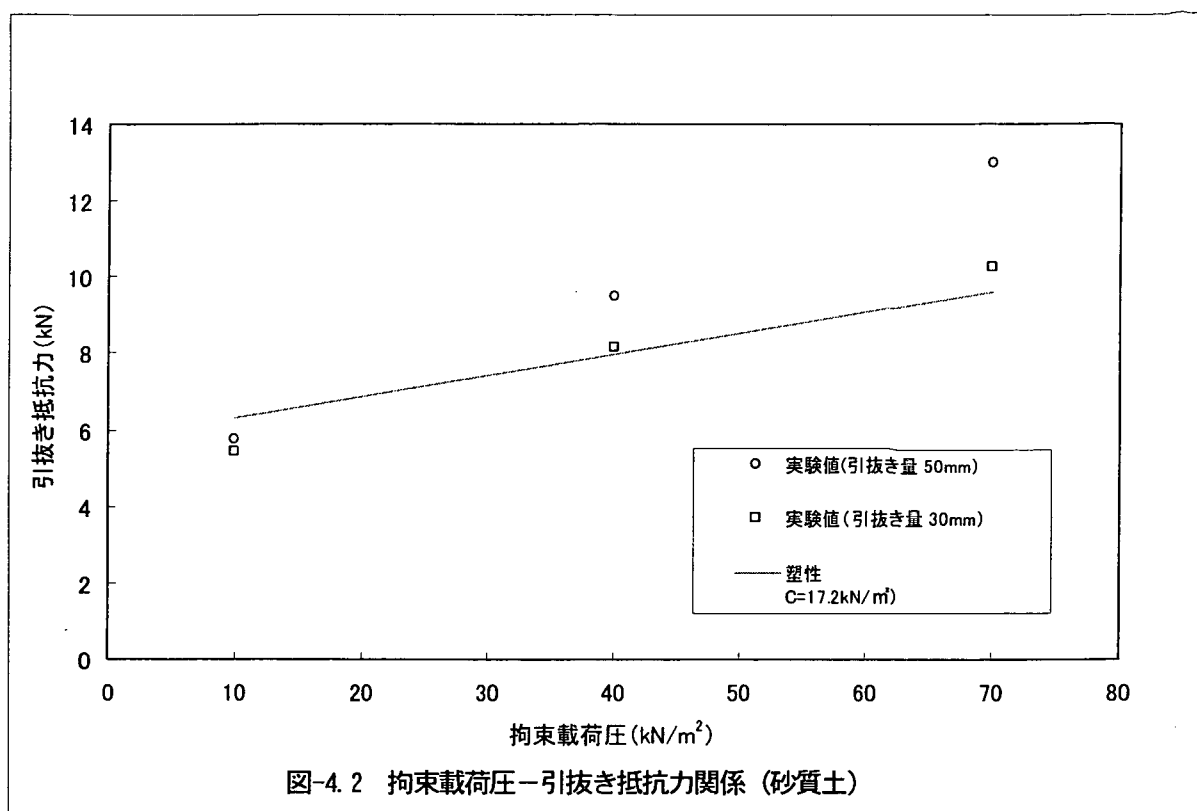
- ・ 砂質土の引抜き抵抗力は、標準砂の結果とは逆に、低載荷圧（10kN/m²）で計算値より実験値の方が小さく、高載荷圧（40, 70kN/m²）では計算値より大きくなった。計算値は引抜き量 30mm に対する値と比較的良好一致を示している。計算値が実験値を下回り、比較的小さい引抜き量に対する値と一致することから設計上問題ないと考え。（図-4.2）
- ・ 高含水ロームの引抜き抵抗力の計算値は、実験値に対して4倍以上となり計算値と実験値はかけ離れている。これは、高含水比ロームは圧縮性・流動性のある材料のため塑性破壊式とは一致せず、計算値が設計値より大きいことから設計上危険側となるため、計算値を設計に反映しにくいと考える。（図-4.3）

以上、今回の基準試験結果は、既往の設計式の合理性を裏付ける結果と判断できる。

表-4.1 無改良条件引抜き抵抗力算定結果一覧 (比較表)

土 質	単位重量 (kN/m^3)	c (kN/m^2)	ϕ ($^\circ$)	拘束 載荷圧 (kN/m^2)	計算値 T (kN)	実験値 (kN)	備考
標準砂	15.7	0.0	38.0	10	1.351	2.00	不飽和
				40	4.166	3.85	
				70	6.982	5.80	
		2.0	36.0	10	1.789	—	強度定数想定
				40	3.870	—	
				70	5.951	—	
砂質土	18.0	17.2	34.4	10	6.307	5.75	不飽和
				40	7.961	9.50	
				70	9.615	13.00	
高含水 ローム	14.2	20.0	3.8	10	0.441	0.11	飽和 (短期)
				40	0.528	0.12	
				70	0.616	0.13	





3. 2 部分改良の場合

部分改良試験について、アンカープレートの極限引抜き抵抗力を既往の設計式（塑性破壊タイプ式）及びパンチング破壊タイプ式により求めた計算値を表-4.2 に、計算値と実験値とを比較したものを図-4.4～4.8 に示す。

平成 10 年度に行われた実大実験⁴⁾では、部分改良土中に設置されたアンカープレートの引抜きに伴う周辺材料の破壊型式として、(a)塑性破壊タイプ、(b)パンチング破壊タイプ、(c)荷重分散型タイプの3タイプを提案し、引抜き抵抗力の計算値と実測値の比較を行っている。しかし、今回の実験より、前面土の土質による影響はほとんどないことが判ったことから、(c)荷重分散型タイプは検討の対象から外した。

計算には、不飽和 CD 三軸試験、飽和 CU 三軸試験から得られた強度定数及び一軸圧縮試験から想定（ $c = q_u/2$ 、 $\phi = 0$ kN/m²）した4種類の強度定数を用いて比較検討を行った。

パンチング破壊タイプの極限引抜き抵抗力は（2）式で算出した。

《パンチング破壊タイプ式》

$$\tau = c + \sigma_v \tan \phi, A = 4b \times d_a, T = \tau \times A \quad \dots (2)$$

ここで、 T ：アンカープレートの極限引抜き抵抗力（kN）

τ ：パンチング破壊面に働くせん断抵抗力（kN/m²）

σ_v ：パンチング破壊面に垂直に働く圧力 {≒鉛直上載圧力}（kN/m²）

b ：アンカープレートの幅（m）、 d_a ：アンカープレート前面側改良厚（m）

部分改良条件の（極限）引抜き抵抗力の実験値と計算値の比較を下記に示す。

- ・ 塑性破壊タイプ式による計算値は、部分改良が低改良・高改良に関わらず、飽和（長期）強度定数を用いた場合は実験値より大きくなり、飽和（短期）強度定数を用いた場合は実験値より小さくなった。この結果は平成 10 年度の実大実験結果とほぼ合致している。（図-4.4、4.6）
- ・ 塑性破壊タイプ式による計算値は、不飽和強度定数を用いた場合、低強度では実験値と比較的良好一致を示しているが、高強度においては実験値に対し 2 倍以上大きな値である。また、一軸圧縮強度から想定した強度定数を用いた場合、低強度・高強度の計算値は実験値の $1/2 \sim 3$ で最も小さな数値となった。（図-4.4、4.6、表-4.2）
- ・ パンチング破壊タイプ式による計算値は、低強度・高強度改良いずれの強度定数を用いた場合も、実験値よりも小さな数値を示した。（図-4.5、4.7）
- ・ 砂質土置換えより部分改良した場合の実験値は、塑性破壊タイプ式で求めた計算値よりも小さく、パンチング破壊タイプ式で求めた計算値より大きな数値を示していた。（図-4.8）

以上、セメント改良土で部分改良した場合、アンカープレートの引抜き抵抗力は、的確な算定式と強度定数の組み合わせを示すことが困難である。しかし、改良強度に依存し拘束圧にあまり大きな影響を受けないこと、改良体の改良程度の指標は改良強度（一軸圧縮強度）であることから、一軸圧縮強度を用いた算定方法の確立が有効であると考える。

今回の比較検討においては、一軸圧縮強度から想定した強度定数を塑性破壊タイプ式（既往設計式）より求めた計算値が最も小さいことから、この設計式が妥当と考える。

表-4.2 部分改良引抜き抵抗比較表算定結果一覧（比較表）

土 質	単位質量 (g/cm ³)	c (kN/m ²)	φ (°)	拘束 載荷圧 (kN/m ²)	T (塑性破壊) (kN)	T (パナガ破壊) (kN)	実験値 (kN)	備考
砂質土	1.80	17.2	34.4	0	5.756	0.826	1.05	不飽和 有効応力
				10	6.307	1.100	3.01	
				40	7.961	1.922	5.14	
				70	9.615	2.743	6.31	
改良土 (貧改良)	1.37	29.6	20.1	0	1.975	1.239	1.79	不飽和 有効応力
				10	2.071	1.386	2.15	
				40	2.358	1.825	2.72	
				70	2.645	2.264	3.08	
		9.5	38.4	0	5.711	0.500	(1.79)	飽 和 有効応力
				10	6.714	0.817	(2.22)	
				40	9.722	1.768	(2.69)	
				70	12.730	2.719	(3.02)	
		15.4	15.3	0	0.697	0.657		飽 和 全応力
				10	0.760	0.767		
				40	0.948	1.095		
				70	1.136	1.423		
		42.5	0	0	0.700	1.700		一軸強度 より強度 定数想定
				10	0.725	1.700		
				40	0.800	1.700		
				70	0.875	1.700		
改良土 (高改良)	1.37	133.5	30.5	0	26.056	5.430	5.35	不飽和 有効応力
				10	26.379	5.666	9.22	
				40	27.347	6.373	10.03	
				70	28.315	7.080	11.08	
		78.9	47.0	0	56.760	3.321	(7.06)	飽 和 有効応力
				10	57.767	3.749	(9.25)	
				40	60.786	5.036	(9.98)	
				70	63.806	6.323	(10.95)	
		197.0	6.3	0	4.395	7.897		飽 和 全応力
				10	4.424	7.941		
				40	4.514	8.074		
				70	4.603	8.206		
		240.0	0	0	3.910	9.600		一軸強度 より強度 定数想定
				10	3.935	9.600		
				40	4.010	9.600		
				70	4.085	9.600		

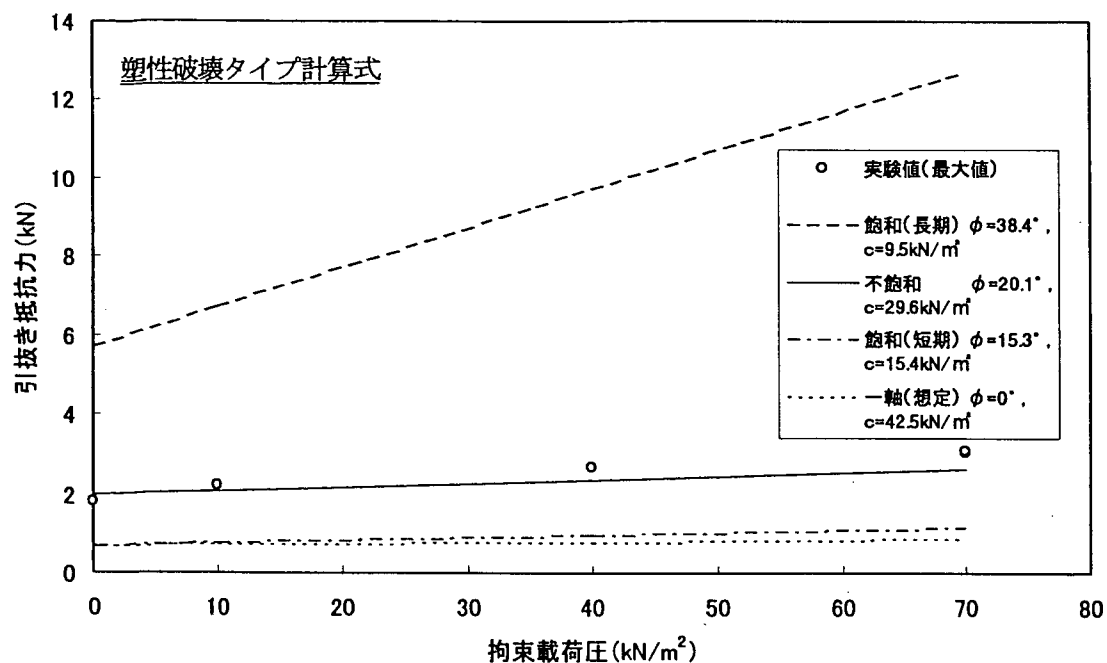


図-4.4 拘束載荷圧—引抜き抵抗関係 (改良土部分改良 $q_u = 85 \text{ kN/m}^2$)

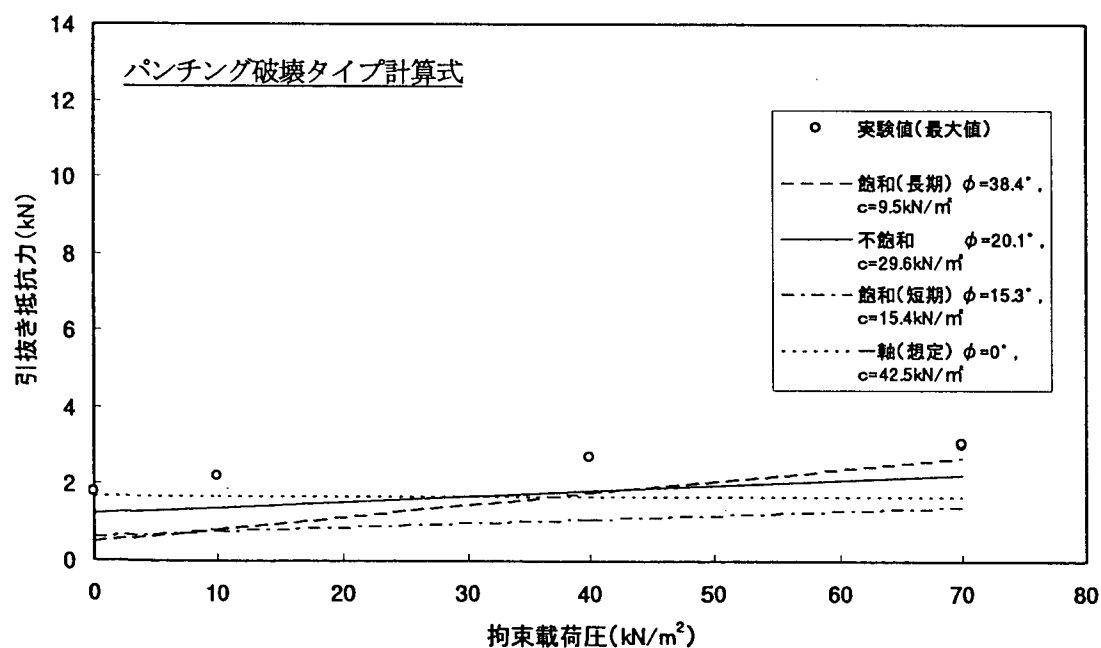
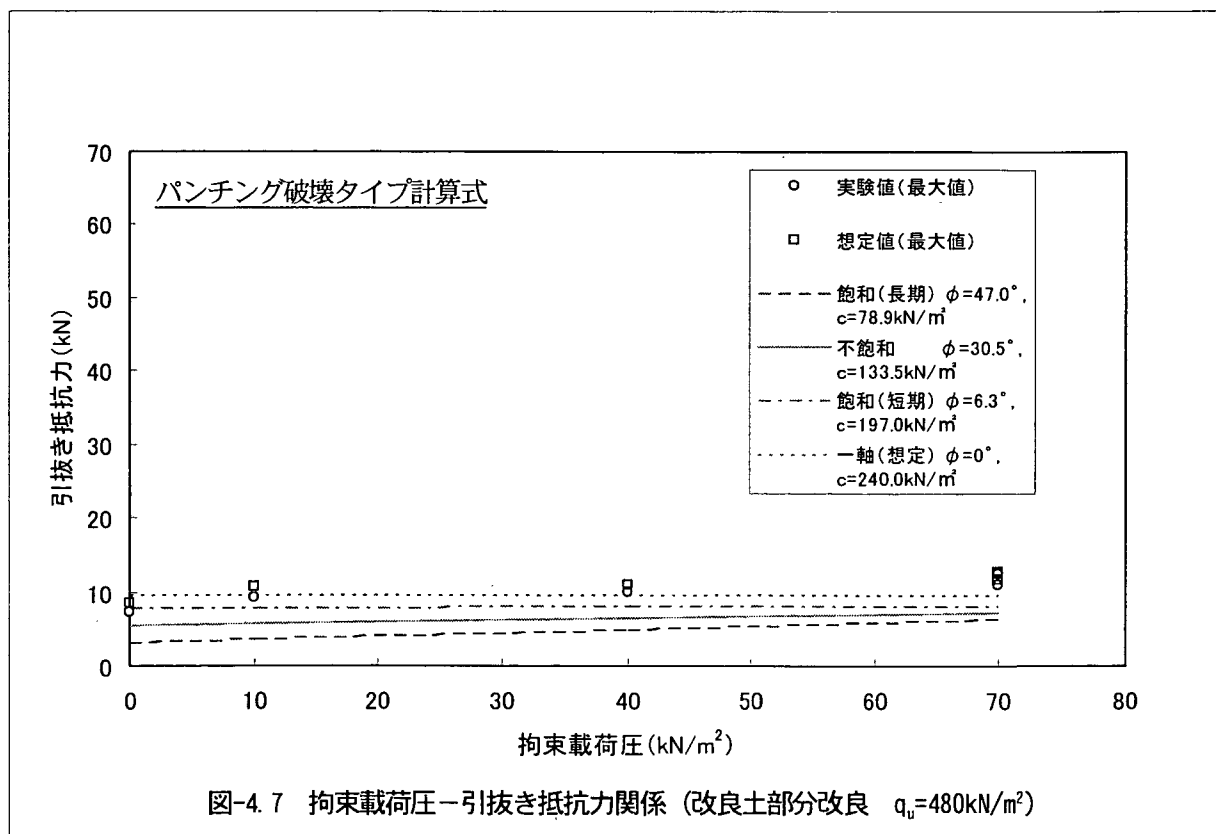
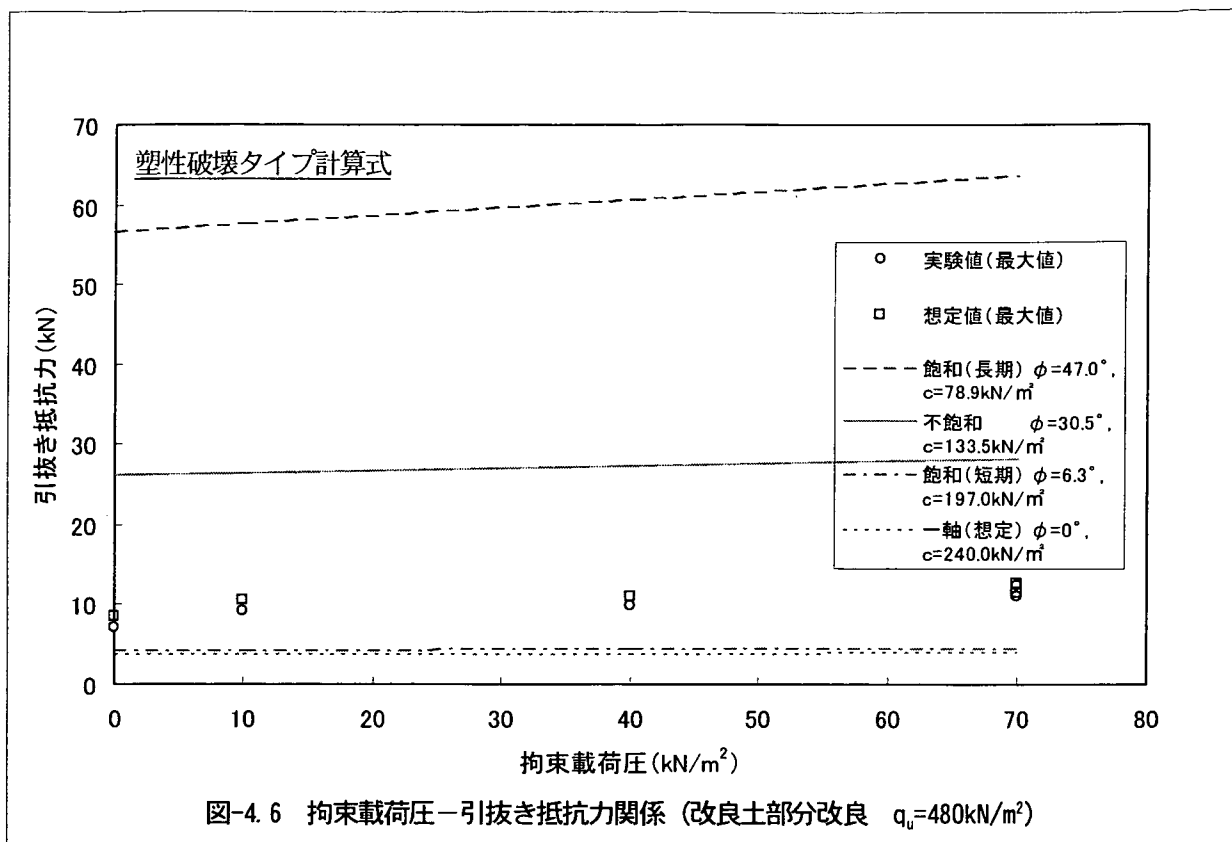


図-4.5 拘束載荷圧—引抜き抵抗関係 (改良土部分改良 $q_u = 85 \text{ kN/m}^2$)



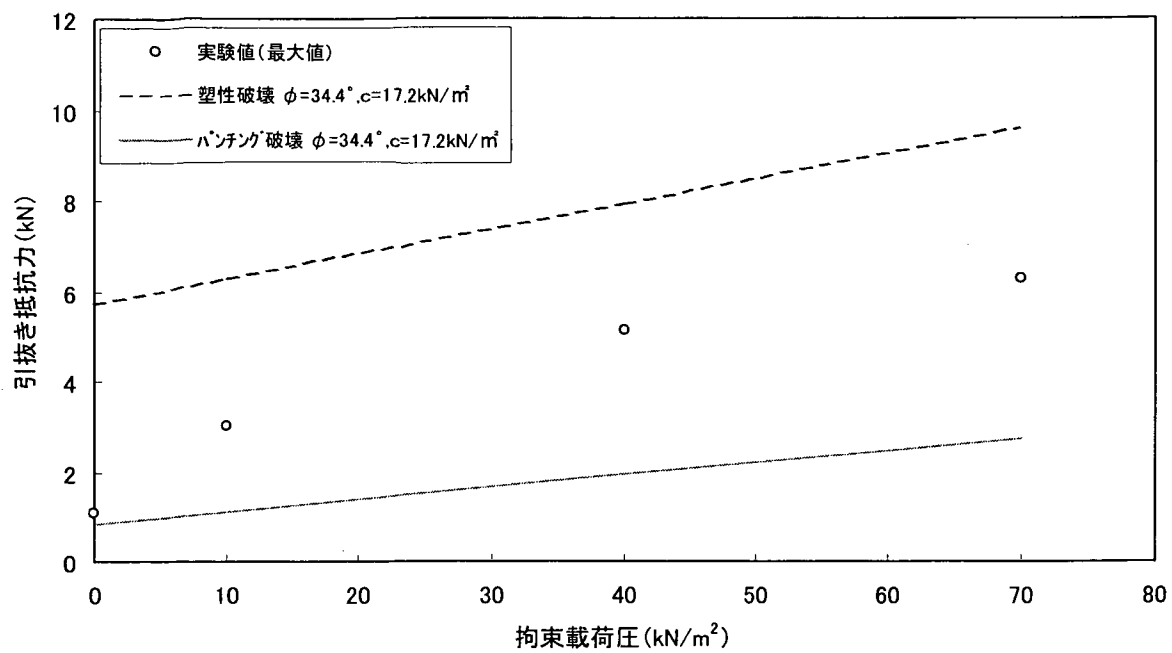


図-4.8 拘束載荷圧—引抜き抵抗力関係 (砂質土置換部分改良)

5. アンカープレートの引抜き変位量－引抜き抵抗力関係の検討

5. 1 許容引抜き抵抗力算定方法（設計法）の検討

既往の設計マニュアルでは、極限引抜き抵抗力に対して安全率（常時 3、地震時 2）で割った値をアンカープレートの許容引抜き抵抗力として設計を行っている。

ここでは引抜き試験より、部分改良におけるアンカープレートの変位量（引抜き量）と極限引抜き抵抗力および許容引抜き抵抗力の関係について検討した。

また、各試験結果（変位－引抜き力曲線）に極限及び許容引抜き抵抗力の計算値を重ねて、その関係について考察した。各試験結果に対応させた計算値は、以下の通りである。

◎ 標準砂、砂質土の基準試験及び砂質土置換えの場合（図-5.1、5.2、5.5）

T : 極限引抜き抵抗力計算値（塑性破壊式－不飽和）

T_a : 許容引抜き抵抗力（ $T_a = T/3$ ）

◎ 改良土で部分改良した場合（図-5.3、5.4）

T' : 極限引抜き抵抗力実験値

T'_a : 許容引抜き抵抗力（ $T'_a = T'/3$ ）

T'' : 極限引抜き抵抗力（塑性破壊式－ q_u より強度定数想定）

検討結果、引抜き変位量と極限及び許容引抜き抵抗力の関係は次のとおりである。

- ・ 標準砂及び砂質土の場合、塑性破壊式で求めた T は、引抜き量 30～100mm 程度の変位に対する引抜き抵抗力となっており、拘束圧の違いによって引抜き量にバラツキがあるが、 T_a は、引抜き量 2mm 程度の変位に対する引抜き抵抗力となっている。（図-5.1、5.2）
- ・ 改良土部分改良の場合、引抜き抵抗力が最大値 T' を示すときの引抜き量は 30～60mm 程度となっており、 T'_a は引抜き量 2～3mm 程度以下の変位に対する引抜き抵抗力となっている。また、 T'' はほぼ T'_a と等しい値であった。（図-5.3、5.4）
- ・ 砂質土置換えの部分改良の場合、塑性破壊式で求めた T_a は砂質土の基準試験の場合とほぼ等しく、 T_a は引抜き量 2mm 程度の変位に対する引抜き抵抗力となっている。（図-5.5）

以上より、既往の設計マニュアルでは、アンカープレートに働く引抜き力が許容引抜き抵抗力を越えないように設計することにより、アンカープレートの引抜き変形を微小（ここでは 2mm：アンカープレート幅の 4%程度以下）に抑えていると推測できる。

同様に、改良土部分改良や砂質土部分置換した場合においても、許容引抜き抵抗力を定めればアンカープレートの引き抜き変位を微小（既往の設計法と同程度）に抑える設計ができると考える。

《提案式》

◎改良土部分改良 —— $T_a' = T'' / \alpha \cdots (3)$

ここで、 T_a' : 改良土部分を改良した場合の許容引抜き抵抗

T'' : 極限引抜き抵抗 (塑性破壊式 - q_u より強度定数を想定)

α : 安全率 $\alpha = 1 \sim 2$

(*安全率 α は今回の実験では 1 でよいが断定するのは困難。但し、安全率 $\alpha = 3$ まで見込む必要はないと考える)

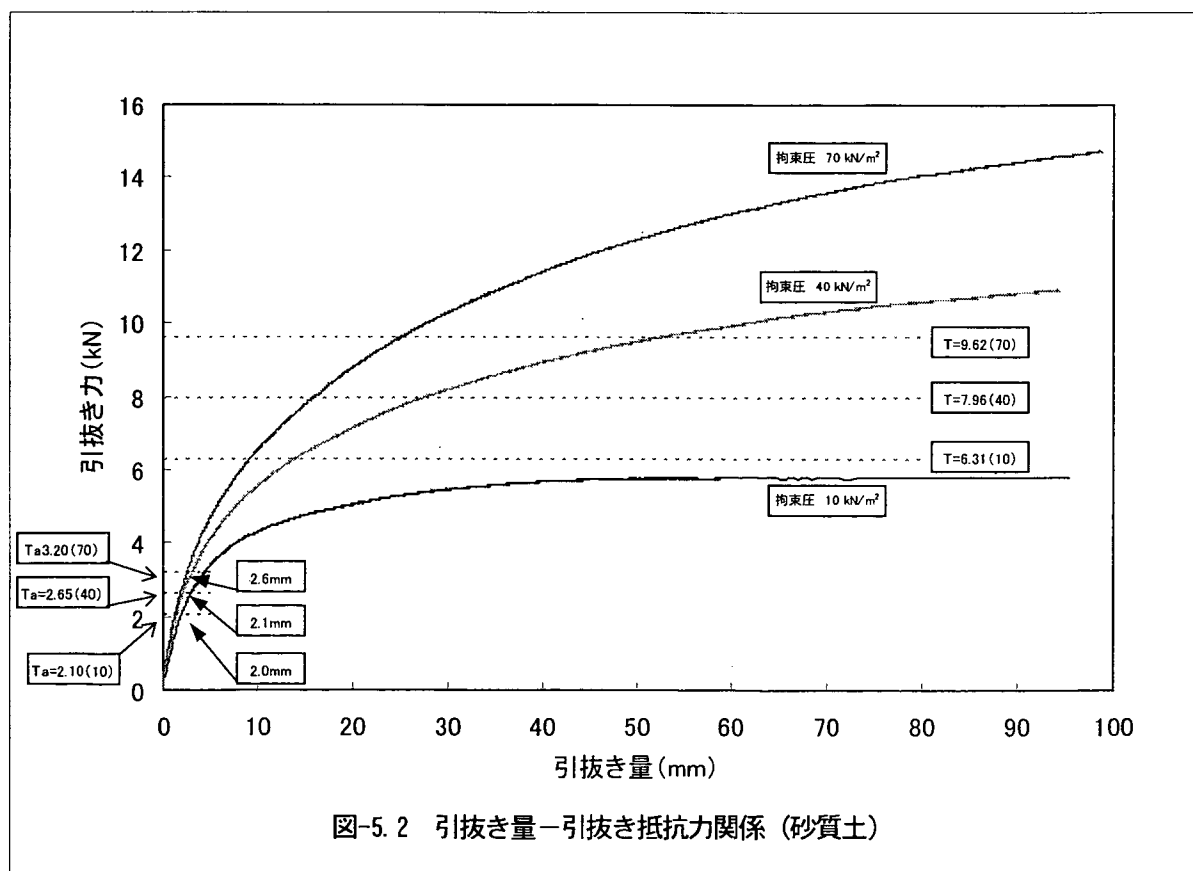
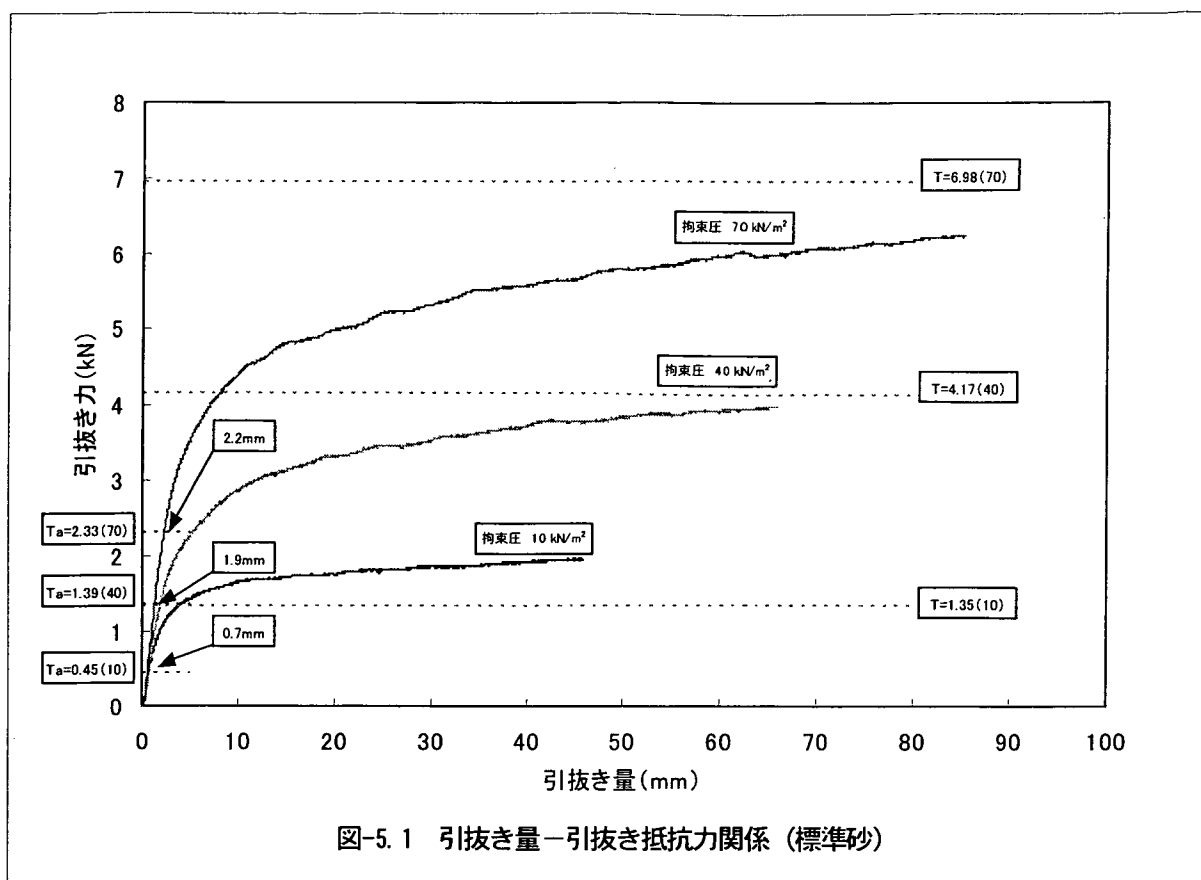
◎砂質土部分置換 —— $T_a' = T_a / \alpha \cdots (4)$

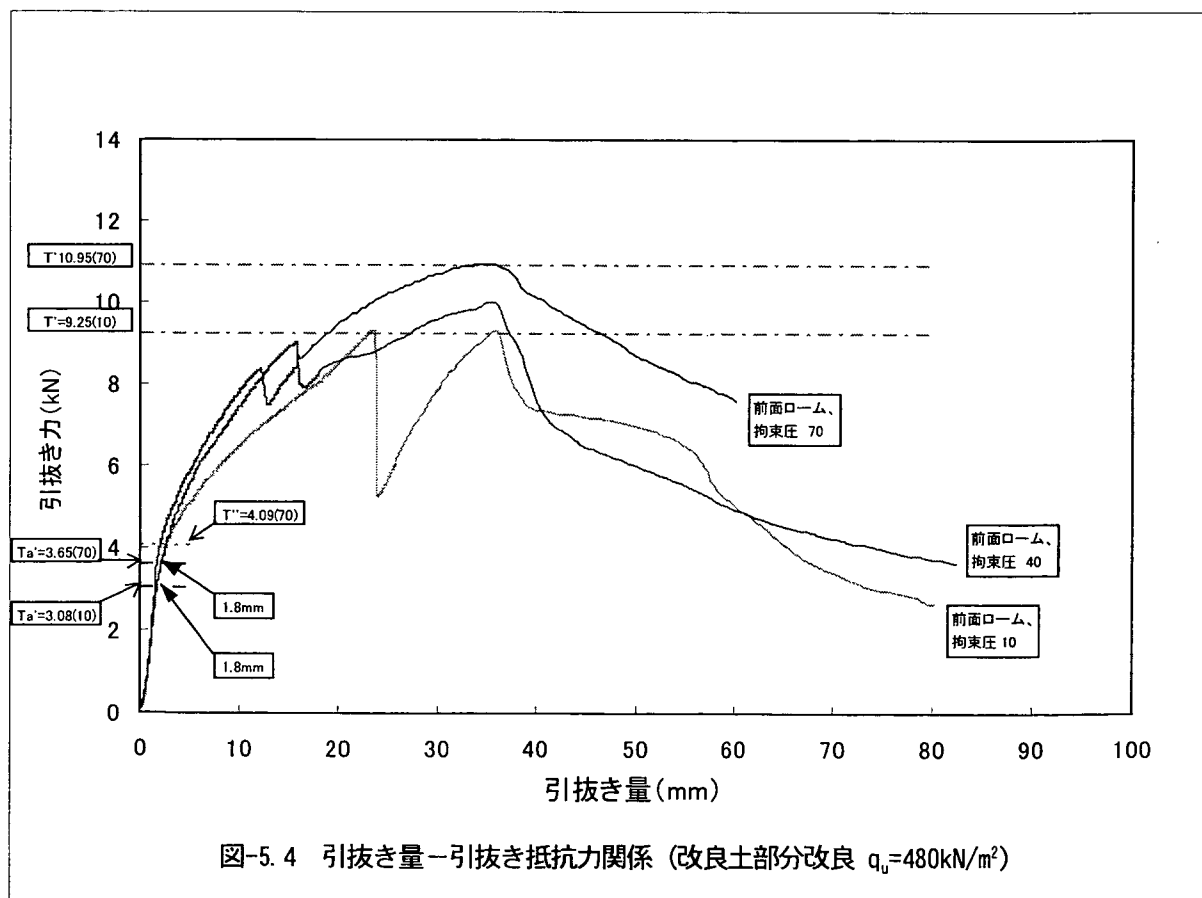
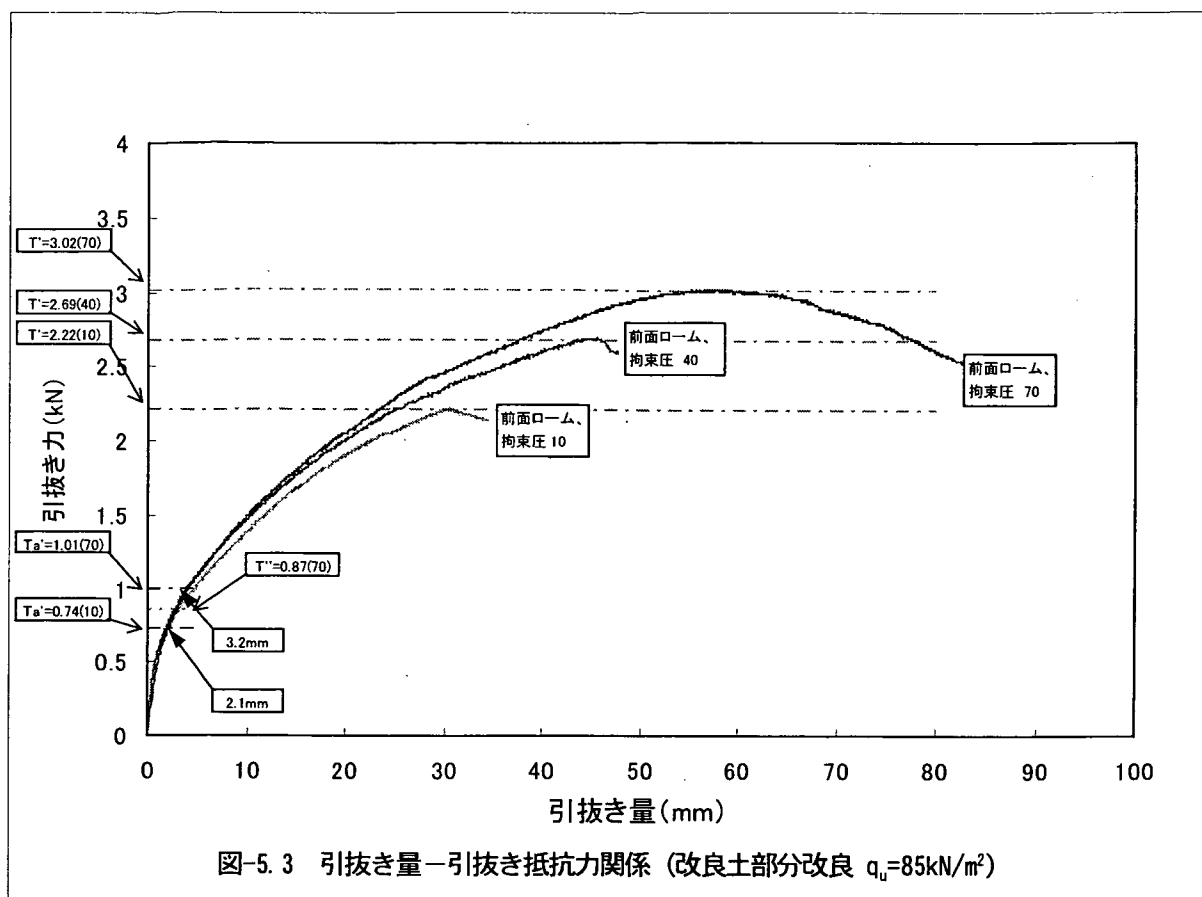
ここで、 T_a' : 砂質土部分を置換した場合の許容引抜き抵抗

T_a : 全体砂質土の許容引抜き抵抗 ($T_a = T / 3$; 塑性破壊式)

α : 安全率 $\alpha = 1 \sim 1.5$

(*安全率 α は今回の実験 1 でよいが断定するのは困難。但し、安全率 $\alpha = 1.5$ 程度まで見込めば安全であるとする)





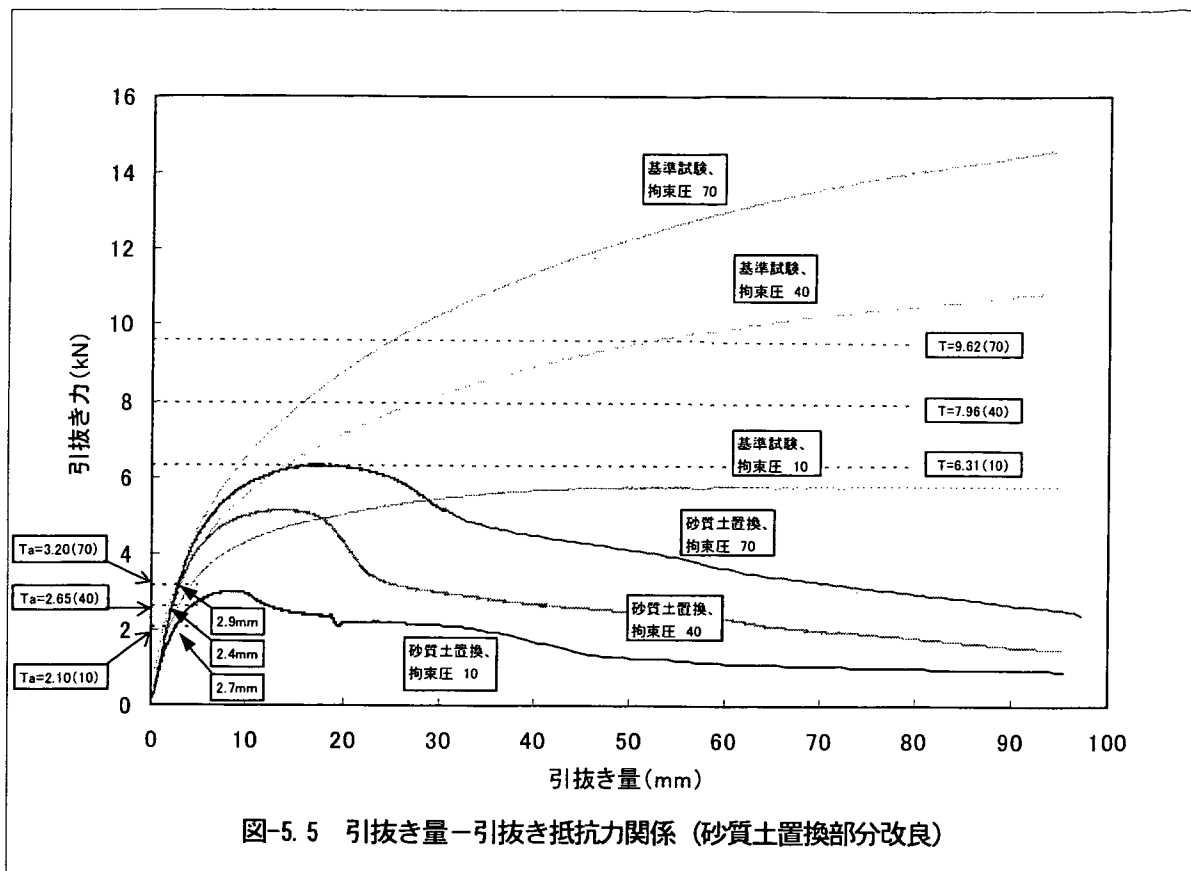


図-5.5 引抜き量-引抜き抵抗力関係 (砂質土置換部分改良)

5. 2 実大実験結果による部分改良の引抜き抵抗力量定法の検証

図-5.6、5.7 は、実大実験の変位－引抜き力曲線結果と、とし、塑性破壊式（今回行われた改良土の一軸圧縮試験結果から粘着力を設計定数）によって求めた極限引抜き抵抗力量（ T'' ）と想定許容引抜き抵抗力量（ $T_a'' = T'' / 1.5 \text{ or } 2.0$ ）を重ねたものである。

（図中、 T ：代表的な極限引抜き抵抗力量の実験値、 $T_a = T / 3$ ）

実大実験結果における引抜き量と引抜き抵抗力量算定値の関係は、下記の通りである。

- ・ T'' は実際の極限引抜き抵抗力量より小さい値を示している。また、 T_a'' は T_a とほぼ等しい値を示し引抜き量 5mm 程度以下の変位に対する引抜き力と考える。（図-5.6、5.7）
- ・ 引抜き量に程度はあるが、実大実験においても小型模型実験と同様、引抜き量と引抜き抵抗力量の傾向があることを検証された。

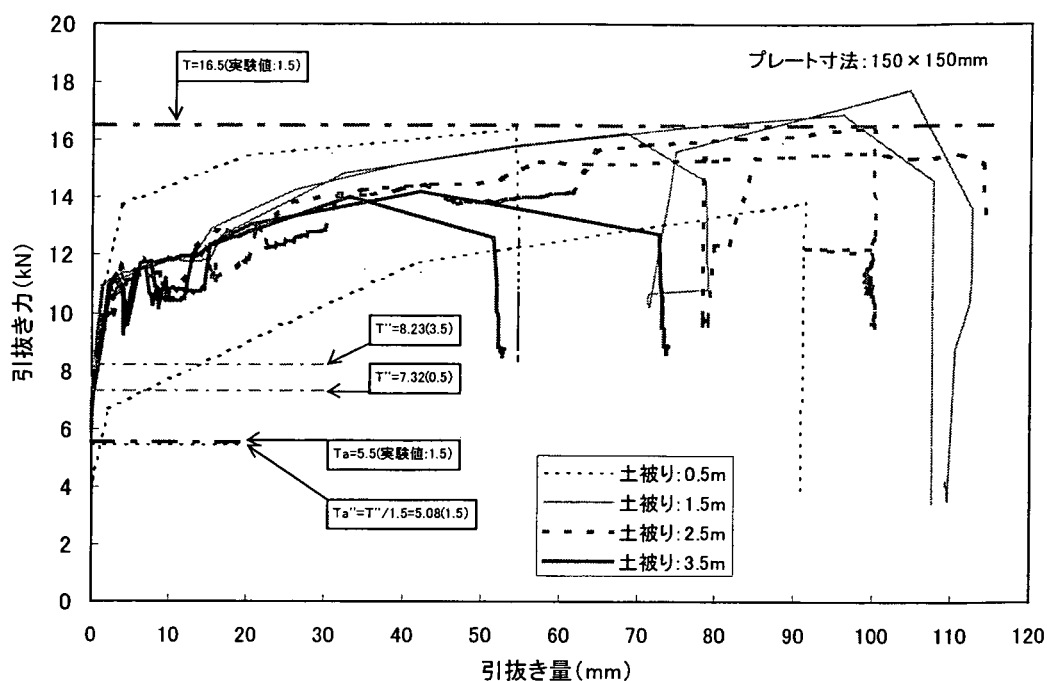


図-5.6 引抜き量－引抜き抵抗力関係 (実大実験 CASE2、 $q=98\text{kN/m}^2$)

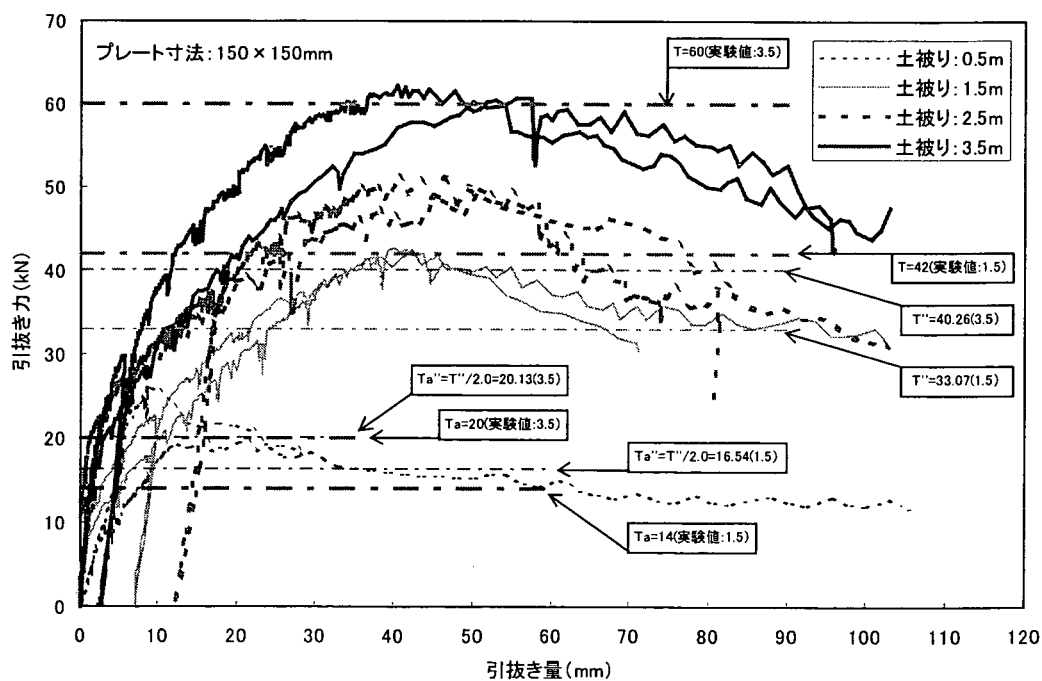


図-5.7 引抜き量－引抜き抵抗力関係 (実大実験 CASE3、 $q=490\text{kN/m}^2$)

6. まとめ

今回のアンカー引抜き実験結果と考察は以下の通りである。

○基準試験

基準試験は、既往の試験結果と同様な結果が得られ、(極限) 引抜き抵抗力の既往設計計算式の合理性を裏付けた。

○部分改良

i) 破壊形態

セメント改良土(低強度・高強度とも)で部分改良した場合、拘束圧・改良部前面の土質の違いによる引抜き抵抗に差はない。また、改良土(低強度・高強度)・砂質土置換えの破壊形態は、いずれもタイバー(アンカーロッド)を中心としたコーン状に引き抜ける破壊形態であった。

ii) 極限引抜き抵抗力

(極限) 引抜き抵抗力は、塑性破壊タイプ式(既往設計式)、パンチング破壊タイプ式に不飽和・飽和(長期・短期)・一軸圧縮試験より粘着力(c)を想定したそれぞれの強度定数をパラメータとして、それぞれの実験結果を比較したが、明確な算定式、強度定数の組み合わせを示すことは困難であった。

一軸圧縮強度から想定した強度定数を用いた既往設計式の計算値は、実物大の引抜き試験結果と同様に実験値に対して十分安全側であった。

○ 既往式で求めた許容引抜き抵抗力と引抜き量の関係

i) 基準試験の標準砂および砂質土

基準試験の標準砂及び砂質土は、許容引抜き抵抗力時の引抜き量 2mm (アンカープレート幅の 4%) 程度以下の微少な変位であった。

ii) 改良土による部分改良

一軸圧縮強度から求めた極限引抜き抵抗力(T'')を安全率($\alpha=1\sim2$)で割った許容引抜き力 T_a' ($T_a' = T'' / \alpha$)は、実際の極限引抜き抵抗力の $1/3$ 程度であり、引抜き量 2~3mm 程度以下の微少な変位に対する引抜き抵抗力であった。

iii) 砂質土による部分改良

砂質土により部分置き換えた場合の変位-荷重曲線は、全体が砂質土の場合(基準試験)とほぼ同じ立ち上がりを示し、既往設計式で求めた許容引抜き抵抗力(T_a)を安全率($\alpha=1\sim1.5$)で割った値が 2mm 程度以下となった。この場合、許容引抜き抵抗力 T_a' ($T_a' = T_a / \alpha$)とすれば、改良土による部分改良と同様に、微少な変位に対する引抜き抵抗力と考える。

iv) 実大実験における引抜き量と引抜き抵抗力算定式の関係

一軸圧縮強度を基に塑性破壊式によって算出した極限抵抗力 (T'') は、実際の極限引抜き抵抗力より小さな値を示しており、想定許容引抜き抵抗力 T_a'' ($T_a'' = T'' / \alpha : \alpha = 1.5 \sim 2$) は T_a とほぼ等しい値を示し、引抜き量 5mm 程度以下の変位に対する引抜き力であった。

以上の結果より、改良土部分改良及び砂質土部分置換についてのアンカー引抜き抵抗力は、従来の算定式を一部修正した形で次式を提案する。

◎改良土部分改良 —— $T_a' = T'' / \alpha$

ここで、 T_a' : 改良土部分改良した場合の許容引抜き抵抗力

T'' : 極限引抜き抵抗力 (塑性破壊式- q_u より強度定数想定)

α : 安全率 $\alpha = 1 \sim 2$

◎砂質土部分置換 —— $T_a' = T_a / \alpha$

ここで、 T_a' : 砂質土部分置換した場合の許容引抜き抵抗力

T_a : 全体砂質土の許容引抜き抵抗力 ($T_a = T / 3$; 塑性破壊式)

α : 安全率 $\alpha = 1 \sim 1.5$

あとがき

多数アンカー式補強土壁工法は、盛土材として粘性土は適用可能である。そのため、現場発生土などの粘性土を使用するケースが多く見受けられるが、設計時と現地で工事が始まった時に搬入した盛土材料の相違や、天候によって品質が一時的に低下する場合等、緊急時に使用しなければならない状況がある。

本実験結果は、プレート周辺をある程度強度を有する改良土あるいは良質な砂質土で置換えることによって、その置換え土の引抜き抵抗力を妥当に判断するための提案（従来式の修正）式を示した。

この提案式は、模型による室内試験で提案されたものである。このため、定量的な提案（修正）式として運用するためには、数多くの現場条件で施工を行ってデータの蓄積から定量的な評価を行う必要がある。

これらの成果が将来的に『多数アンカー式補強土壁工法設計・施工マニュアル』へ反映されて、より多くの現場で適用できることを期待して結びとする。

参考資料

- 1) 財) 土木研究センター：多数アンカー式補強土壁工法設計・施工マニュアル第2版、1998.11
- 2) 財) 土木研究センター他：多数アンカー式補強土壁工法に関する研究ノート、1998.8
- 3) 財) 地盤工学会：地盤工学ハンドブック、pp.162-164、1999.3
- 4) 財) 土質工学会：補強土工法、pp.263-270、1986.5
- 5) 福岡、今村、沢田、片田、渡辺：プレートアンカーの室内模型引抜き実験、第19回土質工学研究発表会、pp.1179～1180、1984.
- 6) 西、福岡、今村、西村、永山：プレートアンカー現場実物大引抜き実験、第20回土質工学研究発表会、pp.1341～1342、1985.
- 7) 井谷、辰井、伊吹他：現地不良発生土を改良して用いる多数アンカー式補強土壁の大型室内実験（その1～その3）、pp.1811-1816、第30回土質工学研究発表会、1999.7