

# 高品質ボーリングコアを利用した地質性状評価に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 26～平 28

担当チーム：地質・地盤特命、地質チーム

研究担当者：佐々木靖人、阿南修司、矢島良紀、松尾達也

## 【要旨】

高品質ボーリングコアを用いた脆弱層の適切な強度評価に向け、脆弱層を模擬した複数の人工岩盤を製作し、削孔によるコアの乱れや、乱れが強度試験値に与える影響について実験的に検討した。その結果、X線CTを用いてコアの乱れを欠損率や亀裂率として定量的に評価する手法を考案し、削孔方法とコアの乱れの関係や、コアの乱れが強度低下にどの程度影響するかを明らかにしたほか、既存ボーリングコアの事例を基にコア乱れの種類・程度とその要因を「コア乱れの定性的区分基準（案）」として整理した。これにより、現場において地質技術者が客観的にコアの品質や物性試験等への利用の可否を判断でき、土木構造物の設計の合理化につながる。

キーワード：ボーリングコア、脆弱層、コア乱れ、X線CT、三軸圧縮試験

## 1. はじめに

岩盤中に存在する「脆弱層」は、基礎とする構造物の不安定化や岩盤すべりなどの災害の原因となるが、地下深部であるため物性値を直接把握することが困難である。このため現状では、経験的な手法や現況斜面の安全率からの逆算による評価に基づく対応が図られているものの、物性値の適切な評価に基づく合理的な対応が課題であった。

一方、近年実施されるようになってきた「高品質ボーリング」は、従来工法では採取が困難なコアも採取できること、調査横坑等でのブロックサンプリングに比べ安価なことなどの利点があり、採取したコアで試験をすることにより脆弱層の物性値を直接把握できる可能性がある。すでに高品質ボーリングで採取されたコアの観察によって、より詳細な地質性状の把握がなされる事例が増えているが、力学評価においては、採取時の乱れの問題などから高品質なコアをどこまで利用できるか明確になっていない。

そこで本研究では、高品質なコアを用いた脆弱層の物性評価手法の開発に向け、コア掘削時に生じる乱れを適切に評価し、乱れの力学強度への影響程度について把握した上でコアを物性評価に利用する手法について検討した。

## 2. 研究方法

### 2. 1 概要

本研究のフローを図-1に示す。まず、建設事業

で採取されたコアをもとに乱れの性状や原因について整理した。その上で、コアの採取方法が乱れに与える影響を評価するため、人工岩盤を製作し、いくつかの削孔条件のもとでコアを採取、X線CT撮影による内部観察により乱れ程度を評価した。あわせて、採取したコアの三軸圧縮試験をおこなうことで、コアの品質が強度物性に与える影響についても評価した。得られた結果をとりまとめ、高品質コアの物性評価への適用性についてとりまとめた。

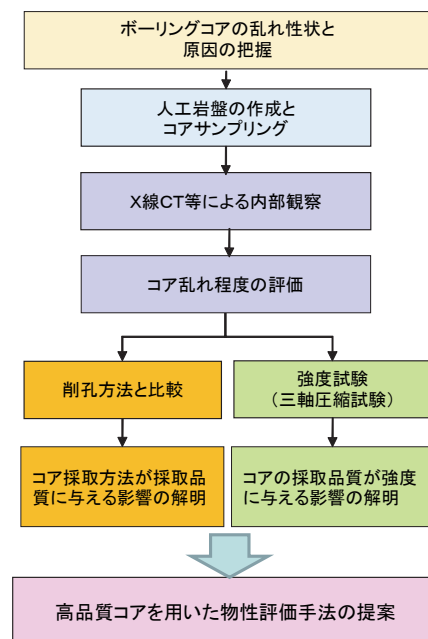


図-1 研究フロー

## 2. 2 コアの乱れ事例の収集と整理

ボーリングコアにみられる様々な乱れの性状とその要因を把握するため、既往事業で削孔されたボーリングコアを観察し、乱れが確認された事例を抽出した。抽出した事例について、乱れの性状や程度を整理した上で、地質性状ごとに分類し、「コア乱れの定性的区分基準(案)」を作成した。また、削孔によるコアの乱れは細粒分の流失、礫部の分離や回転等によるものが多く確認され、本研究においてもそれらの事象を再現できるような供試体の検討をおこなった。

## 2. 3 コア削孔方法と採取品質の関係解明

### 2. 3. 1 人工岩盤製作

削孔条件による脆弱層の乱れの影響を評価するためには、同じ地質条件のもとでコアを採取する必要がある。しかし、現地ではそのような場所を探すのは困難なため、本研究では、脆弱層を模擬した人工岩盤を製作した。人工岩盤は、固結した粘土層を模擬したもの(以下A)と亀裂を有する軽石層を模擬したもの(以下B)の2種類を製作した。材料は硬質石膏(ハードプラスター、圧縮強度62MPa)、カオリン、重曹(炭酸水素ナトリウム)および水(40°C)を使用した。加えて、削孔時に生じる礫の分離・回転を再現するため、石膏を用いて硬質な礫を模擬したもの( $\phi=5\text{mm}$ 、 $H=2\text{mm}$ の円柱状、以下C)を製作し、人工岩盤の製作過程において供試体の重量比で2%程度添加した。人工岩盤の配合と詳細な製作方法について表-1に示す。

このうち重曹は、亀裂を有する多孔質の脆弱層を再現するために添加した。重曹は石膏が硬化する際の反応熱によって、炭酸ナトリウムと二酸化炭素に

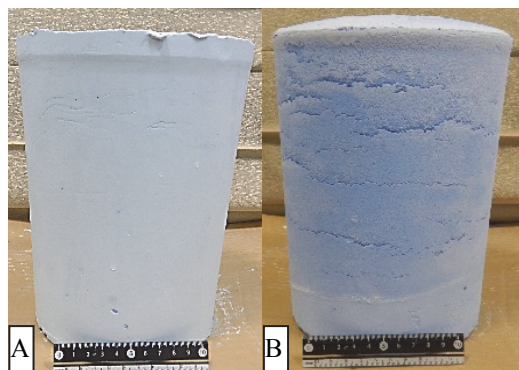


写真-1 製作した人工岩盤 (左: A、右: B)

分解する。炭酸ナトリウムは、石膏の硬化開始時間を遅らせる遅延剤の効果を持つとともに硬化後の強度を低下させる効果をあわせもつ。また、二酸化炭素は気泡として石膏中に残り空隙を形成するほか、石膏を膨張させることにより、ランダムな水平亀裂を生じさせる。この特性を利用することによって、これまで製作が困難であった、亀裂質・多孔質という特徴を有する脆弱層の模擬が可能となった。材料配合や製作手法は、100種類を超える数多くの試作をおこない、最適な組み合わせを試行錯誤的に決定した。製作した人工岩盤の例を写真-1に示す。

### 2. 3. 2 削孔によるコアサンプリング

製作した人工岩盤に対し、コアドリル(シブヤ製TS403、ドリル内径67.8mm、回転数350rpm、ダイヤモンドビット)を用いた削孔により、コア供試体を採取した。削孔状況を写真-2に示す。削孔条件および数量は表-2に示すとおりであり、送水量を3段階、削孔速度を2段階変化させ、人工岩盤A・Bとも削孔条件ごとに各3供試体を採取した。また、削孔による乱れない供試体として、金属製のモールド( $\phi=70\text{mm}$ 、 $H=140\text{mm}$ )を用いたコア試料を製作した。



写真-2 コア削孔状況

表-1 人工岩盤の配合と製作方法

		A (粘土)	B (軽石)	C (礫)
材料配合	石膏	0.7	1.0	1.0
	カオリン	0.3	—	—
	重曹	—	0.018	—
	水 (40°C)	1.0	0.6	0.25
製作方法	A・Bそれぞれについて、以下の手順で製作			
	1. 材料攪拌後、5分間 (Bは10分間) 静置			
	2. 事前に製作したCを所定量混ぜ合わせ、速やかに紙製の大型容器 ( $\phi_{\text{max}}=186\text{mm}$ 、 $\phi_{\text{min}}=154\text{mm}$ 、 $H=233\text{mm}$ )へ充填			
	3. 110°Cの送風乾燥機で2時間加熱			
4. 乾燥機より取り出し脱型				

表-2 削孔条件と数量

	削孔速度	送水量(L/min)			モード
		0.5	2.5	4.0	
A(粘土)	低速	3	3	3	5
	高速	3	3	3	
B(軽石)	低速	3	3	3	6
	高速	3	3	3	

### 2. 3. 3 欠損率・亀裂率の測定

削孔による乱れを評価するため、削孔前の人工岩盤とその削孔により採取したコア供試体に対し、土木研究所が所有する X 線 CT 撮影装置(ニコン製 XT H 320LC、写真-3)を用いて撮影した。撮影条件を表-3 に示す。

削孔時の乱れによる基質の流失部を欠損として定義した上で、撮影によって得られた削孔前後の断面画像を解析し、欠損の割合を欠損率として評価した。また、軽石層を模擬した人工岩盤 B については、削孔後の欠損のほかに初生的にランダムな水平亀裂が存在し、一部は開口している。この亀裂が削孔によりどのように変化するかを確認するため、削孔前後における亀裂の開口領域(幅 0.5mm 以上)の割合を亀裂率として評価した(図-2)。

削孔の条件と得られた供試体の欠損率・亀裂率を比較し、削孔条件と採取品質の関係について考察した。



写真-3 X 線 CT 撮影装置

表-3 X 線 CT の撮影条件

	人工岩盤(削孔前)		コア供試体(削孔後)	
	A	B	A	B
電圧(kV)	190	200	130	140
電流(μA)	160	200	160	200
フィルター	アルミニウム板 厚さ : 5mm			
露光時間(ms)	500			

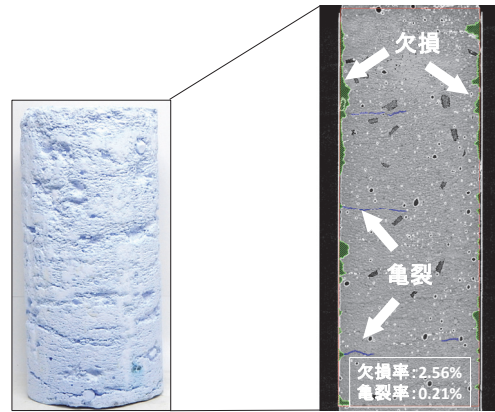


図-2 削孔後のコアと X 線 CT 画像より求めた人工岩盤 B における欠損率と亀裂率の例(緑色が欠損部、青色が亀裂部)

### 2. 4 コアの採取品質と強度の関係説明

コアの乱れが強度試験に与える影響を評価するため、採取・製作した合計 42 本のコア供試体に対し、3 供試体で 1 試料とし、UU 三軸圧縮試験を実施した。試験条件として、セル圧を 100kN/m<sup>2</sup>、200kN/m<sup>2</sup>、400kN/m<sup>2</sup> に設定し、ひずみ速度 0.1%/min で軸ひずみが 15% に達するまで载荷をおこなった。なお、試験条件をそろえるため、供試体の含水状態は、事前に送風乾燥機により絶乾状態とした。

試験で得られた結果と供試体の欠損率と比較し、コアの採取品質と強度の関係について考察した。

## 3. 研究結果

### 3. 1 コアの乱れ事例の収集と整理結果

作成した「コア乱れの定性的区分基準(案)」を表-4 に示す。コアの地質性状として地すべり土塊等にみられる礫混じり土砂状コア、断層破碎帯等にみられる粘土混じり角礫状コア、亀裂性岩盤コアの 3 タイプに区分し、それぞれ乱れのレベルに応じたコア写真と乱れの性状について整理した。また、削孔による影響ではないものの、泥岩など一部の岩石では削孔後にスレーキングが生じ、観察や試験が困難になることもあるため、このような乱れについても付記した。さらに、乱れのレベルごとに、地質性状観察と強度試験の適用性について記載した。このようなコアの乱れの種類・レベル等に関する区分基準は、これまで専門技術者の経験知として個々人に蓄積されてきたものであるが、一覧表としてまとめ、また物性評価への適用性を示すことで、行政職員や若手技術者の判断指標の一つとして活用できると考える。

表-4 コア乱れの定性的区分基準 (案)

人為的な乱れレベル	対象	観察	強度試験	礫混じり土砂状コア(地すべり土塊)	粘土混じり角礫状コア(断層部)	亀裂性岩盤	操作異状	現象	コアに現れる現象
1 乱れ小	地山と同様の状態で採取されており、傷や欠損等が全く見られない	可	可				ロッド・サンプラーの揺動	試料に曲げ応力が発生	軟化・破砕
2	コアに若干の傷や欠損、一部流失、かみ合わせの変化が見られるが、もとの地質構造が残っている。	可	条件付き可 乱れに応じ試験値を低減	細粒分のわずかな流失	細粒分のわずかな流失	亀裂のわずかな開口や移動	過大な給圧(鉛直力)	試料に圧縮応力やせん断応力が発生	軟化・破砕
				外周部の剝離と流出によるコアの部分的なせ	細粒分の部分的流出と分離面の発生	亀裂中の細粒分の部分的流出	循環流体圧力の上昇	試料に過剰な水圧がかかる	水圧破砕・割れ目の開口・細粒分流失
3	コアに大きな欠損や細粒分の顕著な流失、塊の移動・回転、分離が見られるなど、もとの地質構造が不明瞭になっている。	一部可	不可	細粒分の流失と塊のほぐれ	細粒分の流失、塊部の分離・回転	亀裂の開口や分離	循環流体の供給不足	試料に摩擦熱が発生	焼き付き(スライムとともに固結)
				無水掘削による焼き付け	完全に分離した塊状コア	完全に分離した塊状コア	ビットとコアの間に岩片が挟まる	ビットの回転力が試料に伝達	切断・破砕
4 乱れ大	焼き付け、塊状コア、明らかな破損等によりコアが攪乱され、もとの組織・構造がほとんど残っていない。	不可	不可	無水掘削による焼き付け	完全に分離した塊状コア	完全に分離した塊状コア	サンプラー内管とコアの間に岩片が挟まる	軸力が内管を通じて試料に伝達	切断・破砕
				無水掘削による焼き付け	コア境界	コア境界	ビット切削時の岩塊の回転	試料の破砕、攪乱	かみ合わせの破砕・岩塊の破砕
							コアの落下(サンプラー内、削孔内)	試料の破砕、攪乱	圧縮・破砕・割れ目の開口・かみ合わせの破砕
							サンプラー境界におけるコアの切断	試料の切断	切断・破砕・かみ合わせの破砕、スライム混合
									スレーキングによる細片化(保管後)

### 3. 2 コア削孔方法と採取品質の関係

#### 3. 2. 1 欠損率

X線CT撮影により求めたコア欠損率と削孔方法(送水量・削孔速度)の関係を図-3に示す。なお、削孔前の人工岩盤には欠損と認められる領域がなかったため、コアの欠損率は全て掘削による乱れと判断した。なお、人工岩盤Bにおける「送水量4.0L/min・高速削孔」の組み合わせでは、削孔によりコアが分離するなど、強度試験ができる状態での採取ができなかったため評価対象外とし、「送水量4.0L/min・低速削孔」の組み合わせは、削孔前のX線CT画像を取得できなかったため、削孔方法と乱れの関係性評価に関してのみ対象から除外している。

結果は、A、Bとも同様の傾向を示し、低速削孔時では、送水量が増加するにつれ欠損率が大きくなる傾向があり、送水量が5倍になると両者とも欠損率が約2倍に増加した。両者を絶対値で比較すると、Bの欠損率は同条件におけるAの欠損率の50~70%程度であった。X線CT写真や研磨薄片の詳細観察により、この欠損は、送水による基質の流失とそれにとまなう礫の抜け落ちが原因であることがわかった。AがBに比べ、欠損率が高いのは、Aに配合したカオリンが石膏の固結度を低下させたためと推定される。

また、高速削孔時では、試料への応力が增大するため、送水量が少ない場合でもコア欠損率が増加する傾向があり、送水量0.5L/minの場合、低速削孔時の1.5~2.4倍の欠損率となる一方で、送水量の増加

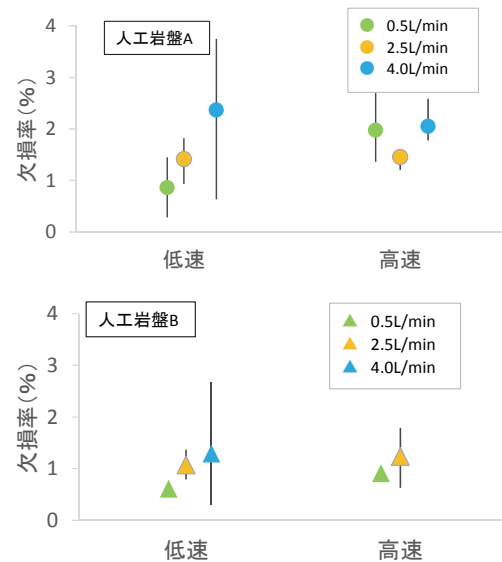


図-3 コア欠損率と削孔方法との関係 (上: A (粘土)、下: B (軽石))

による欠損率の増加傾向は小さかった。これは、削孔速度の増加により、削孔時間が短縮されたため、実質的な送水量が減少した結果、基質流失による欠損が減少したと考えられる。このようにコアの乱れを欠損率として定量的に評価することで、削孔条件と採取品質の関係を把握することができた。なお、今回の実験では、低速かつ送水量を低減することがコアの乱れを抑制するために効果的であった。

#### 3. 2. 2 亀裂率

軽石層を模擬した人工岩盤Bにおける削孔前後の

亀裂率を比較すると、約半数の供試体で削孔後の亀裂率が削孔前よりも減少する異常な結果が得られた

(図-4)。そこで削孔後のコアや削孔前後の X 線 CT 画像を詳細に観察すると、削孔後のコアで欠損と評価している箇所が多くが、削孔前の人工岩盤では開口亀裂と評価した箇所であり、亀裂が削孔によりコアの外周部と連続したために削孔後は欠損と評価していたことが明らかになった。すなわち、削孔前の亀裂の多くが削孔後は欠損として評価されていた。そのため、削孔後の亀裂率と欠損率を合計した「亀裂欠損率」と削孔前の亀裂率との差分(増加亀裂欠損率)を亀裂に関する乱れの指標として用いて、削孔方法と比較した。

結果を図-5 に示す。低速削孔時では送水量が 0.5L/min から 4.0L/min に増加すると、亀裂欠損率も大きく増加することがわかる。これは、送水による外周部の基質流失に加え、削孔時に水が亀裂へ浸入することによる亀裂の拡大が原因と考えられる。一方で高速削孔時の亀裂欠損率の増加は送水量 0.5L/min の低速削孔時よりは大きいものの 4.0L/min のケースよりは少なく、また送水量の増加による亀裂欠損率の増加は見られなかった。これは欠損率のみの場合と同様に、削孔時間の短縮による送水量の実質的な減少があったためと考えられる。

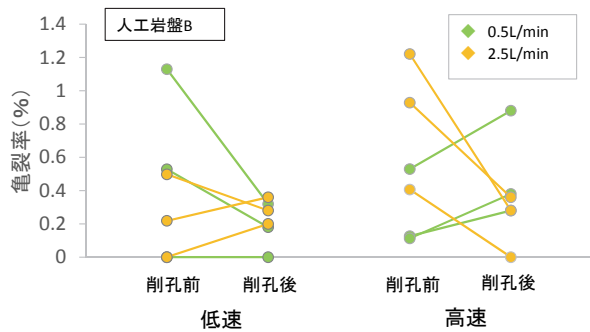


図-4 削孔前後の亀裂率の変化

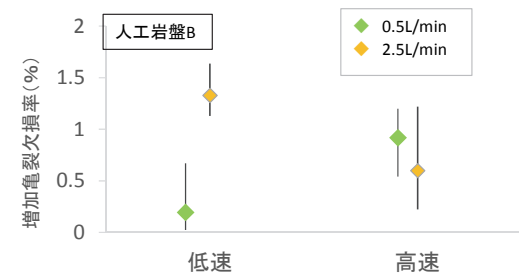


図-5 削孔前後の亀裂欠損率の変化と削孔方法

### 3.3 コアの採取品質と強度の関係

#### 3.3.1 人工岩盤 A (粘土模擬)

削孔したコア試料を用いた三軸圧縮試験結果より求めた各試料(3供試体で1試料を基本構成とする)のせん断強度および強度と欠損率との関係を図-6 に示す。粘土を模擬した人工岩盤Aでは、送水量や削孔速度の増加により試料の欠損率が増加すると、モールドによる試料(欠損率0)に比べ、粘着力Cは低下し、内部摩擦角φは増加する傾向が見られた。

原因を考察するため、各試料において、試験結果をセル圧ごとに分析したところ、欠損率の増加に応じて、圧縮強度や変形係数が低下することを確認した(図-7)。欠損率が1%増加したとき、圧縮強度はセル圧 100kN/m<sup>2</sup> 下では約 8%、400kN/m<sup>2</sup> 下では約 3%低下した。同様に変形係数も 100kN/m<sup>2</sup> 下では約 14%、400kN/m<sup>2</sup> 下で約 7%低下している。これは、試験時に供試体の欠損部に応力が集中したことにより、相対的に低い強度で破壊が生じたためと推定さ

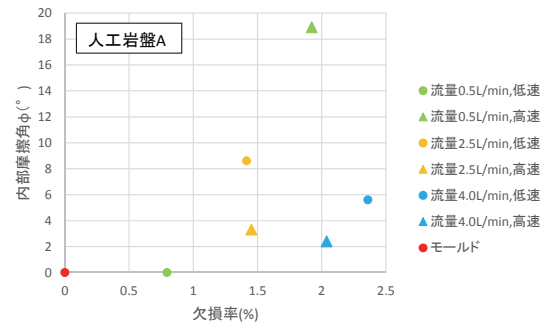
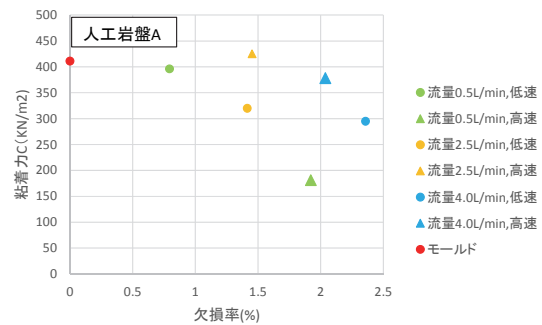
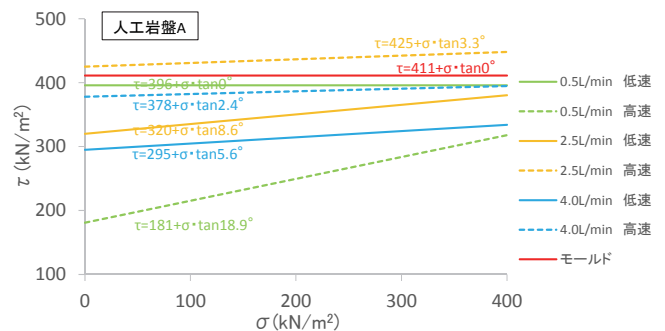
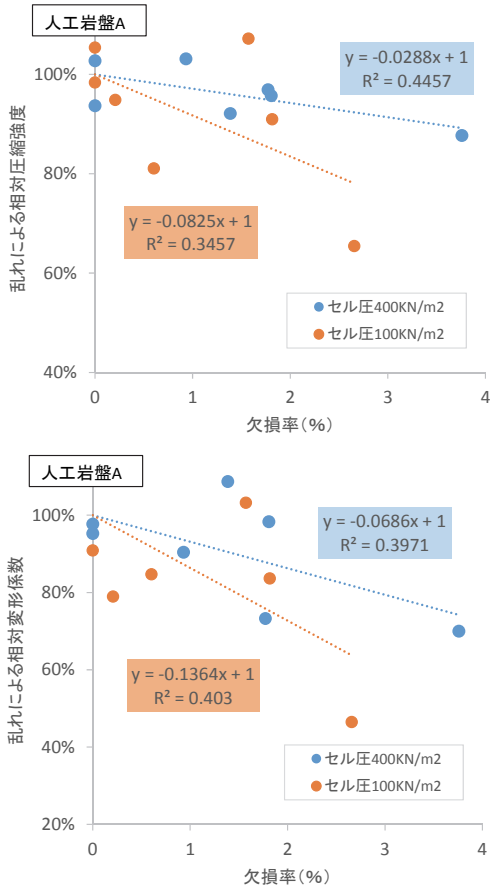


図-6 供試体の欠損率とせん断強度 (c, φ) の関係 (人工岩盤 A)

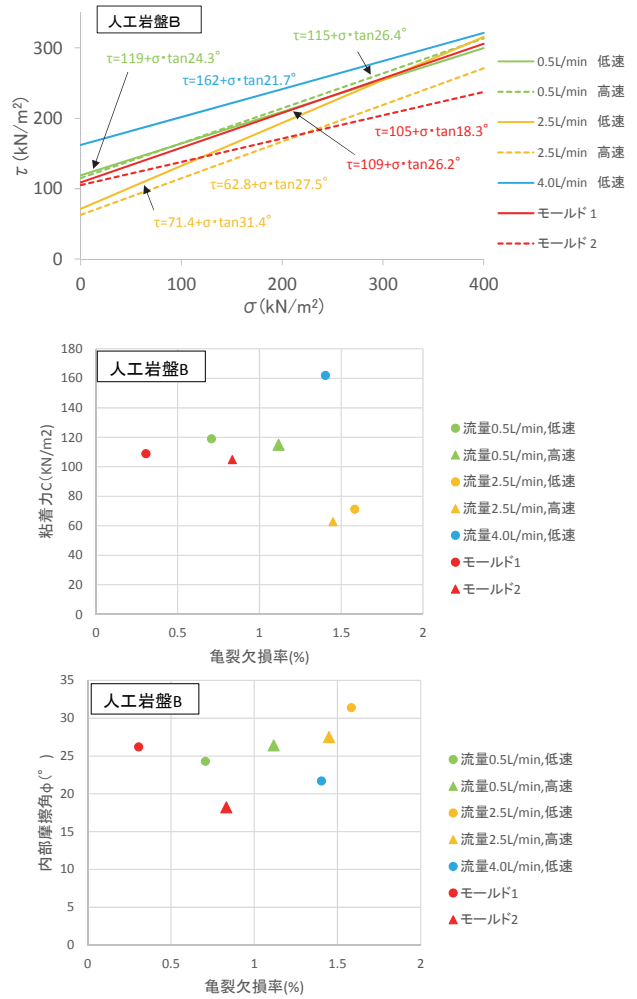


図一七 供試体の欠損率が強度特性に与える影響 (人工岩盤A)

れる。また、400kN/m<sup>2</sup>など高いセル圧条件の下では、強度の低下割合が小さくなっている。このセル圧の大きさによる強度低下傾向の違いが、欠損率の増加によって生じた粘着力Cの低下と内部摩擦角φの上昇の原因である。したがって、内部摩擦角φの上昇はあくまで見かけであり、セル圧の上昇に従い、ある段階で欠損のない状態の傾きに遷移する可能性が高い。そのため、試験を実施したセル圧を超えた外挿は過大な評価となる可能性が高いため、適用にあたっては注意が必要である。

### 3. 3. 2 人工岩盤 B (軽石模擬)

軽石を模擬した人工岩盤Bを削孔した試料における三軸圧縮試験結果より求めた、せん断強度および強度と亀裂欠損率との関係を図一八に示す。人工岩盤Bは多孔質かつ亀裂を含んでいることもあり、せん断強度は人工岩盤Aよりも低い傾向を示す。このうち、粘着力は特に低く、モールドで比較すると1/4程度である。一方、内部摩擦角は18°、26°であり人工岩盤Aに比べ高い傾向を示した。



図一八 供試体の亀裂欠損率とせん断強度 (c, φ) の関係 (人工岩盤B)

人工岩盤Bにおける亀裂欠損率とせん断強度の関係についてみると、大きな傾向として人工岩盤Aと同様に、亀裂欠損率が増加すると粘着力Cは減少し、内部摩擦角φは増加する傾向が見られたものの、あまり明瞭ではない。そこで、セル圧ごとに供試体の亀裂欠損率・亀裂率と圧縮強度の関係について人工岩盤Aと同様に分析すると、図一九に示すとおり亀裂欠損率と強度の関係については、特段の傾向が見いだせなかったが、亀裂率に関しては、その増加にともない圧縮強度が減少する傾向が見られ、特に低いセル圧下において顕著であった。この結果は、せん断強度の低下傾向と調和的であるとともに、人工岩盤Bの強度は、コア外周部の欠損よりコア内部の亀裂に依存することを示唆している。そのため、亀裂を有する脆弱層の強度評価にあたっては、欠損率だけでなく亀裂率にも着目して実施することが必要である。

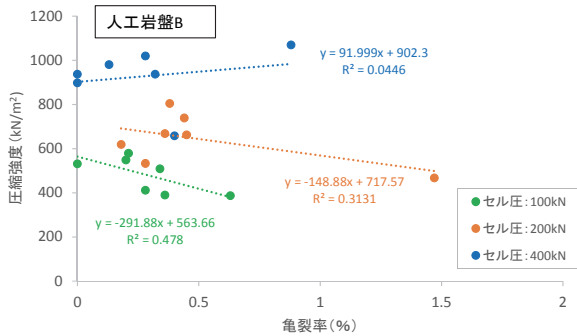
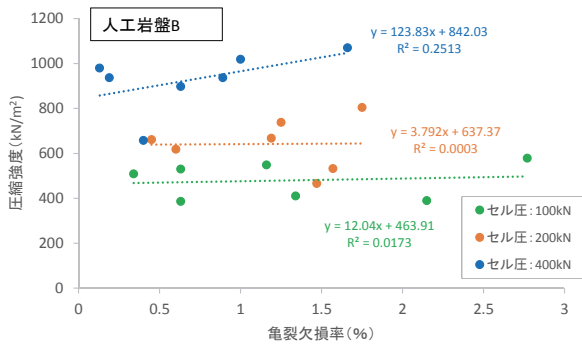


図-9 亀裂欠損率・亀裂率と圧縮強度の関係  
(人工岩盤 B)

#### 4. まとめ

本研究の成果を以下にまとめる。

- 1) これまで専門技術者の経験知によっていたボーリングコアの乱れ判定と物性評価への適用性について体系的に整理し、「コア乱れの定性的区分基準 (案)」を作成した。
- 2) X線 CT 撮影をコアに適用し、コアの削孔による乱れを欠損率や亀裂率という指標を用いて定量的に評価する手法を考案し、削孔方法とコアの乱れの関係について明らかにした。
- 3) 複数の模擬供試体に対し、乱れ指標を用いて、コアの乱れが強度低下にどの程度寄与するかを定量的に明らかにした上で、評価にあたっての留意点をとりまとめた。

# A STUDY ON GEOLOGICAL PROPERTIES EVALUATION USING HIGH-QUALITY DRILLED CORE

Research Period : FY2014-2016

Research Team : Geology and Geotechnical Engineering  
Research Group Geology Team

Author : SASAKI Yasuhito

ANAN Shuji

YAJIMA Yoshinori

MATSUO Tatsuya

## Abstract :

For evaluating appropriate strength of a weak layer using high quality drilled cores, we prepared two types of artificial rocks that imitated a weak layer, and we examined the effects of a core disturbance on the strength of a weak layer.

As a result, we could quantitatively express the core disturbance using “crack ratio” and “loss ratio” that was calculated from X-ray CT data. And we clarified the relation between a core disturbance and drilling conditions and also clarified the effects of a core disturbance on the strength. In addition we made the “Qualitative classification standard of drilled core disturbance (draft)” based on the observation of many cores that was drilled on infrastructure construction sites.

Key words : drilled core, weak layer, core disturbance, X-ray CT, triaxial compression test