

第26回沖繩地盤工学研究発表会 講演論文集

Annual Meeting Papers of Okinawa Geotechnical Society, 2013

2013年 11月 21日(木)
沖繩県市町村自治会館

主催：沖繩地盤工学研究会，地盤工学会九州支部
共催：沖繩県地質調査業協会
後援：琉球大学土木工学科・環境建設工学科土木系同窓会

第 26 回沖縄地盤工学研究発表会 目次

セッション 1

サンゴ礫混じり土の乱れの少ない試料採取事例	1
池田 政人 (中央開発(株))	
○ 溝渕 年哉 (中央開発(株))	
町田 宗一 ((株)海邦技研)	
沖縄本島の赤土等流出問題におけるろ過型沈砂池による対策の有効性と現況について	4
○ 松本 駿輝 (琉球大学大学院)	
原 久夫 (琉球大学)	
再圧密した島尻粘土の過圧密領域における圧密特性値に関する実験的研究	10
○ 山路 伸悟 (琉球大学工学部)	
磯野 泰佑 (琉球大学工学部)	
原 久夫 (琉球大学)	
Mud crack の形成メカニズムに関する実験的検討	14
○ 広瀬 孝三郎 (琉球大学大学院)	
松原 仁 (琉球大学)	
Material Point Method (MPM) を用いた斜面崩壊発生時の土質強度の検討	18
○ 江戸 孝昭 (琉球大学大学院)	
松原 仁 (琉球大学)	
原 久夫 (琉球大学)	
不均質脆性固体における破壊形態の複雑性に関する数値解析的検討	24
○ 松原 仁 (琉球大学)	
江戸 孝昭 (琉球大学大学院)	
原 久夫 (琉球大学)	

サンゴ礫混じり土の乱れの少ない試料採取事例

中央開発株 池田 政人
 中央開発株 溝渕 年哉
 (株)海邦技研 町田 宗一

1. はじめに

沖縄本島をはじめとする南西諸島沿岸部には、造礁サンゴの群落によって造られたサンゴ礁が広がっており、南国特有の海岸地形を形成している。これらのサンゴ礁は、一部が破碎されてサンゴ礫を生成し、堆積土砂に混入することで「サンゴ礫混じり土」となる。このため沖縄の沿岸部には、N値が10以下のサンゴ礫混じり土が厚く堆積している。これまで、サンゴ礫混じり土は基質部の締め合い具合が緩いことや、枝状となるサンゴ礫の影響で、力学試験を行える試料の採取が困難であった。近年、サンプリング技術の向上により、これらの試料を採取できる手法が幾つか実用化されている。今回は、試験的に実施した IFCS による、乱れの少ない試料の採取事例を紹介する。

2. サンゴ礫混じり土の特性

調査地は、那覇市沿岸部の埋立地であり、地表より GL-8m までは埋土が分布し、その下位 GL-30m 付近までサンゴ礫を混入するシルト質砂～粘土質砂礫(サンゴ礫混じり土)が堆積している。

今回、乱れの少ない試料採取の対象層は、サンゴ礫混じり土層で、力学試験を実施する目的でサンプリングを行った。N値は図-1に示すように概ね3前後でバラツキは少なく、緩い状態で堆積している。

粒度組成は概ね砂を主体とするものの、細粒分および礫分も多く、不均質な土質となっている。内部には写真1～2に示すような、枝状のサンゴ礫が絡み合って混入している。またサンゴ礫はハンマーの軽打で割れる程度の硬さである。

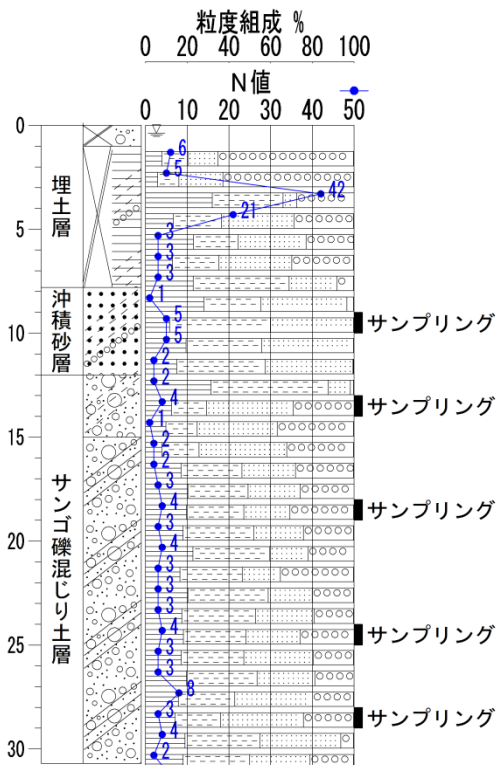


図-1 試料採取地の柱状図



写真-1 サンゴ礫混じり土(サンゴ礫の混入状況)

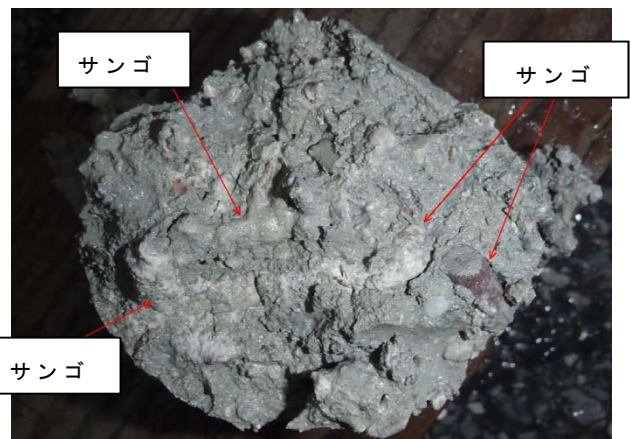


写真-2 採取試料内のサンゴ礫の状態

3. サンプリング装置の概要

サンプリング装置であるIFCSは、水中に微細気泡（ $\phi 10 \mu\text{m}$ 程度）を分散させた気泡水を掘削循環水として用いるものである。これにより、清水に近い作業性を確保しながら、より低圧・低流量・低衝撃でのサンプリングが可能になり、気泡効果でスライムもスムーズに排出される。

この結果、清水などでは困難な、緩い砂の自然状態でのサンプリングが可能となる。

掘削水は泥水としてポリマー系をベースとし、適度な粘性を確保する事で、サンプラーの内管に試料が収納された後、引き上げ時に真空となりやすい様にした。これにより、引き上げ時の試料落下が軽減された。

サンプラーは、図-2に示す様にトリプルチューブサンプラーを用い、先端はウォータウェイで礫が引っかかり動く事がないように破砕帯用ダイヤモンドビットを選択した。

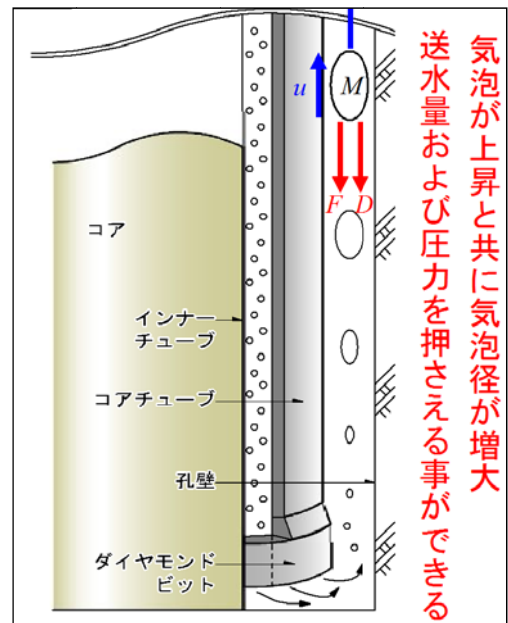


図-2 工法の概念図

4. 採取試料の状態

今回用いたトリプルチューブサンプラーは、試料をアクリル管内に取り込むため、試料採取後の応力開放が小さく、形状及び状態の変化が小さい事や観察が容易である事が利点である。

但し、先端のビットおよび先端シューで留まる試料は、サンプラーを地上に上げた後、アクリル管内に収納されていないため、乱れの影響が強く、10～15cm程度を破棄することとなる。

今回採取されたサンゴ礫混じり土の試料は、以下の写真に示すような状況であった。

試料の表面をみると、白いサンゴ礫が確認でき、面がきれいに切断されていた。

また、礫の周辺部に緩みまたは、礫が動いた状態は見られなかった。

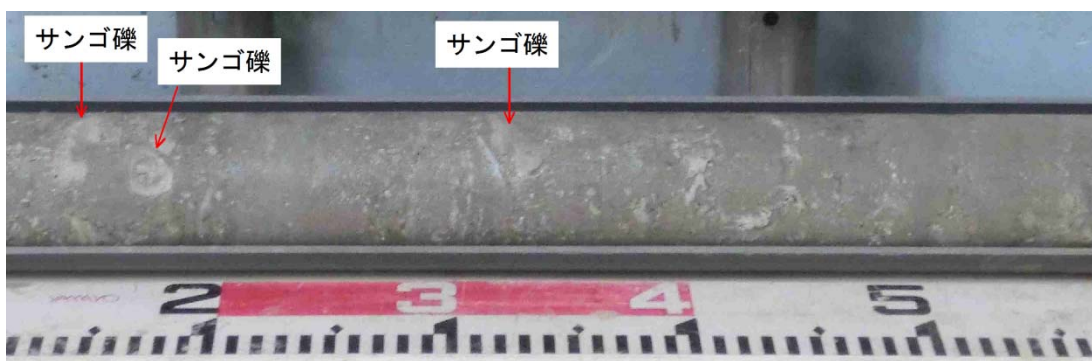


写真-4 IFCSによる採取された試料

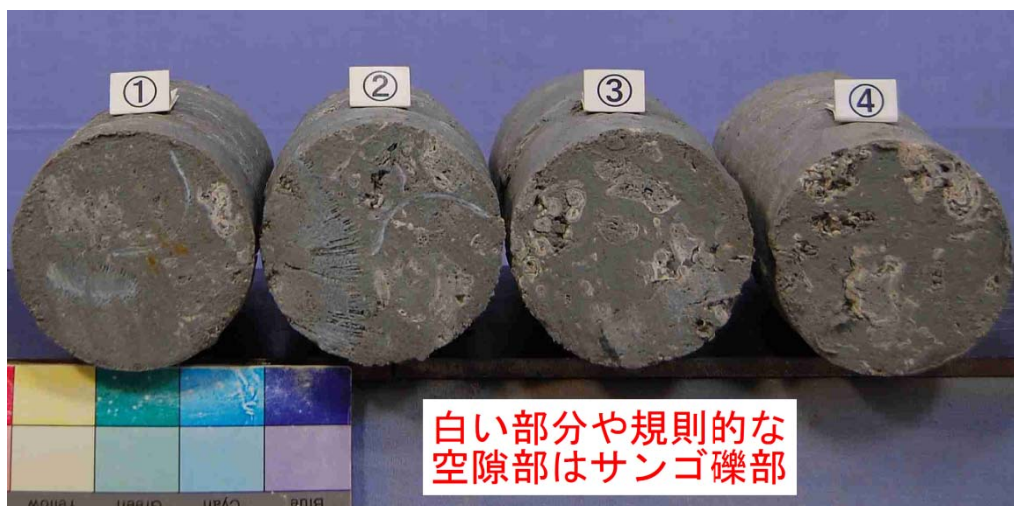


写真-5 試験前の供試体断面

写真-5は、供試体断面を撮影したものであるが、サンゴ礫が多いことが分かる。さらに、礫が動いたことによる乱れ等はみられない。

5. 室内土質試験結果

採取された試料は、現地で凍結処理を行い、土質試験室へ運搬した。

土質試験の内容は表-1に示すように、物理試験一式および液状化強度試験を実施した。

サンゴ礫混じり土は、図-3に示すとおり、粒度分布に富む組成である。

全体的に砂および礫が主体となっているものの、細粒分も多く、粘土とシルトではシルト分が多く有している。

一般的にこのような粒径幅の広い土は、均一な粒子の砂質土に比べ液状化の可能性は小さいとされている。

液状化強度試験の結果は、N値2～5程度でRL20は0.27～0.36の値が測定された。

表-1 室内土質試験結果一覧

深度 GL- m	9～10	13～14	18～19	24～25	28～29
N値 (別孔測定)	5	2	4	4	3
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.686	1.931	1.856	1.839	1.881
礫分	0	28	29	46	11
砂分	82	41	21	21	39
シルト分	16	24	37	25	33
粘土分	2	7	13	8	17
細粒分 含有率	18	31	50	33	50
RL20 (DA=5%)	0.273	0.362	0.270	0.273	0.328

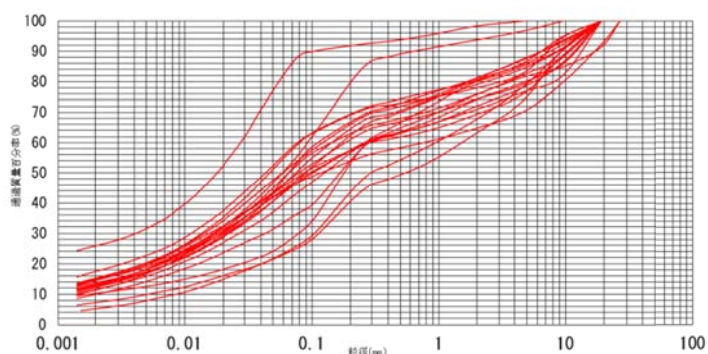


図-3 サンゴ礫混じり土の総括粒径加積曲線

6. おわりに

今回の結果により、サンゴ礫混じり土の乱れの少ない試料を採取する事ができた。

採取した試料を観察した結果、サンゴ礫混じり土は弱い固結状態であった。これはセメンテーション効果である可能性が考えられた。

今回の室内試験結果については、乱れ度合の把握を検証するに至っていない。今後は、サンプリング数を増やし、サンプリング品質および試験値の妥当性について分析を行っていく事が課題と考える。

沖縄本島の赤土等流出問題におけるろ過型沈砂池による対策の有効性と現況について

琉球大学大学院 学生会員 ○松本 駿輝
琉球大学 正会員 原 久夫

1. はじめに

沖縄県本島には、中北部地域に「国頭まあじ」、一般に赤土と呼ばれる赤褐色の変成岩風化残積土が、比較的急峻な山地から傾斜地にかけて広く分布している。その他にも、南部地域に「島尻まあじ」、そして中南部地域に「島尻層泥岩」（沖縄地方でクチャと呼ばれる土壌）がそれぞれ分布している¹⁾。クチャに関しては、表層部が風化し褐色に土壌化したものを、ジャーガルと呼ぶ。昨今では、これらの土壌（以下、赤土等土壌）の海域への流出がサンゴ礁等の海洋生物に深刻な被害をもたらしており、環境地盤工学上の重大な課題として解決が急務となっている。これに対して沖縄県では、1995年に「赤土等流出防止条例」を施行するなどの対策を行ってきたが、被害を完全に防止できていないため²⁾、更なる対策が必要である。

本研究では、数ある赤土等流出防止対策の中でも、施工性・経済性に優れ、多くの工事現場で使用実績を有しているろ過型沈砂池に着目した。このろ過型沈砂池には、長期間の使用により砂ろ過層が目詰まりを起し、機能が低下してしまう問題点が指摘されており、既往の実験的検証においてもそれは明白である。この問題点を解決できれば、より効率的かつ確実な赤土等流出防止対策が行えられ、これまでもその問題の原因を探るべく様々な研究が行われてきた。そこで、それら既往の研究³⁾⁴⁾では赤土のみを対象として実験が行われているため、本研究では、赤土に加え島尻まあじ、泥岩を用いて実験を行い目詰まりの様子を確認し、各土壌におけるろ過型沈砂池の有効性を考察した。またそれに伴い、ろ過型沈砂池の現況を確認すべく、沖縄県が管理している赤土等流出防止対策の現況資料から見た、全体の総括とろ過型沈砂池の現況についての考察を行った。

2. 室内ろ過実験

ここでは、ろ過型沈砂池における各土壌

（赤土、島尻まあじ、泥岩）の有効性について考察するために行った実験と結果について説明する。

(1) 実験装置

実験には実際のろ過型沈砂池砂ろ過層部を模して作成した小型の室内ろ過実験装置を用いた。図1に示すのは実験装置概略図である。砂ろ過層は両側に不織布を配し、所定の寸法で作成した漏斗を使用し自由落下で密度 $\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$ が 1.07 ± 0.054 になるようにチービシ砂を詰めて作成した。また、本実験でろ過を行う濁水は赤土、島尻まあじ、泥岩の各土壌（以下、各実験土壌）を $75\mu\text{m}$ のふるいで裏ごしして作成し、砂ろ過層への流入濁度 $\text{SS}_{\text{in}}(\text{ppm})$ が約1500になるように調節して使用するものとした。表1と表2に各実験土壌とチービシ砂の物理特性値を示す。

(2) 実験土壌

本実験では、赤土、島尻まあじ、泥岩の3種類の土壌を用いた。なお赤土についてはその物理特性が広い範囲に分布していることが知られているため、沖縄本島における2ヶ所で採取したものを用いることとした。各実験土壌の採取場所は、赤土はうるま市石川（以下、この赤土を石川土と呼ぶ）と恩納村仲泊（同様に以下、仲泊土と呼ぶ）、島尻まあじは浦添市牧港、泥岩は中頭郡西原町となっている。図2に採取場所を示す。

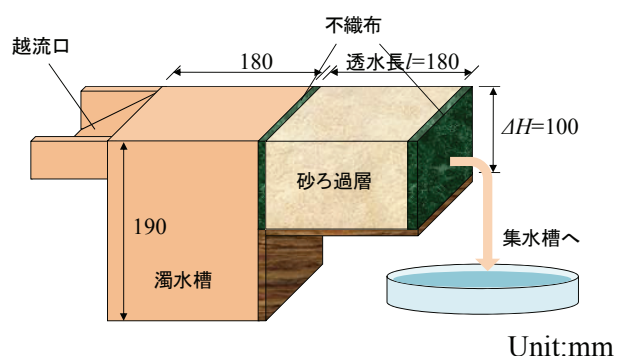


図1 実験装置概略図

表 1 各実験土壌の物性値

実験土壌	石川土	仲泊土	島尻マーヅ	泥岩
分類名	シルト(MH)	シルト(ML)	粘土(CH)	粘土(CH)
液性限界 w_L (%)	56.0	44.0	83.0	56.8
塑性限界 w_P (%)	34.2	30.5	35.2	24.4
塑性指数 I_P (%)	21.8	13.5	47.8	32.4
礫分(%)	0	0	0	0
砂分(%)	35	41.7	9	9.3
シルト分(%)	62	33	66	79
粘土(%)	3	25.3	24	11.7
土粒子の密度 ρ_d (g/cm ³)	2.78	2.69	2.72	2.76

表 2 チービシ砂の物性値

分類名	砂(S)
粗粒分(%)	27
中砂分(%)	64
細砂分(%)	7
シルト分(%)	2
土粒子の密度 ρ_d (g/cm ³)	2.67
最小密度(g/cm ³)	1.056
最大密度(g/cm ³)	1.284
透水係数 k (cm/s)	1.85×10^{-2}

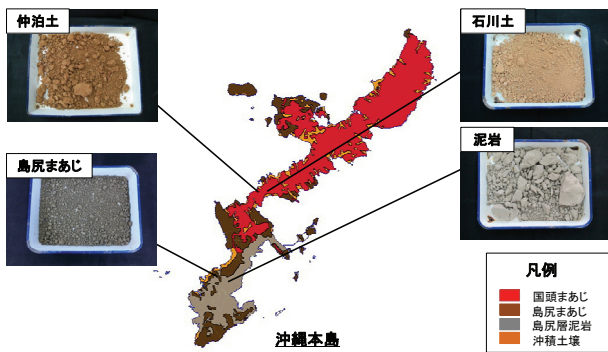


図 2 各実験土壌の採取場所

(1) 実験方法

本実験では各実験土壌において定水位透水試験を行う。濁水槽に濁水を流し、砂ろ過層を通った濁水を集水槽に溜め、透過流量 ΔQ (cm³) と流入濁度 SS_{in} (ppm) と流出濁度 SS_{out} (ppm) を測定・記録し、濁水透過時間 t (min) と累積透過流量 Q (cm³)、砂ろ過層の透水係数 k (cm/s)、流入濁度 SS_{in} (ppm)、流出濁度 SS_{out} (ppm) との関係を求める。実験終了の条件は、濁水透過時間が $t > 10800$ (min)、もしくは砂ろ過層の透水係数が $k < 2.0 \times 10^{-3}$ (cm/s) となるまでとする。また、濁水透過時間が $t > 720$ (min) の時点で t と Q の関係に変化が見られない場合も終了としている。

(2) 透水係数の算出方法

本研究では、砂ろ過層中の濁水流が式(1)のダルシーの法則に従うものと仮定し、式(2)にて $t = t_i$ における透水係数を算出するものとする。

$$v = ki \tag{1}$$

$$k = \frac{\Delta Q}{Ai\Delta t} \tag{2}$$

ここで、断面積： A (cm²)、動水勾配： i である。

また、 ΔQ は式(3)に表すように、時刻 t_i から t_{i+1} ($i=1,2,\dots,i\dots n$)までに発生した透過流量である。

$$\Delta Q = Q_{t_{n+1}} - Q_{t_n} \tag{3}$$

(3) 実験結果と考察

各実験土壌で行った実験結果を比較する。図 3-1、図 3-2、図 3-3(1)～(4)に各実験土壌の t と Q の関係、 t と k の関係、 t と SS_{in} の関係、 t と SS_{out} の関係を示す。

結果、累積透過流量に関しては、二つの赤土では、石川土よりも仲泊土の方がより多くの透過流量を流出していることが分かる。さらに、島尻まあじと泥岩は似た関係を示しており、 $t=720$ min の部分で終了したが、その後は仲泊土よりも多くの透過流量を流出することが予想される。透水係数に関しては、石川土が最も減少速度が速く、次いで仲泊土、島尻まあじと泥岩は最も遅くなっている。濁度に関しては、赤土では流出濁度 SS_{out} が徐々に減少しているのに対し、島尻まあじ、泥岩ではほぼ一定の値となっており、ろ過が進んでいない様子が分かる。

以上の結果より、土壌ごとにそのろ過特性は異なる結果を示しており、ろ過型沈砂池を用いた対策を行う場合、土壌それぞれの結果に合わせた対処や維持管理方法などが必要であると考えられる。

3. 現況調査

ここでは、沖縄県が行った、平成 21 年度及び 22 年度に実施された事業の内の 257 事業における対策状況調査資料をもとに、近年の赤土等流出防止対策の状況についてまとめる。

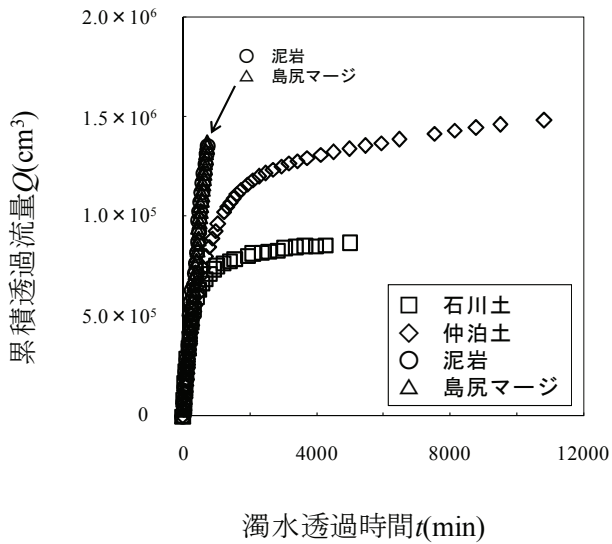


図 3-1 濁水透過時間と累積透過流量の関係

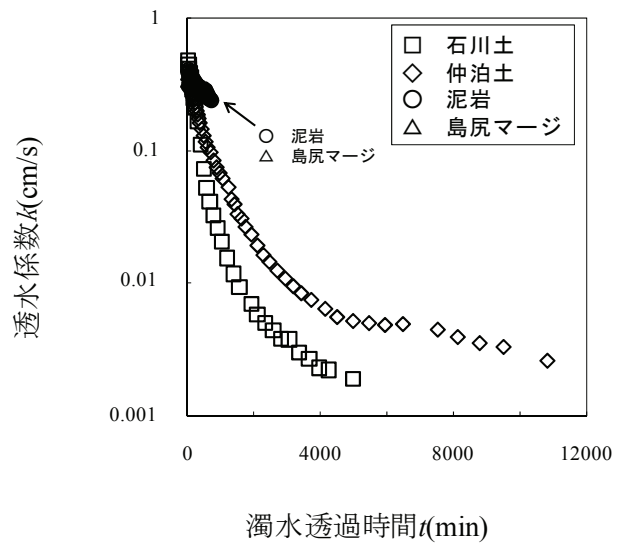
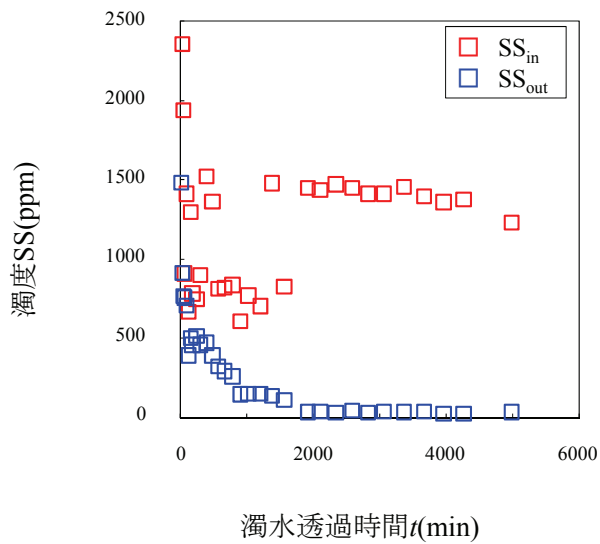
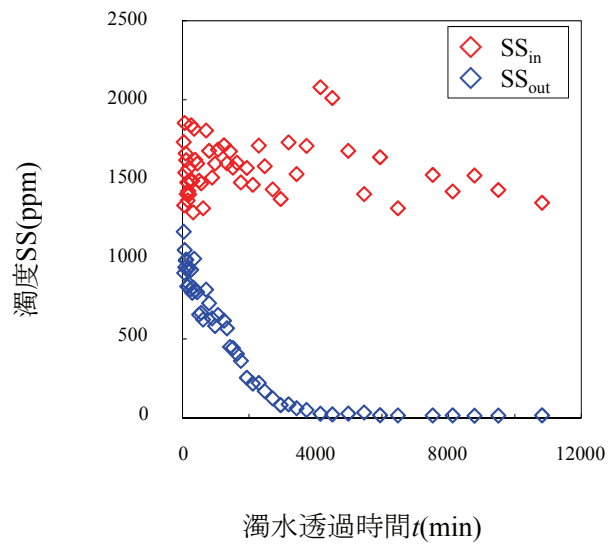


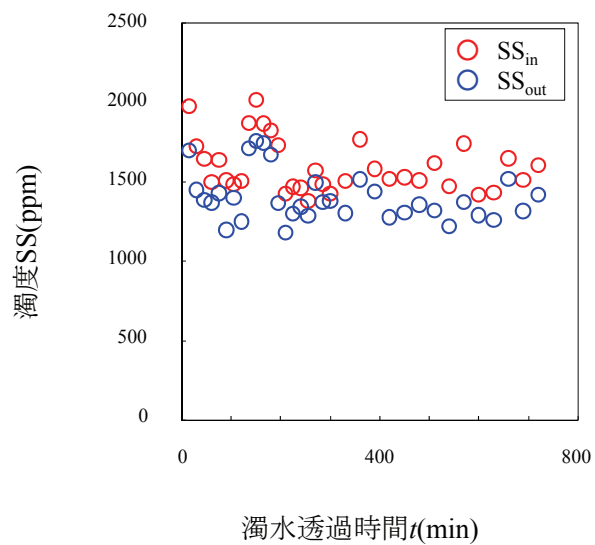
図 3-2 濁水透過時間と透水係数の関係



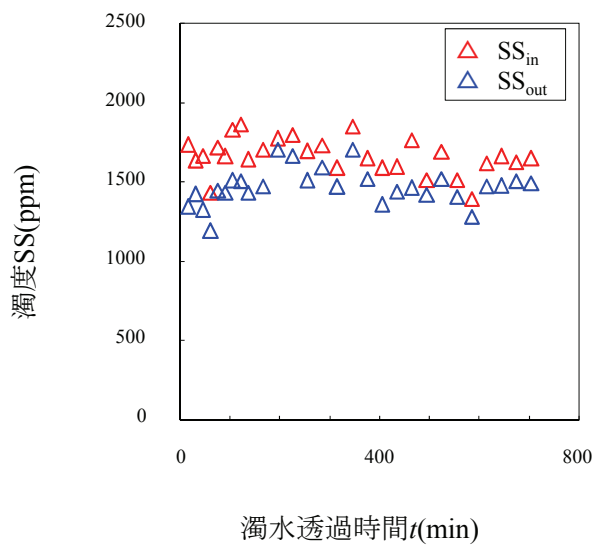
(1) 石川土



(2) 仲泊土



(3) 泥岩



(4) 島尻まあじ

図 3-3 濁水透過時間と濁度の関係

(1) 調査資料

調査に用いた資料は、沖縄県環境保全課が管理している開発事業における届出書類、また県が行った流出量調査資料の中の、2004年から2011年の間に行われた約4,900件の開発事業のうち、平成21年及び22年度に実施された事業の中から土壌種や事業種に偏りなく抽出された257件分である。さらに、その事業件数に対し年間1回から3回（工事前期、中期、後期）の調査が行われており、その調査件数でいうと591件分となる。表3に調査件数の内約を示す。

表3 調査件数

工事前期	工事中期	工事後期	計
136	217	238	591

(2) 対策工法の分類

防止対策には種々の工法があり、流出過程に対応させて発生源対策・流出濁水対策・最終処理対策の三分類としている。流出濁水対策は土の安定性や地下浸透を促進することによって、流出を直接くい止める表面保護法である。流出濁水対策は発生源近傍で濁水の流速を緩和し、浸食の拡大を抑制する流出抑制工であり、主に表土保護法の補助としての役割がある。また最終処理対策は対策の最終施設にあたり、発生した濁水を貯留し規定の水質まで処理し、放流する濁水処理工となっている。表4に対策工法の細分類と各対策工法の保全係数（流出防止効果に関する指標。無効化時は1、効果が高いほど0に近づく。それぞれの対策工法で保全係数は設定されているが、事業現場での機能状況によって調整される。）を示す。

表4 対策工法の細分類と各対策工法の保全係数

発生源対策		流出濁水対策		最終処理対策	
植生・緑化工	0	転圧締固め	0	土砂溜柵（ろ過式）	0.5
モルタル、コンクリート吹付	0	砂利敷設（平場のみ）	0	沈砂池（自然沈殿式）	0.6
ブロック積み	0	切り回し水路	—	沈砂池（ろ過式）	0.4
マルチング 全面	0.1	水路	—	縦樋、ろ過堰	—
部分	0.2	小堤	—	浸透池	0.1
シート被覆	0	ふとん籠、柵	0.7	沈殿池	0
土壌団粒化剤吹付	0	畦畔	—	浸透池	0
アスファルト乳剤吹付	0	土砂溜柵（自然沈殿式）	0.7	処理プラント	0

(3) 赤土等流出防止対策の実施率

調査方法は、上記資料を整理し、各対策の実施率を事業全体と土壌種別（国頭まあじ、島尻まあじ、ジャーガル、クチャ、沖積土壌）にまとめ、調べるものとしている。さらに事業全体における防止対策の実施率と、各土壌種における同実施率を、防止対策ごとに相関関係をみることによって、対策対象土壌によって使用する防止対策に変化があるのか調べる。図4に事業全体における防止対策の実施率を、図5に事業全体における防止対策の実施率と各土壌種における防止対策の実施率との相関関係図を示す。

(4) ろ過型沈砂池の実施状況

図4を見て分かるように、ろ過型沈砂池の実施率は19.8%となっており、最終処理対策の中で最も多く使用されている対策である。ここで、本研究における実験結果を考慮し、ろ過型沈砂池も使用するにあたってどの土壌を対象に対策が行われているのか確認するために、表5にろ過型沈砂池の実施状況と土壌ごとの有効性についてまとめたものを示す。

表5 ろ過型沈砂池の実施状況

土壌ごとの内訳		ろ過型沈砂池における有効性
国頭まあじ	35	○
島尻まあじ	14	×
ジャーガル	40	×
クチャ	24	×
沖積土壌	4	—
計117		

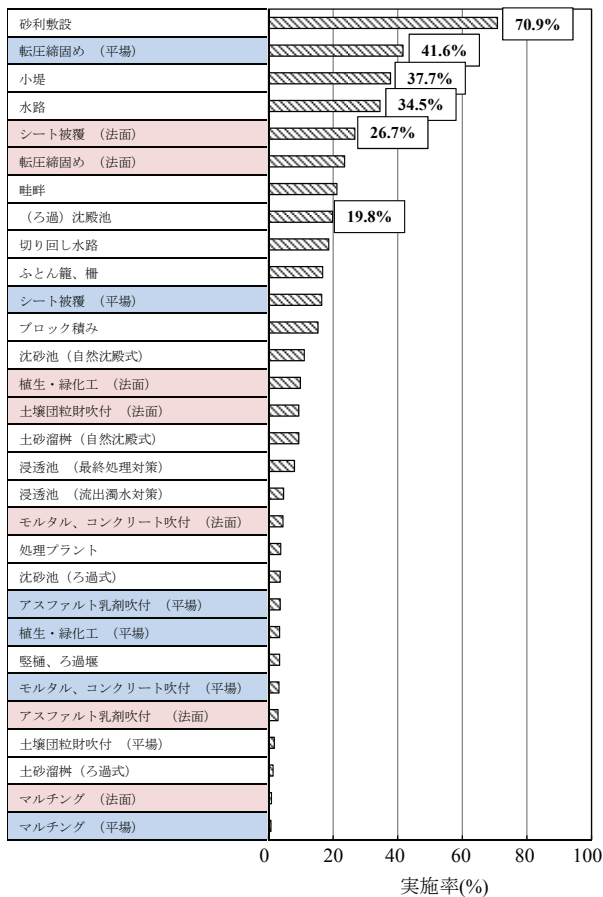


図4 事業全体における防止対策の実施率

(5) 現況のまとめと考察

図4に示すのは事業全体における防止対策の実施率をまとめたものであるが、これは調査件数591件に対する各防止対策の割合を示したものである。発生源対策に関しては現場が法面(図中の赤)か平場(図中の青)かで分けており、また一つの事業現場で複数の防止対策を用いているために防止対策数は重複している。図4から、発生源対策ではシート被覆(法面:26.7%、平場:16.4%)、転圧締め(法面:23.5%、平場:41.6%)、砂利敷設(平場のみ70.9%)が、流出濁水対策では水路(34.5%)、小堤(37.7%)、ふとん籠、柵(16.8%)、畦畔(21.2%)が、最終処理対策では沈殿池(ろ過・沈砂池)(19.8%)がそれぞれ多く使用されていることが分かる。

また、図5に示す、事業全体における防止対策の実施率と各土壌種における防止対策の実施率との相関関係図より、土壌種の違いは防止対策工法選択において影響されていないのではと考える。しかし、表6に示すように、排水水のSSを予測する際に用いる最終排水濃度の最高値(大雨時)は、土壌ごとに設定されており、また、本実験においても採取場所

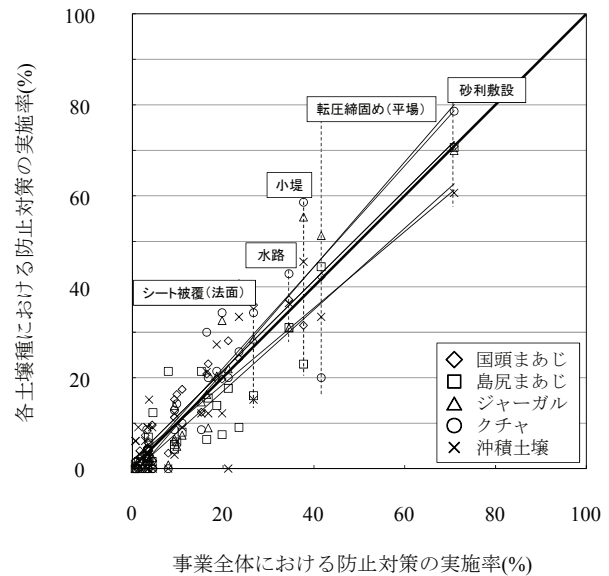


図5 事業全体と各土壌種との実施率の相関関係

表6 大雨時における最終排水濃度の最高値

土壌種	設計最高SS濃度(mg/l)		
	面的工事	線の工事	河川工事
国頭まあじ	10,000	15,000	
島尻まあじ	2,000	2,000	
ジャーガル	10,000	10,000	全て 5,000
クチャ	80,000	20,000	
沖積土壌	7,000	7,000	

の違いや土壌種の違いにより、対策効果が異なることが明らかとなっている。実際にろ過型沈砂池がどの土壌を対象に使用されているかをまとめたところ、表5に示すように本実験において有効性が認められなかった土壌に対しても、ろ過型沈砂池は使用されていることが分かった。このことにより、ろ過型沈砂池による対策が非効率的に行われている可能性が示唆されると考える。以上のことから、ろ過型沈砂池を用いた対策を行う場合、対象の土壌が赤土である以外は、沈砂池に凝集剤を添加する等の対策を付加することが必要ではないだろうか。今後は各土壌のろ過特性に対する最適な防止対策方法についても検討していきたい。

4. まとめ

本研究では、赤土、島尻まあじ、泥岩を用

いてそれぞれの土壌におけるろ過型沈砂池の有効性について実験的検証を行い、また、沖縄県の資料から見た近年の赤土等流出防止対策の現況の総括も行った。結果、チーピン砂を用いた砂ろ過層において、それぞれの土壌でそのろ過特性が異なることが分かった。このことから、ろ過型沈砂池においても対象土壌ごとその設計や対処方法を検討する必要があると考える。また近年の流出防止対策の現況については、沖縄県環境保全課の資料を用いて、平成 21 年度及び 22 年度に実施されたうちの 257 件分についてはあるが、行われた対策それぞれの実施率をまとめた。さらに本実験結果から、ろ過型沈砂池に対する有効性が低い土壌においては、他の対策を組み合わせる複合対策を行う必要があることが示唆されたと考える。しかし、平成 21, 22 年度の調査結果によると有効性が低い土壌についてもろ過型沈砂池による対策が行われているため、検討が必要である。最適な対策方法については、例えば沈砂池に凝集剤を添加することなどがあげられるが、今後の課題としている。これらの結果をもとに今後はより効率的かつ確実な流出防止対策について考えていきたい。

謝辞

本研究を行うにあたって資料を提供して頂きました沖縄県環境保全課に、ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土質工学会九州支部編：九州・沖縄の特殊土，pp.221-225，1983.
- 2) 金城孝一，上原睦男：海域における赤土汚染モニタリング，平成 17 年度赤土等流出防止交流集会事例集，1-9，2005.
- 3) 原久夫，江戸孝昭：赤土濁水のろ過に関する実験的研究，平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会講演概論集，pp.339-340，2010.
- 4) 江戸孝昭，原久夫，松原仁：ろ過型沈砂池における赤土濁水流の有限要素解析，応用力学論文集 Vol.13，pp211-220，2010.
- 5) 沖縄県土木建設部：赤土等流出防止対策技術指針案，1995.

再圧密した島尻粘土の過圧密領域における圧密特性値に関する実験的研究

琉球大学学生 ○山路 伸悟
 琉球大学学生 磯野 泰佑
 琉球大学 原 久夫

1. はじめに

段階載荷方式による標準的な室内圧密試験（以下、標準圧密試験とする）は、圧密圧力を8段階で載荷し、1つの段階につき24時間載荷させたのち次の段階に移る。そのため、測定日数は8日間、試験期間全体では約10日間有するため、土質試験の中でも長時間を必要とする試験の1つである。そこで、著者らは試験時間の短縮を目的とし、これまでに再圧密粘土の供試体を用いた急速圧密試験を行い、標準圧密試験と急速圧密試験で得られる圧密特性値（圧密係数、体積圧縮係数、圧縮曲線）の比較を行ってきた。その結果、急速圧密試験から得られる圧密特性値は、標準圧密試験の圧密特性値と比べ同程度の値が得られた^{1), 2)}。しかしながら、正規圧密領域では圧密特性値のばらつきは少ないが、過圧密領域では圧密特性値が大きくばらつく結果が得られている。

そこで本研究では、急速圧密試験において載荷・除荷・再載荷を行い、過圧密領域における圧密特性値に関する実験的研究を行った。

2. 試料

図1に示す沖縄本島中南部に広く分布する島尻層泥岩を粉砕して使用した。表1に試験に用いた試料の物理特性値を示す。なお、試料は沖縄県中頭郡西原町で採取しており、採取した試料を以下に示す手順で作成した。

1. 固結状態の島尻層泥岩を木づちで打ち砕き、

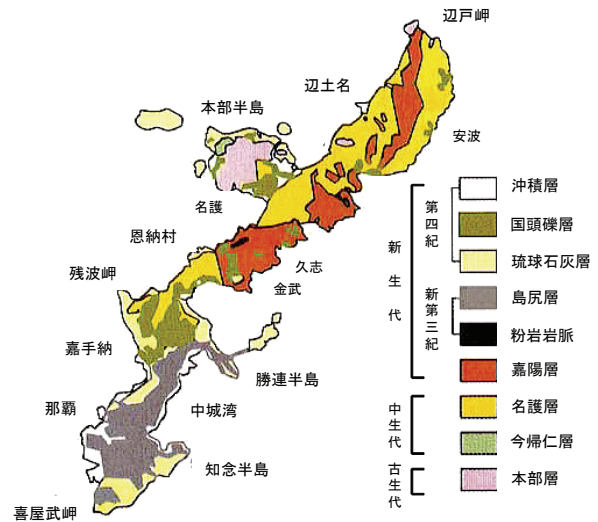


図1 沖縄県の地質



(a) 攪拌機

(b) 高圧圧密試験装置

図2 試料作成の様子

表1 試料の物理特性

土粒子の密度(g/cm ³)	2.68
含水比(%)	50~54
液性限界(%)	57.5
塑性限界(%)	20.8
塑性指数(%)	36.7
砂礫分(%)	15.3
シルト分(%)	41.3
粘土分(%)	43.4
分類名	粘土(CH)

2000 μm ふるい通過分を水に浸す。

2. スラリー状の粘土を含水比 105%に調整して、図 2 (a)に示す攪拌機で十分に練返す。
3. 十分に練返した試料を 425 μm のふるいを通して、直径 15cm のモールドに静かに流し込む。
4. 上下両面排水の排水条件のもと図 2 (b)を用い圧密圧力 50kpa で約 2 週間圧密する。

3. 荷重・除荷・再荷重による急速圧密試験

試験は標準圧密試験と同じリングを使用し段階的に荷重した。1 段階の圧密時間を 30 分とする。このとき、所定の荷重段階において荷重を 1 段階目まで除荷し、そして再び 8 段階目まで荷重する。荷重段階が 3 段階目まで荷重した後、除荷した供試体を 3step, 4 段階目まで荷重した後、除荷した供試体を 4step と記し、表 2 に試験条件一覧表を示す。

4. 結果

図 3 に各試験方法における e - $\log p$ 曲線を示す。同図より、 e - $\log p$ 曲線群には一つの直線が現れて、降伏応力を超えると e - $\log p$ 曲線群には、傾き約 -0.374 の一つの直線が現れ、 e と p に一義的關係があることが分かる。過圧密領域では、3step, 4step, 5step, 6step, 7step, 8step とそれぞれ傾きの値は-0.037, -0.045, -0.064, -0.071, -0.083, -0.095 となり、大きくなることが分かる。

図 4 に平均圧密圧力と体積圧縮係数の関係を示す。正規圧密領域での体積圧縮係数は、一つの直線で表され、 e と p に一義的關係があることが分かる。また、同じ平均圧密圧力に対する過圧密領域の体積圧縮係数の値は正規圧密領域の体積圧縮係数の値に比べ 54.85%小さくなること分かる。

図 5 に平均圧密圧力と圧密係数の関係を示す。同図より、正規圧密領域では $\log C_v$ の標準偏差は 0.109(cm^2/d)であり、過圧密領域では 0.238

表 2 試験条件

Case	Loading	Unloading	Reloading
3step	3 rd	1 st	8 th
4step	4 th	1 st	8 th
5step	5 th	1 st	8 th
6step	6 th	1 st	8 th
7step	7 th	1 st	8 th
8step	8 th	1 st	8 th

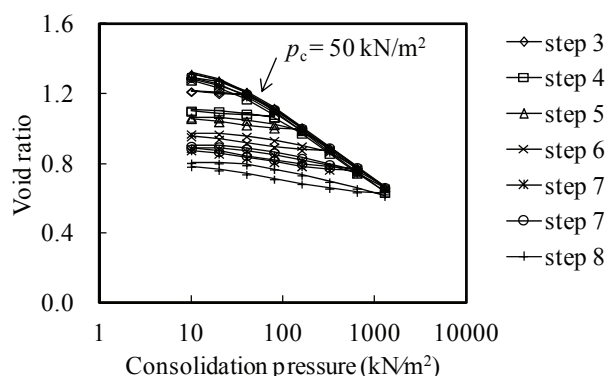


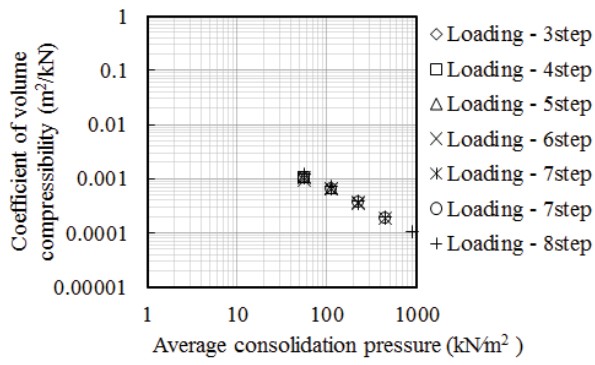
図 3 Consolidation pressure vs. void ratio

(cm^2/d)と大きくなっている。また、再荷重の時の正規圧密領域では $\log C_v$ の標準偏差は 0.008 (cm^2/d)とばらつきが少なくなることが分かる。

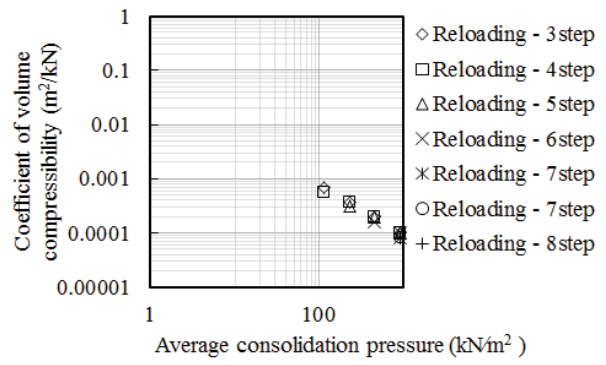
5. まとめ

本研究では、再圧密した島尻粘土の過圧密領域における圧密の特性値に関する実験的研究を行った。以下に、その結果を列記する。

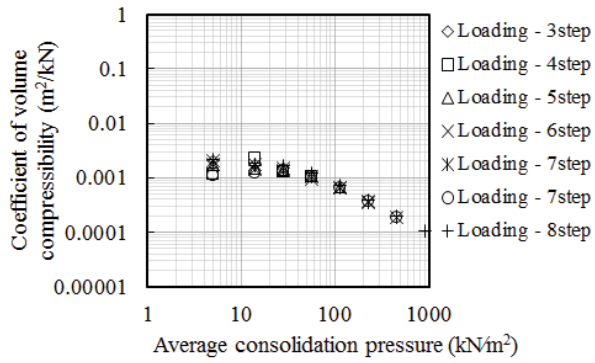
1. 体積圧縮係数は、正規圧密領域、過圧密領域においてばらつきが小さく安定している。同じ平均圧密圧力に対する過圧密領域の体積圧縮係数の値は正規圧密領域の体積圧縮係数の値に比べ 54.85%小さくなることが分かった。
2. 圧密係数はばらつきの大きな力学量であるが $\log C_v$ の標準偏差は過圧密領域で正規圧密領域の約 2 倍の値となる。再荷重時の正規圧密領域では $\log C_v$ の標準偏差の値が小さくなることからこの領域では圧密係数のばらつきが少なくなることが分かった。



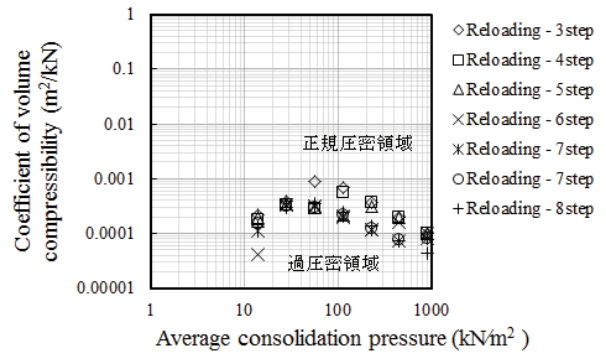
(a) Loading (正規圧密領域のみ)



(b) Reloading (正規圧密領域のみ)

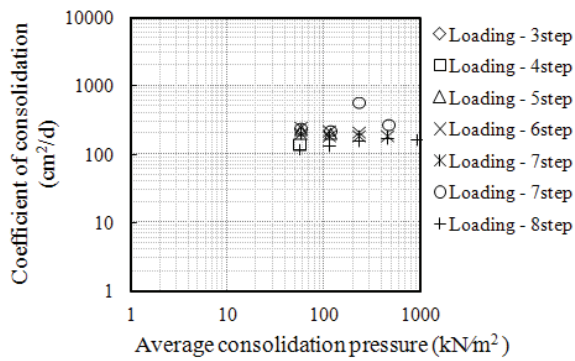


(c) Loading (過圧密領域-正規圧密領域)

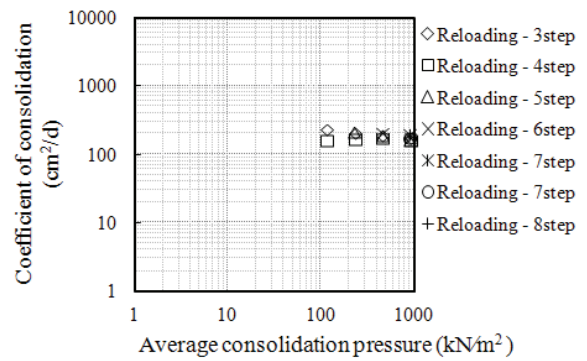


(d) Reloading (過圧密領域-正規圧密領域)

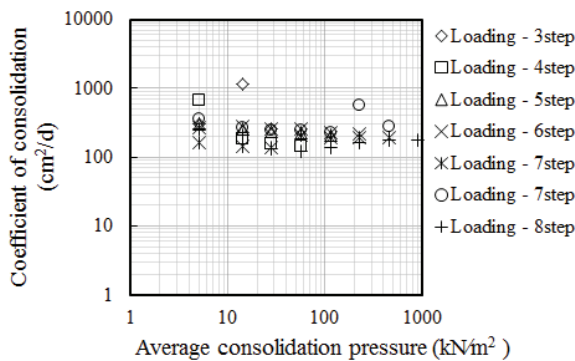
図 4 Average consolidation pressure - Coefficient of volume compressibility



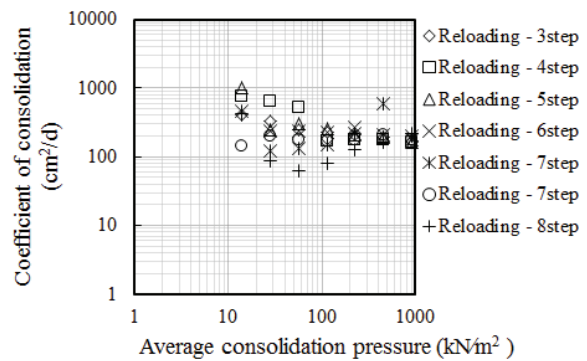
(a) Loading (正規圧密領域のみ)



(b) Reloading (正規圧密領域のみ)



(c) Loading (過圧密領域-正規圧密領域)



(d) Reloading (過圧密領域-正規圧密領域)

図 5 Average consolidation pressure - Coefficient of consolidation

以上のことから C_v の初期の正規圧密領域でのばらつきは試験準備時などの影響によると考える。今後は、圧密特性値と過圧密比、除荷時の間隙比、再載荷時の間隙比等の関係について考察し、過圧密領域での圧密特性値についてさらに追究していく。

参考文献

- 1) 酒井康司, 原久夫: 載荷速度が圧密特性値に与える影響に関する実験的研究, 平成 23 年度土木学会 西部支部 研究発表会, pp.463-464, 2011.
- 2) 猪野翔太, 酒井康司, 原久夫: 圧密リング集面へのグリース塗布が圧密特性値に与える影響について, 第 24 回沖縄地盤工学研究発表会, pp.45-48, 2011.

Mud crack の形成メカニズムに関する実験的検討

琉球大学大学院 ○広瀬 孝三郎
琉球大学 松原 仁

1. はじめに

泥層に発生する割れ目は **Mud crack** と呼ばれ、地表面だけでなく地層中にも散見される。このような、破壊現象の過程は、非線形性と不可逆性を有しているため、乾燥に伴って実際に生成されるき裂の形状や発生箇所等の予測は、非常に困難なことが多く、十分に理解されているとは言い難い状況である。**Mud crack** に関しては、き裂の形状を揺れや流れを記憶させることでコントロールする研究や⁽¹⁾⁽⁴⁾、吉田らが行った水田に発生するき裂の検討⁽⁶⁾など、多くの研究⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾が現在までに行われている。しかしながら、**Mud crack** は予測できない不均質性に支配される面が強いため、**Mud crack** のパターン形成を説明するには至っていない。

そこで本研究では、国頭マージ（恩納村仲泊）と島尻泥岩（中頭郡西原町）を用いて、**Mud crack** の進展過程の実験的検討を行うことを目的として研究を行った。図-1 に沖縄本島における、国頭マージと島尻泥岩の分布図を示す。また、東日本大震災により内陸部には海水や汚染物質、瓦礫等が流れ込み、東北地方に甚大な被害を与えた。震災後の問題として田畑等の土壌における塩害があげられる。田畑では、粘質土壌に塩分を含むことで発生した **Mud crack** (図-1) が確認された。このように、塩分が粘質土壌に発生させるき裂進展を評価するために、本研究では塩分の含む試料を作成することで実験的検討を行った。

Okinawa Island

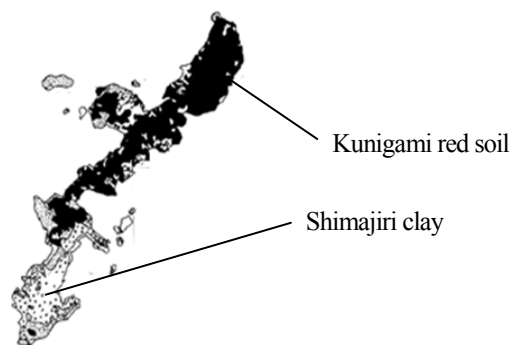


図-1. 沖縄本島における土壌分布図

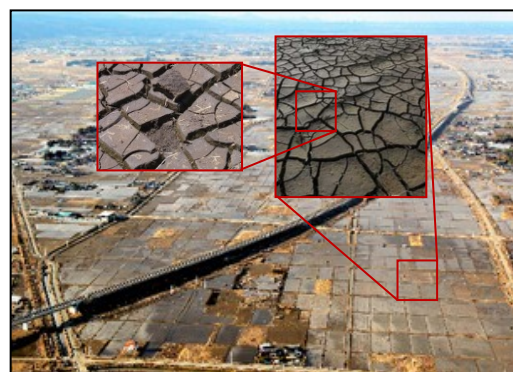


図-2 東日本大震災における塩分の影響

2. 実験方法

本実験では国頭マージと島尻泥岩を用いて **Mud crack** の発生メカニズムを解明するために実験的検討を行った。

(1) 実験条件

a) 混合物の条件

本実験では、最大粒径 $425\mu\text{m}$ のふるいを通したものをを用い、水または塩水と混ぜることで混合物を作成し、試料と水が均一に混合する含水比 60%として実験を行った。各試料の粒度分布については図-3 に示す。同図に示すように、粒径は国頭マージよりも島尻泥岩が細かい試料を用いた。また、塩分がき裂進展に与える影響を観察するために塩分濃度が 0%と 10%の 2 パターンを条件に含め実験を行った。塩分濃度が 0%の試料の含水比は式 (1) にて決定した。

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

一方、塩分濃度が 10%の試料に関しては式 (2) を用いて含水比の決定を行った。

$$w = \frac{m_w}{m_s + m_{salt}} \times 100 = \frac{\text{水}}{\text{固体(試料)}} \quad (2)$$

混合物の深さに関しては 10mm と 15mm の 2 パターンを用いた。ここで、試料の深さとは、容器の底面から試料の表面までの高さのことである。なお、本研究で用いた試料の状態として、国

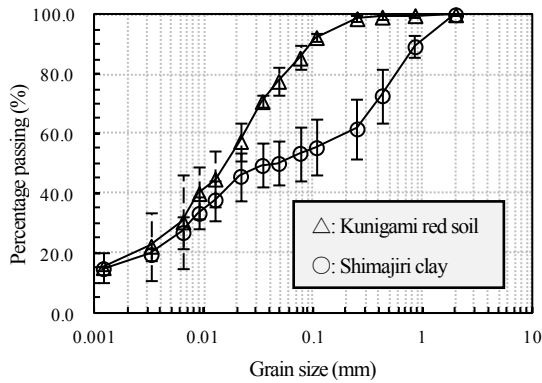


図-3 粒度分布図

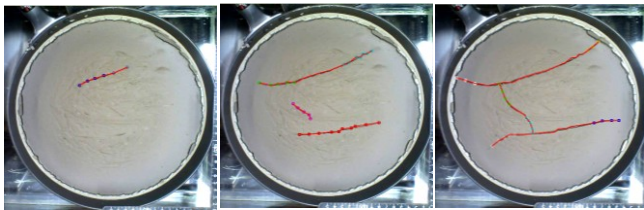


図-4 き裂進展長さを求めるための手順

頭マージの塩分濃度 0% の場合は、間隙比 $e: 2.05$, 飽和度 $S_r: 78.68\%$ のような状態で、塩分濃度 10% の場合は間隙比 $e: 1.78$, 飽和度 $S_r: 90.20\%$ のような状態であった。一方、島尻泥岩の塩分濃度 0% の場合は間隙比 $e: 2.13$, 飽和度 $S_r: 77.72\%$ のような状態で、塩分濃度 10% の場合は間隙比 $e: 1.89$, 飽和度 $S_r: 86.88\%$ のような状態であった。以上のように、本研究では両試料とも不飽和状態で実験を開始した。

b) 実験器具および設定条件

使用した容器は、フッ素樹脂加工を施してある円形容器（直径28cm、深さ5.3cm）を使用した。恒温器内の条件は、温度25度、湿度40%と一定条件とした。また、き裂の進展過程を撮影するために、本実験では、定点カメラを恒温器内に設置し、1分間隔でインターバル撮影をすることで24時間撮影を行うことで、き裂進展の様子を観察した。なお、全ての実験で、初期含水比および最終含水比を観測した。24時間乾燥後の含水比を測定する際は、複数箇所の試料を3つのシャーレに入れ乾燥させることで観測を行った。

(2) 評価方法

本研究での評価方法を以下に示す。

- ① 最終結果の画像と含水比を考慮した評価
 - ② 経過時間とき裂の長さの関係
- ①に関しては、定点カメラにて24時間撮影した最終結果の画像および毎回の実験時に測定した初

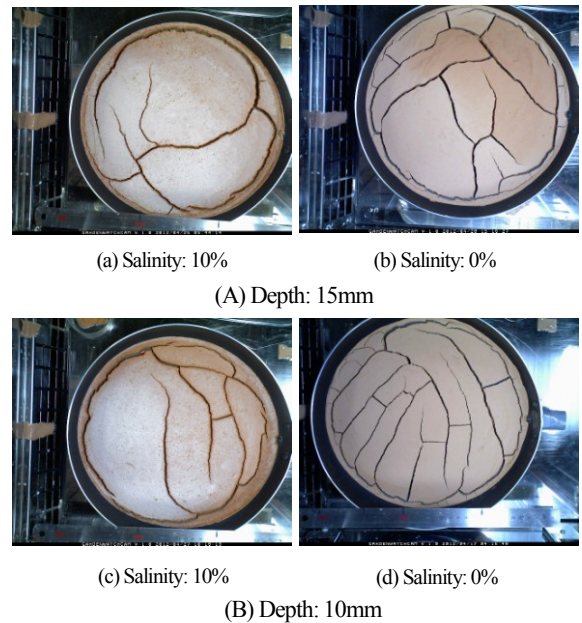


図-5 国頭マージの最終結果画像

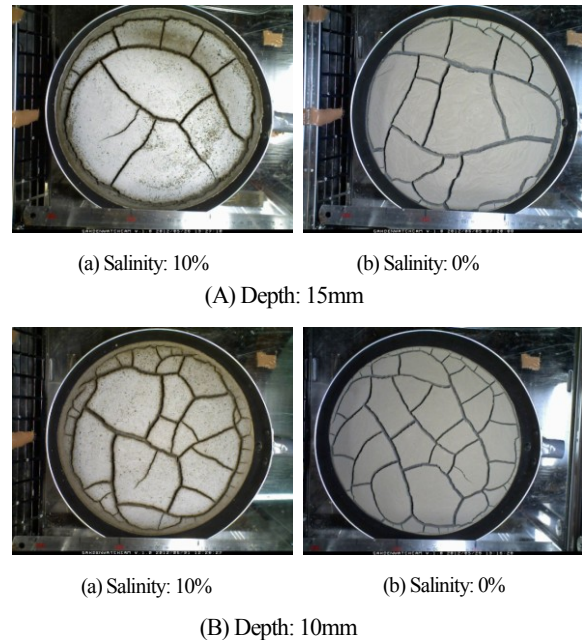


図-6 島尻泥岩の最終結果画像

期含水比と24時間乾燥後の含水比の結果を踏まえて比較検討を行った。②に関しては、定点カメラの画像と本研究室で作成したデジタル画像処理技術を使用し評価した。図-4に、き裂の長さを求めるために使用した画像処理プログラムの手順を示す。まず、き裂進展が始まってから20分間隔に実験画像を用意し、ソフト内に読み込み、同図に示すようにき裂を表示することでき裂長さの算出を行う。なお、本プログラムは、画像をクリックした2点を結ぶように設定しており、き裂は連続した線によって表示される。以上の操作を行うことで長さを出力した。

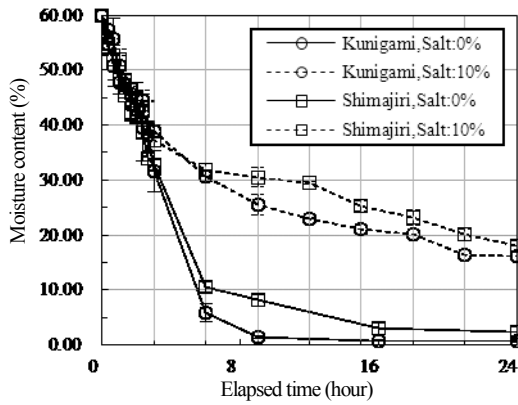


図-7 経過時間と含水比の関係

3. 実験結果

(1) 最終結果の画像と含水比を考慮した評価

図-5 および図-6 に 24 時間乾燥後の最終結果画像を示す。同図より両試料とも深さ 10mm の試料は深さ 15mm の試料よりもピースの面積が小さいことが確認された。特に塩分を含むものに関して顕著であることがわかった。そこで、24 時間乾燥後の含水比に着目してみると、両試料とも塩分を含む試料と含まない試料に大きな違いが見られた。国頭マージに関しては、塩分濃度が 10% の場合、最終含水比が 20% 前後、塩分濃度が 0% の場合、最終含水比が 5% 前後であることが分かった。一方、島尻泥岩に関しては、塩分濃度が 10% の場合、最終含水比が 25% 前後、塩分濃度が 0% の場合、最終含水比が 5% 前後であることが分かった。以上のように、塩分を含む場合と含まない場合で、含水比に大きな違いが見られた。そこで本研究では、塩分が含水比に与える影響を評価するために、各条件ごとに含水比試験を行った。図-7 に経過時間と含水比の関係を示す。傾向としては、両試料とも塩分を含む試料に関しては高い含水比を長い間維持することが確認された。このことは、塩分により水分の蒸発が抑制されるためだと考えられる。図-8 に時間ごとのき裂進展の様子を示す。ここでは、塩分濃度が 10% の島尻泥岩の実験結果を示す。このように、き裂進展の様子を観察することで、図-9 に示すように、き裂同士が 90 度に交わるパターンと 120 度に交わる 2 パターンのき裂が発生することが確認された。また、図-5 および図-6 より、き裂の幅に関しては国頭マージは島尻泥岩よりも小さいことがわかる。このような収縮幅の違いは、国頭マージの収縮率 20% と島尻泥岩の収縮率 22% のように収縮率に

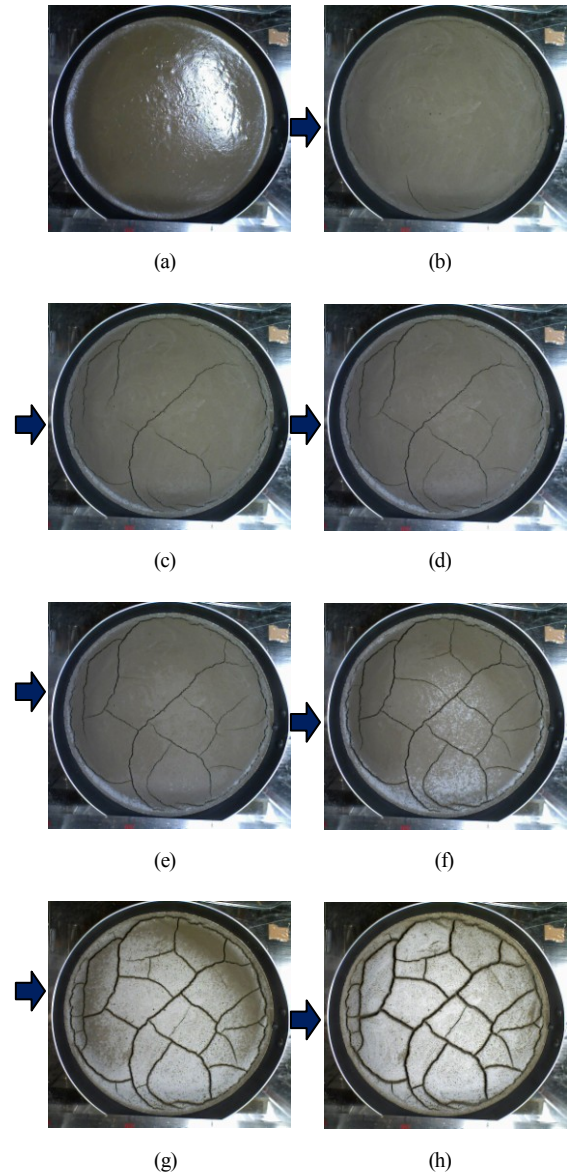


図-8 塩分濃度 10% の島尻泥岩のき裂進展の様子

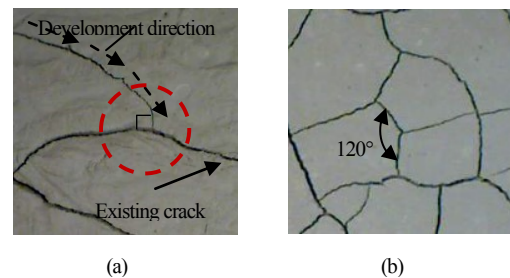
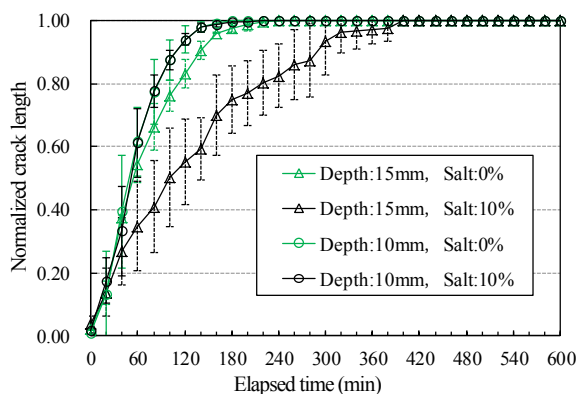


図-9 塩分濃度 10% の島尻泥岩のき裂の交差角度

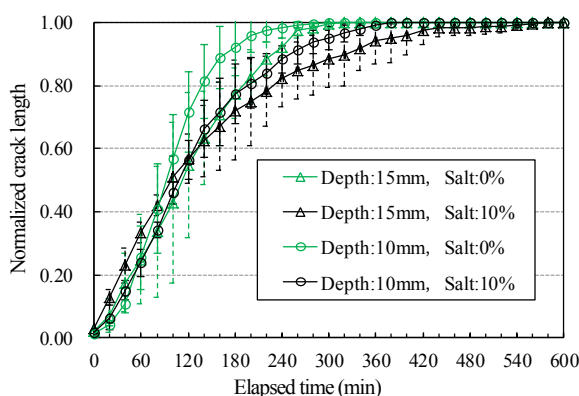
違いがあるためだと考えられる。

(2) 経過時間とき裂長さの関係

図-10 に経過時間とき裂進展長さの関係を示す。本実験では、き裂の進展が分かりやすいようにき裂が発生してから 20 分間隔ごとの画像を用いてき裂進展長さの評価を行った。なお、同図は各条件ごとに 3 回の実験結果の平均をプロットし、エ



(A) Kunigami red soil



(B) Shimajiri clay

図-10 経過時間とき裂長さの関係

ラーバーは標準偏差を示す。試料の厚さが 15mm の場合、両試料とも塩分を含む土壌に関しては、き裂進展に時間を要することがわかった。一方、試料の厚さが 10mm の場合、国頭マージに関しては塩分を含む試料と含まない試料のほとんど違いはみられなかったが、島尻泥岩に関しては、試料の厚さが 15mm の場合と同様に、塩分が含まれる試料の方がき裂進展に時間を要することがわかった。この原因としては、前節で示した通り、塩分により試料内の水分が蒸発しにくくなるために、長い間高い含水比を維持するために、き裂進展が進みにくくなるためだと考えられる。また、同図よりいくつかのき裂が発生することで、き裂の進展は急激に進展することがわかった。また、本実験より塩分を含む試料は 24 時間後も高い含水比を維持するが、その後乾燥し続けてもそれ以上き裂進展が進まないことが分かった。

4. おわりに

本研究では、国頭マージと島尻泥岩を対象に Mud crack の形成メカニズムの基礎的な実験的

検討を行った。今後は、さらに実験条件を増やし実験的検討を行う。さらに、実験的検討だけでなく解析的検討も併せて行い、き裂発生メカニズムの解明を行う。

参考文献

- 1) 中原明生, 松尾洋介: ペーストへの記憶刷り込みと乾燥破壊時の亀裂の制御, 数理解析研究所講究録 1472 巻, 2006.
- 2) Nakahara, A., Matsuno, Y.: Imprinting memory into paste and its visualization as crack patterns in drying process, J. Phys. Soc. Japan 74 1362, 2005.
- 3) Nakahara, A., Matsuno, Y.: Imprinting memory into paste to control crack patterns in the drying process Powders and Grains 2005 ed R Garcia-Rojo, pp5-1081, 2005.
- 4) Nakahara, A., Matsuno, Y.: Transition in the pattern of crack s resulting from memory effects in paste, Phys. Rev. E74, 045102(R), 2006.
- 5) 吉田修一郎: 粘土質水田における亀裂形成メカニズムに関する研究, 中央農業総合研究センター研究報告 2, pp.1-61, 2003.
- 6) Kitsunozaki, S.: Crack growth in drying paste, Advanced powder technology, Vol.22, 311-318, 2011.
- 7) 伊藤寛之, 宮田雄一郎: マッドクラックのパターン形成実験, 地質学雑誌 104 巻, 90-98, 1998.
- 8) Bohn, S., Pauchard, L., and Couder, Y.: Hierarchical crack pattern as formed by successive domain divisions-I. Temporal and geometrical hierarchy, Phys. Rev. E71, 046214, 2005,
- 9) Kindle. E. M.: Some factors affecting the development of Mud Cracks, The Journal of Geology, Vol.25, pp135-144, 2013,
- 10) Denis E. Kerfoot.: Thermal contraction cracks in an arctic, Tundra environment, Vol.25, pp142-150, 1972.

Material Point Method (MPM) を用いた斜面崩壊発生時の土質強度の検討

琉球大学大学院 ○江戸 孝昭
琉球大学 松原 仁
琉球大学 原 久夫

1. はじめに

日本の国土の大半が急峻な山地で形成されており、平野部が少ないことから、山間部まで人間の居住空間が広がっている。そのため、一度斜面崩壊が生じると甚大な被害を生じてしまう恐れがある。表層崩壊や土石流のような斜面崩壊は、地盤に地震等による外力が加わり、降雨や地下水により形成された抵抗力が弱い面（地質構造的弱面）から一気に滑り落ちる現象であるとされている。このように、斜面崩壊のメカニズムはある程度把握されているにもかかわらず、斜面崩壊を精度よく評価することは極めて難しく、現在も斜面崩壊現象の評価手法に関する研究は未だに行われている現状である。評価手法が確立することにより、斜面崩壊メカニズムに基づいた対策を行うことが可能となり、斜面崩壊の発生予測、減災予防が行え、多くの人的被害が軽減される。すなわち、斜面崩壊の評価手法を確立することは極めて重要であると思われる。

斜面崩壊現象の数値解析的アプローチとして、これまでジョイント要素を用いた有限要素法 (FEM) ¹⁾や大変形理論を考慮した有限差分法 (FDM) ²⁾⁻⁴⁾等の格子法、個別要素法 (DEM) ⁵⁾や不連続変形法 (DDA) ⁶⁾⁻⁸⁾を用いて現象の解明が試みられてきた。近年、計算手法の多様化に伴い、MPS (Moving Particle Semi-implicit)、SPH (Smoothed Particle Method)、EFGM (Element Free Galerkin Method)、RKPM (Reproducing Kernel Particle Method) 等のメッシュを必要としない解析手法である粒子法の研究が様々な分野で盛んに行われている ⁹⁾⁻¹⁷⁾。地盤分野においても、例えば、SPH 法による液状化の解析 ¹⁸⁾、EFGM による側方流動解析 ¹⁹⁾、MPS 法に弾塑性構成則にモール・クーロンモデルやドラッカ

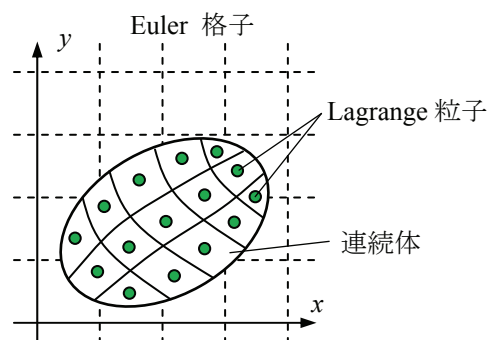


Fig.1 MPM の概念図

ー・プラガーモデル等を用いて地盤の大変形解析が行われている ^{20), 21)}。それらの粒子法の中にMPM (Material Point Method) ²²⁾⁻²⁴⁾と呼ばれる手法がある。本手法は、連続体を粒子で表現し、支配方程式は連続体の背面に設けられるEuler格子にて解く手法である。そのため、MPS、SPH等の粒子法と異なり、境界条件をEuler格子で行うため、境界条件の設定が簡易である。また、本手法は地盤解析分野以外において、破壊力学問題、接触問題、衝突問題等の問題への適用が盛んに試みられており ²⁵⁾⁻²⁸⁾、その有用性が示されている。

そこで本研究では、2006年6月10日に沖縄県中頭郡中城村で発生した安里地すべり ²⁹⁾⁻³⁴⁾にMPMを適用し、MPMの有用性の検証をおこなった。本地すべりは、移動層の斜面長が237m、最大鉛直深度が15.8m²⁹⁾と大規模な斜面崩壊であり、沖縄県においては特異的な斜面崩壊現象となった ³⁰⁾。

2. Material Point Method (MPM)

MPM (Material Point Method) は、流体解析手法であるPIC法 (FLIP) ^{35), 36)}を固体力学問題へ拡張した手法であり、Sulskyら ²²⁾により提案された。MPMはFig.1に示すように、連続体は

質量を持つ Lagrange 粒子の集合体として表わされ、支配方程式を連続体の背面に設けられる Euler 格子を用いて解く手法である。粒子が持つ物理量を内装関数を用いて、格子の節点に集約し、そして支配方程式を解くことで算出される Euler 格子の物理量を、再度内挿関数を用いて Lagrange 粒子に集約する。この計算を繰り返すことで、連続体の変形または移動現象を表現する。なお本研究では、MPM の高精度手法である GIMP を用いており、GIMP の詳細は参考文献³⁷⁾を参照されたい。

MPM におけるアルゴリズムに関して、一般的に MUSL (Modified Update Stress Last)²³⁾, USF (Update Stress First)³⁸⁾, MUSL と USF の平均的なアルゴリズムである USAVG (Update Stress Averaged)³⁹⁾の3つの手法があるが、本研究では、Sulsky らによって示された MUSL をベースとした。Fig.2 に MPM のフローチャートを示す。

3. 安里地すべり (Kita-Uebaru Landslide)

Fig.3 に北上原斜面崩壊の発生場所を示す。北上原斜面崩壊が発生した地域は、沖縄県本島の中南部に位置し、東海岸側であった。沖縄県本島の中南部の東斜面側には、海岸線に平行な北東-南西方向の丘陵が発達しており、多くの地すべり地形が分布し、地すべり危険箇所が複数存在する。沖縄県本島の中南部の地質は、島尻層群泥岩であり、沖縄県本島中南部から宮古島にかけて分布する新第三紀の堆積軟岩である。本斜面崩壊地帯の地質特性はいくつか調査報告されている³³⁾。地すべり地域の砂岩は多孔質であり、強度は 300 から 340 kPa と、極めて脆弱であり、泥岩の強度は含水状態で 1.2 から 3.6 MPa であったと報告されている。また宜保らによると、粘着力のピーク強度は 70 から 100 kPa、内部摩擦角のピーク強度は 23 から 27 degs であり、残留粘着力ならびに内部摩擦角はそれぞれ 0 kPa, 11degs と報告されている。さらに、他の機関の試験結果では、内部摩擦角のピーク強度は 15 から 29 degs、残留内部摩擦角は 9 か

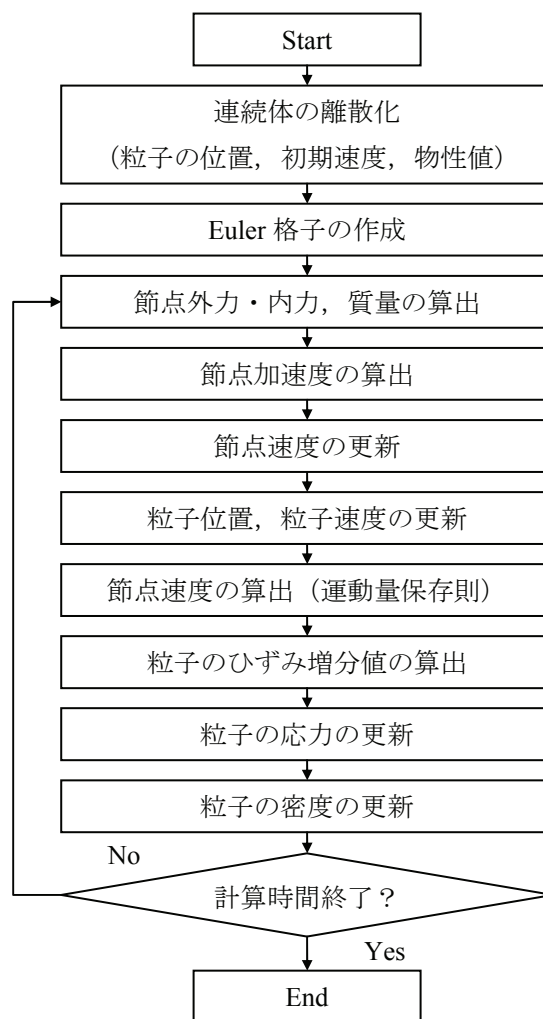


Fig.2 MPM のフローチャート (MUSL)

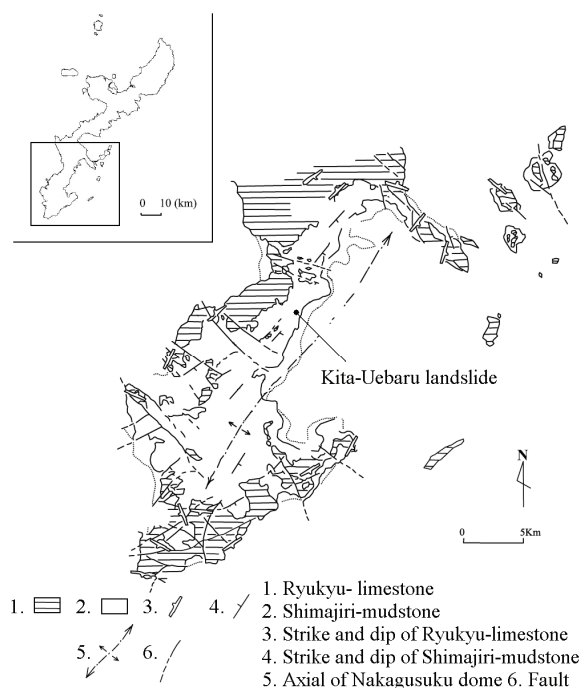


Fig.3 安里地すべり発生箇所 (Chen³⁴⁾ら加筆修正)

ら 13degs であったと報告されている。また、斜面崩壊時にはかなりの量の雨が降っていたことから、降雨により間隙水圧が上昇し、その結果、地質的構造弱面が形成され、斜面崩壊が発生したと考えられる。事実、地質的構造弱面は複数確認されている^{31), 32)}。

4. 解析結果

Fig.4 に解析モデルを示す。解析モデルは上部の移動層と下部の不動層とで成り立っており、上部の移動層は 15,558 の粒子で表現している。材料特性として、斜面崩壊時にはかなりの降雨量であったことを考慮し、ヤング率を 1.34 Mpa, ポアソン比 0.45 とした。弾塑性構成則には、Drucker-Prager の降伏関数を用いた。

$$f = \beta I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0 \quad (1)$$

$$I_1 = \text{tr}(\boldsymbol{\sigma}) \quad (2)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} \left(s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk} \right) \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\tan \phi}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}} \quad (4)$$

$$K = \frac{3c}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}} \quad (5)$$

ここで、 σ は応力、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角である。この時、降雨によるサクションの減少は粘着力を低下させることから、粘着力は 0 kPa とした。

Fig.5 に時間と移動層先端の到達距離の関係を示す。同図より、内部摩擦角が 25degs (ピークの内部摩擦角の範囲) の時、移動層はほとんど動いていないことが分かる。一方、内部摩擦角が 12degs (残留内部摩擦角の範囲内) の時、50 秒間における移動距離は 110.7m となった。宜保³⁰⁾らの報告によれば、移動層先端の到達距離は 110m 程度とされていることから、本解析結果は観測結果とほぼ同等な値となった。このことから、斜面崩壊が発生する時の地盤の強度特性はピーク強度から著しく低下していることが示唆される。また、本解析結果においては、二次関数的に移動距離が増加していることがわかる。すなわち本解析結果では、斜面崩壊は

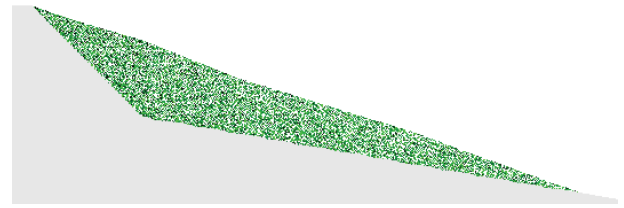


Fig.4 解析モデル

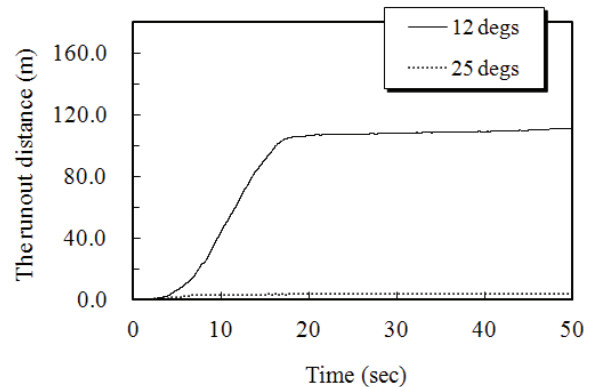


Fig.5 時間経過に伴う先端到達距離

突発的に発生したことがわかる。Fig.6 に、内部摩擦角が 12 degs と 25 degs におけるシミュレーション結果を示す。同図においても、内部摩擦角が 25 degs の時、移動層がほとんど移動してないことがわかる。

5. おわりに

本研究では、MPM (Material Point Method) を 2006 年 6 月 10 日に発生した安里地すべりに適用し、MPM の有用性の検証を行った。その結果、移動先端の到達距離に関して、解析結果と観測結果は同程度な値を示し、MPM の有用性が検証された。また本解析において、地盤の内部摩擦角がピークの強度の場合、斜面崩壊は発生しにくく、残留強度内の内部摩擦角を有する場合、斜面崩壊現象が生じることがわかった。

謝辞：本研究は科学研究費補助金 (23760428) の助成を受けた。ここに記して感謝の意を示す。

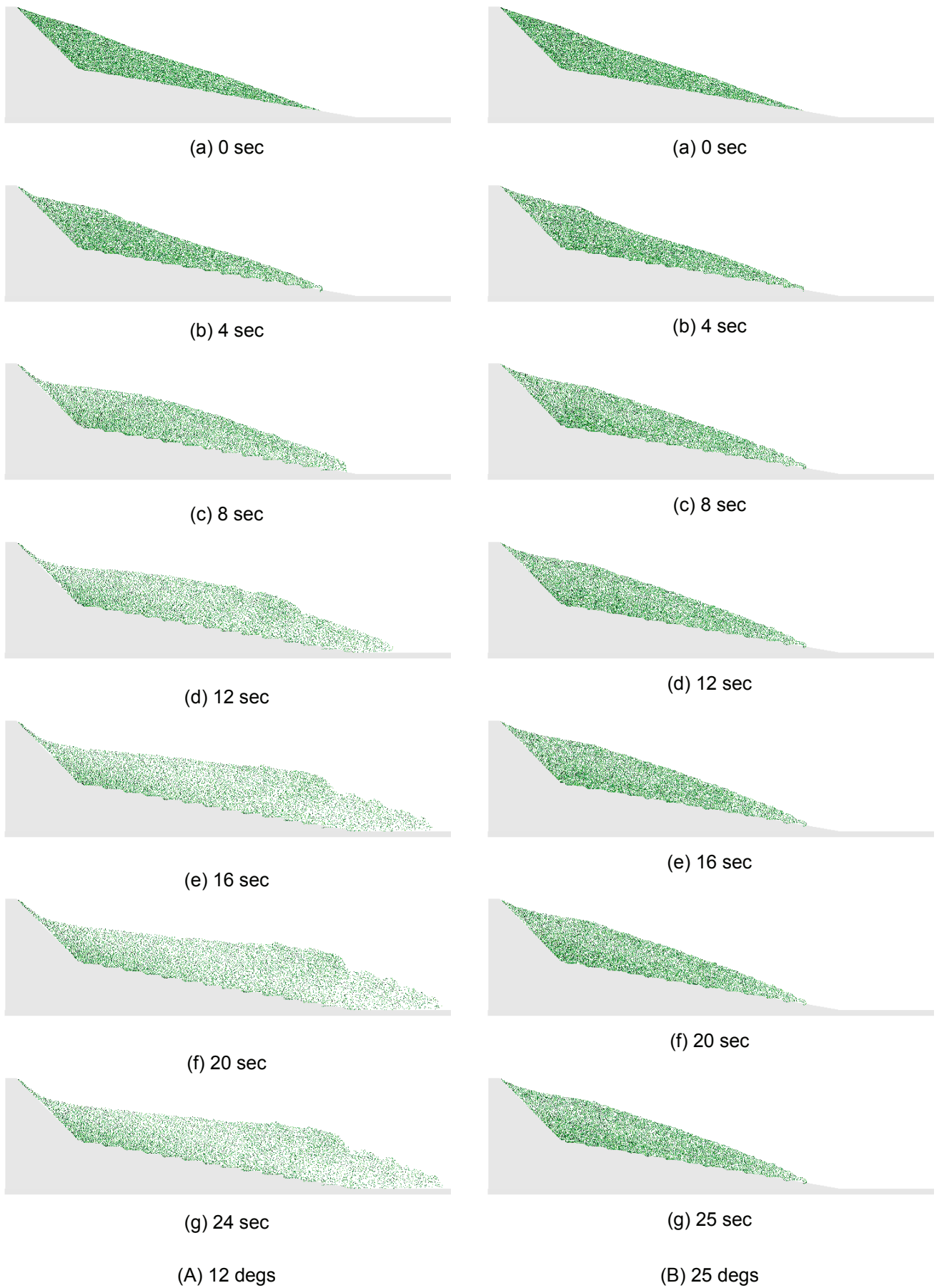


Fig 7. 各内部摩擦角における地すべり挙動

参考文献

- 1) Goodman, R. E., Taylor, R. L. and Breeke, T. L.: A model for the mechanics of jointed rock, *Journal of the Soil Me-chanics & Foundations, Division. ASCE*, pp.637-660, 1968.
- 2) Cundall, P. A. and Board, M.: A microcomputer pro-gram for modeling large-strain plasticity problems, *Proc. 6th Int Conf on Numerical Methods Geomechanics, Innsbruck, Austria*, pp.2101-2108, 1988.
- 3) Nakagawa, M., Jiang, Y. and Esaki, T.: Application of Large Strain Analysis for Estimation of Behavior and Stability of Rock Mass, *Journal of JSCE*, Vol.575, pp.93-104, 1997.
- 4) Nakagawa, M. and Yamada, M.: Application for Large Displacement Landslides Simulation by Using Finite Difference Method, *Journal of the Japan Landslide Society : landslides*, Vol.44, No.6, pp.377-384, 2008.
- 5) Cundall, P. A.: Computer model for simulating progressivelarge scale movements in blocky systems. *Proc. Int. Symp. on Rock Fracture*, Vol.II-8, pp.129-136, 1971.
- 6) Shi. G. H. and Goodman, R. E.: Two dimensional discontinuous deformation analysis, Vol.9, No.6, pp.541-556, 1985.
- 7) 大西有三, 佐々木猛, Shi, G. H.: 不連続変形法 (DDA), 丸善, 2005.
- 8) Koyama, T., Akoa, S., Nishiyama, S. and Ohnishi, Y.: Earthquake Response Analysis for Rock Slope Using Discountinuous Deformation Anlysis(DDA), *Journal of JSCE, Division C: Geotechnics*, Vol.65, No.3, pp.644-662, 2009.
- 9) Li, S. and Liu, W. K.: Meshfree Particle Methods, *Springer*, 2007.
- 10) Liu, G. G. R. and Liu, M. B.: Smoothed Particle Hydrody-namics: A Meshfree Particle Method, *World Scientific*, 2003.
- 11) Belytschko, T., Lu. Y. Y. and Gu, L.: Element-free Galerkin methods. *Int. J. Numerical Methods in Engineering*, Vol.37, pp.229-256, 1994.
- 12) Belytschko, T., Krograuz, Y., Organ, D., Fleming, M. and Krysl, P.: Meshless methods: An overview and recent developments, *Comput. Methods Appl. Mech. Engng*, Vol.139, pp.3-47, 1996.
- 13) Shaofan, L. and Wing, K. L.: Meshfree Particle Methods, *Springer*, 2004.
- 14) Matsubara, H. and Yagawa, G.: Application and accuracy of basis functions implemented in a patch-by-patch approximation of mixed-type finite element, *Journal of applied mechanics: JSCE*, Vol.10, pp.201-209, 2007.
- 15) Matsubara, H. and Yagawa, G.: Convergence studies for Enriched Free Mesh Method and its application to fracture mechanics, *Interaction and Multiscale Mechanics: An International Journal*, Vol.2, No.3, pp.277-293, 2009.
- 16) Yagawa, G. and Matsubara, H.: Enriched Free Mesh Method: An Accuracy Improvement for Node-based FEM. *Computational Plasticity, Springer*, Vol.7, pp.207-219, 2007.
- 17) Tian, R., Matsubara, H. and Yagawa, G.: Advanced 4-node tetrahedrons, *Int. J. Numeri. Meth. Engng*, Vol. 68, No.12, pp.1209-1231, 2006.
- 18) Naili, M., Matsushima, T and Yamada, Y.: A 2D Smoothed Particle Hydrodynamics method for liquefaction induced lateral spreading analysis, *Journal of applied mechanics, JSCE*, Vol.8, pp.591-599, 2005.
- 19) Sato, T. and Matsumaru, T.: Numerical Simulation of Liquefaction and Flow Process Using Mesh Free Method, *Journal of JSCE, Division C: Geotechnics*, Vol.62, No.1, pp.22-34, 2006.
- 20) Ikari, H. and Gotoh, H.: The Computational Mechanics of Collapse Process of Cohesive Bank by MPS Method with Elastic-Plastic Model, *Journal of JSCE, Division B: Hydraulic*, Vol.53, pp.1069-1074, 2009.
- 21) Ikari, H., Gotoh, H. and Yodoshi, H.: Development of Fluid-Elastoplastic Hybrid Particle Method for Tsunami Simulation due to Slope Failure, *Journal of JSCE, Division B: Coasta*, Vol.65, No.1, pp.46-50, 2009.
- 22) Sulsky, D., Chen, Z. and Schreyer, H. L.: A particle method for history-dependent

- materials, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.118, pp.179-196, 1994.
- 23) Sulsky, D., Zhou, S. J. and Schreyer, H. L.: Application of a particle-in-cell method to solid mechanics, *Computer physics communications*, Vol.87, pp.236-252, 1995.
- 24) Sulsky, D. and Schreyer, H. L.: Axisymmetric form of the material point method with applications to upsetting and Taylor impact problems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.139, pp.409-429, 1996.
- 25) Zhang, H. W., Wang, K. P. and Chen, Z.: Material point method for dynamic analysis of saturated porous media under external contact/impact of solid bodies, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.198, pp.1456-1472, 2009
- 26) Andersen, S. and Andersen, L.: Modelling of land-slides with the material-point method, *Computational Geosciences*, Vol.14, pp.137-147, 2010.
- 27) Andersen, S. and Andersen, L.: Analysis of spatial interpolation in the material-point method, *Computers & Structures*, Vol.88, pp.506-518, 2010.
- 28) Beuth, L., WiReckowski, Z. and Vermeer, P. A.: Solution of quasi-static large-strain problems by the material point method, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*, Vol.35, pp.1451-1465, 2011.
- 29) Gibo, S., Nakamura, S., Kimura, S. and Chen, C.: Characteristics of cross section and occurrence site of the first-activated type landslides in the area of Shimajiri-mudstone, Okinawa Island -For the risk evaluation of landslide-, *Journal of the Japan Landslide Society*, Vol.46, No.3, pp.154-161, 2009.
- 30) Gibo, S., Zhou, Y., Sasaki, K. and Nakamura, S.: Kitauebaru landslide caused by continual rainfall in Nakagusuku Village, Okinawa Prefecture, on June 10, 2006, *Journal of the Japan Landslide Society*, Vol.43, No.2, pp.44-47, 2006.
- 31) Kimura, S., Gibo, S. and Nakamura, S., Sasaki, K. and Zhou, Y.: Shear strength in first-time activation and reactivation of Shimajiri-mudstone landslide : An example of Asato landslide, Okinawa, Japan, *Journal of the Japan Landslide Society*, Vol.47, No.3, pp.138-146, 2010.
- 32) Nakamura, S., Gibo, S., Kimura, S. and Shriwantha, V. B.: Average shear strength parameters along the slip surface of various types of landslides -Shimajiri-mudstone landslides, Okinawa-, *Journal of the Japan Landslide Society*, Vol.48, No.5, pp.251-262, 2011.
- 33) Tokashiki, N. and Aydan, Ö.: Kita-Uebaru natural rock slope failure and its back analysis, *Environmental Earth Sciences*, Vol.62, pp.25-31, 2011.
- 34) Chen, C., Gibo, S., Sasaki, K. and Nakamura, S.: Classification of landslide types observed in the area of Shimajiri-mudstone, Okinawa Island -For the risk evaluation of landslide-, *Journal of Japan Landslide Society*, Vol.43, No.6, pp.339-350, 2007.
- 35) Brackbill, J. U. and Ruppel, H. M.: FLIP: A method for adaptively zoned, particle-in-cell calculations of fluid flows in two dimensions, *Journal of Computational Physics*, Vol.65, No.2, pp.314-343, 1986.
- 36) Brackbill, J. U., Kothe, D. B. and Ruppel, H., M.: Flip: A low-dissipation, particle-in-cell method for fluid flow, *Computer Physics Communications*, Vol.48, No.1, pp.25-38, 1988.
- 37) Bardenhagen, S. G. and Kober, E. M.: The Generalized Interpolation Material Point Method, *Computer Modeling in Engineering and Science*, Vol.5, No.6, pp.477-495, 2004.
- 38) Bardenhagen, S. G.: Energy Conservation Error in the Material Point Method for Solid Mechanics, *Journal of Computational Physics*, Vol.180, pp.383-403, 2002.
- 39) Nairn, J. A.: Material Point Method Calculations with Explicit Cracks, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, Vol.4, No.6, pp.649-663, 2003.

不均質脆性固体における破壊形態の複雑性に関する数値解析的検討

琉球大学 ○松原 仁
 琉球大学大学院 江戸孝昭
 琉球大学 原 久夫

1. はじめに

岩石のような不均質性の脆性固体材料の破壊パターンは複雑かつ多様である。これらの材料が圧縮力や引張力を受けた場合における破壊過程は、ここ数十年の間、数多く研究されているが[1]-[10]、特に圧縮力を受けた際の破壊パターンの形成メカニズムについては完全に理解されたとはいえない。屋内実験においては、Fig. 1 に示すような、縦方向割裂、斜め割裂、砂時計状割裂、あるいはこれらを組み合わせたような破壊パターンがしばしば観察される。これらのき裂パターンに関して、例えば、縦方向から斜め方向き裂へのパターン推移に対する根本的な要素については、未だ正確には解明されていないのが現状である。

本発表では、多孔質材料の一軸圧縮試験時における破壊パターンについて、数値シミュレーションの観点から考察し、さらに、微細粒子の構造が破壊パターンに与える影響についても議論する。

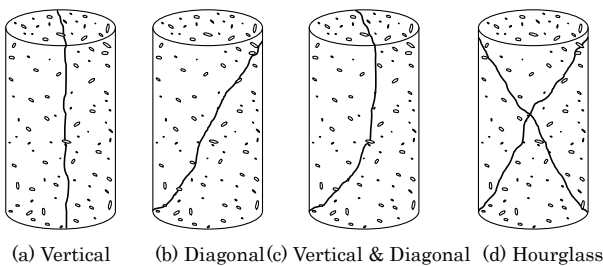


Fig.1 Typical fracture pattern of sedimentary rocks under uniaxial compression

2. 手法

2.1 Smearred crack model

Smearred crack model は、き裂を材料特性の変化としてモデル化する手法である。したがって、解析領域のリメッシング等は必要なく、き裂を有する部材も連続体として扱われる。要素に関

しては、Fig. 2 に示すように、き裂発生後は直交異方性材料としてモデル化され、き裂方向は固定される（固定ひび割れモデル）。したがって、き裂発生後の要素剛性マトリックス (K_{cr}) は座標変換マトリックスを用いて、次式にて表すことができる。

$$K_{cr} = \int_{\Omega} B^T \cdot T_{\sigma}^{-1} \cdot D_{cr} \cdot T_{\epsilon} d\Omega \quad (1)$$

ここで、 B はひずみ-変位マトリックス、 T は座標変換マトリックス、 D_{cr} は Fig. 2(b) で示すように、き裂面に垂直方向の応力は伝達しないように設定した応力-ひずみマトリックスである。

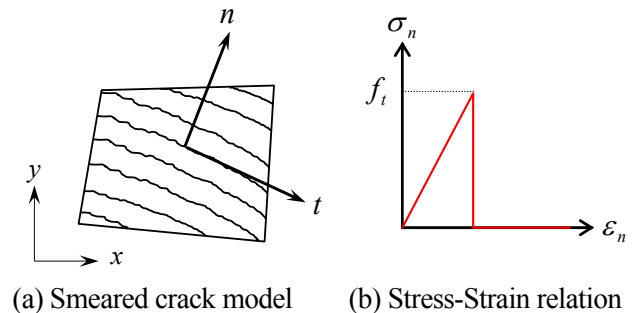


Fig.2 Smearred crack model for the FEM simulation

2.2 粒状形状を考慮したモデル

Fig. 3(a) に示すように、堆積岩はたくさんの粒子が集合した形の微細構造を有している。そこで本研究では、岩石粒子を Voronoi 分割にてモデル化した (Fig. 3(b) 参照)。

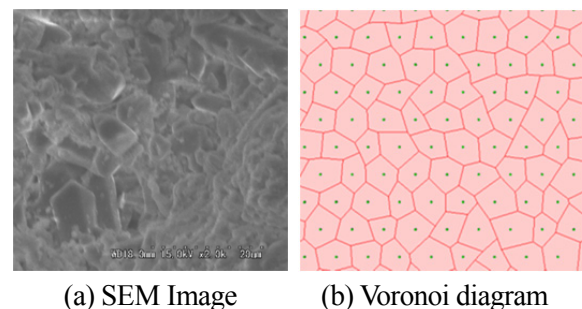


Fig.3 Micro-structure of sedimentary rock and its numerical model

一般に、破壊は結晶や粒子の境界における微細なき裂（マイクロクラックと呼ばれる）が原因で起こることが知られている。既存の研究として、「剛体-バネモデル（RBSM）」と呼ばれる材料の極限状態を算定する際に用いられる数値解析手法が存在するが、この手法においても Voronoi 境界を破壊面として扱うことで高精度な解が得られることが知られている。ただし、RBSM における材料の弾性挙動に関しては、必ずしも正しい解が得られないことが指摘されていることをここに付記しておく。

3 数値解析例

ここでは、Fig. 4 に示すような、孔を円でモデル化した多孔モデルのき裂進展解析について議論する。Fig. 5 にモデルの上下面に引張力を与えた場合のき裂進展の様子を示す。き裂は最も大きな径をもつ孔から発生し、隣接する孔に接続しながら進展した。本結果に対して、他の計算手法や実験との比較分析などの定量的な評価は行っていないが、破壊力学の観点から考えると、定性的には良好な結果であると言える。

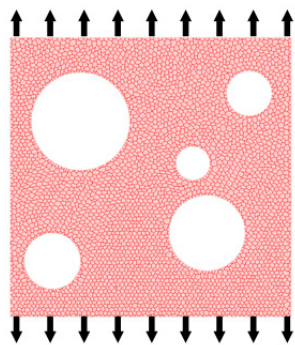


Fig. 4 Numerical simulation model

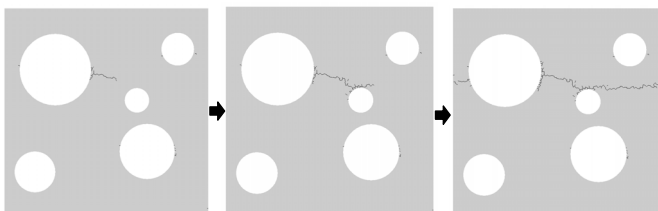


Fig. 5 The result of crack propagation

4. おわりに

本稿は、き裂進展解析手法の簡単な説明と単純な解析結果を示したものである。本研究の主テーマであるき裂発生パターンの複雑性につ

いては、口頭発表時に示す。

参考文献

- [1] Holzhausen GR, Johnson AM. Analyses of longitudinal splitting of uniaxially compressed rock cylinders, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 1979; 16: 163-177.
- [2] Peng S. Fracture and Failure of Chelmsford Granite, Ph.D. diss., Dept. of Mineral Engng., Stanford Univ., Stanford, CA. 1970.
- [3] Peng S, Johnson AM. Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 1972; 9: 37-86.
- [4] Jaeger GC, Cook Neville GW. *Fundamental of rock mechanics*. 4th edn, Blackwell, 2007; 148-160.
- [5] Gramberg J. Axial cleavage fracturing, a significant process in mining and geology, *Engng. Geol.* 1965; 1: 31-72.
- [6] Wawersik QR, Fairhurst C. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 1970; 7: 561-575.
- [7] Wang EZ, Shrice NG. Brittle fracture in compression: mechanisms, models and criteria, *Engng. Fracture Mech.*, 1995; 52(6):1107-1126.
- [8] Vardoulakis Ionnis, Labuz Joseph F, *Continuum fracture mechanics of uniaxial compression on brittle materials*, *Int. J. Solids and Structures*, 1998; 35: 4313-4335.
- [9] Jing L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2003; 40: 283-353.
- [10] Hoek E, Bieniawski ZT. Brittle rock fracture propagation in rock under compression, *Int. J. Fracture Mech.*, 1965; 1(3): 137-155.