

粘土材料を用いた人工軟岩の強度

Strength of Artificial Soft Rocks Using Clays

五味 信 治 (ごみ しんじ)

日産建設(株)技術研究所 主任研究員

岡本 將 昭 (おかもと まさあき)

日産建設(株)技術研究所 研究員

1. はじめに

岩盤用セミシールド (Rock Semi Shield) により軟岩掘削を行う場合、岩盤用セミシールドの面板に閉塞を生じる場合があったため、実機の約1/5の実験装置を制作し、軟岩の掘削特性を調べるための実験^{1),2)}を行うこととした。掘削実験を効率的に行うためには、均質な軟岩を用いることが必要となるが、均質な軟岩を採取することは困難である。そこで、人工的に軟岩を作成³⁾することとした (以下、人工軟岩と呼ぶ)。掘削実験に用いるためには、実際の軟岩と同様な物性値であることや短期間での強度発現等が条件となる。また、人工軟岩を均質なものとするため、粘土、珪砂、早強セメントおよび純水を用いた。人工軟岩を作成するにあたり、配合、作成方法および養生日数が違う場合を想定した。本報文では、液性・塑性限界試験、X線回折を用い水酸化生成物の検出および一軸と三軸圧縮試験の結果を用いて、人工軟岩の塑性指数、圧縮強度および作成方法について検討したので報告する。

2. 人工軟岩

2.1 配合

人工軟岩の材料は、粘土I (カオリナイト系) および粘土II (ベントナイト系)、珪砂 (7号)、固化材 (早強セメント) および水 (純水) を用いた。ここで、2種類の粘土を用いるのは、人工軟岩の物性のうち塑性指数を変化させるためであり、配合の違いが人工軟岩の強度に及ぼす影響を調べるためである。

基本配合は質量比で、粘土:珪砂:早強セメント:水を58:10:8:24とした。粘土の質量比58を粘土I:粘土IIの比率25:33, 15:43, 5:53および0:58の4種類 (以下、配合A, B, CおよびDと呼ぶ) とした。また、参考として、珪砂の比率を20%, 30%, 50% および粘土Iの比率を36.8%の場合 (以下、配合a, b, cおよびdと呼ぶ) も実施した。配合を表-1に示す。

2.2 作成方法

(1) 掘削実験用供試体

配合の違いが人工軟岩の強度に及ぼす影響を調べるための試験体の作成は、大型のモールド $D280\text{mm} \times L250\text{mm}$ に混合した試料を充填し、軸応力 5N/mm^2 で静的に載荷し、載荷時間は60分とした。ここで、 5N/mm^2 という急激な昇圧および降圧が衝撃荷重となること、セ

表-1 人工軟岩の配合

配合	粘土I	粘土II	珪砂	早強セメント	水(純水)
A	25.0	33.0	10.0	8.0	24.0
B	15.0	43.0	10.0	8.0	24.0
C	5.0	53.0	10.0	8.0	24.0
D	0.0	58.0	10.0	8.0	24.0
a	22.2	29.4	20.0	7.1	21.3
b	19.4	25.7	30.0	6.2	18.7
c	13.8	18.2	50.0	4.5	13.5
d	36.8	16.6	9.2	7.4	30.0

質量比

メントが反応し固化を始める時間を混練り後2時間と仮定し、 $0 \sim 5\text{N/mm}^2$ の昇圧を10分とし、 $5 \sim 0\text{N/mm}^2$ の降圧を20分とし、昇圧、載荷、降圧を合わせて90分とした。養生は、湿潤養生で3日間とした。

塑性指数の確認のため、養生終了後の試験体から採取した人工軟岩を炉乾燥し、粉碎して $425\mu\text{m}$ のふるい通過分をさらに粉碎した後 $75\mu\text{m}$ のふるい通過分を試料とし、液性・塑性限界試験を行った。試験値より求めた塑性指数を表-2に示す。

表-2 人工軟岩の塑性指数

配合	塑性指数%
A	29.1
B	26.5
C	22.9
D	22.4
a	29.1
b	29.1
c	29.1
d	41.8

(2) 圧縮強度試験用供試体

作成方法の違いが人工軟岩の強度に及ぼす影響を調べるため、前述の配合Aのみとし、小型のモールド $D150\text{mm} \times L150\text{mm}$ に混合した試料を充填した。載荷方法は、軸応力 5N/mm^2 、載荷時間30分の静的載荷、2種類の動的載荷は静的載荷と同様に 5N/mm^2 を中心にして載荷した。2種類の動的載荷は、サインカーブ載荷および台形波載荷で $5 \sim 7.5 \sim 2.5 \sim 5\text{N/mm}^2$ をそれぞれサイクルタイム30秒で60回 (30分) とした。ただし、台形波載荷は、 $5 \sim 7.5\text{N/mm}^2$ を5秒、 7.5N/mm^2 を5

事例報告

秒, 7.5~5 N/mm² を 5 秒, 5~2.5 N/mm² を 5 秒, 2.5 N/mm² を 5 秒, 2.5~5 N/mm² を 5 秒とした。ここで, 静的載荷と動的載荷のエネルギーを軸応力×時間と考えいずれの場合も等しくした。また, 昇圧, 降圧は上述と同様とした。ここで, 静的, サインカーブおよび台形波載荷としたのは, それぞれプレロード, 転圧および衝撃締固めを想定したためである。

養生は, 湿潤養生で 3 日間とした。また, 養生日数の比較のため, 静的載荷についてのみ 7 日間の養生も行った。作成条件を表-3 に示す。

表-3 人工軟岩の作成条件

モールド(mm)	配合	載荷	湿潤養生
280 (掘削用)	A, B, C, D a, b, c, d	静的	3日
150 (試験用)	A	静的	3日, 7日
	A	サインカーブ	3日
	A	台形波	3日

3. 圧縮強度試験

3.1 試験方法

配合の違いが人工軟岩の強度に及ぼす影響を調べるための供試体は, 2.1の大型のモールドで作成した配合 A, B, C, D, a, b, c および d の試験体からコアドリルにより採取し, マイターボックスおよびストレートエッジを用い, 一軸圧縮強度試験用は, D35 mm×L70 mm に整形した。ただし, 配合 d は, D50 mm×L120 mm のアルミ管を挿入して採取し整形した。三軸圧縮強度試験は UU 試験とし, 供試体は配合 A および B はアルミ管, 配合 C および D はコアドリルにより採取し, D50 mm×L100 mm に整形した。三軸圧縮強度試験の側圧は一軸圧縮強度試験で得られた値の1/2を基に上下させた。

作成方法の違いが人工軟岩の強度に及ぼす影響を調べる供試体は, 2.の小型のモールドで作成した配合 A の試験体からアルミ管により採取した。一軸圧縮試験用の供試体は, D35 mm×L70 mm, D50 mm×L100 mm の 2 種類とした。三軸圧縮試験は UU 試験とし, 供試体は一軸圧縮試験用の D50 mm×L100 mm と同様な方法で整形した。三軸圧縮強度試験の側圧は, 1, 1.5, 3 MPa の 3 とおりとした。

養生日数の比較用の供試体についても, D50 mm×L100 mm に整形し, 一軸圧縮強度試験と三軸圧縮強度試験 (UU 試験) を行った。三軸圧縮強度試験の側圧は上記と同様に 3 とおりとした。

3.2 試験結果

配合の違いが人工軟岩の圧縮強度に及ぼす影響は, 粘土全体の割合が同一であっても, 粘土 I と粘土 II の比率を変化させる (種類の違う粘土を用いる) と強度が異なることがわかった。ここで, 粘土 I に着目すると, 粘土 I の割合が増加すると, 強度が低下することがわかった。粘土 I の割合と一軸圧縮強度の関係を図-1 に, また塑

性指数と一軸圧縮強度の関係を図-2 に示す。

作成方法の違いが人工軟岩の圧縮強度に及ぼす影響は, 配合 A の場合のみ実験した。異なる 3 とおりの載荷方法 (静的, サインカーブおよび台形波) の中でサインカーブ載荷で作成した人工軟岩の一軸圧縮強度が大きくなることがわかった。載荷方法と一軸圧縮強度の関係を図-3 に示す。これらの載荷により作成した人工軟岩の湿潤密度を比較すると, 台形波で作成した供試体が最も大きく, 締固めには有効であることがわかった。ただし, 湿潤密度が大きいかかわらず, 一軸圧縮強度の増加はなく, 逆に低下していると推測される。

養生日数の比較については, 3 日と 7 日養生で強度の比較をしたが, 当然のことながら 7 日養生の場合の方が

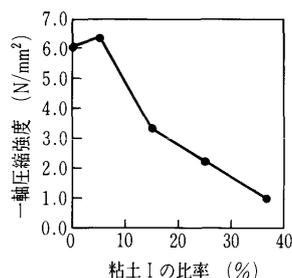


図-1 粘土 I の比率と一軸圧縮強度の関係

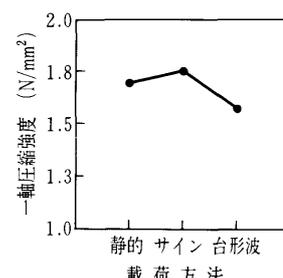


図-3 載荷方法と一軸圧縮強度の関係

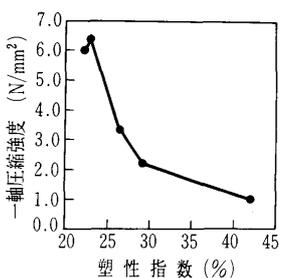


図-2 塑性指数と一軸圧縮強度の関係

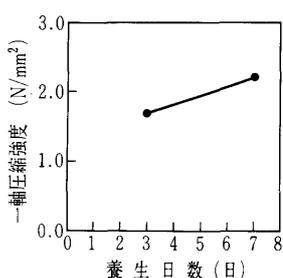


図-4 養生日数と一軸圧縮強度の関係

表-4 人工軟岩の一軸, 三軸圧縮強度および湿潤密度

配合	載荷	養生日数	一軸圧縮強度 N/mm ²	三軸圧縮強度		湿潤密度 g/cm ³
				c N/mm ²	φ 度	
A(掘削用)	静的	3	2.21	1.11	5.0	1.91
			1.69	1.03	9.8	1.87
A(試験用)	サイン 台形波	7	2.20	1.31	11.4	1.88
			1.75	1.22	9.9	1.88
			1.57	0.95	7.6	1.92
B(掘削用)	静的	3	3.32	1.42	3.6	1.91
C(掘削用)			6.31	3.79	13.2	2.04
D(掘削用)			6.05	3.77	11.8	2.08
a(掘削用)			2.16	-----	-----	-----
b(掘削用)			3.25	-----	-----	-----
c(掘削用)			2.90	-----	-----	-----
d(掘削用)			1.00	-----	-----	-----

ただし, 表中の試験用および配合 d の一軸圧縮試験用供試体は D50 mm×L100 mm, ほかの一軸圧縮試験用供試体は D35 mm×L70 mm とした。また, 三軸圧縮強度試験は UU 試験とし, 供試体は D50 mm×L100 mm とした。

表-5 人工軟岩と泥岩（土丹）の一軸圧縮強度

試料名	一軸圧縮強度 N/mm ²
人工軟岩	2.21~6.05
土丹(新杉田)	1.99

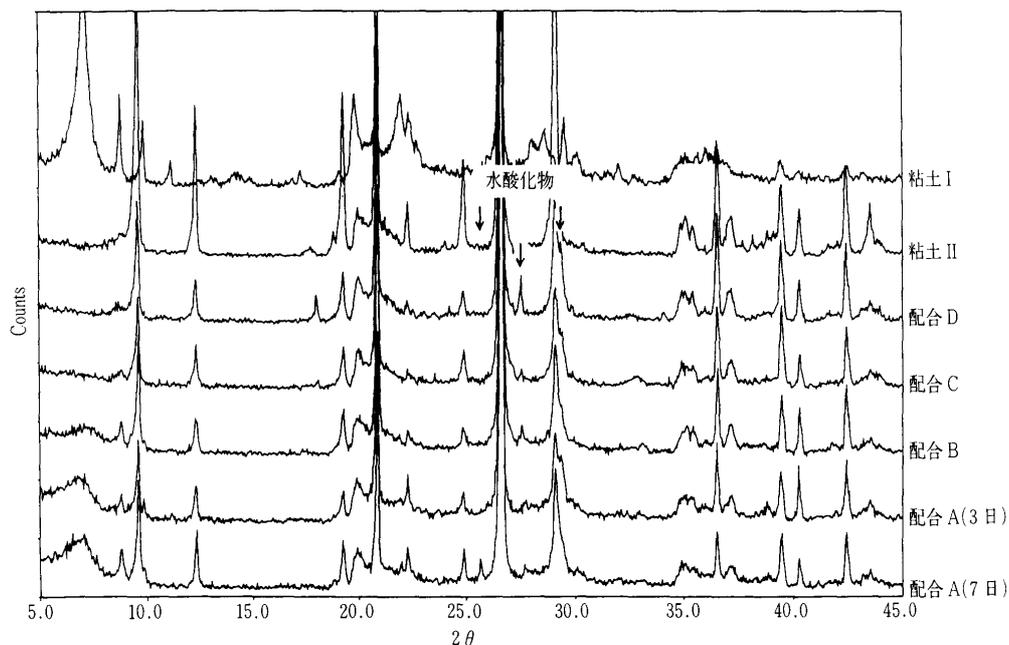


図-5 X線回折のパターン

約2割程度強度上昇が見られた。一軸、三軸圧縮強度を表-4に、また養生日数と一軸圧縮強度の関係を図-4に示す。

以上のことから、人工軟岩の作成については、いずれの場合も強度的には軟岩（泥岩）の一般的な範囲である1~20 N/mm²の間で作成することが可能であることがわかった。表-5に人工軟岩、土丹の1例および一般の軟岩の強度を示す。

4. X線回折

4.1 実験方法

人工軟岩中での水酸化物の生成を確認するため、X線回折を行った。試料は、2.の静的載荷で作成した配合A, B, CおよびDの4種類の試験体より、人工軟岩を採取し、炉乾燥後粉碎し、425 μ mのふるい通過分をさらに粉碎し試料として実験に供した。粘土Iおよび粘土IIもX線回折の実験を行った。

また、養生日数の違う試料についても上記と同様に実験を行った。X線回折の実験は、 $\theta \cdot 2\theta$ 、ステップ法で行い、回折角 2θ の計測範囲は3°~83°とした。

4.2 実験結果

配合の違う試料は、粘土Iの比率が多くなるに従って、水酸化生成物の発生が減少している。このことは、セメントの強度発現が、粘土Iによって影響を受け、人工軟岩の強度にも反映していると考えられる。しかし、セメントの量が少ないこと、養生期間が短いことから、水酸化物の生成量も極めて少量であった。このため、水酸化物の生成量と強度の関係までは求めることができなかった。この件についてはさらに実験を行う予定にしている。

養生日数の違う試料は、日数が3日と7日を比較すると養生日数の長い7日の方が水酸化生成物が多く、それに伴い人工軟岩の強度も上昇していると考えられる。配合A, B, C, D, 粘土I, IIおよび養生7日の配合A

の回折パターンを図-5に示す。

5. おわりに

実験用に人工軟岩を作成することとした。その際に、作成する人工軟岩の性質のうち、特に圧縮強度に着目し強度を調べた。人工軟岩は、配合の違う場合、作成方法が違う場合および養生日数が違う場合で作成した。実験に用いた人工軟岩の圧縮強度試験およびX線回折の結果より得られたことは以下のとおりである。

- (1) 配合による強度の違いは、粘性の大きい粘土Iにより水酸化物の生成が阻害され、強度低下を招くことがわかった。
- (2) 作成方法が違う場合を比較すると、サインカーブ載荷で作成した人工軟岩の圧縮強度が大きくなることがわかった。
- (3) 養生日数（3日、7日）については、養生日数の長い7日の方が水酸化生成物が多く、それに伴い人工軟岩の圧縮強度が大きくなることがわかった。
- (4) 本実験の人工軟岩の作成方法であれば、圧縮強度に関しては軟岩（泥岩）の範囲で作成できることがわかった。

参考文献

- 1) 五味・森ほか：軟岩掘進における岩盤セミシールドの閉塞予測に関する研究（その1）、土木学会第50回年次学術講演会概要集III, pp. 1296~1297, 1995.
- 2) 五味・森ほか：軟岩掘進における岩盤セミシールドの閉塞予測に関する研究（その2）、土木学会第50回年次学術講演会概要集III, pp. 1298~1299, 1995.
- 3) 五味・岡本：岩盤セミシールドの実験に用いた人工軟岩の強度について、土木学会第50回年次学術講演会概要集III, pp. 1480~1481, 1995.

(原稿受理 1995.9.4)