

(52) 人工軟岩の作製法

(財)電力中央研究所 正会員 ○ 谷 和夫
同 上 吉田保夫

Preparation of Artificial Soft Rock

Kazuo TANI, CRIEPI
Yasuo YOSHIDA, ditto

Abstract

An artificial soft rock was developed as a model material which could be readily prepared in the laboratories to study mechanical behavior of soft rock grounds. Consolidation of fresh mortar, mixture of soil, cement and water, is followed by the subsequent development of cementation between densely packed particales ; thus simulates diagenesis effect of natural sedimentary soft rocks. This material was found to be homogeneous, and could be reliably and simply reproduced with a range of properties which were similar to the typical soft rocks. This report describes some results of experimental works conducted to study the mechanical characteristics of this artificial soft rock.

1. はじめに

軟岩を研究対象とした室内模型実験において、自然軟岩を供試体として利用すると、その均質性や再現性、さらに供試体が多い場合には、その取り扱いが極めて困難になる等の問題が生じる。そこで筆者らは、砂や粘土に水とセメントを混ぜたモルタルを、十分に圧密した後に水中養生する方法を試みている。このようにして作製された人工軟岩は、自重圧密後の長期間にわたる続成作用（二次圧密、セメンテーション等）を伴う自然堆積軟岩の生成過程を、比較的うまくシミュレーションしていると考えられ、今回は、その圧密およびせん断特性等を検討するために実施している各種試験結果の一部を報告する。

セメントや生石灰あるいは石膏といった硬化剤を土質材料と混ぜた材料は、従来より種々の工学上の目的の下で幅広く利用されてきた。例えば、軟弱地盤をセメントスラリー等により改良する深層混合処理工法や、ソイルセメント工法に関する研究は古くから盛んである^{1,2)}。また最近では、人工島の築堤材料あるいは大型構造物の基礎岩盤の置換材料として用いる人工軟岩の力学的特性や長期安定性に関する綿密な検討を行った研究があげられる^{3,4)}。しかし、これらで対象となる人工材料は、その本来の使用目的に基づく所定の条件（例えば強度、剛性、施工性、経済性）のみを満足するか否かが検討されて開発されたものであるため、その配合、調整方法が必ずしも模型実験に用いる自然軟岩の代替材料として適切ではない。

軟岩地盤の力学的挙動を室内で作製した模型地盤により検討する場合、その人工軟岩は少なくとも次の2条件を満足しなければならない。

- (1) 圧密・せん断・透水等に関する力学的特性が、一般的な自然軟岩を模擬している。
- (2) 所定の大きさ・形状の供試体として、安定的かつ経済的に作製できる。

2. 人工軟岩の作製法

完全排水あるいは非排水とほぼ見做せる条件下における模型地盤の力学挙動を調べるため、透水性の著しく異なる2種類の人工軟岩を作製した。多少透水性のある砂質軟岩を模擬した人工軟岩（配合S1～S3）として、利根川砂（ $G_s=2.701$, $U_c=2.58$, $D_{50}=0.59\text{mm}$ ）に、材料分離を防止するために生田木節粘土（ $G_s=2.657$ ）を若干混ぜたものを土質材料（砂・粘土比S/C $\ell=9.63\sim9.72$ ）として用いた。また、極めて透水性の低い均質な泥質軟岩を模擬する人工軟岩（配合M1～M3）の土質材料としては、カオリンT A（関東ベントナイト鉱業、 $G_s=2.712$, $D_{50}=0.005\text{mm}$ ）を用いた。これに早強セメント（大日本セメント）と水道水を加えて、表1に示す6種の配合とした。ただし、砂の重量は含水比 $\omega=1.0\%$ の状態にて測定した。

十分練り混ぜたモルタルを真鍮円筒（内径51.3mm）に投入し、バイブレーターにより5層に分けて締固めた後、フィルターを介して排水用の細孔を多数有するピストンにより段階的に圧密させた。最終圧密圧力 p^* は各配合とも3.1, 6.1, 12.2MPaの3種類とし、配合S3については圧密しない供試体（ $p^*=0\text{MPa}$ ）も試みた。配合S1～S3は、各段階の圧密は1分以内に終了し、圧密開始後約40分で p^* に到達させ、最終圧密圧力 p^* の下で5～6時間圧密した後脱型して水中養生した。一方、配合M1～M3は、各載荷段階の圧密に10～20分間を要し、圧密開始後2～3時間で p^* に到達させた後3日間そのまま圧密し、十分セメンテーションを発達させた後に脱型、水中養生させた。

細粒分を多く含むモルタルを圧密させて軟質泥岩を模擬した人工軟岩を作製する場合、土質材料の選択と圧密方法に関して次の2点が重要である。まず第1に、圧密の進行に伴って、それ以前にセメンテーションによって形成された構造を次々と破壊していくことのないように、最終圧密圧力 p^* での一次圧密をセメンテーションが進行する前に終了させなければならない。第2に、脱型後の水中養生中に吸水膨張して供試体にクラックが発生しないように、モンモリロナイト、クライト等の膨潤性粘土鉱物の含有量が少ない土質材料を用い、最終圧密圧力下で十分セメンテーションを進行させなければならない。本研究の場合、セメント含有率 a_w が低く、圧密応力 p^* が高い場合（配合M3（ $a_w=0.043$ ）, $p^*=12.2\text{MPa}$ ）には、水中養生開始後数時間でクラックが発生することがあり、3日以

上圧密する必要があったであろう。

各配合、圧密圧力 p^* に対する単位体積重量 γ_t と含水比 ω の平均値を表2に示す。各配合とも圧密圧力 p^* と共に単位体積重量 γ_t が増加し、含水比 ω が減少している。特に、人工泥質軟岩（配合M1～M3）にその傾向が著しく、モルタルを圧密せずにそのまま養生した人工軟岩の場合、圧縮性が極めて大きくなることが予想される。従って、代表的な自然軟岩に近いダイレイタンスー特性を持つ人工軟岩をモルタルで作製するには、圧密して密な粒子構造を造る必要があることがうかがわれる。

3. 一軸圧縮試験の結果

本研究では早期に安定的な供試体を得るために、硬化剤として早強セメントを用いている。作製された人工軟岩の強度・変形特性が、材令と共にどのように変化するかを一軸圧縮試験により検討した。供試体は直径d

表1 : 配合（セメント含有率 $a_w=C/(S+C\ell)$ 、水セメント比 W/C ）

配合名		S1	S2	S3	M1	M2	M3
重量比 (%)	砂 (S)	67.1	69.3	71.4	0.0	0.0	0.0
	粘土 (C ℓ)	6.9	7.1	7.4	55.3	59.0	59.3
	セメント (C)	9.2	6.3	3.4	9.6	5.1	2.6
	水 (W)	16.8	17.3	17.8	35.1	35.9	38.1
a_w		0.124	0.082	0.043	0.174	0.087	0.043
W/C		1.83	2.75	5.24	3.65	6.99	14.77

表2 : 単位体積重量 γ_t と含水比 ω

	p^* (MPa)	S1	S2	S3	M1	M2	M3
γ_t (kN/m 3)	0.0	—	—	19.20	—	—	—
	3.1	21.00	20.87	20.57	19.43	18.98	18.92
	6.1	21.36	21.15	20.79	19.97	19.32	19.23
	12.2	21.72	21.43	21.52	20.66	20.06	20.07
ω (%)	0.0	—	—	22.29	—	—	—
	3.1	13.96	15.60	17.19	26.17	30.56	30.14
	6.1	13.34	14.80	16.36	23.24	26.85	28.13
	12.2	12.65	13.38	14.73	19.33	22.74	22.93

=51.3mm、高さ $h=100\sim110$ mmで、端面摩擦除去は施さず、軸変位速度は $0.176\text{mm}/\text{min}$ である。圧密をしない場合 ($p^*=0$ MPa)、供試体内に鉛直方向のクラックが複数発生するが、圧密した場合 ($p^*>0$ MPa) は、全てすべり面が発達してせん断破壊した。

人工砂質軟岩 (配合S1) の一軸圧縮強度 q_u と破壊時の軸ひずみ ε_{ax} 、および人工泥質軟岩 (配合M1) の一軸圧縮強度 q_u の材令に対する変化を図1～3に示す。ただし、 ε_{ax} はキャップとペDESTALの相対変位から計算したためベッディング・エラーを含んでいる。人工泥質軟岩の q_u はばらつきがあるものの材令に伴ってほとんど変化しない (図3) が、人工砂質軟岩の q_u は2週目まで増加した後安定化する (図1)。また、 ε_{ax} は圧密圧力 p^* 、材令によらずほぼ一定値0.7%であった (図2)。

各配合 (セメント含有率 a_w)、圧密圧力 p^* に対する q_u ～材令関係で、材令に対してほぼ一定となった2週以降に得られた一軸圧縮強度 q_u の平均値 q_u^* をプロットしたのが図4、5である。セメント含有率 a_w と圧密圧力 p^* と共に一軸圧縮強度 q_u^* は増加することがわかる。

4. 定ひずみ速度圧密試験の結果

既存の三軸圧縮試験装置のセル内部を改良して、定ひずみ速度圧密試験を実施し、人工泥質軟岩 (配合M3, $a_w=0.043$) の圧密特性を検討した。本試験方法は、試験期間の短縮、制御・計測の自動化が可能で、高压領域までの圧密特性を調べる上で非常に実用的である^{5,6)}。3日以上デシケータ内で脱気した後成形し、内径50.0mm、高さ20.0mmの圧密リングごとさらに24時間脱気する。背圧を0.1 MPa作用させ、上面を排水境界、下面を非排水境界とする片面排水条件下で、ひずみ速度 $0.005\text{mm}/\text{min}$ ($\approx 0.025\%/ \text{min}$) で連続的に圧密载荷した。

供試体作製時の圧密圧力 $p^*=3.1, 6.1, 12.2$ MPaの3種類の試料に対し、養生日数8週以降に実施した圧密試験により得られた圧密曲線 ($e\sim\log p'$ 関係) を図6に示す。 $p^*=12.2$ MPaの試料に対しては装置の载荷能力の関係で正規圧密領域 ($e\sim\log p'$ 関係の直線部分) が短かいが、図6より求められた圧密降伏応力 p_c' 、圧縮指数 C_c を一軸圧縮強度 q_u^* と共に表3に示す。 q_u^* の数倍のオーダーの p_c' を有し、代表的な自然堆積軟岩と類似した形状の圧密曲線であることから、人工軟岩の圧密特性は模擬材料としてほぼ満足のいくものであると思われる。 C_c は p^* と共に減少する傾向がある。

地質年代的に若い土質材料 (粘土) の場合、先行圧密圧力 p^* と圧密降伏応力 p_c' のオーダーは同じであると考えられ、自然泥質軟岩の場合、さらに続成作用の影響により、 p_c' の方が p^* より一般的に大きいことが考えられる。しかし、本研究で用いた人工軟岩の場合、 p^* が大きくなる程この傾向がみられなくなった。これは、供試体作製時の圧密期間中 (3日間) に硬化剤 (早強セメント) によるセメンテーションが終了せず、除荷・脱型後の水中養生により、吸水膨張後もセメンテーションが進行したためと思われる。また、自然軟岩における続成作用の主要なファクターである二次圧密・こう結作用のうち、後者のみをセメントによりシミュレーションしていることに留意しなければならない。

図7に透水係数 k と圧密圧力 p' の関係を示す。 $\log k\sim\log p'$ 関係が傾きが急変する圧力 p' が圧密降伏応力 p_c' 付近であり、この点に関しても自然の地盤材料と類似した人工軟岩であることがわかる。また、人工泥質軟岩の透水係数は $10^{-10}\sim10^{-7}$ (cm/sec) オーダーであり、極めて難透水性であると考えられる。

5. あとがき

土質材料にセメントを混ぜ、圧密して模型実験用の人工軟岩を作る試みは Johnston 等⁷⁾によっても試みられており、本研究では今後、三軸試験等も実施し、せん断特性についても検討する予定である。実験の一部を実施していただいた舘川知巳 (元 (株) CRS)、笹田麻純 (東海大学生) 両氏に感謝します。

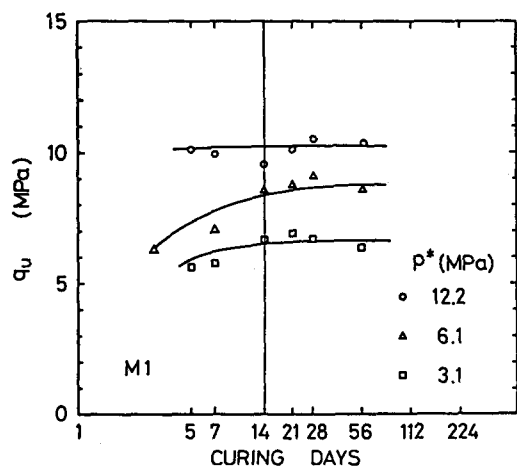
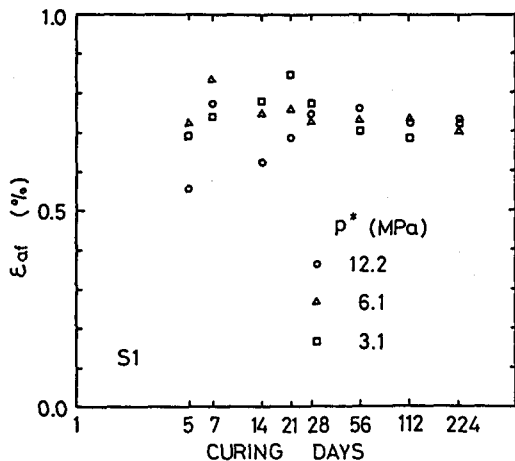
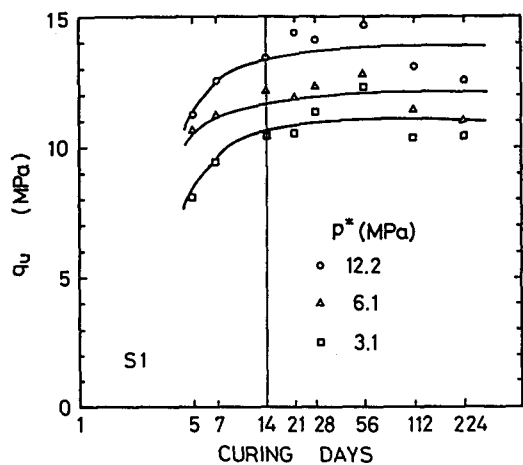


図1 (左上) : 配合S1の q_u ~ 材令関係

図2 (右上) : 配合S1の ϵ_{ax} ~ 材令関係

図3 (左) : 配合M1の q_u ~ 材令関係

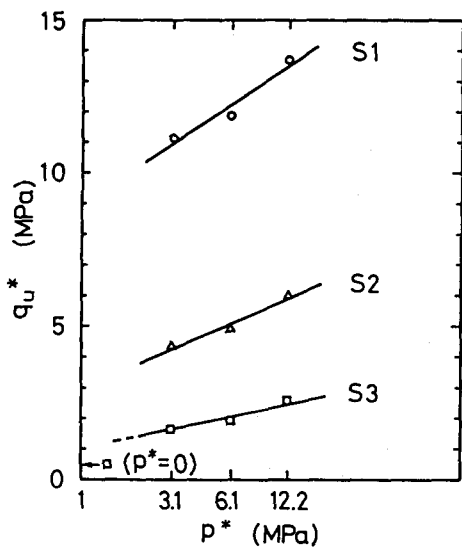


図4 : 砂質軟岩の $q_u^* \sim p^*$ 関係

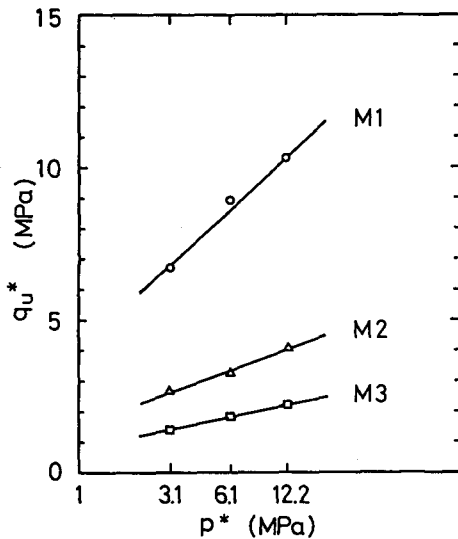


図5 : 泥質軟岩の $q_u^* \sim p^*$ 関係

参考文献

- 1) 小林 晃、龍岡文夫 (1982) “セメント混合により改良した飽和軟弱粘性土の強度変形特性Ⅰ～Ⅶ,” 生産研究, 34巻, 7～12号.
- 2) 例えば “特集 ソイルセメント工法,” 基礎工 (1984), Vol.12, No.11.
- 3) 金 有性 (1989) “三軸圧縮試験によるセメント改良砂質土の変形強度特性,” 東京大学修士論文
- 4) 岸 清、百瀬和夫 (1991) “人工軟岩材料の開発,” 土木施工, Vol.32, No.3, pp.79-85.
- 5) 川崎 了、西 好一、藤原義一、池見元宜 (1992) “関東近郊における深部堆積地盤の物理的・力学的特性,” 電力中央研究所報告 (準備中).
- 6) 定ひずみ速度圧密試験委員会 (1988) “定ひずみ速度圧密試験について,” 特殊圧密試験に関するシンポジウム, 土質工学会編, pp.27-46.
- 7) Johnston, I.W. and Choi, S.K. (1986) “A synthetic soft rock for laboratory model studies,” Geotechnique, Vol.36, No.2, pp.251-263.

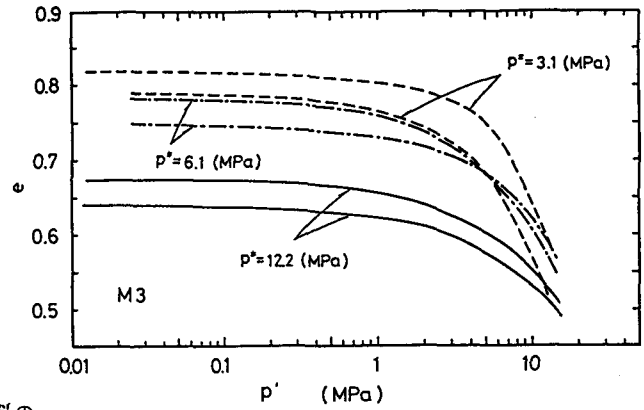


図6：配合M3の $e \sim \log p'$ 関係

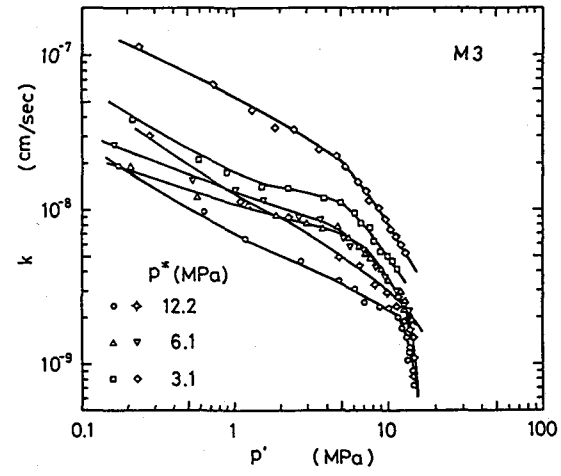


図7：配合M3の $\log k \sim \log p'$ 関係

表3：圧密降伏応力 $p_{c'}$ と圧縮指数 C_c (配合：M3)

p^* (MPa)	3.1		6.1		12.2	
q_{u^*} (MPa)	1.6		1.9		2.2	
$p_{c'}$ (MPa)	6.8	6.2	9.3	9.6	11.5	12.5
C_c	0.53	0.46	0.46	0.41	0.32	0.26