

戦7 アップグレードソイルを用いた土構造物に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 21

担当チーム：技術推進本部（施工）

研究担当者：大下武志、宮武裕昭、堤祥一、
澤松俊寿

【要旨】

近年、工事現場で大量に発生する建設発生土に対し、セメント改良を行ない、従来の宅地・擁壁等の支持地盤としての利用に限らず、盛土材や擁壁の裏込め土、管渠等の埋戻し土として使用することが求められている。

しかしながら、改良土を利用するにあたって、現場/室内強度比や施工のバラツキにより、現場での正確な品質を把握できないこと。通常の設計に用いられるクーロン土圧理論では、土の粘着力を過剰に評価する傾向にあり、実務では土の粘着力を評価できないこと。粒状材料をモデル対象とした従来理論は、ブロック体として作用する改良土には適用できないこと等が問題となっている。そこで昨年度は、改良土の実態に関する文献・ヒアリング調査とともに、不攪乱試料採取機の開発と、重錘落下試験と組み合わせる形での品質管理手法の提案を行った。

今年度は、伊豆縦貫道の塚原 IC 工事現場を対象とした提案する品質管理手法の有効性の検証、並びに補強土壁との組み合わせにより、改良土の定着力を評価することを企図し、多数アンカーと改良土を組み合わせた新しい設計方法・理論の提案を行った。

キーワード：改良土、浅層改良、品質管理、不攪乱試料、補強材

1. はじめに

近年、建設発生土に対し、セメント改良を行ない、盛土材や擁壁の裏込め土の利用において粘着力を評価することが求められている。しかしながら、現場/室内強度比や施工のバラツキにより、現場での正確な品質を把握できないこと。クーロン土圧理論では、実務で土の粘着力を評価していないこと。粒状材料をモデル対象とした従来理論は、ブロック体としての改良土には適用できないことが問題となっている。

そこで、伊豆縦貫道の塚原 IC 工事現場を対象とした提案する品質管理手法の有効性の検証、並びに補強土壁との組み合わせにより、改良土の定着力を評価することを企図し、アンカーと改良土を組み合わせた新しい設計方法・理論の提案を行った。

<p>問題点(1) 現場での正確な品質を把握・評価することができない</p> <p>理由(1-1)室内と現場での密度の違いによる、現場/室内強度比が発生 理由(1-2)施工の混合・攪拌の度合いによる施工のバラツキが発生</p> <p>対策(1) 新しい品質管理手法を提案（伊豆縦貫道・塚原IC工事現場にて検証）</p> <p>対策(1-1)不攪乱試料の採取により、現場/室内強度比を除去 対策(1-2)重錘落下試験機により、施工のバラツキを把握</p> <p>問題点(2) 従来の設計式（クーロン土圧式）を適用することができない</p> <p>理由(2-1)実務では、クーロン土圧の粘着力は評価していない（過大評価する傾向があるため） 理由(1-2)前提としている設計対象モデルが異なる（クーロン土圧：粒状材料 改良土：ブロック体）</p> <p>対策(2) 補強材との組み合わせにより、改良土の粘着力（定着力）を評価し、設計に反映</p> <p>対策(2-1)定着力を設計に評価できる補強材として、アンカーに注目 対策(2-2)改良土に対するアンカー引抜き遠心模型により、設計理論を提案</p>
--

図1 改良土の利用における問題点と対策

2. 新しい品質管理方法の検証

2.1 提案する品質管理方法

盛土材や裏込め材として改良土を使用し、その固結強度（粘着力）を設計に見込むためには、現場にて改良土の品質を正確に把握できることが求められている。しかしながら、従来の品質管理方法は(1)不良土ではオーバーコンパクションが起きること。(2)現場と室内試験との密度の異なるため固結強度が異なること。(3)混合の度合いによる施工のバラツキが生じることといった問題より、現場での正確な品質は把握することができず、大きな安全率を設定しているのが実状である。(図2)

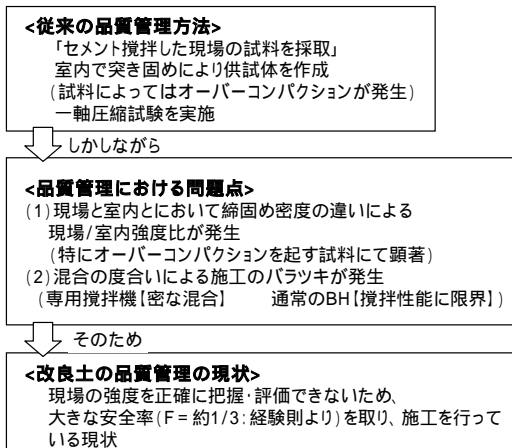


図2 従来の品質管理方法の問題点

提案する新しい品質管理方法は、まず不攪乱試料が採取可能なコアボーリング機（昨年度に土木研究所にて開発）(図3)を用いて、不攪乱試料を採取・養生し、7日後に一軸圧縮試験を行い、現場での改良土の強度の平均値を把握する。次に、重錘落下試験（改良地盤の剛性を計測）(図4)を実施し、現場における施工のバラツキを把握するものである。これにより、現状の品質管理方法の問題点である、現場/室内強度比の影響を排除し、混合の度合いによる施工のバラツキを正確に把握することができるものと考えている。(図5)



図3 不攪乱試料採取コアボーリング機(土研にて開発)



図4 重錘落下試験機

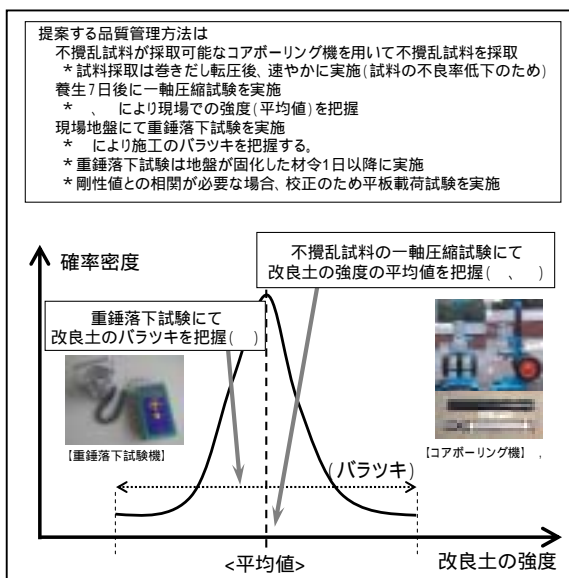


図5 提案する品質管理方法の概要

そこで、伊豆縦貫道の塚原 IC 建設工事における改良土盛土の現場を対象として、現場/室内強度比や施工のバラツキを考慮できる、新しい品質管理方法の有効性の検討を行った。

2.2 工事現場の概要

今回、品質管理方法の検討を行った伊豆縦貫道-塚原 IC 工事の概要を表1に、工事の様子を図6に示す。最大盛土高さ 40m、工事土量 33 万 m³の大規模な工事現場であり、主にロームを主体とした建設発生土に対し、プラント式の土質改良機によりセメント混合した後、1層 30cm 厚にて巻き出した後、転圧（湿地ブルドーザにて5回転圧-試験施工より規定）する形で施工が行われている。

表1 伊豆縦貫道-塚原 IC 工事の概要

工事規模	最大盛土高さ	40m
	工事土量	33万/m ³
施工方法	巻き出し厚さ	30cm
	転圧回数	20の湿地用ブルドーザにて、5回転圧
セメント混合	使用セメント	特殊土用セメント系固化材
	セメント添加量	180~220kg/m ³
	混合方法	連続機械混合式土質改良工法
現場土質	愛鷹ローム	粒度0.075mm未満...83.0% 自然含水比...149~184%
	火山灰質粘性土	粒度0.075mm未満...55.3% 自然含水比...73~171%
	箱根軽石堆積物	粒度0.075mm未満...91.9% 自然含水比...43~123%



図6 伊豆縦貫道-塚原 IC の工事の様子

2.3 試験の概要

今回実施した試験ケースと試験数を表2に示す。ともに材令 1、7日強度を対象に、不攪乱試料による一軸圧縮試験、重錘落下試験を実施した。また、重錘落下試験の値の校正と、重錘落下試験機の地盤剛性の精度を確認するために、別途平板載荷試験を実施した。

表2 試験ケースと試験数

試験項目	材令	試験数
一軸圧縮試験 (不攪乱試料)	1日強度	18
	7日強度	43
重錘落下試験	1日強度	100
	7日強度	542

試験項目	材令	試験数	地盤反力係数
平板載荷試験	1日強度	1	45.72 MN/m ³
	7日強度	1	141.41 MN/m ³

* 平板載荷試験は重錘落下試験の校正値取得を目的として実施

2.4 試験結果と分析

まず、材令1,7日強度における一軸圧縮試験値と重錘落下試験値の分布を示す。(図7)これより両試験ともに、ピークとなる領域を有しており、正規分布に従うものと判断できる。そこで、横軸に試験値を、縦軸に確率密度関数を取ること正規分布に基づく整理を行い、バラツキ状況の把握を行った。(図8-11)

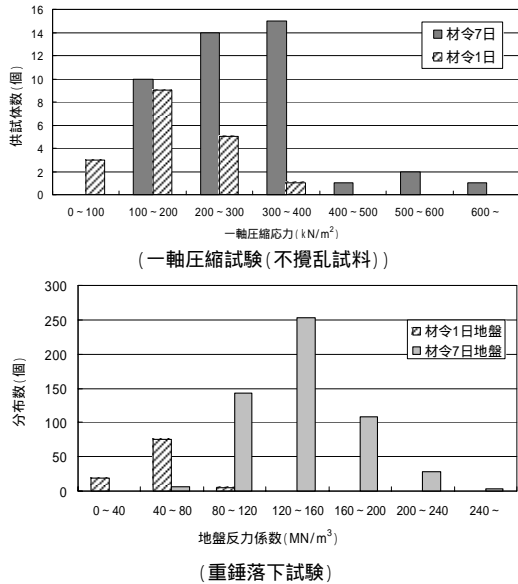


図7 一軸圧縮試験値と重錘落下試験値の分布

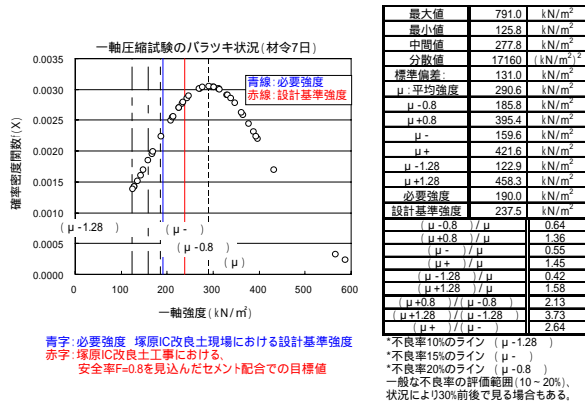


図8 一軸圧縮試験 (材令7日) のバラツキ状況

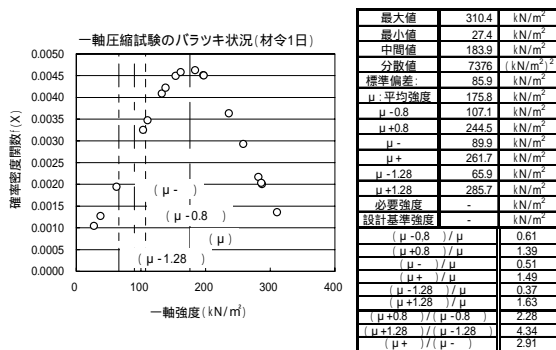


図9 一軸圧縮試験 (材令1日) のバラツキ状況

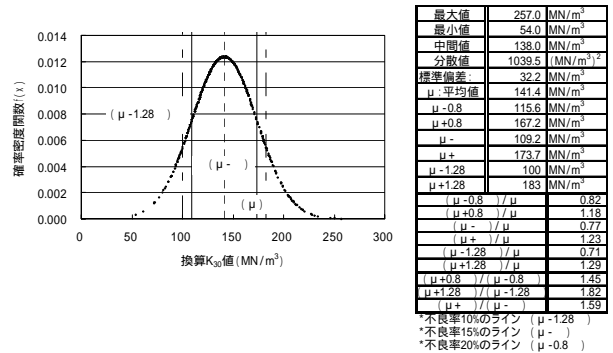


図10 重錘落下試験 (材令7日) のバラツキ状況

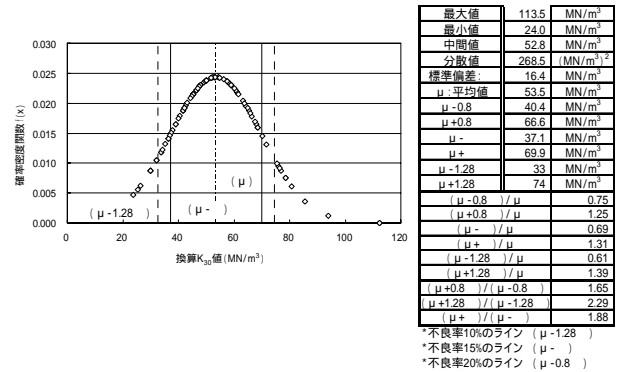


図11 重錘落下試験 (材令1日) のバラツキ状況

一軸圧縮強度と重錘落下試験値のバラツキ状況を表3にまとめる。

表3 各試験のバラツキ状況のまとめ

項目	記号	一軸圧縮試験 (kN/m ²)		重錘落下試験 (MN/m ²)	
		材令1日	材令7日	材令1日	材令7日
平均値	μ	176	291	53	141
標準偏差		86	131	16	32
不良率20%の境界値	μ-0.8	107	186	40	116
不良率15%の境界値	μ-	90	160	37	109
不良率10%の境界値	μ-1.28	66	123	33	100
不良率20%の変動幅	(μ+0.8)/(μ-0.8)	2.3	2.1	1.6	1.4
不良率15%の変動幅	(μ+)/(μ-)	2.9	2.6	1.9	1.6
不良率10%の変動幅	(μ+1.28)/(μ-1.28)	4.3	3.7	2.3	1.8
変動係数	V: (σ/μ)	0.49	0.45	0.31	0.23

これより、分かることを以下にまとめる。

- 変動係数の値より、材令による強度のバラツキに大きな差を見ることはできなかった。
- 一軸圧縮試験の材令1,7日ともに、不良率を約10%で評価する場合の強度のバラツキ幅は約4倍、15%では約2.5~3倍、20%では約2倍であった。不良率は通常10~20%(良品率80~90%)の範囲で評価・設定する^{*)}ため、経験則によるバラツキ幅($F_c=0.3^{(2)}$)は現状を反映した妥当な値であると考えられることができる。
- 重錘落下試験によるバラツキは、一軸圧縮試験よりかなり小さく、不良率約10%で約2倍、20%では約1.5倍であった。これは地盤剛性を直接計測しているため、一軸圧縮試験と異なり試料採取や整形に伴う実験誤差を排除できることが、理由として考えられる。

2.5 提案する品質管理方法の適用方針

今回の検討結果より、一軸圧縮試験と重錘落下試験には大きなバラツキの差が見られた。そのため重錘落下試験のバラツキを、そのまま地盤のバラツキとして評価する場合、設計基準強度が高い値となり、安全率を過剰に見ることが懸念される。そのため実際の使用においては、試験施工もしくは施工初期の段階で、一軸圧縮試験と重錘落下試験のバラツキ範囲を求め、補正を行う必要があるものと考えられる。(図12 表4)

$$F_c = (1 - m \times V_1) \times \overline{q_{uf}}$$

$$= (1 - m \times V_2 \times C) \times \overline{q_{uf}}$$

F_c : 設計基準強度
 q_{uf} : 現場平均一軸圧縮強さ
 m : 地盤改良強度のバラツキ (一般値 $m=1.3$ 不良率10%)
 V_1 : 一軸圧縮試験による変動係数
 V_2 : 重錘落下試験による変動係数
 C : 補正係数 (V_1/V_2)

図12 一軸圧縮と重錘落下試験値の補正

表4 一軸圧縮と重錘落下試験値の補正結果

実施試験	材令	V: 変動係数 ¹⁾	Vを平均化	C: 補正係数 ²⁾	備考
一軸圧縮	材令1日	0.49	0.47	1.75	C=0.47/0.27
	材令7日	0.45			
重錘落下	材令1日	0.31	0.27		
	材令7日	0.23			
実施試験	材令	平均値 $\mu(q_{uf})$ kN/m	不良率20% $\mu-0.8$ kN/m	不良率15% $\mu-$ kN/m	不良率10% $\mu-1.28$ kN/m
一軸圧縮	材令1日	175.8	107.1	89.9	65.8
	材令7日	290.6	185.8	159.6	122.9
重錘落下	材令1日	175.8	109.74	93.23	70.10
	材令7日	290.6	181.4	154.1	115.9

*1 V=(標準偏差値)/(平均値) 太字: 補正式による補正値
 *2 C=(一軸のV)/(重錘落下のV)

2.6 新しい品質管理方法の検証に関するまとめ

本試験における結果を以下にまとめる。

- 一軸圧縮試験、重錘落下試験ともに材令の違いによる強度のバラツキは小さいことが分かった。
- 重錘落下試験は一軸圧縮試験と比較して、試験誤差が小さい分バラツキが小さく、実際の使用では、一軸圧縮試験との間に補正を行う必要があることが分かった。
- 今回の検証から、提案する品質管理方法の適用方針を以下に示す。

- 平均強度把握のための一軸圧縮試験(不攪乱試料)の際、ある程度の供試体(目安10本以上)を取り、一軸圧縮試験での変動係数についても把握を行う。【施工初期】
- 重錘落下試験を実施し、変動係数を把握する。【施工初期】
- 一軸圧縮試験と重錘落下試験の値から補正係数

を求め、以後の施工においては、少数の不攪乱試料による一軸圧縮試験と重錘落下により品質管理を行う。【施工全体】

3. セメント改良土のアンカー引抜き遠心模型実験

3.1 セメント改良土の定着力の評価

擁壁・橋台の裏込め部に用いられる土は、排水性が良いことが条件であるため、排水性や強度等の問題から、不良土として処分されている建設発生土に対し、セメント混合による改良を行ない、不良土の利用や擁壁背面部への作用土圧の低減を企図した設計を行うことで、建設コストの縮減や建設発生土の減少による環境への配慮が求められている。しかしながら、通常の設計に用いられるクーロン式は、ブロック体として挙動するセメント改良土に適用することは理論的に難しく、また実務においても、安全を見て土の粘着力は設計に見込んでいないのが現状である。そのため改良土の定着力(固結力)を評価する設計法が求められている。(図13)

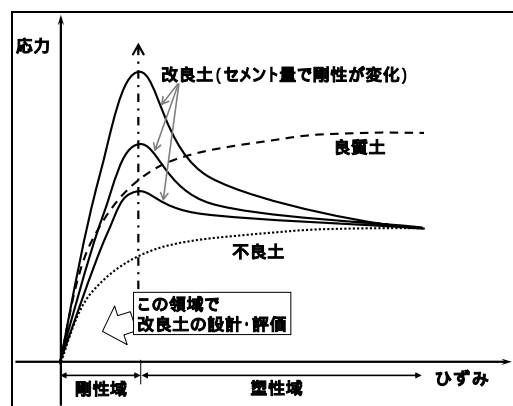


図13 改良土の定着力の評価のイメージ

そこで、改良土の定着力を設計に組み込むことができる補強材として、アンカープレートに注目し、セメント改良土を補強土壁の裏込め材として使用することを企図して、セメント改良土の定着力を評価するためのアンカープレート引抜き遠心模型実験を行った。

3.2 アンカー引抜き遠心模型実験の概要

図14に実験の概要図を示す。改良土の定着力がアンカープレートの引抜き強度に与える影響を評価するために、改良土の被り深さ(4、8、12cm) 改良土の強度(300、400、800 kN/m²) アンカープレート(円形)の径(27、40mm)をパラメータとして、遠心30G場にて引抜き試験を行った。砂の地盤のケース(Case1-1、1-2)では豊浦砂を用い、改良土の地盤では強度のバラツキを低減するために粒径の小さい東北珪砂(特砂8号)を用いた。

27 mmのケースは1回の改良土地盤で3ケースずつ、40 mmのケースは2ケースずつ、できるだけ距離を離す形でアンカープレートの配置を行った。(表5)

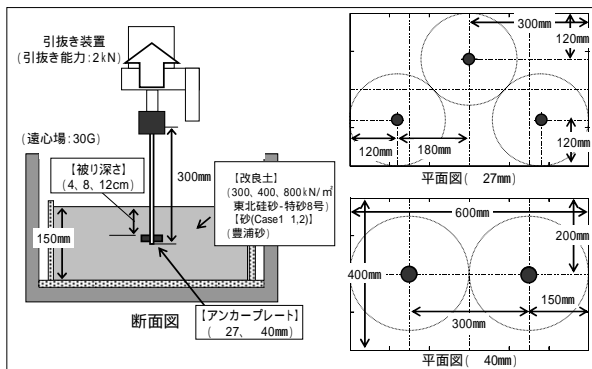


図 14 改良土のアンカー引抜き試験の概要

表 5 実験のケース

Case	改良土強度 (kN/m ²)	アンカー径 (mm)	被り深さ (cm)	備考
Case1-1	-	27.0	8.0	砂(豊浦砂)- 27
Case1-2	-	40.0	8.0	砂(豊浦砂)- 27
Case2-1	400.0	27.0	4.0	被り(小)-強度(中)
Case2-2			8.0	被り(中)-強度(中)
Case2-3			12.0	被り(大)-強度(中)
Case3-1	800.0	27.0	4.0	被り(小)-強度(大)
Case3-2			8.0	被り(中)-強度(大)
Case4-1	300.0	27.0	4.0	被り(小)-強度(小)
Case4-2			8.0	被り(中)-強度(小)
Case4-3			12.0	被り(大)-強度(小)
Case5-1	400.0	40.0	4.0	被り(小)-強度(中)
Case5-2			8.0	被り(中)-強度(中)
Case6-1	800.0	40.0	4.0	被り(小)-強度(大)
Case6-2			8.0	被り(中)-強度(大)
Case7-1	300.0	40.0	4.0	被り(小)-強度(小)
Case7-2			8.0	被り(中)-強度(小)

* Case3-3は実施したものの、引抜き装置の能力を越えたため、降伏前に停止
 * 遠心G: 30G
 * 砂(豊浦砂)は乾燥状態、密度は1.58
 * セメントは早強セメントを使用
 * 数字は模型寸法
 * 改良土の乾燥密度は1.36
 * 引抜き速度は0.05mm/sec

3.3 実験結果

アンカープレート引抜きの影響範囲

引抜き試験後の供試体の引抜き状態と亀裂の発生状況を図15に示す。これより、アンカープレートの引抜き破壊は従来言われている荷重分散の分散を考えないパンチング破壊ではなく、荷重伝達は通常の砂と同様に拡散することが分かる。また、荷重伝達の角度は砂の内部摩擦角と同様の約35°程度であるものと考えられる。



図 15 引抜き試験後の供試体の状態と亀裂の発生状況

実験結果

続いて、ひずみと引抜き荷重(実大換算)の関係を被り深さ(4、8cm) アンカー径(27、40mm) 改良体の強度(400、800 kN/m²)ごとに比較を行った。(図16-17) これより、結果を以下にまとめる。

- ・ひずみ-荷重曲線は一軸圧縮試験と同様な分布を示し、砂以外のどのケースにおいてもひずみ量が約1~1.5%程度の範囲で降伏荷重に到達しており、通常の一軸圧縮試験での降伏ひずみ量に近いこと。
- ・また、ひずみ量が5%程度で、セメント固化による定着力は大幅に低下していること。
- ・改良土の強度、被り深さともに大きくなるにつれ、降伏荷重が大きくなる傾向があるが、被り深さが荷重の立ち上がりを与える影響が大きいこと。

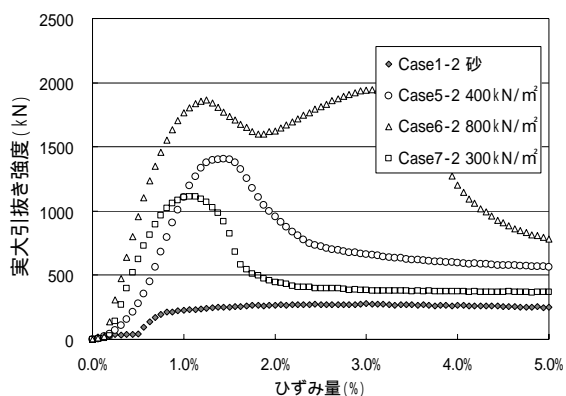


図 16 ひずみ-引抜き強度の関係(被り8cm 40)

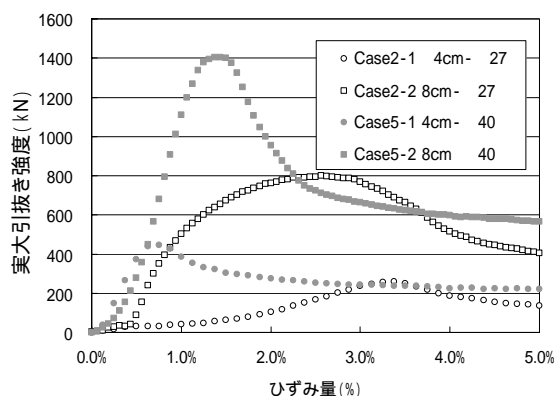


図 17 ひずみ-引抜き強度の関係 (400 kN/m²被り4、8cm- 27、40 mm)

3.4 設計モデルの提案と実験値との比較

設計モデルの提案

今回の実験結果を基に、アンカープレートの径から円錐状に荷重の伝達が発生し、円錐の側面積部において、

改良土が引張破壊を起す形を想定した設計モデルと設計式の提案を行う。(図18) なお、設計値の試算に当たり、荷重伝達の分散角は一般的な砂で用いられる35°を用いた。

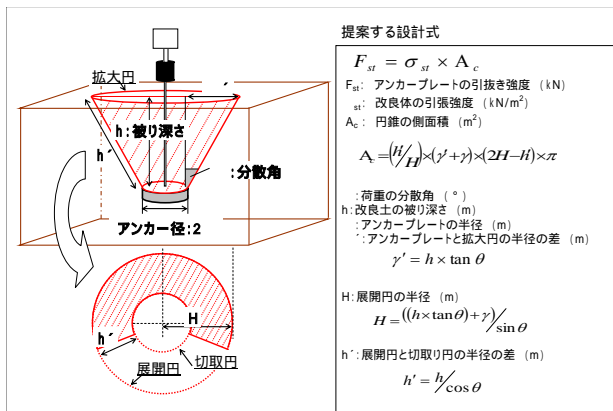


図18 提案する設計モデルと設計式

実験値との比較

提案した設計式による設計値と、実験値との比較を行った。(表6、図19)これより、設計値と実験値との間にはかなり良い整合が得られている。これは改良土は通常の砂と異なり、粒子のせん断による滑りではなく、荷重伝達の分散を考慮した円錐の側面部において、セメントによる固結が切れる形で引張破壊が作用しているためと考えられる。(図20)

表6 設計値と実験値の結果(実大換算 遠心30G)

実験Case	アンカー径 cm	荷重分散角 °	試算条件		改良強度 kN/m ²	引張強度 kN/m ²	降伏荷重の比較			
			被り深さ m	側面積 m ²			計算値 ^{*)} kN	実験値 kN		
Case2-1	81	35	1.2	7.59	400	40	304	260		
Case2-2			2.4	22.92			917	799		
Case2-3			3.6	45.99			1839	1549		
Case3-1			1.2	7.59	800	80	608	837		
Case3-2			2.4	22.92			1834	1996		
Case4-1			1.2	7.59			228	180		
Case4-2			2.4	22.92	300	30	688	647		
Case4-3			3.6	45.99			1380	1347		
Case5-1			1.2	9.39			400	40	376	445
Case5-2			2.4	26.51	1061	1405				
Case6-1			120	35	1.2	9.39	800	80	751	371
Case6-2					2.4	26.51			2121	1866
Case7-1	1.2	9.39			282	184				
Case7-2	2.4	26.51			795	1113				

*3-3は降伏荷重に到達せず、(許容量オーバー)

数字は全て実大換算

*1 計算値 = 側面積 × 引張強度

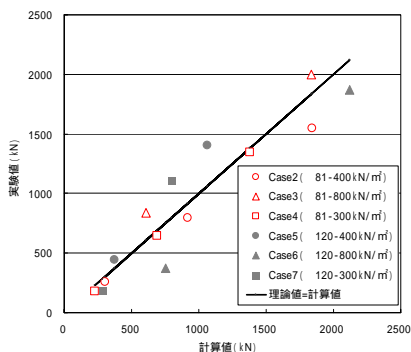


図19 計算値と実験値の比較結果

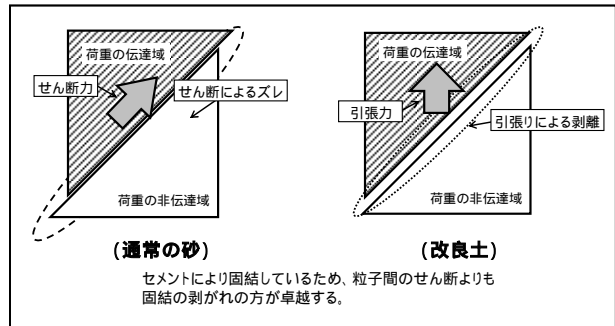


図20 想定される改良土の破壊現象

3.5 アンカー引抜き遠心模型実験のまとめ

今回の実験で分かったことを以下にまとめる。

- ・ひずみ - 荷重曲線は一軸圧縮試験と同様な分布を示し、砂を除いたどのケースにおいてもひずみ量が約1~1.5%程度の範囲で降伏荷重に到達し、ひずみ量が5%まで行くと、セメント固化による定着力は大幅に低下していること。
- ・設計モデルの検討結果と実験によるひび割れ範囲により検討した結果、改良土の荷重伝達の分散角は、一般の砂の内部摩擦角と同じ約35°程度であること。
- ・設計モデルと実験値との比較より、荷重の伝達を想定した円錐の側面積に、引張破壊が作用するものとして求めた設計値と、実験による降伏荷重値との間に良い整合が得られること。
- ・これより改良土は通常の砂と異なり、せん断による滑りではなく、荷重の伝達域と非伝達域との間でセメントの結合が切れて剥離する現象が起きているものと考えられること。

4. 今後の課題

今年度の実験により、提案する改良土の品質管理方法が有効であることを実際の現場において確認でき、またアンカーと改良土との定着力の把握・評価を適切に行うことができた。次年度では、さらなる現場でのデータの蓄積、並びに補強土壁全体での設計・評価を念頭に置いて実験・検証を行う予定である。

参考文献

- 1) (財)日本建築センター：改訂版 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針 セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法、pp. 198-226 2004年
- 2) (社)セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル(第3版) 2003年
- 3) 土木研究所資料第3812号：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、2001年
- 4) (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3版、2002年

A STUDY ON THE IMPROVED SOIL USED FOR EARTH STRUCTURE

Abstract : Because of the shortage of dump yards, it is required to reduce and recycle the construction surplus soil. From the cost reduction for public works, reasonable design and quality of the earth structure is required as well. If the strength characteristic of improved soil is considered for the earth structure, for example the retaining wall, it is possible to design reasonable and economical earth structure.

However, we have two problems for the use of improved soil. The first problem is to be difficult to know the quality of improved soil at construction field. The second problem is to not be able to use the Coulomb design theory because the target model is difference between improved soil and ordinary soil.

In 2007, we conducted verification whether new quality control method of improved soil we propose is effective or not in construction field, and conducted the pulling resistance test of anchor plate for improved soil by centrifuge experiment because of the valuation of strength characteristic for improved soil.

Key words : improved soil, surface mixing soil stabilization, quality assessment, undisturbed sampling, reinforcement