エトリンガイトの析出に着目した石灰安定処理土のせん断特性

石川工業高等専門学校　正会員　○重松宏明
加賀市役所　竹田健成

1. 緒言

石灰系固化材を適度な割合で土に混ぜ合わせると，吸水作用・イオン交換反応に加え，エトリンガイト反応が早期に起こる [1]．石灰に加えられた石膏と土中のアルミナ（Al_2O_3）によって形成された針状のエトリンガイト（$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$）は，間隙の奥深くまで伸びていき，土粒子同士をロッキングさせることによって土を安定化させる．このように安定処理された土の改良効果は，支持力の確保を目的とする場合は CBR や一軸圧縮強度，トラフィカビリティの改善を目的とする場合はコーン指数で評価されることが多い．近年，石灰安定処理工法が道路や鉄道盛土・路床・路盤のみならず，空港，港湾，建物基礎，河川改修，宅地造成まで広範囲に及んでいることから，石灰安定処理土に対しても，異なる応力領域での力学特性を把握する必要がある．本研究は，エトリンガイトの析出が土のせん断特性，特に破壊・限界状態に至るまでのダイレイタンシーにどのような影響を及ぼすのかを明らかにすることを目的としている．そのために，石灰系固化材を所定の混合率で混ぜ合わせた改良土に対して，異なる拘束圧で圧密非排水三軸圧縮（$\overline{CU}$）試験を実施した．

2. 使用材料，試料調整および供試体の作製方法

実験で使用する石灰系固化材は，工業用消石灰（$Ca(OH)_2$）を母材とし，これに添加材として廃石膏ボードから再生した半水石膏（$CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$）と，石川ライトと呼ばれるシリカ（S_iO_2）に富んだ珪質土の廃材（パウダー状）を加えたものである．各原料の比率は乾燥質量比で消石灰 2 に対して，半水石膏 1，石川ライト 1 である．処理対象土には，京都市深草地区で採取された市販の粘性土（0.425mm ふるい通過分）を用いた．以後，この土を藤森土と呼ぶ．表-1 に藤森土の物理・化学特性を示す．

表-1 藤森土の物理・化学特性

土粒子の密度ρ_s(g/cm^3)	2.689
最大乾燥密度ρ_{dmax}(g/cm^3)	1.601
最適含水比w_{opt}(%)	22.9
砂分(%)	12.7
シルト分(%)	76.9
粘土分(%)	10.4
液性限界w_L(%)	43.8
塑性限界w_P(%)	21.0
塑性指数I_P	22.8
活性度A	3.93
強熱減量L_i(%)	5.86
pH	3.1

試料調整および供試体（直径 5cm，高さ 10cm）の作製方法について説明する．先ず，加水調整した藤森土に所定の混合率（表-2 参照）で固化材を混ぜ合わせた後，インキュベーター内にて一定温度（20℃）のもと，3 日間湿潤養生させてエトリンガイトの析出を待つ．養生終了後，土試料を円筒形の割型モールドに詰めて静的に締め固める．その後脱型し，$\overline{CU}$ 試験を開始する．なお，表-2 の基本配合に従って作製した種々の供試体の含水比と乾燥密度は，処理対象土である藤森土の最適含水比（=22.9%）と最大乾燥密度（=1.601g/cm^3）と同じ値になるように設定してある．

表-2 石灰安定処理土の基本配合

固化材混合率(%)	乾燥質量100g当たり			
	藤森土(g)	石灰系固化材		
		消石灰(g)	半水石膏(g)	石川ライト(g)
0	100	0	0	0
4	96	2	1	1
8	92	4	2	2

3. 結果および考察

エトリンガイトの析出が石灰安定処理土のせん断特性にどのような影響を及ぼすのかを把握するため，2. で作製した供試体に対して$\overline{CU}$試験を実施した．先ず，所定の圧密応力（σ_c'=0.2MN/m^2，0.4MN/m^2）で等方圧密した後，B 値（=$\Delta u/\Delta\sigma$）が 0.95 以上得られていることを確認した上で，非排水状態で側圧一定のもと，軸方向に荷重を載荷させた．なお，ひずみ速度は，せん断応力に対して遅れて出てくる過剰間隙水圧を考慮し，0.01%/min を採用した．

図-1~3 に石灰安定処理土の$\overline{CU}$試験の結果を示す．図中に示す 0%，4%，8%は固化材混合率（以後，単に「混合率」と述べる）を表している．図-1 の軸差応力－軸ひずみ関係から，固化材を多く混入するほど，軸差応力は増加していることが分かる．また一方で，圧密応力（拘束圧）σ_c'と混合率の高低に関係なく，ピーク強度に達した後はひずみ軟化を伴わず，そのまま残留強度に至っている．土のせん断特性を図-2 の過剰間隙水圧－軸ひずみ関係，つまりダイレイタンシー挙

キーワード　石灰安定処理，エトリンガイト，せん断
連絡先　〒929-0392　石川県河北郡津幡町北中条タ 1　石川工業高等専門学校環境都市工学科　TEL 076-288-8168

動から見てみると，固化材を混ぜ合わせることで過剰間隙水圧は著しく減少していく様子が見られる．特に混合率 8%では，せん断初期において僅かに正の過剰間隙水圧が発生するものの，せん断の進行ともに過剰間隙水圧は減少し，やがて負へと移行していく．この点について筆者らは，次のように考察する．σ_c'=0.2MN/m^2 の挙動を見ても分かるように，固化材を混ぜ合わせない通常の重過圧密土（混合率 0%）においても，非排水せん断の過程で過剰間隙水圧は負へと移行している．この場合，間隙水が負圧となって土粒子同士が互いに引っ張り合うことになる．そこへエトリンガイトが加わると，多くの土粒子は針状結晶によって物理的に拘束され，土粒子間でより大きな引張り力が生じることになる．その結果，限界状態に至るまでの過程において著しい正のダイレイタンシー（負の過剰間隙水圧）が発生し，せん断強度は著しく増大するものと考えられる．混合率 4%においても，過剰間隙水圧の減少に伴う軸差応力の上昇は認められるものの，際立った強度発現ではない．これはエトリンガイトの析出量が少なく，土粒子のロッキング効果が小さかったためと思われる．

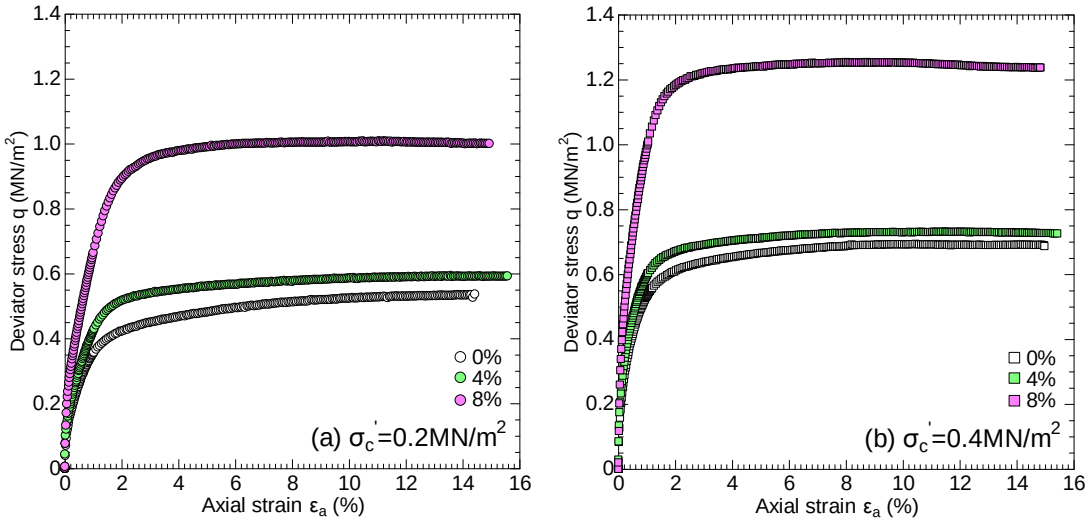

図-1 軸差応力－軸ひずみ関係

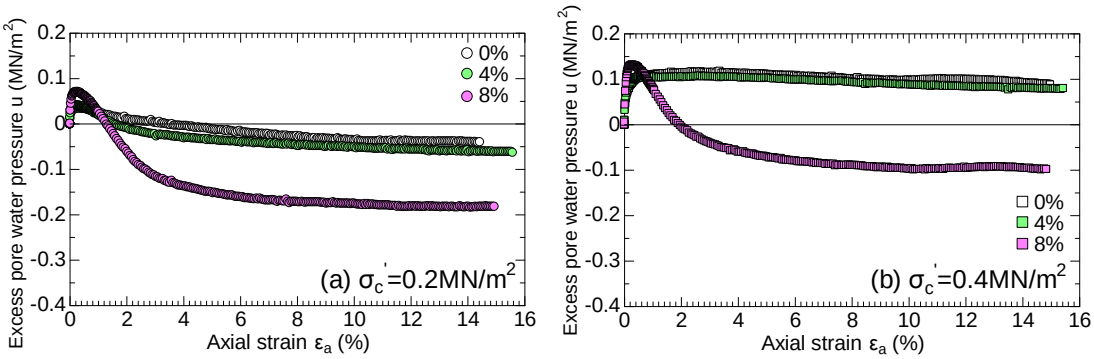

図-2 過剰間隙水圧－軸ひずみ関係

図-3 の有効応力径路を見ると，限界状態（critical state）における応力比 M（=q/p'）は，混合率の増加とともに徐々に大きくなっている．

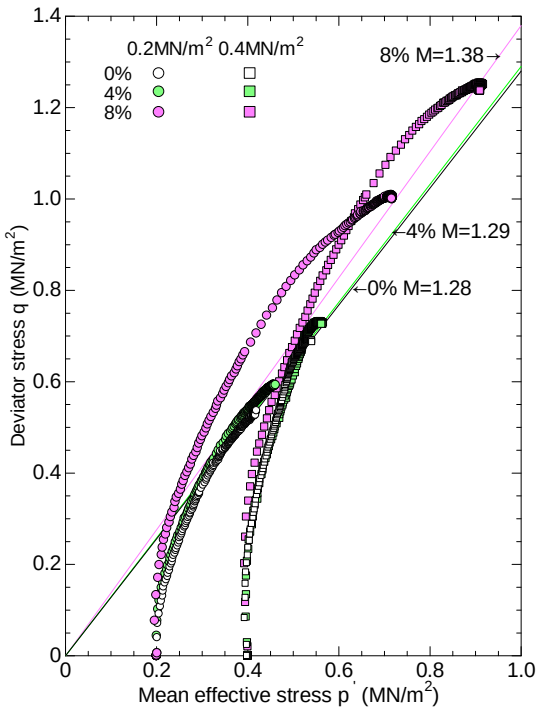

図-3 有効応力径路

4. 結言

石灰安定処理土中にエトリンガイトが析出すると，多くの土粒子は針状結晶によって物理的に拘束され（つまりロッキングされ），土粒子間でより大きな引張り力が生じることが予想される．その結果，限界状態に至るまでの過程において著しい正のダイレイタンシー（負の過剰間隙水圧）が発生し，せん断強度は著しく増大するものと考えられる．今後は，この点をより明確にするために，もう少し幅広い応力領域で$\overline{\text{CU}}$ 試験を行い，かつ他の物理・化学特性を有する土に対しても，同様の実験を実施し検証していく．

参考文献 1) 日本石灰協会：石灰安定処理工法（設計・施工の手引），pp.4-23，2006.