

管中混合固化処理工法を想定したセメント改良土の力学挙動の把握と 弾塑性力学に基づく解釈

Elasto-plastic interpretation of mechanical behavior of the dredged soil treated by Pneumatic Flow Method

依田広貴¹，中野正樹¹，山田正太郎¹，堀内俊輔²，笹山哲司¹

1 名古屋大学大学院・工学研究科社会基盤工学専攻・yoda@soil.civil.nagoya-u.ac.jp

2 東日本旅客鉄道（株）・仙台支社

概 要

浚渫土を管中混合固化処理工法を施して有効利用することを視野に研究を行った。具体的には、管中混合固化処理工法を想定して作製したセメント改良土に対し、標準圧密試験および三軸圧縮試験を実施した上で、骨格構造概念を有する土骨格の弾塑性構成式 SYS Cam-clay model によってその実験結果を再現することを試みた。その結果、セメント添加は、その土に人工的な構造高位化と疑似的な過圧密土化をもたらすとして、その効果を解釈できることを示した。また、セメント添加量の違いは過圧密比の違いに反映されやすく、一方で水セメント比の違いは構造の発達程度に反映されやすいことを示した。さらに、三軸試験を要素試験としてではなく、境界値問題と見做す立場から水～土連成有限変形解析を実施した。非一様な変形の影響として、せん断面の発生と共に軸差応力-軸ひずみ関係において急激な荷重低下が生じることを示す一方で、マスとして整理した有効応力経路は構成式が示す有効応力経路と比較的よく似た挙動を示すことなどを示した。

キーワード：浚渫土砂，改良土，管中混合固化処理工法，構成式応答，境界値問題

1. はじめに

名古屋港では年間 130 万 m³ 以上の浚渫土砂が発生している。浚渫土砂の仮置き場である名古屋港ポートアイランド (PI) の受け入れ容量は限界にきている。そこで本研究では、管中混合固化処理工法による PI 浚渫土のセメント改良土を有効利用するため、室内試験による改良土の力学特性の詳細な把握を行い、弾塑性構成モデルによる力学特性の再現、および改良効果を解釈することを目指す。そのために、はじめに、セメント改良した浚渫土砂を対象に実施した標準圧密試験および非排水三軸試験の結果を示す。これらの実験によって得られたセメント改良土の力学挙動を、骨格構造の変化を記述可能な弾塑性構成式 SYS Cam-clay model¹⁾を用いて再現しつつ、セメント添加による改良効果を骨格構造概念および弾塑性力学に基づいて説明することを試みる。

次に、その結果を踏まえた上で、セメント添加量の違いによって、セメント改良土の力学挙動がどのように変化するか実験的に調べると共に、その違いを骨格構造概念を有する弾塑性力学に基づいて説明することを試みる。

また、このように三軸試験を要素試験と見做す立場から

セメント改良土の力学挙動について考察する一方で、三軸試験を境界値問題として捉える立場²⁾からも考察する。具体的には、三軸試験を要素試験と見做す立場から求めた材料定数および初期値を用いて、改めて三軸試験を境界値問題として解き直すことによって、非一様な変形が、三軸試験結果に与える影響について調べる。

2. セメント改良土の力学挙動の把握と SYS Cam-clay model による再現

本章では、管中混合固化処理工法を想定して作製したセメント改良土に対し、標準圧密試験および三軸試験を実施した上で、SYS Cam-clay model によってその実験結果を再現することを試みる。また、本章では、この試みに先立ち、一旦セメント固化を施した土を練り返した試料に対して実験を行うことで、SYS Cam-clay model 弾塑性パラメータを決定することを試みる。

2.1 浚渫土の物理特性とセメント改良土の配合条件

実験には、名古屋港ポートアイランドで採取した浚渫土砂を用いた。表 1 に浚渫土砂の物理特性を示す。細粒分が

96%を超える粘土質の浚渫土である。本研究では、この浚渫土砂を管中混合固化処理工法によってセメント安定処理することを想定して実験を行った。適度な流動特性を得るために、目標フロー値を90~100mmに設定した。また、目標強度を養生28日の一軸圧縮強度で100~200kPaに設定した。これらの目標値を満たすべく決めた配合条件を表2に示す。実験は全て養生28日の供試体に対して行った。

表1 浚渫土の物理特性

土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]	2.67
自然含水比 w_n [%]	50~110
液性限界 w_L [%]	52.5
塑性限界 w_p [%]	25.1
塑性指数 I_p [%]	27.4
粘土分 [%]	60
シルト分 [%]	36.6
砂分 [%]	3.4
平均粒径 D_{50} [mm]	0.002

表2 セメント改良土の配合条件

	浚渫土含水比 w_0 [%]	セメント添加量 C [kg/m ³]	水セメント比 W/C
セメント改良土	120	50	14.98

2.2 セメント改良土の力学挙動

図1にセメント改良土の標準圧密試験結果を示す。図中には、比較のために、改良の対象とした浚渫土の標準圧密試験結果も示す。フロー値を満足させた結果、初期間隙比が大きい状態になっていることが分かる。また、セメント添加の効果によって、ある程度の応力レベルまでこの間隙比の大きな状態を保つことができることも分かる。一方、ある応力レベルに達すると浚渫土に比べて高い圧縮性を示すことが分かる。これらのことから、セメント改良土は、構造が発達した状態であつ、擬似的に過圧密状態になっていると考えられる。

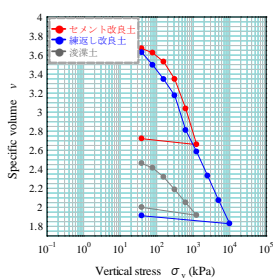


図1 標準圧密試験結果

図2にセメント改良土の非排水三軸試験結果を示す。低

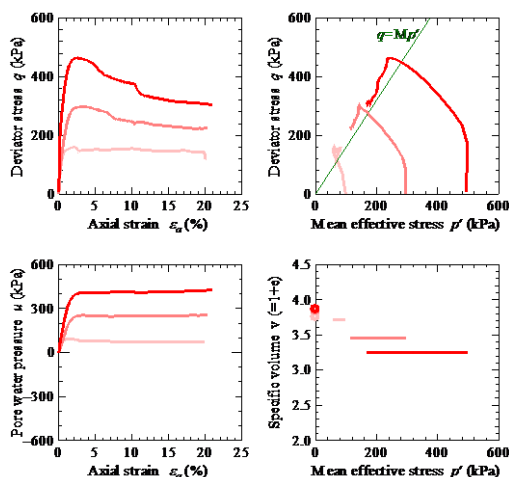


図2 セメント改良土の非排水三軸試験結果

拘束圧では有効応力経路で巻き返し挙動が見られる。また、拘束圧を上げていくと、顕著な塑性圧縮を伴う軟化挙動が見られるようになっていく。これらの挙動は構造が発達した自然堆積粘土に特徴的な挙動である³⁾。したがって、図2に示す挙動からも、セメント改良土は構造が発達した状態であつ擬似的に過圧密状態になっていると考えられる。また、低拘束圧で巻き返し挙動が見られることから、セメント改良土は構造劣化に比べて過圧密の解消が速い試料であると考えられる。

2.3 繰り返したセメント改良土の力学挙動

上記の結果を踏まえ、本稿では、セメント改良土を構造が発達した過圧密状態にある土として、SYS Cam-clay modelによってその挙動を再現することを試みる。SYS Cam-clay modelは、練返し正規圧密土の弾塑性挙動を記述するCam-clay modelをベースに、構造が発達し過圧密にある土が塑性変形を受けることで練返し正規圧密土に漸近してゆく過程を記述する弾塑性構成式である。このモデルでは、Cam-clay modelに必要な材料定数のことを弾塑性パラメータと呼ぶ。通常、自然堆積した粘土に対してSYS Cam-clay modelを用いる場合は、その試料を繰り返して意図的に構造を劣化させた試料に対して室内要素試験を行うことで、弾塑性パラメータを決定する。セメント改良土に骨格構造概念を適用する場合、一つの考え方として、セメント改良土は塑性変形の結果、セメント添加によって得られた効果を全て喪失し、最終的にセメントを添加する前の母材(本稿では浚渫土)と同じ状態に帰着すると考えることができる。しかし、本稿では、セメントが一旦添加されると、その土は母材とは異なる土になるとの考え方から、自然堆積粘土を対象とする場合と同様に、セメント改良土を繰り返した試料に対し実験を行い、弾塑性パラメータを決定することを試みる。

図1に一旦固化したセメント改良土(養生28日)を繰り返した試料に対し行った標準圧密試験結果を示す。同図には繰り返す前のセメント改良土と浚渫土の実験結果も示している。まず、繰り返したセメント改良土は浚渫土と異なる挙動を取っていることがわかる。また、繰り返したセメント改良土の圧縮線は比較的直線的な挙動をとっており、構造の劣化した正規圧密土と比べてよい状態にあると考えられる。したがって、これらの結果より、一旦セメントが添加された土は、十分に繰り返しても母材には帰らないことが示唆される。また、セメント改良土の一次元圧縮挙動は繰り返したセメント改良土の一次元圧縮挙動に徐々に漸近しており、繰り返したセメント改良土を基準にとることの妥当性が伺える。

図3に繰り返したセメント改良土の非排水三軸試験の結果を示す。同図には、比較のために、浚渫土の非排水三軸試験結果も示す。繰り返したセメント改良土は、練返し正規圧密粘土に見られる挙動をとっている。その挙動は浚渫土とよく似ているが、セメント改良土は浚渫土に比べて明らかに高い間隙比を有しており、やはり一旦セメントが

添加された土は、十分に繰り返しても母材には帰らないことが見て取れる。

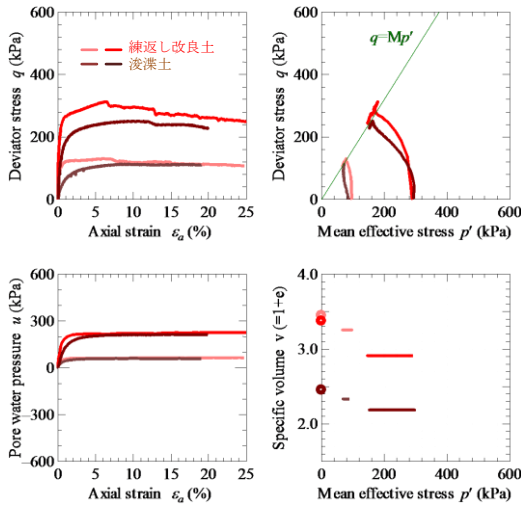


図3 繰り返されたセメント改良土および浚渫土の非排水三軸試験結果

2.4 SYS Cam-clay modelによるセメント改良土の力学挙動の再現

次に、SYS Cam-clay modelによりセメント改良土の力学挙動(図1と2)を再現することを試みる。表3に解析に用いた材料定数と初期値を示す。表中に示す弾塑性パラメータは、図1と3に示す繰り返したセメント改良土に対して実施した実験結果より求めた値である。

表3 材料定数と初期値結果

試験条件		非排水三軸試験 拘束圧 98.1kPa	標準圧密試験
弾塑性パラメータ			
圧縮指数	λ	0.363	0.363
膨潤指数	κ	0.050	0.050
限界状態定数	M	1.600	1.600
NCLの切片	N	3.400	3.400
ポアゾン比	ν	0.300	0.300
発展則パラメータ			
正規圧密化指数	M	0.6	0.6
構造劣化指数	a	0.6	0.6
	b	1.0	1.0
	c	1.0	1.0
塑性せん断：塑性圧縮	c_s	0.5	0.5
回転硬化指数	b_r	0.001	0.001
回転硬化限界定数	m_b	0.5	0.5
初期値			
過圧密比	$1/R_0$	20.933	12.254
構造の程度	$1/R_0^*$	10	10
鉛直応力	σ_v	19.62	39.24
比体積	v_0	3.753	3.669
応力比	η_0	0	0
初期異方性	ζ_0	0	0

図4にセメント改良土の一次元圧縮挙動のシミュレーション結果を示す。図中には繰り返したセメント改良土のシミュレーション結果も併せて示す。セメント改良土は、繰り返したセメント改良土よりも大きな間隙比を示しているが、鉛直応力が増加していくと、徐々に塑性変形量が

大きくなり、ある応力レベルを過ぎると、次第に繰り返したセメント改良土の一次元圧縮挙動に漸近してゆく様子が再現されている。

図5にセメント改良土の非排水せん断挙動のシミュレーション

結果を示す。解析は、表3に示す拘束圧19.62kPaの状態から各拘束圧まで等方圧縮する過程も含めて行った。図5では、図2に示す実験結果と同様に、拘束圧を上げていくと、巻き返すような挙動から、巻き返さずに塑性圧縮を伴う軟化挙動を示す挙動に変化してゆく様子が見られ、実験結果を概ね再現できている。このように、セメント添加は、その土に人工的な構造高位化と疑似的な過圧密化をもたらしとしてその効果を理解できる。

なお、図3の実験結果には繰り返したセメント改良土の限界状態線を示しているが、拘束圧294kPaおよび491kPaの結果は $q=Mp'$ よりも上側で塑性圧縮を伴う軟化挙動を示している。これに対し、図5に示す解析結果は $q=Mp'$ よりも下側で塑性圧縮を伴う軟化挙動を示している。(異方性による効果を仮に見なければ、)SYS Cam-clay modelは限界状態線よりも上側で塑性圧縮を示すことはないため、実験結果が示す挙動を厳密には再現することができない。セメント添加量を増加させてゆくとこのような挙動が卓越して見られるようになってくるため、このような挙動についても着目して調べて行く必要がある。

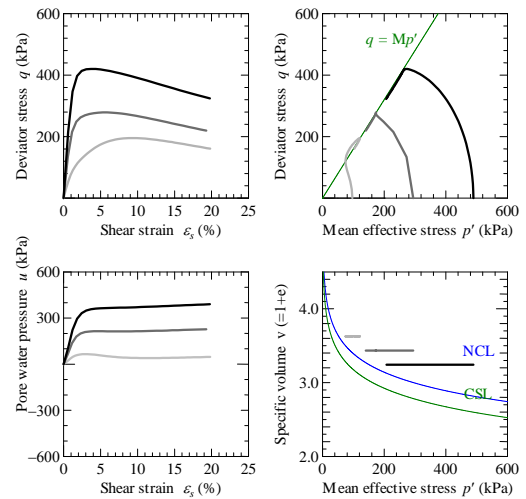


図5 SYS Cam-clay modelによる非排水三軸試験のシミュレーション結果

3. SYS Cam-clay modelによるセメント添加量の影響の把握

本章では、第2章の議論を踏まえた上で、セメント添加量の違いが土の弾塑性力学挙動にどのような影響を及ぼ

すか、実験結果と SYS Cam-clay model によるその再現結果を通して理解することを試みる。

3.1 セメント添加量の比較に用いる配合条件

表 4 にセメント添加量の影響を比較するためのセメント改良土の配合条件を示す。前述した通り、本稿では管中混合固化処理工法を想定しているため、流動性および強度の確保を考慮した含水比 $w=120\%$ 、セメント添加量 $C=30, 50, 70\text{kg/m}^3$ なる配合条件でセメント改良土を作製した。

表 4 セメント添加量の比較に用いる配合条件

	浚渫土含水比 w_0 [%]	セメント添加量 C [kg/m^3]	水セメント比 W/C
セメント改良土	120	30	25.23
		50	14.98
		70	10.63

3.2 セメント改良土の弾塑性パラメータに与えるセメント添加量の影響

前述した通り、本論文ではセメント改良土の力学挙動を再現する際、一旦セメント添加を受けると、その土は母材とは異なる土になるとの考え方から、固化したセメント改良土を繰り返すことによって弾塑性パラメータを求める。セメント添加量の違いによって弾塑性パラメータがどのように変化するか、標準圧密試験および三軸試験によって調べた。

図 6 に繰り返されたセメント改良土の標準圧密試験結果を示す。全ての添加量において比較的直線的な挙動が見られ、概ね練返し正規圧密土の挙動であると言える。また、セメント添加量が増加するほ

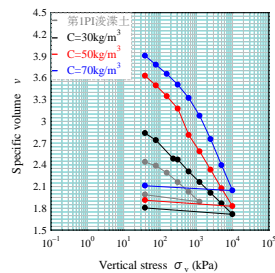


図 6 標準圧密試験結果

表 5 材料定数と初期値

弾塑性パラメータ		処理土		
固化材添加量		$C=30\text{kg/m}^3$	$C=50\text{kg/m}^3$	$C=70\text{kg/m}^3$
拘束圧		98.1kPa	98.1kPa	98.1kPa
圧縮指数	λ	0.212	0.363	0.511
膨潤指数	κ	0.050	0.050	0.030
限界状態定数	M	1.700	1.600	1.650
NCL の切片	N	2.700	3.400	4.200
ポアソン比	ν	0.300	0.300	0.300
発展則パラメータ				
正規圧密土化指数	m	0.01	0.6	5.0
構造劣化指数	a	0.25	0.6	1.5
	b	1.0	1.0	1.0
	c	1.0	1.0	1.0
塑性せん断：塑性圧縮	c_s	0.2	0.5	0.1
回転硬化指数	b_r	0.001	0.001	0.001
回転硬化限界定数	m_b	0.5	0.5	0.5
初期値				
過圧密比	$1/R_0$	1.025	20.933	63.753
構造の程度	$1/R^*_0$	260	10	5
鉛直応力	σ_v	19.62	19.62	19.62
比体積	v_0	3.938	3.753	3.798
応力比	η_0	0	0	0
初期異方性	ζ_0	0	0	0

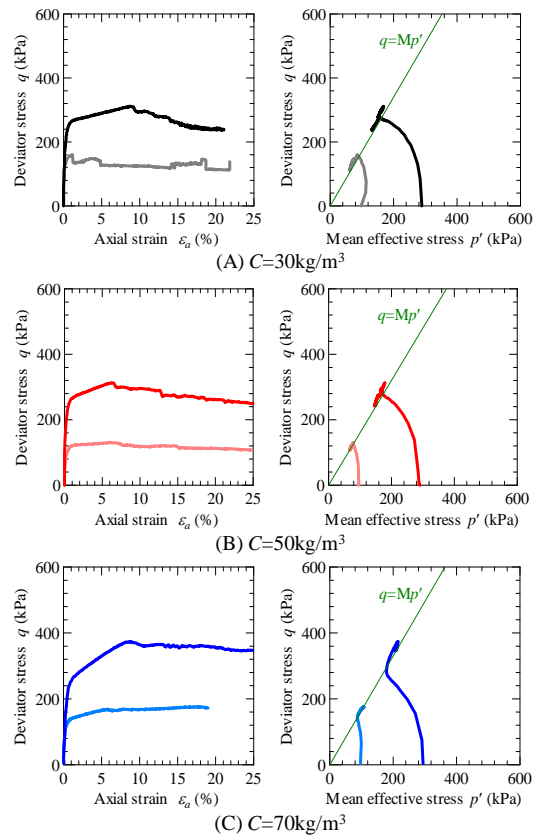


図 7 繰り返されたセメント改良土の非排水せん断挙動

ど圧縮線の傾き λ および正規圧密線の切片 N の値が大きくなる傾向が見られる。これらのことから、練返し正規圧密線はセメント添加量の違いに応じて異なることがわかる。図 7 に繰り返されたセメント改良土の非排水せん断試験結果を示す。いずれのセメント添加量においても、概ね練返し正規圧密土の挙動が見られる。また、セメント添加量の違いは限界状態定数 M には大きな変化を与えないことがわかる。表 5 にこれらの実験結果から決めた弾塑性パラメータを示す。本研究では上記の実験結果を踏まえて、セメント添加量の違いに応じて異なる弾塑性パラメータを与えた。セメント添加量の違いは、特に練返し正規圧密線の切片 N および傾き λ に現れると言える。

3.3 構造の発達程度および過圧密比に与えるセメント添加量の影響

図 8 にセメント改良土の標準圧密試験結果と SYS Cam-clay model によるその再現結果を示す。図 8 より、セメント添加量が増加するほど圧密降伏応力が大きくなる事が分かる。また、いずれも圧密降伏応力を超えると高い圧縮性を示す傾向が見られる。図 6 と比較すると、いずれの添加量においても、セメント添加により、構造の高位化がもたらされたと考えられる。図 8 より、SYS Cam-clay model はこれらの傾向を概ね再現できているといえる。ただし、セメント添加量 $C=30\text{kg/m}^3$ に関しては、解析の方が、圧縮線が低い位置にあるが、別途行った他の浚渫土を用いた実験結果と比較した結果、実験において比体積が少し大きく出てしまった可能性があると考えている。

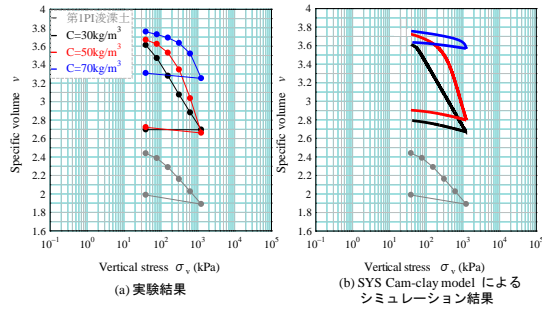


図 8 繰り返されたセメント改良土の非排水せん断挙動

図 9 にセメント改良土の非排水せん断試験結果と SYS Cam-clay model によるその再現結果を示す。まず、実験結果に着目すると、図 9(A)では、塑性圧縮を伴う軟化が見られることから、セメント改良土は高位な構造を有していると思ふことができる。図 9(B)では、低い拘束圧では巻き返し挙動を示すが、拘束圧を上げると巻き返さずに軟化することから、初期に過圧密状態にあることも分かる。また、図 9(C)では、塑性膨張を伴う硬化挙動がはっきりと見られることから、 $C=70\text{kg/m}^3$ は過圧密比の高い状態にあることが分かる。解析結果に目を移してみると、SYS Cam-clay model はこれらの挙動を概ね再現している。ただし、 $C=70\text{kg/m}^3$ ではテンションカットオフライン ($q=3p'$) に有効応力が達しているが、解析結果はこのような高い応力比に達していない。

表 5 に解析に用いた SYS Cam-clay model の材料定数と

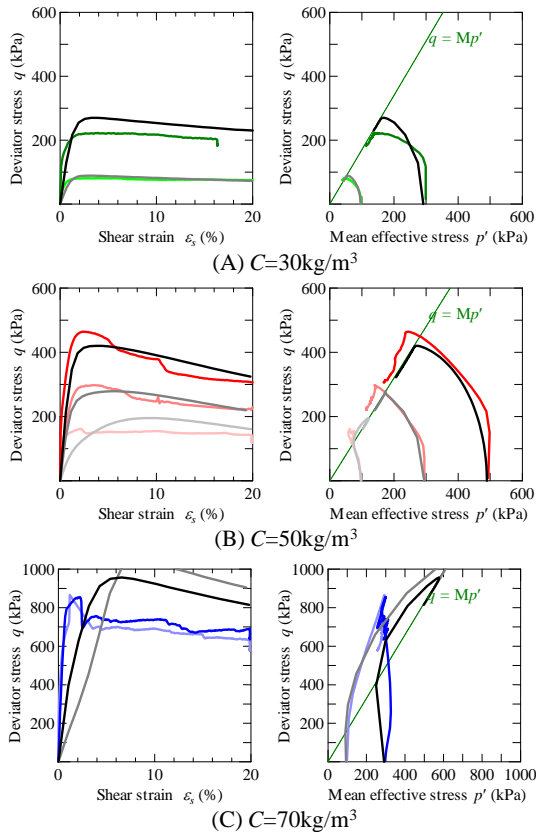


図 9 セメント改良土の非排水せん断挙動と SYS Cam-clay model によるその再現

初期値を示す。まず、いずれの改良土においてもセメント添加によって人工的な構造の高位化と疑似的な過圧密土化がもたらされていることが見て取れる。また、セメント添加量の増加によって過圧密比が増加することが分かる。一方で、構造の発達程度はセメント添加量の増加によって逆に低下していることがわかる。これは、今回の配合条件では浚渫土の含水比を一定にした結果、セメント添加量が大きくなるほど、水セメント比が小さくなっていることに対応していると考えられる。

4. 水～土連成有限変形解析による三軸試験の数値シミュレーション

以上では、三軸試験を要素試験と見做す立場から、セメント改良土の力学挙動を解釈することを試みてきた。本章では、三軸試験を境界値問題と見做す立場に立って、セメント改良土の力学挙動について改めて議論する。

4.1 解析条件

三軸試験を境界値問題として取り扱うにあたり、土骨格の構成式に SYS Cam-clay model を搭載する水～土連成有限変形解析コード **GEOASIA**⁴⁾ を用いた。図 10 に有限要素メッシュおよび境界条件を示す。解析は平面ひずみ条件で行った。供試体の周囲を非排水境界とし、上下端面はキャップとペダスタルが剛で摩擦のある条件とした。供試体側面には幾何学的

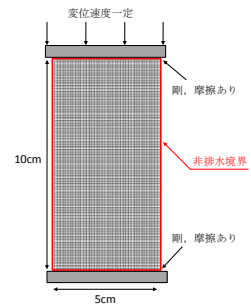


図 10 有限要素メッシュと境界条件

な初期不整として、振幅 0.005cm の余弦カーブ (半周期) で与えられる 1 次の非対称モード²⁾を与えた。せん断速度は $1.4 \times 10^{-2}\%$ /min として、供試体上端面に下向きの変位速度を与えた。解析の対象とした実験は図 2 の $C=50\text{kg/m}^3$ 、拘束圧 98kPa と 294kPa の場合である。三軸試験を要素試験と見做す立場に立って求めた SYS Cam-clay model の材料定数および初期値 (表 3) を用いて、これらの三軸試験結果を境界値問題として改めてシミュレーションする。

4.2 解析結果

拘束圧 98kPa の場合に対し、供試体をひとつの要素と見做して整理した解析結果を図 11 に、せん断ひずみ分布の推移図を図 12 に示す。図 11 には、構成式の応答も併せて示した。図 11 の軸差応力-軸ひずみ関係からは、軸ひずみ 3~4%付近で急激な軸差応力の低下が見られる。図 12 のせん断ひずみ分布には軸ひずみ 4%で袈裟がけ状のせん断面が見られることから、明確な荷重低下はこのせん断面の発生に伴うものであることが分かる。図 2 に示す実験結果でも、やはり軸ひずみ 2%付近で荷重低下する様子が見られる。実験と解析では、荷重低下の大きさにこそ違いが

見られるが、実験においてもせん断面が入った影響で荷重低下が生じたものと考えられる。図 12 では、軸ひずみ 7% 付近から縦に割裂するようにひずみの局所化が伸展してゆく様子が見られるが、その影響は、マスとしての挙動に大きな影響を及ぼしていない。写真 1 に図 10 に示す実験に用いた供試体のせん断後の様子を示す。解析で最終的に非対称な破壊形状が示されるのと同様に、実験後の供試体でも一本の袈裟がけ状のせん断面が確認できる。

次に、拘束圧 294kPa の場合に対し、供試体をひとつの要素と見做して整理した解析結果を図 13 に、せん断ひずみ分布の推移図を図 14 に示す。図 13 には、構成式の応答も併せて示した。図 13 の軸差応力-軸ひずみ関係からは、軸ひずみ 3% 付近と 6% を過ぎた付近で急激な軸差応力の低下が見られる。図 14 のせん断ひずみ分布でははじめ袈裟がけ状のせん断面が入った後、反対方向にもせん断面入り、最終的に X 字のせん断面が形成されている様子が見て取れる。せん断面の発生と荷重低下のタイミングが合っていることから、荷重低下の要因はせん断面の発生にあることが分かる。図 2 に示す実験結果では、やはり解析結果ほど大きくはないが、荷重低下が発生している。図 2 では、



写真1 供試体破壊形状
(拘束圧98kPa)



写真2 供試体破壊形状
(拘束圧294kPa)

軸ひずみ 7~8% 付近ではっきりとした荷重低下が生じているが、5% 付近でも僅かに荷重低下していることが見て取れる。写真 2 に図 2 に示す実験に用いた供試体のせん断後の様子を示す。実験同様、最終的に X 字のせん断面が形成されている様子を見て取ることができる。

5. おわりに

セメント添加による改良効果を、実験結果および骨格構造概念を有する弾塑性構成式 SYS Cam-clay model に基づいて説明することを試みた。結果として、セメント添加は、その土に人工的な構造高位化と疑似的な過圧密土化をもたらすとしてその効果を理解できることが分かった。

また、セメント添加量の違いによるセメント改良土の力学挙動の変化については、セメント添加量が多くなるほど繰返し正規圧密線の切片 N および傾き λ が大きくなることが分かった。また、セメント添加量の違いは過圧密比の違いに反映されやすく、一方で水セメント比の違いは構造の発達程度に反映されやすいことが分かった。

さらに、三軸試験を境界値問題として見做す立場からせん断面の発生と共に急激な荷重低下が生じる様子を示す一方で、供試体を一つの要素と見做して得た有効応力経路が構成式の応答から極端に離れたものでないことを示した。加えて、三軸試験を要素試験とみなして与えた材料定数および初期値を用いて解析を行った結果、実験と解析で符合するような破壊形状が得られたりすることも示した。

今後も、三軸試験で得られた結果を、要素試験と境界値問題の両方の視点を持って、セメント改良土本来の性質を見定めてゆきたい。

参考文献

- 1) Asaoka, et al. (2002): An elasto-plasticelasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *S&F* **42**(5), 47-57.
- 2) Asaoka et al. (1995): Imperfection-sensitive bifurcation of Cam-clay under plane strain compression with undrained boundaries, *S&F* **35**(1) 83-100.
- 3) Asaoka, et al. (2001): The loss of structure and the decay of overconsolidation, *Proc. 15th ICSMGE*, Istanbul, Turkey, 19-22.
- 4) Noda et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *S&F*, **48**(6), 771-790.

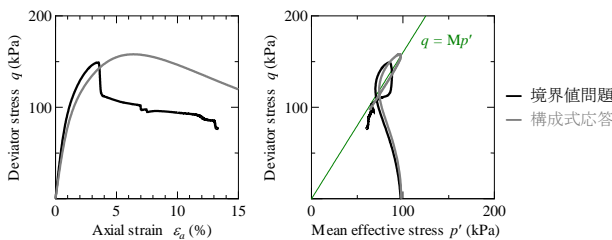


図 11 構成式およびマスとしての非排水せん断挙動 (拘束圧98kPa)

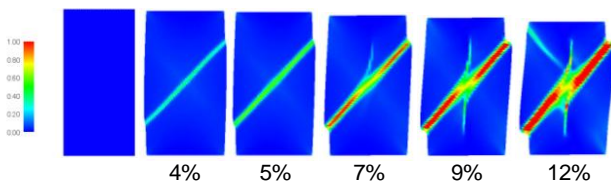


図 12 せん断ひずみ分布の推移 (拘束圧98kPa)

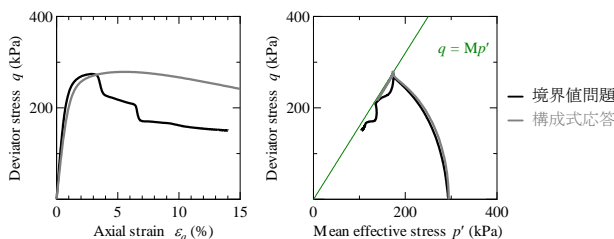


図 13 構成式およびマスとしての非排水せん断挙動 (拘束圧294kPa)

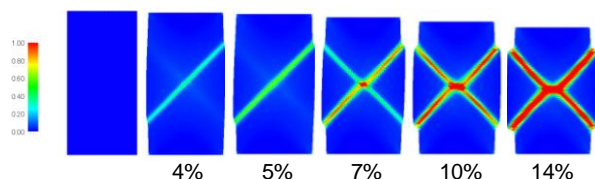


図 14 せん断ひずみ分布の推移 (拘束圧294kPa)