

**投稿論文(和文)  
PAPERS**

# 人工軟岩の長期安定性に関する実験的研究

栗原宏武\*・菊地宏吉\*\*・深沢栄造\*\*\*

土と水と固化材からなる人工軟岩の耐久性に関する実験研究を行った。人工軟岩は第三紀の自然軟岩とほぼ同等の物性を再現できることとともに、その物性は長期的に安定していること、さらには地下水の水質等に起因する物理、化学作用に対しても高い抵抗性を有していることが確認できた。また、現場実験にて、施工性及び長期に亘る追跡調査を行い、長期安定性を検証でき、十分、実用に供し得ることが明らかとなった。

**Key Words:** *artificial soft rock, durability, ettringite, laboratory test, field experiment*

## 1. はじめに

土と水とセメント系固化材とを混合し、プラスチックな状態で種々の目的に活用するプラスチックソイルセメント技術は我が国の国土事情と相俟って飛躍的に発展した技術の一つであり、現在では、化学的安定処理技術として地盤改良分野で主流ともなりつつある技術である。

筆者等も1970年頃から、その実用化研究に着手し、特に多量の水を含んだ土の安定処理には固化材として、アルミナ ( $Al_2O_3$ )、石灰 ( $Ca(OH)_2$ )、石膏 ( $CaSO_4$ ) および水の反応生成物であるエトリンガイト (Ettringite) の生成を活用するのが有効であることを提案するとともに、それを応用した施工技術の開発を図ってきた<sup>1)-4)</sup>。エトリンガイトは、その組成式 ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) から分かる様に、多量の水を結晶水として固定する能力があり、またこのエトリンガイトを土粒子間に生成させれば固化機能も期待しうるものである。また、エトリンガイト生成材とセメントクリンカーとの共存も効果的で、相乗効果も期待できる等の特性を有するものである。

このエトリンガイトに関しては、1890年代に Candlot がコンクリート製海洋構造物の破壊起因物として発見以来セメント化学分野では多くの研究がなされ、既にポルトランドセメントの偽凝結防止、膨張セメントの主成分の一つとしてあるいは耐海水セメント等へ積極的に活用されている<sup>5)</sup>。

土質安定処理分野で、その有効性を最初に見いだしたのは、近藤 (1960)<sup>6)</sup>、有泉 (1961)<sup>7), 8)</sup> 等の研究で、その後、エトリンガイトの生成と固化のメカニズムに関する

枷場、川村等の一連の研究 (1978)<sup>9), 10)</sup>、エトリンガイトの形成と安定処理効果との相関に関する嘉門等の研究<sup>11)</sup>がある。さらに、この間セメントメーカーはエトリンガイトの生成を活用した土質安定処理用の新しい固化材の開発に力を注ぎ、各メーカーとも競って商品化を進めてきた<sup>12)</sup>。

筆者等は、このような背景と実績を踏まえて、さらにこの種の技術の高度化を図り、人工構築材としての人工軟岩造成技術の開発 (1983) へと発展させた<sup>13), 14)</sup>。即ち、我が国の橋梁、ダム、地下構造物あるいは原子力施設等の重要な構造物は第三紀～第四紀の軟岩層に直接支持されることが多い。しかし、対象軟岩層は必ずしも健全とは言えず、度々構造物と軟岩層との間に人工的置換材が必要となる。この人工置換材は設計上、周辺軟岩と同等の物性、特に、同等の剛性を有することが望ましいとされ、その開発が待たれていた。

これらのニーズに対応して、人工的に軟岩を再現する技術を開発したものである。

当技術は現地発生土を主体とした材料に、前述のエトリンガイトの生成とセメントクリンカーの水和反応を併用した固化材を通常のコンクリートと同様に混合して、製造する技術である。特に、混合後の性質については施工性を考慮して、締固め等を伴わない極めて流動性のよいものを対象とした。この種の人工軟岩の物性は、短期的には対象とする軟岩物性と近似させることは比較的容易であるが、その物性が長期的に変動しないか、また施工環境下における外的作用に対する抵抗性はどうか等、長期的な安定性あるいは外的作用に対する耐久性については未解明の点も多く残されている。

そこで、本研究では、人工軟岩の長期安定性あるいは耐久性に関する一連の室内試験および実規模での施工実験とその追跡調査を約10年に亘り実施し、その結果に長期安定性の観点から若干の考察を加えた。

\* 正会員 工修 鹿島 技術研究所 専門部長  
(〒182 調布市飛田給2-19-1)

\*\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部  
\*\*\* 正会員 鹿島 技術研究所 主管研究員

表一 長期安定性に関する試験項目と試験方法

安定性に対する影響要因	試験内容	試験方法	
		試験項目	試験方法
人工軟岩自身の長期安定性に対する確認	水和生成物の確認	・X線回折 ・走査型電子顕微鏡 ・化学分析	・生成物の同定 ・化学分析
	水和反応に伴う自己収縮・膨張	・自己収縮試験	・ $\phi 10\text{cm} \times h 20\text{cm}$ ・軸方向変化
	物理・力学特性の長期安定性	・一軸圧縮試験 ・X線回折 ・走査型電子顕微鏡	・ $\phi 5\text{cm} \times h 10\text{cm}$ ・静・三軸圧縮試験
気象作用に対する耐久性	凍結・融解に対する安定性	・凍結・融解試験	・強度・変形試験 ・供試体減量測定
	湿潤・乾燥繰返しに対する安定性	・湿潤・乾燥繰返し試験	・強度・変形試験 ・供試体減量測定
環境条件に起因する諸作用に対する耐久性	イオン交換水に対する安定性	・イオン交換水浸漬試験	・ $\phi 5\text{cm}, h 10\text{cm}$ 供試体 ・強度・見さ化成・重量 変化計測
	硫酸塩水に対する安定性	・10%硫酸ソーダ水浸漬試験	同上
	炭酸イオン水に対する安定性	・重炭酸ソーダ水浸漬試験	同上
物理的作用	上載荷重に対する転送し・クリープの安定性	・繰返し載荷クリープ試験	・ $\phi 5\text{cm}, h 10\text{cm}$ $P = 8\text{kg}/\text{cm}^2$ 繰返し 載荷、変形測定

表二 試験用試料の構成材料

粘 土	砂	固 化 材	水
・千葉県産、新潟県産、静岡県産の泥岩を湿式粉碎したもの	・砂分85～95%含有 ・千葉・山砂・砂丘砂 ・静岡・砂岩	・日本セメント製 ・ロックメイド ・高炉セメント系 ・固化材	・水道水
・シルト分以下80%含有			

## 2. 実験概要

### (1) 長期安定性試験の考え方

ソイルセメントを始めとする土と水と固化材とからなる人工構築材の長期安定性あるいは耐久性は実際の設計・施工上、重要な性質の一つと認識されてはいるが、未だ適切な試験法が確立されていない。

その為、この種の研究例も少ないので実情である。

そこで、人工構築材として人工軟岩の適用が考えられる橋梁基礎、地下構造物、発電所構造物等の施工環境を想定して、表一に示す様な人工軟岩の力学特性を初めてとする諸特性の長期安定性、施工環境に起因する外的作業に対する耐久性等を取上げ、それぞれの条件下に暴露した供試体の長期挙動を調査し、その結果に基づき、安定性あるいは耐久性について評価、検討することとした。

### (2) 使用材料

試験に供した試料は表二に示す粘土、砂、固化材、水である。砂及び粘土は千葉県産、新潟県産及び静岡県産のものであるが、特に、粘土は第三紀の泥岩をシルト分以下の細粒分含有量が80%以上となるよう湿式にて粉碎したものを使用した。

固化材はこれまでの実績と知見を踏まえ、普通ポルトランドセメント～高炉スラグ～石膏をブレンド粉碎したもので、エトリンガイトの生成を期待しつつ、セメントの水和反応をも併用するものである。その化学組成は表一に示す通りである。

表三 人工軟岩用固化材の化学成分

構成割合(%)	成 分 (%)									
	クリンカー	スラグ	石膏	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	その他
62	20	18	20.4	6.4	2.0	53.6	2.0	9.4	6.2	

表四 人工軟岩の目標物性

分類	物性値	記号 単位		目標値
		記号	単位	
固まる前の状態	テーブルフロー値	—	mm	190 ± 10
	ブリージング率	—	%	3 以下
固結後の状態	湿潤密度	p t	g / cm <sup>3</sup>	1.70 ~ 1.95
	一軸圧縮強さ	q u	kgf/cm <sup>2</sup>	10 ~ 60
	変形係数	E <sub>so</sub>	kgf/cm <sup>2</sup>	2,000 ~ 12,000
	ボアソン比	v	—	0.40 ~ 0.48
	超音波伝播速度	V <sub>p</sub>	m/sec	1,500 ~ 2,500
		V <sub>s</sub>	m/sec	400 ~ 900

### (3) 材料配合と基本物性

人工軟岩の物性は各地に分布する第三紀の軟岩の物性値を参考に、表一に示す目標値を設定した。また、製造直後の性質はポンプ圧送性、打設時の流動性等をセメントモルタル等の実績を踏まえ、テーブルフロー値で190±10 mm、ブリージング率3%以下として、表一に示す材料配合とした。

### (4) 実験方法

実験は室内試験と現場実験とに分け、図一に示す手順にて実施した。

室内試験では、所定の材料、配合条件の試料を強制練りモルタルミキサーで所定の時間、混合攪拌した後、フロー値、密度、ブリージング率等の測定とともに、各種の耐久性試験に供するため、 $\phi 5\text{cm}, h 10\text{cm}$ の鋼製モールドに流し込み供試体を作成した。供試体は恒温恒湿室（温度：20°C、湿度：100%）で3~5日養生した後、脱型し、引き続き所定の材令まで密封養生し、長期安定性あるいは耐久性試験に供した。

現場実験は、室内試験結果を踏まえ、構造物基礎が軟岩に着岩する工事の一部を利用して実施したもので、基礎フーチング下とフーチング周りを表一のNo.8の配合にて約3,500 m<sup>3</sup> (25×22×厚さ6.5 m) を施工し、経年的にその諸物性の追跡調査、試験を行ったものである。

なお、当該地域の平均外気温は冬季で-2°C、夏期で30°Cと大きな温度差のある地域で、施工は冬季に行った。

#### a) 人工軟岩の長期安定性に関する試験

人工軟岩の長期安定性に関する試験は、標準養生(20°C、湿度100%)条件で養生した供試体を所定の材令毎に、一軸圧縮強さ、静・動弾性係数、密度等を測定した後、X線回折(Cu K $\alpha$  Ni フィルター、30 Kv、40 mA、理学電気製)及び走査型電子顕微鏡にて、その微視的内部構造の変化を観察し、諸物性の長期的変動、或

表-5 供試体配合例

配合 No.	目標強度 (材令91日)	単位量 (kg/m³)			固結前の性状			強度 (kgf/cm²)		
		粘土	砂	固化材	水	チークフット 径 (mm)	密度 (t/m³)	ワーリング 率 (%)	28日	91日
①	kgf/cm² 10~30	195	1110	60	496	206	1.86	0.5	7.0	8.7
②		195	1095	90	491	203	1.87	0	17.6	21.0
③		190	1080	120	489	195	1.88	0.5	27.3	31.0
④		270	940	60	532	180	1.80	0	6.9	7.4
⑤		260	900	120	530	186	1.81	0	19.7	24.3
⑥		250	860	180	527	188	1.82	0	30.0	32.1
⑦	30~60	195	890	150	549	193	1.78	0	28.7	34.7
⑧		190	870	180	549	195	1.79	0	40.5	50.7
⑨		180	845	210	550	193	1.79	0	40.7	50.8
⑩		235	720	150	601	196	1.71	0	27.9	31.4
⑪		230	700	180	597	187	1.71	0	36.8	45.0
⑫		225	680	210	596	192	1.71	0	40.1	48.9

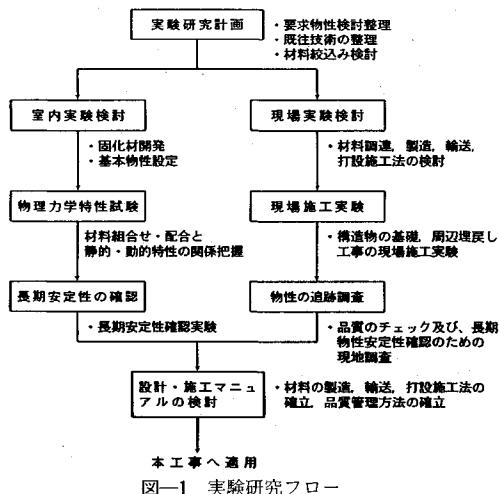


図-1 実験研究フロー

いは固化体中の水和生成物の安定性を追跡調査した。

#### b) 気象作用に対する耐久性に関する試験

気象作用に対する耐久性については、一般的にソイルセメントやコンクリート等で取上げられている凍結と融解の繰り返し作用と湿潤と乾燥の繰り返し作用に対する耐久性を取上げることとした。

試験方法については、道路公団の安定処理土に関する試験法<sup>15)</sup>に準拠することとした。

試験では、凍結・融解、湿潤・乾燥、それぞれの行程を1サイクルとして、所定のサイクル毎に、一軸圧縮強さを求め、その強度変化を調べ、耐久性を評価することとした。

#### c) 環境条件に起因する諸作用への耐久性に関する試験

人工軟岩が遭遇すると想定される施工環境に起因する諸作用としては、主に地下水の水質に起因する化学的作用及び周辺構造物から受ける物理的作用に大別できよう。そこで、先ず化学的作用に関しては、地下水の水質が純水に近く、人工軟岩から溶解成分が地下水へ溶出する条件を想定し、イオン交換水への浸漬試験を、また

地下水の溶存成分と人工軟岩中の成分が化学反応を起こす水質条件として、海水（最も劣化に関与すると思われる硫酸塩を取上げた）を、さらに気中、水中でも化学反応が予想される炭酸ガスあるいは炭酸塩との反応に対し、炭酸イオン水を取上げ、それへの浸漬試験を実施した。試験はそれぞれの溶液中に、供試体を浸漬し、所定の材令毎に取り出し、一軸圧縮強さ、静・動弾性係数、密度、含水比、形状変化観察、X線回折或いは電子顕微鏡観察等に供した。

また、物理的作用については人工軟岩が構造物基礎あるいはその周辺に施工されることを想定し、対象構造物から受ける荷重下での、クリープ挙動に着目し、その特性を調査した。

#### d) 現場施工供試体の長期安定性に関する追跡調査

現場実験にて打設した人工軟岩の3年、6年、8年経過時のボーリングコア供試体について追跡調査（一軸圧縮強さ、変形特性、密度等）の他、現位置での各種検層（弾性波、密度、地耐力等）を実施し、その安定性について調査した。

### 3. 実験結果

今回実施した一連の室内及び現場実験結果の一例を表-6に示した。

#### (1) 未だ固まらない状態での諸特性

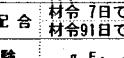
未だ固まらない状態での特性としては、施工性を表す指標の一つであるテーブルフロー値を取り上げ、その目標値を  $190 \pm 10 \text{ mm}$  としたが、室内試験、現場実験を通して得られたテーブルフロー値は個数  $n = 31$  について、平均値 189、標準偏差 5.8、変動係数 2.7 とばらつきの小さい、極めて安定したものを製造することができた。また、当該試料の実規模相当（打設総量  $30 \text{ m}^3$ 、打設速度  $0.55 \text{ m}^3/\text{分}$ ）での流動試験によれば、気中（外気温  $18^\circ\text{C}$ ）での流動勾配（垂直／水平） $1/20 \sim 1/30$ 、水中（水温  $13^\circ\text{C}$ ）での流動勾配  $1/7 \sim 1/10$  となり、特に、気中の流動勾配は極めて小さく、流動性のよいことが確認された。

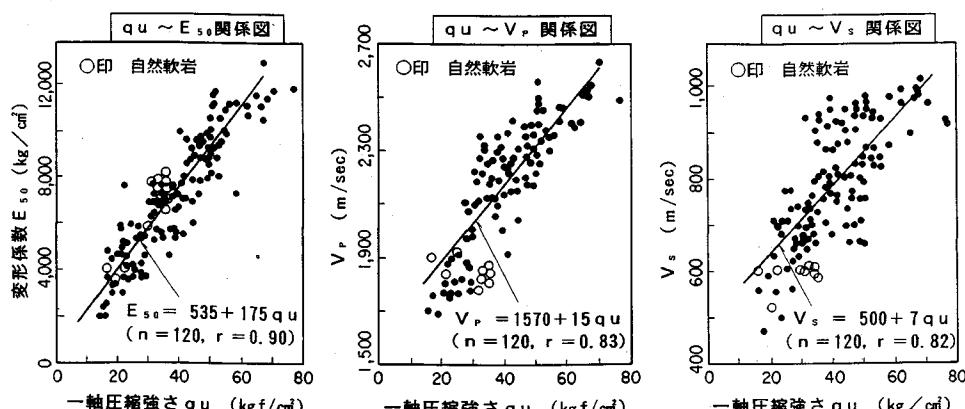
#### (2) 人工軟岩の諸特性

人工軟岩の物理・力学特性は表-6に示した。

試験結果によれば、いずれの物性とも、材令の経過とともにその変動は徐々に小さくなり、安定するといった傾向を呈し、この傾向から類推すると、当人工軟岩は長期的に安定していると言えよう。特に、一軸圧縮強さ ( $q_u$ ) と変形係数 ( $E_{50}$ )、弾性波速度 ( $V_p, V_s$ ) の関係については、自然軟岩の物性をも併記し、図-2に示した。これらの図からも、人工軟岩、自然軟岩とも強度特性と変形特性は相関性が高いことが分かる。一般に、人工軟岩を自然軟岩に近似させる際、強度特性ばかりでなく、変形特性も重要な要素となるが、強度特性 ( $q_u$ )、変形

表-6 室内試験・現場実験結果表

室内・現場		検討項目	試験・検討結果															
固まる前の性状		• 流動性：テーブルフロー値で 180 ~ 200mm を確保 • 材料分離抵抗性：ブリージング率 3% 以下																
室内試験	固結後の力学特性	配合 No.	配合	粘	砂	固	水	項目	7日	28日	91日	1年	2年	3年	4年	6年	10年	
		(2)	強度範囲	195	1095	90	491	$p_t \text{ t/m}^2$	1.86	1.87	1.87	1.87	—	1.87	—	1.86		
			10~30					$q_u \text{ kgf/cm}^2$	13.6	17.6	21.0	23.5	—	23.8	—	25.0		
		(1)						$E_{50} \text{ kgf/cm}^2$	2900	3480	4290	3700	—	4100	—	4050		
		(3)						$v$	—	0.46	0.46	0.46	—	0.45	—	0.44		
		(6)						$V_p \text{ m/s}$	—	1680	1750	1780	—	1830	—	1870		
			30~60					$V_s \text{ m/s}$	—	470	550	500	—	540	—	600		
		(7)						$q_u \text{ kgf/cm}^2$	17.3	27.3	31.0	32.6	—	33.3	—	34.0		
		(9)						$p_t \text{ t/m}^2$	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79		
		(11)						$q_u \text{ kgf/cm}^2$	25.6	40.5	50.7	57.5	62.0	63.5	63.0	63.6	64.2	
長期安定性	化学作用	イオン交換	⑦ 配合	材令28日供試体を蒸液水に浸漬。				$E_{50} \text{ kgf/cm}^2$	4400	6580	9380	11250	11700	12000	13000	13100	13400	
		硫酸	⑧ 配合	右欄は浸漬後の $q_u$ 値を示す。				$v$	—	0.42	0.43	0.45	0.43	0.45	0.42	0.44	0.42	
		ヨウ素	⑨ 配合					$V_p \text{ m/s}$	—	1940	2320	2220	2320	2360	2340	2410	2550	
		重炭酸	⑩ 配合					$V_s \text{ m/s}$	—	720	750	810	940	890	920	950	960	
		ソーダ	⑪ 配合					$q_u \text{ kgf/cm}^2$	15.3	28.7	34.7	42.3	42.4	43.6	43.3	42.2	45.0	
									23.2	40.7	50.8	59.9	64.2	64.8	65.4	65.0	65.7	
									21.6	36.8	45.0	49.8	55.9	57.2	58.3	59.4	59.5	
									—	35.7	38.5	38.9	42.8	44.8	45.1	46.2	46.0	
										56.2	58.5	56.2	59.7	62.5	63.0	63.7	63.5	
										35.8	36.9	39.2	40.5	41.3	41.5	43.3	42.8	
現場実験	長期安定性	気象作用	凍結	⑥ 配合	材令28日供試体を蒸液水に浸漬。				$q_u \text{ kgf/cm}^2$	49.2	50.2	51.0	49.5	45.4	47.6	44.0	39.0	41.2
		融解	⑦ 配合						—	46.6	54.2	57.5	60.3	61.4	61.6	59.7	62.8	
		潤滑	⑧ 配合						—	34.8	37.3	38.7	41.5	42.6	43.3	44.5	45.2	
		乾燥	⑨ 配合						—	52.3	46.1	54.6	58.3	60.5	61.7	62.0	62.2	
				試験条件 サイクル					1	2	3	4	6	8	10	12	14	
				凍結	⑥ 配合	材令 7 日で試験	$q_u \text{ kgf/cm}^2$	24.3	25.3	23.7	18.5	15.8	5.8	* * *				
				融解	⑦ 配合	材令 91 日で試験	$q_u \text{ kgf/cm}^2$	49.2	50.2	51.0	49.5	45.4	47.6	44.0	39.0	41.2		
				潤滑	⑧ 配合	材令 7 日で試験	$q_u \text{ kgf/cm}^2$	26.0	25.7	22.6	26.3	22.2	18.3	17.4	20.3	15.5		
				乾燥	⑨ 配合	材令 91 日で試験	$q_u \text{ kgf/cm}^2$	51.0	48.8	49.0	49.3	44.6	48.2	47.6	47.0	48.4		
現場実験	固まる前の性状	物理的作用	クリープ試験	③ 要素	 ⑧ B 配合、人工軟岩 $\alpha = 0.04$ , $\beta = 0.2/\text{日}$ 自然軟岩 $\alpha = 0.05$ , $\beta = 18/\text{日}$													
			自己収縮特性		セメント水和反応に伴う固化体の収縮・膨脹は 0~0.004% であり、ほとんどゼロであった。													

図-2 人工軟岩の  $q_u \sim E_{50}$ ,  $q_u \sim V_p$ ,  $V_s$  関係図

特性 ( $E_{50}$ ) の両者とも経時的には同様の変動傾向を示すとともに、その絶対値も相関性が高いことから、以後の検討では、強度を代用特性値として用いることとした。

### (3) 長期安定性及び各種耐久性試験結果

気象あるいは施工環境に起因する諸作用への抵抗性を調査したが、その結果の一例は表-6 に示す通りである。

試験結果によれば、標準養生条件下あるいは地下水等からの化学的作用においては、人工軟岩は今回の試験範囲（約 10 年間）においては安定していることが分かった。また、クリープ特性については、粘弾性モデル（三要素モデル）で表現すると、そのクリープ係数は表-6 に示す様に、自然軟岩と極めて近似していることが確認でき

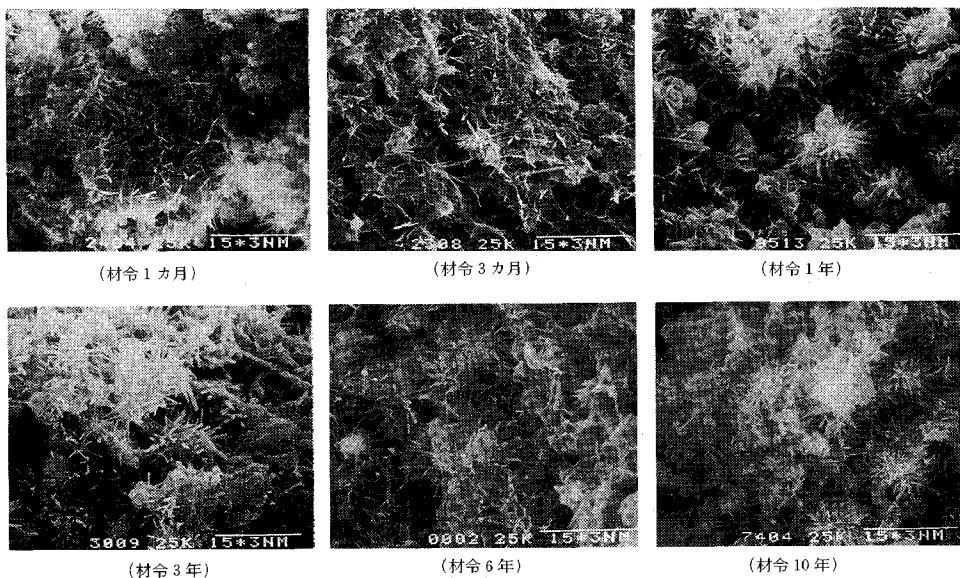


写真-1 長期材令人工軟岩の電子顕微鏡観察結果

た。

#### (4) 現場実験結果

現場実験で打設した人工軟岩について、経年的に物性変動を追跡調査した。その結果の一例は表-6に示した通りであるが、約8年間の追跡調査結果では各物性値ともほとんど変動はなく、この傾向から類推すると当人工軟岩は長期的に安定していると考えられる。

### 4. 結果の考察

#### (1) 人工軟岩の反応生成物について

X線回折及び電子顕微鏡観察による人工軟岩中の水和反応生成物の一例を図-3, 写真-1に示したが、まず、X線回折結果からみると、水和物は主としてエトリンガイトとケイ酸カルシウム水和物及びアルミニン酸カルシウム水和物である。特に、材令初期においてはエトリンガイトが主体をなし、それも材令6ヶ月から1年でピーク強度も安定し、以後ほとんど変化は認められない。ケイ酸カルシウム水和物は材令1~3年で安定したピーク強度を呈し、以後10年間ほとんど変化は認められない。またアルミニン酸カルシウム水和物はケイ酸カルシウム水和物とほぼ同時に、認められるが、そのピーク強度は弱く、痕跡程度で、材令の進展にもかかわらず、ほとんど変化していない。

これらの現象は電子顕微鏡写真でも観察され、材令初期に1μm程度の微細なエトリンガイトが土粒子間の空隙に生成し、それに絡むようにして、ケイ酸カルシウムを主体としたゲル状水和物が認められる。また、エトリンガイトは材令と共に、数μmまで成長するが、6ヶ月経過時以降はほとんど変化していない。これに対し、ケイ酸カルシウム水和物はさらに2~3年経過時まで、変

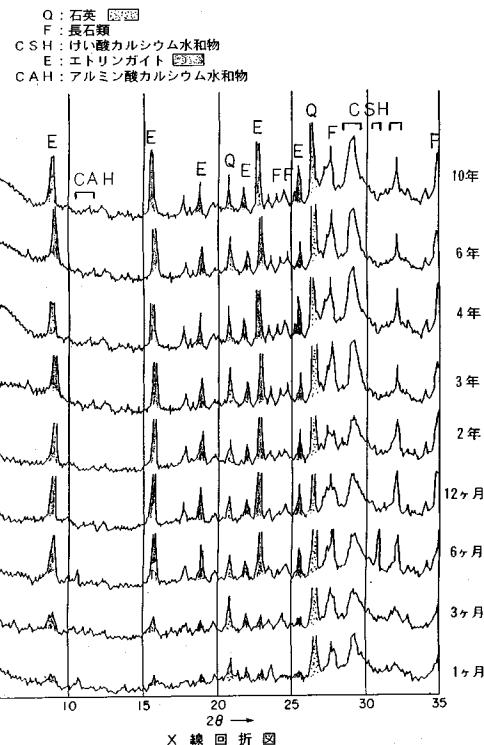


図-3 水和反応生成物追跡試験

化しており、写真からも結晶度が徐々に上がる様子が伺われる。

これらの水和生成物とその成長過程は、今回の養生条件(5~40°Cの気中および水中養生)の範囲ではいずれも同様の傾向を示している。

但し、養生温度が高い程、水和生成物のX線回折のピーク強度が早く生じ、しかも早く安定状態になる等水

和反応の促進性を伺うことができる。

また、ポルトランドセメントでは、徐々にアルミニン酸カルシウムモノサルフェイト水和物へ転移することが知られているが、今回はその現象も見られず、水和物、特に人工軟岩の諸特性を支配していると思われるエトリンガイト及びケイ酸カルシウム水和物は今回の試験期間においては安定していることが確認できた。

これらの水和反応のメカニズムについてはセメント化学の分野で多くの研究がなされ<sup>16)</sup>、既によく知られている事実であるが、今回も同じ様な反応形態を辿っているようである。まず、クリンカー中のアルミニン酸カルシウムが石膏の存在下でエトリンガイトを晶出すると併に、ケイ酸カルシウムの水和と共に遊離生成する消石灰が水碎スラグから溶出したアルミナと石膏と反応してエトリンガイトを生成する。このエトリンガイトは土粒子間の隙間を充填するようにまた、土粒子と複雑に絡み合って、固結力を与え、人工軟岩の初期強度に関与している。通常、このエトリンガイトは前述した様に、石膏の枯欠に伴いモノサルフェイトへの転移が起こるが、この固化材にはその転移を抑制するため、石膏を過剰に加えており、その効果が十分認められる。また、エトリンガイトを取り囲む様に、ケイ酸カルシウム水和物が晶出し、時間経過とともに、その結晶度が上がり、安定した生成物として、人工軟岩の強度を初めとする力学特性に関与している。なお、人工軟岩は施工性をよくするため、単位水量を多くしている。即ち、水量がボリューム的には使用材料の約半分を占め（ほぼ隙間比e=1）、初期隙間比が大きくなっている。隙間比が大きいことは人工軟岩の耐久性にも影響すると予想されたことから、特に、エトリンガイトの生成を多く期待し、その隙間を充填することを意図したが、試験結果からも十分にその効果が伺われ、人工軟岩の強度発現のみならず、長期的安定性にも好結果を与えているようである。

さらに、この水量が多いことに起因して、水和反応に伴う液層から固層への変換で、容積減少も予想されたが、自己収縮試験結果からも分かるように、収縮は見られず、むしろエトリンガイトの生成によると思われる膨張ひずみが見られた。

これらの結果から、固化体の微視的構造も長期的に安定していると言える。

## （2）人工軟岩の物理・力学特性について

人工軟岩の各種物理・力学特性については室内、現場データの一部を表-6に示したが、特にその代用特性値として一軸圧縮強さを取上げ、その長期挙動について検討してみる。

一軸圧縮強さと材令及び養生温度との関係は図-4に示す通りであるが、一軸圧縮強さは養生温度によって強度発現傾向は若干異なるものの、標準養生条件(20℃)で

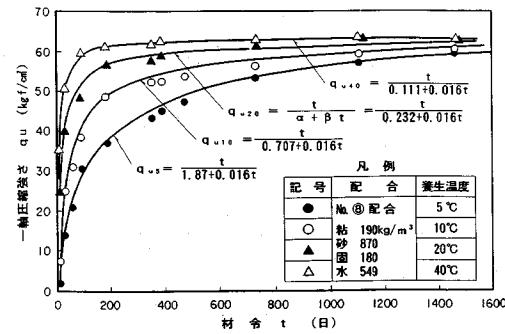


図-4 養生温度～材令～一軸圧縮強さ関係図

は比較的早期に強度が発現し、以後僅かに漸増する傾向を示しており、長期的に見ても安定していると言えよう。

この材令と強度の関係をコンクリートの初期強度から長期強度を推定するM. Goralの実験式<sup>17)</sup>と同様に、双曲線に近似し、検討してみる。

今、ある材令の一軸強さ( $q_{ut}$ )は式(1)で表現されるものとする。

$$q_{ut} = \frac{t}{\alpha + \beta t} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $q_{ut}$ ：材令  $n$  日での一軸圧縮強さ  $\text{kgf}/\text{cm}^2$   
(0.098 MPa)

$t$ ：材令日

$\alpha, \beta$ ：定数

式(1)を、 $t/q_{ut}$ と  $t$ との直線関係に変形し、試験結果からその切片( $\alpha$ )と勾配( $\beta$ )を求め、最小二乗法で定数 $\alpha, \beta$ を決定し、試験結果と比較してみると、図-4に示す様になり、試験結果と極めて良く一致していることが判る。

従って、人工軟岩の一軸圧縮強さと材令との関係は式(1)にて表現できると言える。

また、人工軟岩の最終強さ( $q_{uf}$ )は式(1)から  $t \rightarrow \infty$  とすることで得られる。

$$q_{uf} = q_{ut} = \frac{t}{\alpha + \beta t} = \frac{t}{\alpha/t + \beta} = \frac{1}{\beta} \quad \dots \dots \dots (2)$$

即ち、人工軟岩の最終強さは定数 $\beta$ の逆数となる。因みに、配合条件が同一で、養生条件の異なる試験結果について、 $\beta$ 値を比較してみると、図-4に示す様に、よい一致を示しており、上記の関係が実証できる。

また、ある材令における強度( $q_{ut}$ )と最終強度( $q_{uf}$ )との比を強度発現率( $R$ )とすると、 $R$ は式(3)で表される。

$$R = q_{ut}/q_{uf} = q_{ut} \cdot \beta = \frac{t\beta}{\alpha + \beta t} = \frac{t}{\alpha/\beta + t} \quad \dots \dots \dots (3)$$

また、式(3)は

$$t = \frac{R}{1-R} \cdot \frac{\alpha}{\beta} \quad \dots \dots \dots (4)$$

と表され、この関係式から、ある強度が発現するまでの

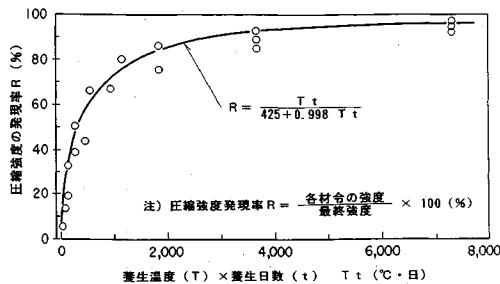


図-5 圧縮強度発現率と養生温度・日数との関係

所要日数を求めることができる。式(4)から分かるように、定数の比  $\alpha/\beta$  は、強度発現率 50% の所要日数を示していることになる。

このように、人工軟岩の長期強度の推定あるいは所要の強度が発現するに要する日数等は上記の関係式から、求めることができよう。

次に、図-4 に示す配合条件の人工軟岩について、強度発現率と養生温度、養生日数との関係を求めてみると、図-5 に示す様になり、この種の人工軟岩の強度は、養生温度と養生日数との関数で表現できることが分かる。これは、コンクリートの強度発現における積算温度の概念と同様の考え方で、強度発現は養生温度と養生日数との積で表されることを示唆している<sup>18)</sup>。

その関係式は、一軸圧縮強度の発現率  $R = \text{各材令の強度} / \text{最終強度}$ 、養生温度  $T$  及び養生日数  $t$  とすると、式(5) のようになる。

$$R = \frac{T \cdot t}{a + b \cdot T \cdot t} \quad \dots \dots \dots (5)$$

但し、 $a, b$ : 定数

従って、この関係式から施工現場の養生条件（養生温度）を知ることで、時間経過に伴う強度の発現性を予測することができるようになる。

### (3) 気象作用に対する安定性について

気象条件等の環境から受ける作用として、凍結・融解の繰り返し作用と湿潤・乾燥の繰り返し作用を取上げ、いずれも 14 サイクルまでの一軸圧縮強さの残存率（各サイクルでの強度 / 0 サイクル時の強度）×100%）について整理し、図-6, 7 に示した。

凍結・融解繰り返しによる試験結果によると、材令 7 日のまだ強度発現率の低い時期に凍結・融解の繰り返しに供した試料は、5 サイクル目当たりから急激に残存率は低下し、14 サイクルでは 60% 程度となる。

これに対し、材令 91 日即ち、強度発現率が 85% 程度の供試体については、凍結・融解の繰り返し作用に対する抵抗性は材令 7 日の供試体に比較しかなり大きくなっている。

これは、当人工軟岩の単位水量が多く、即ち、練り上がり時、容積比で約 50% が水であり、エトリンガイト

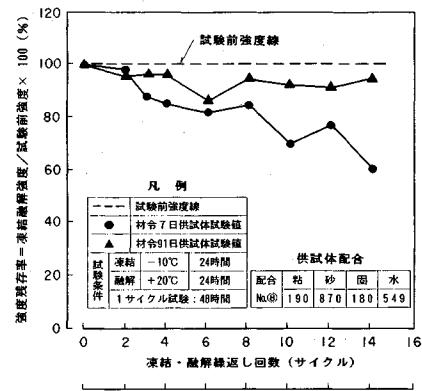


図-6 凍結・融解試験結果

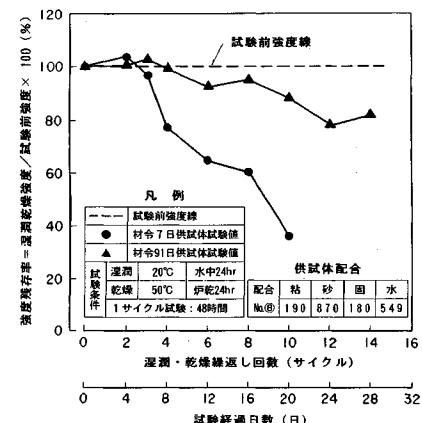


図-7 湿潤・乾燥繰返し試験結果

等の生成による水分の固定が十分でない材令初期に、凍結・融解作用を受けると、強度に及ぼす影響が大きいこと、また材令の進行に伴って結晶水として固定され、自由水が少なくなると凍結・融解作用に対する抵抗性も大幅に改善されることを示している。

一方、湿潤・乾燥の繰り返し作用に対しては、この傾向が一層顕著に現れ、人工軟岩中の水分の影響が大きいことを示している。

但し、この繰り返し作用を受けた試料の X 線回折試験結果によると、エトリンガイト及びケイ酸カルシウム水和物の回折線強度は変化していないことから、水和物そのものは安定していると言える。

これらの試験結果は、鳥居等の研究（1984）<sup>19)</sup>、嘉門等の研究（1991）<sup>20)</sup>でも同様の結果を得ている。

従って、人工軟岩の実用に当たっては、特に初期養生に十分配慮する必要があると同時に、材令の初期にこの種の環境に直接暴露しないような注意が必要と考えられる。

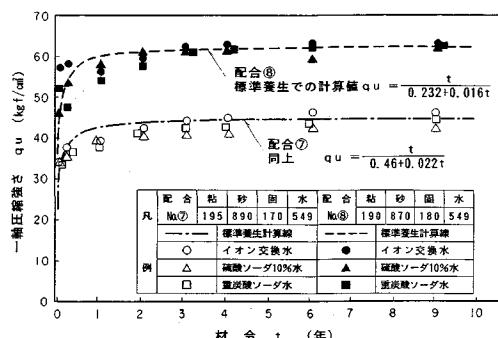


図-8 葉液水浸漬試験結果

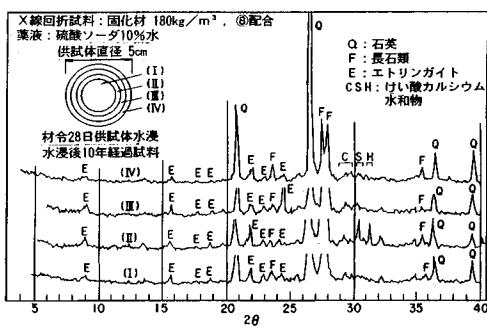


図-9 葉液水浸供試体のX線回折

#### (4) 施工環境に起因する諸作用に対する抵抗性について

施工環境に起因する諸作用としては、前述の様に、人工軟岩と地下水との諸作用を想定し、それぞれに該当する水質条件としてイオン交換水、硫酸ソーダ水、炭酸イオン水を取上げ、供試体を浸漬して経時にその性状変化を調べた。

浸漬した供試体の代用特性値の一軸圧縮強さについては図-8に示すように、標準養生条件の供試体とほとんど差はなく、今回想定した環境条件に対し、十分な抵抗性を有していることが確認できた。

さらに微視的内部構造を把握するため、X線回折、走査型電子顕微鏡観察を行った。その結果の一例を図-9、写真-2に示したが、この結果からも分かるように、前述の標準養生条件の供試体と浸漬供試体との微細内部構造においても有為な差異は認められなかった。

なお、普通ポルトランドセメントにて作成した供試体も比較のために浸漬したが、特に、硫酸ソーダ水に浸漬した試料は徐々に膨張し、表面に亀の子状のクラックが発生した後、崩壊する現象が見られた。

崩壊箇所の試料をX線回折にて調べてみると、多量のエトリンガイトが確認でき、その生成に伴う膨張作用で、崩壊したことが伺われた。

今回使用した固化材は、予め過剰の石膏を添加していること、さらには当初からエトリンガイトの生成反応を

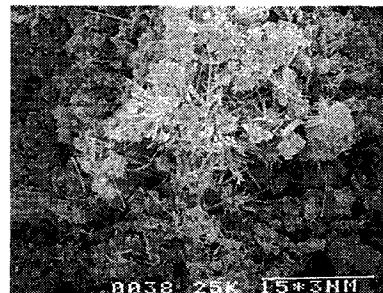


写真-2 葉液水浸漬供試体の電子顕微鏡観察結果  
(硫酸ソーダ10%水、浸漬10年経過試料)

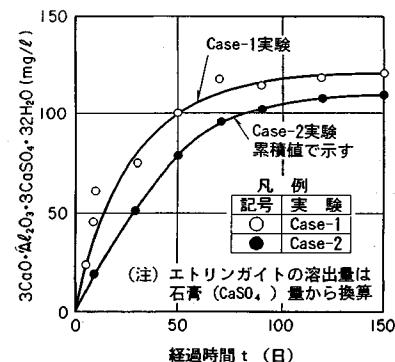


図-10 経過時間～溶出量関係図

期待していることで、この種の外的作応に対する抵抗性の向上効果が確認できたとも言えよう。

但し、イオン交換水に浸漬した供試体は、他の浸漬試料に比較して、若干供試体重量が減少傾向を示し、しかも浸漬液のpH及び電導度が共に、高くなる傾向を示した(pH:初期8.0→10.5、電導度:初期2.5→475μΩ/cm)。

これは、人工軟岩からの溶出があることを示唆しているものと考えられた。

そこで、人工軟岩供試体を単位表面積当たり0.1l/cm<sup>2</sup>のイオン交換水に漬け、長時間浸漬した場合(Case-1)と24時間毎にフレッシュな水と交換した場合(Case-2)との条件で、溶出試験を実施した。

試験では、溶出液のpH、電導度、Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の分析を行った。その試験結果は、図-10に示す通りである。これらの結果からも判るように、供試体浸漬後、50日程度までは溶出量は増加しているが、その後、徐々に少くなり、100日程度で溶出しなくなる傾向を示す。

そこで、Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の溶出は等価なエトリンガイト固体からの溶出と仮定して、若干検討してみる。

一般に、固体の溶解はNoyes, Whiney等<sup>21)</sup>によれば溶液が十分存在する場合、図-11に示すような拡散現象にて進行するとしている。

この濃度変化図から、単位時間に拡散溶液していく固体量d<sub>m</sub>はFicksの定理から、式(6)のように表され

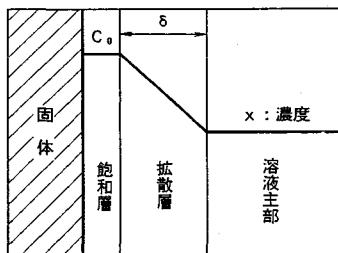


図-11 固体の溶解

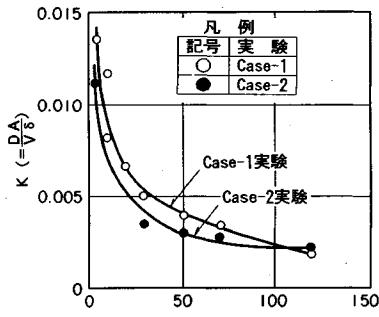


図-12 K~材令関係図

る。

$$d_m = \frac{-DA(X - C_0)}{\delta} \cdot d_t \quad \dots \dots \dots (6)$$

また、溶液の容量を  $V$  とすると、上式は式 (7) の様になる。

$$\frac{d_m}{V} = d_x = \frac{-D \cdot A \cdot (X - C_0)}{V \cdot \delta} \cdot d_t \quad \dots \dots \dots (7)$$

今、

$$\frac{D \cdot A}{V \cdot \delta} = K \quad \dots \dots \dots (8)$$

と置けば、式 (8) は、

$$dx/dt = K(C_0 - X) \text{ の微分方程式が得られ、その解は}, \\ K \cdot t = \ln(C_0/(C_0 - X)) \quad \dots \dots \dots (9)$$

となる。

今回の実測値を式 (9) に代入し、時間と定数  $K$  との関係を求めてみると、図-12に示すようになる。

一般に可溶性固体の溶液に対する定数  $K$  は一定値といわれるのに対し、当結果では、時間の経過とともにその値は減少し、一定値に漸近するという興味ある傾向を示している。この  $K$  は拡散定数  $D$ 、接触面積  $A$ 、溶液容量  $V$  及び拡散層厚  $\delta$  からなるが、実験条件では前 3 者はいずれも定数であり、変動する可能性としては、拡散層厚だけである。この拡散層が変動する一因としては、当供試体が可溶成分と不溶成分とからなり、むしろ不溶成分の方が大半を占めていることに起因すると考えられる。

即ち、供試体からエトリンガイトを始めとする可溶性成分はイオン交換水との接触部付近では、比較的早期に溶出を起こすが、若干でもその内部に及ぶと、不溶成分

で形成されるスケルトン間の微小空隙を介して溶出するため、あたかも拡散層厚の増大といった結果をもたらし、溶出量が急激に減少するものと推察される。

このように、地下水環境がイオン交換水に近い条件ではその接触部付近の人工軟岩の可溶成分の一部は溶出する。

しかし、その内部にまで及ぼすことは少なく、前述の様に、強度を初め、諸力学特性にはほとんど影響なく、実用上ほとんど問題ないものと判断されよう。

## 5. 結論

以上、本研究で得られた成果について要約すると以下のようである。

1) 現地発生土（粘土、砂）と固化材とを混合して、製造する人工軟岩は、重要構造物等の基礎対象となる第三紀自然軟岩に類似した物性（強度、変形特性等）を再現することができるとともに、その値は長期的に安定し、かつ周辺環境から受ける諸作用に対する耐久性も十分期待できる。

2) 固化材としては、エトリンガイトの生成とセメントクリンカーの水和反応との両方による固化機能を期待したものであるが、特に、エトリンガイトが重要な役割をなし、初期強度に関与するばかりでなく、土粒子間の間隙を充填して、長期安定性、耐久性の面でも寄与している。

3) 人工軟岩の強度は、ほぼ 90 日前後まで徐々に増加し、以後一定値を保持し、長期的にも安定している。その強度発現傾向は、次の双曲線で近似できる。

$$q_{ut} = \frac{t}{\alpha + \beta t} \quad \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 $q_{ut}$  : 材令  $t$  の時の軸圧縮強さ

$t$  : 材令

$\alpha, \beta$  : 定数

4) 式 (10) から、人工軟岩の最終強度の予測が可能である。

その値は、 $q_{ut} = 1/\beta$  から求まる。

5) また、ある強度が発現するに要する日数は、次式から求められる。

$$t = \frac{R}{1-R} \cdot \frac{\alpha}{\beta} \quad \dots \dots \dots (11)$$

但し、 $R$  : 強度発現率

6) また、強度発現率  $R$  は養生温度  $T$  と養生日数  $t$  との関数で表される。

$$R = \frac{Tt}{a + bTt} \quad \dots \dots \dots (12)$$

但し、 $a, b$  は配合条件等にて決まる定数

7) 人工軟岩供試体をイオン交換水、硫酸ソーダ水、炭酸ソーダ水等に浸漬し、長期挙動を 10 年間に亘り調査

したが、強度特性を初めとする諸物性は、ほとんど変化せず、十分な耐久性を有することが確認できた。

8) 人工軟岩供試体は、初期材令で、凍結・融解、湿潤・乾燥等の繰り返し作用を受けると、強度低下を起こす恐れがあり、初期養生に留意する必要がある。

9) 自然軟岩を構造物基礎とする施工現場において、自然軟岩と同等の物性（強度、変形特性等）を持つ人工軟岩を施工し、長期拳動を追跡調査したが、当初の設定した物性が長期に亘って安定し、十分実用に供し得ることを確認できた。

**謝辞：**本研究を行うに当たって、故有泉昌氏、日本セメント（株）戸田尚旨氏をはじめ多くの方にご指導とご協力を賜ったことを記し、深甚の謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 栗原宏武・有泉昌他：セメントパチルスの生成を利用した軟弱土の安定処理法の研究、鹿島技術研究所年報、第23号、pp.55~62、1975。
- 2) 栗原宏武・有泉昌・深沢栄造他：セメントパチルスの生成を利用した軟弱土の安定処理について、第10回土質工学研究発表会、pp.999~1002、1975。
- 3) 有泉昌・栗原宏武他：エトリンガイト生成反応を利用する土質安定方法、第18回粘土学会、講演会、p.47、1975。
- 4) H.Kurihara,A.Ariizumi et al : Solidification of Harmful Wastes and Muds by means of The Formation of Cement Bacillus and Its Application, 9 th I.C.S.M.F.E. Tokyo, 1977.
- 5) 例えは、後藤誠史・大門正機：エトリンガイト、セメントコンクリート、No. 408, pp.57~60, 1981.
- 6) 近藤連一：ソイルスタビライズとメーソンリー用の新種高硫酸塩スラグセメント、セメント技術年報、14号、pp.248~259、1960。
- 7) 有泉昌他：Ca(OH)<sub>2</sub>, CaSO<sub>4</sub>混合溶液とアロファン粘土との反応について、セメント技術年報、15号、pp.400~405, 1961.
- 8) 有泉昌他：アロファン質粘土の消石灰一石膏による化学的処理方法に関する研究、土木研究所報告、No.119, pp.83~103, 1963.
- 9) 川村満紀・鳥居和之：脱硫セッコウおよび高炉水碎スラグを用いた安定処理土における反応生成物と強度、セメント技術年報、33号、pp.588~592、1979.
- 10) 楠場重正・川村満紀他：排煙脱硫石膏および高炉水碎スラグを使用した安定処理土における反応生成物と強度特性、土木学会論文報告集、第320号、pp.77~88、1982.
- 11) 嘉門雅史他：エトリンガイトの形成と安定処理効果との相関について、第38回土木学会年次講演会、pp.-457~458、1983.
- 12) 例えは、セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル、技報堂、1985.
- 13) 栗原宏武・深沢栄造：人工軟岩の力学的性質に関する研究、鹿島技術研究所年報、第37号、pp.183~188、1989.
- 14) 岸 清・栗原宏武・深沢栄造他：人工軟岩材料の開発、土木学会論文集、第421号、pp.67~68、1990.
- 15) 三嶋信雄：路床・路盤材としてマサ土の安定処理効果と耐久性、土と基礎、Vol. 23, No. 2, pp.25~31, 1975.
- 16) 例えは、笠井順一：セメント化学概論（その4）、Vol. 22, No. 2, Feb. 1984.
- 17) M.Goral : Empirical Time-Strength Relations of Concrete, Journal of A.C.I.28, pp.215~224, 1956.
- 18) 岡田清・六車熙編：コンクリート工学ハンドブック、pp.363、朝倉書店、1981.
- 19) 鳥居和之・川村満紀他：安定処理土における凍結融解に対する抵抗性と微視的構造について、金沢大学工学部紀要、17巻、1号、pp.1~28、1984.
- 20) 嘉門雅史他：セメント系安定処理土の乾湿繰り返し耐久性、第45回セメント技術大会講演集、pp.844~849、1991.
- 21) 千谷利三：化学反応、岩波書店、1937.

(1993.4.16 受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON DURABILITY OF ARTIFICIAL SOFT ROCK

Hirotake KURIHARA, Kokichi KIKUCHI and Eizo FUKAZAWA

This experimental study has been carried out in order to investigate the durability of artificial soft rock which were made by clay pulverized natural mud-rock, natural sand, water and new blended blast-furnace slag cement mixtures.

In the experiment, the artificial soft rock specimens were exposed in some curing conditions such as in curing rooms at 5~40°C in order to eliminate the temperature effect, in some water conditions and in some weathering conditions in order to eliminate the resistance against the actions of various ground water and weathering for about 10 years. These studies proved that the artificial soft rock have high resistance against the actions of various ground water and weathering.

The long-term durability of them were also verified by the results of the follow-up investigations, after exposing in field for 10 years.