

報 告

[1209] 人口軟岩材料の開発

正会員○岸 清 (東京電力(株)原子力建設部)

正会員 百瀬和夫 (東京電力(株)原子力建設部)

深沢栄造 (鹿島建設(株)技術研究所)

1. はじめに

ダム、橋梁等の重要構造物の基礎地盤の一部を良質材で置換え、安定化させる工事においては、置換材料として長期的な使用実績のあるコンクリートを用い、基礎地盤としての機能と長期的な安定性を確保するのが一般的である。

しかし、置換工事の対象となる基礎地盤が軟岩である場合には、コンクリートの剛性が周辺地盤の剛性と比較して大きいことから、置換材料あるいは周辺の地盤に局所的に応力集中を生じたり、地震時における地盤の振動性状が複雑となることが予想される。そこで、置換材料の品質としては、周辺の地盤と同程度の剛性を有し、長期的に安定しているものが適しており、あわせて施工性、経済性に優れていることが要求される。

本報告は、重要構造物の基礎地盤が軟岩である場合の置換材料として開発した、人工軟岩材料の開発経緯、物性及び長期安定性についてとりまとめたものである。

2. 材料の開発経緯

2-1 材料の選定

今回、置換材料の開発対象とした軟岩は、新第三紀の泥岩であり、その物性は湿潤密度が 1.7 ~ 1.8 t/m³、変形係数が 5,000~10,000 kg/cm²、一軸圧縮強度が30~50 kg/cm²程度であることから、人工軟岩材料の開発に当たっては、上記の軟岩と同程度の物性を有し、あわせて物性が長期にわたって変化しないこと、施工性に優れていること、安定した品質が得られること、経済的であること等を目標品質とした。

人工軟岩材料の選定に当たっては、既往の土木建築材料の中で長期的な使用実績のあるコンクリート系材料、アスファルト系材料及びソイル系材料をとりあげ、これらの材料の物性、長期安定性、施工性、経済性等について人工軟岩材料の要求品質との比較検討を行った結果、人工軟岩材料に適用する材料としてソイル系材料のソイルモルタルを選定した。

2-2 ソイルモルタルの構成材料

ソイルモルタルは、「粘性土 + 砂 + 固化材 + 水」で構成された材料である。用いる粘性土としてはベントナイト等で代表される市販の乾燥粉末粘土、シルト等があるが、本材料においては、ベントナイトは活性が高く目標とする物性を安定した形で得にくいこと及び経済性の面で

表-1 固化材の成分

固化材名称	構成割合 (%)			成 分 (%)						
	クリンカー	スラグ	石膏	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	その他
普通ポルトランドセメント	96	0	4	22.8	5.1	3.0	63.8	1.5	1.9	1.9
高炉セメント (A種)	67	29	4	23.8	7.1	2.3	58.7	3.0	2.1	3.0
人工軟岩材料用固化材	62	20	18	20.4	6.4	2.0	53.6	2.0	9.4	6.2

問題があることから、現地で発生した泥岩をスラリー状に湿式粉碎し、これに砂と特殊な固化材

を混合し、固化する方法を採用した。

固化材としては、材料中の微細な間隙を水和生成物によって充填し、強度、剛性等物性の発現を比較的早期に収斂させ、長期にわたって安定していることが要求される。

そこで、粘性土を固化させる地盤改良用固化材に関する既往の研究結果(例えば 1) 2) を参考にして、クリンカー、高炉水砕スラグ及び石膏の三者を混合した新しい固化材を開発することとした。

割合については、室内において、種々の配合試験を行い、所期の品質を満足し得るものを決定した。

表-1 に固化材の混合割合及び成分を示す。

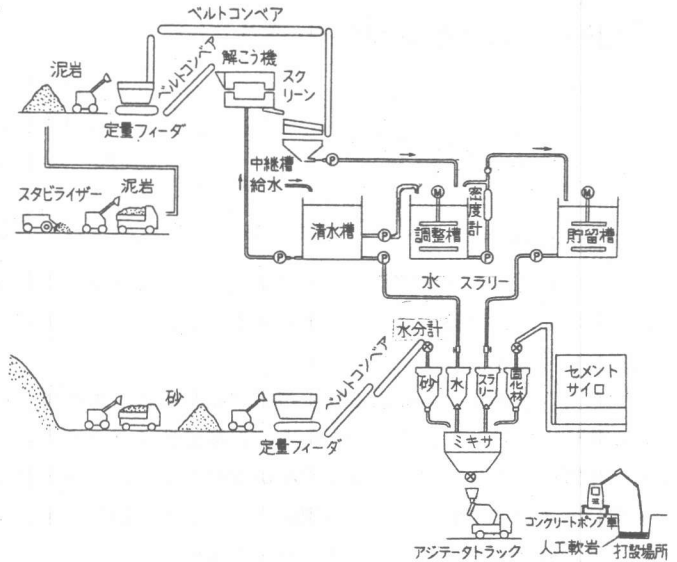


図-1 人工軟岩材料の製造方法

3. 製造方法

本人工軟岩材料の製造工程は図-1 に示すとおりであり、現地で発生した泥岩を特殊な解こう機で湿式粉砕して泥岩スラリーとし、これに砂と固化材を混合して固化するものであり、泥岩スラリー及び砂の物性は図-2 に示すとおりである。本材料の製造に用いるプラントは、通常のコンクリート製造で用いる定置式プラントと泥岩解こう機を組合わせたものであり、泥岩解こう機は従来粗骨材の研磨機として用いられていたものを改良したものである。

本材料は、泥岩スラリー、砂及び固化材の三者の配合を調整することによって、目標とする物性値を任意に得ることができ、今回適用対象とした軟岩と同程度の物性を確保するための配合条件を表-2 に示す。

なお、材料の品質管理においては、泥岩スラリーの密度を管理することによって一定の品質を確保することができる。

4. 物性

本材料のフレッシュモルタルの性状は、流動性及び保水能力に優れた泥岩スラリーの働きにより、流動性に優れ、材料分離がほとんどなく、ポンパビリチーに優れている。

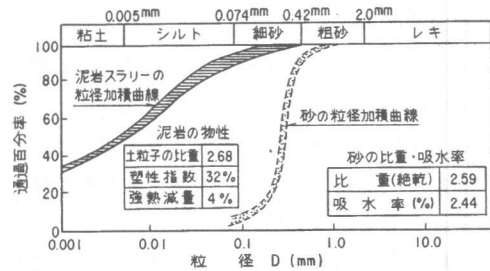


図-2 泥岩スラリー及び砂の物性

表-2 人工軟岩材料の配合例

単 位 量 (kg/m³)				湿潤密度 ρ_1 (g/cm³)	テーブル フロー (mm)
泥 岩	砂	固化材	水		
190	700	150	550	1.71	180
}	}	}	}	}	}
230	890	180	600	1.78	210

本材料の強度発現特性を確認するために実施した、20℃養生及び40℃促進養生の材令4年にわたる一軸圧縮強度試験の結果を図-3に示す。同図より、本材料の強度発現は比較的初期の段階で収斂しており、材令の経過に伴って強度が低下したり、あるいは、著しい強度増加が長期的に継続することは認められない。また、40℃促進養生による材令2年程度の強度が、20℃標準養生の50年程度の強度に対応していることから、通常の養生状態においては、本材料は50年以上の長期にわたって強度低下等がないものと考えられる。

試験結果を回帰して推定した収束強度の、ほぼ80~90%に達する材令91日における物理・力学特性は、表-3に示すとおりであり、目標とした泥岩と同程度の物性が得られていることを確認した。

5. 長期安定性

5-1 固化材の水和反応機構

本人工軟岩材料の長期的な安定性の確認に当たっては、本材料がセメント系の材料であることを考慮して、まず水和反応機構の検討を実施した。

本材料の固化材は高炉セメントに石膏を添加したものであり、人工軟岩材料中のクリンカー、高炉水砕スラグ及び粘土鉱物の水和反応は以下に示すとおりである(図-4参照)。

クリンカーは、水と反応してけい酸カルシウム化合物からけい酸カルシウム水和物及び水酸化カルシウムを生成し、アルミン酸カルシウム化合物からアルミン酸カルシウム水和物を生成する。

また、高炉水砕スラグ中のアルミノけい酸カルシウム化合物は、クリンカーの水和反応によって生じた水酸化カルシウム及び水と反応し、けい酸カルシウム水和物及びアルミン酸カルシウム水和物を生成する。さらに、粘土鉱物のポゾラン反応においても同様にけい酸カルシウム水和物及びアルミン酸カルシウム水和物を生成する。

本固化材の特徴として、石膏を多く添加していることか

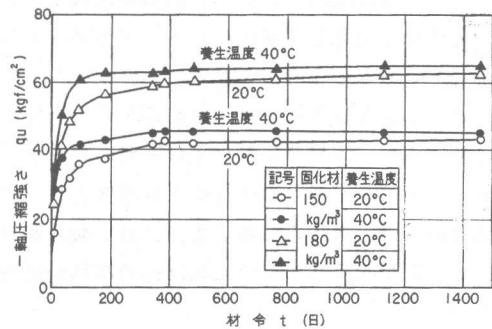


図-3 人工軟岩材料の強度発現特性

表-3 人工軟岩材料の物理・力学試験結果

特性値	記号	単位	目標値	試験結果 (材令91日)
湿潤密度	ρ_t	g/cm^3	1.70~1.80	1.70~1.78
一軸圧縮強さ	q_u	kgf/cm^2	30~50	33~50
変形係数	E_{50}	kgf/cm^2	5000~10000	6900~9300
ポアソン比	ν	—	0.46~0.48	0.43~0.44
超音波伝播速度	V_p	m/sec	1700~2000	1800~2200
	V_s	m/sec	500~800	670~810

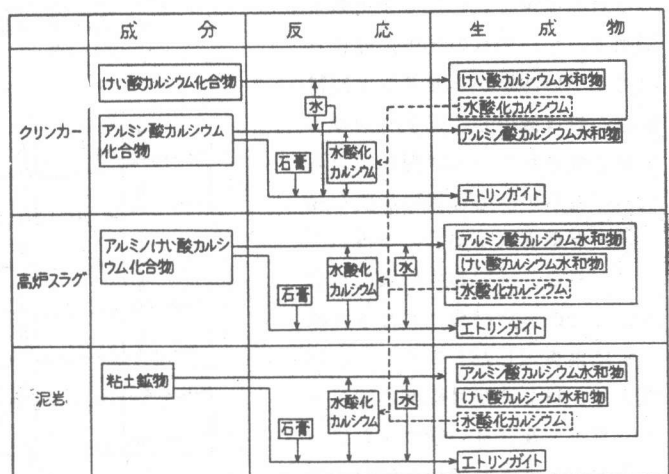


図-4 人工軟岩材料の水和反応機構

ら、上記の水和反応において、石膏は水酸化カルシウム及び水とともに固化材及び粘土鉱物中のアルミナ分と反応して多量のエトリンガイトを生成し、これが人工軟岩材料の早期強度の発現に寄与しているものと考えられる。

なお、エトリンガイトは未反応のアルミナ分と反応してモノサルフェートに転移することが知られているが、本材料においては石膏の量を十分に多くしていることから材料中のアルミナ分の大半はエトリンガイトの生成により消費され、エトリンガイトがモノサルフェートに転移することはないものと考えられる。また、けい酸カルシウム水和物の生成に伴って生じる水酸化カルシウムは、高炉水砕スラグの水和反応及び粘土鉱物のポゾラン反応により消費されるものと考えられる。

5-2 水和生成物の追跡調査

人工軟岩材料の長期的な安定性を確認するために、ごく初期の材令から4年にわたってX線回折及び電子顕微鏡観察を行い、水和生成物の生成状況及び長期的な安定性の確認を行った。試験に当たっては、本材料の水和発熱に伴う高温養生下における水和反応特性についてもあわせて調査するため、供試体の養生温度は20℃標準養生以外に40℃及び50℃養生についても実施した。

図-5は、初期材令における固化材の減少状況及び水和生成物の生成状況を示したものである。縦軸は、X線回折における内部標準物質（酸化アルミニウム：10wt%）の回折強度（ I_0 ）に対するセメント原料（ C_3S 、 C_2S ）、石膏及びエトリンガイトの回折強度（ I ）の比（ I/I_0 ）であり、各物質の相対的な量を表したものである。同図より、いずれの養生温度においても早い時期からセメント原料及び石膏は減少し、エトリンガイトが生成されている状況が認められ、これらの反応は養生温度が高いほど促進される傾向にある。

図-6は、20℃養生による材令4年までの長期材令にわたるX線回折結果を示したものである。同図より、材令6か月程度までエトリンガイト及びけい酸カルシウム水和物が生成されている状況が認められ、6か月以降においてはX

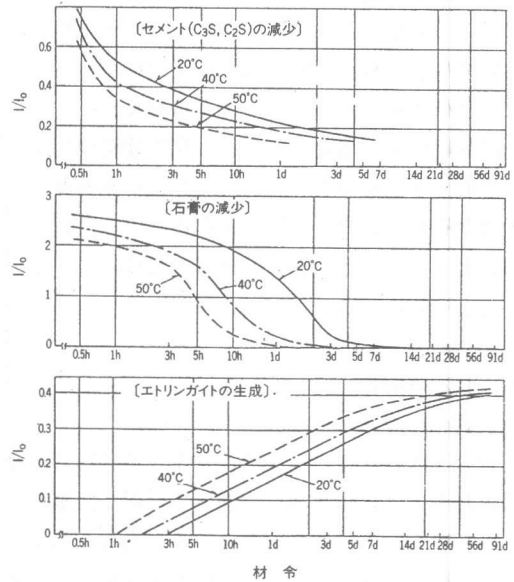


図-5 初期材令における水和反応

- 石英
- 長石類
- CSH けい酸カルシウム水和物
- E エトリンガイト
- CAH アルミン酸カルシウム水和物

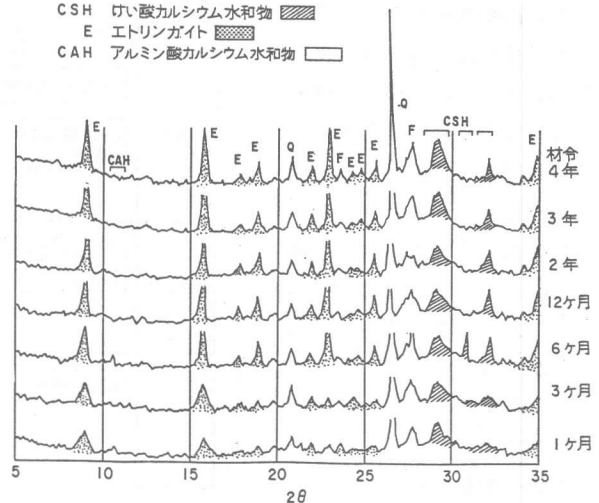


図-6 人工軟岩材料のX線回折結果（20℃養生）

線回折結果に有為な差が認められない。また、図-7は40℃促進養生による材令4年までのX線回折結果を示したものである。材令6か月以降においては図-6に示した20℃養生によるX線回折結果と差異がなく、4年にわたる長期材令においてもその状況は変化していないことが確認でき、エトリングイトからモノサルフェートへの転移もないことから、上記の水和生成物は本材料中において長期的に安定しているものと考えられる。

写真-1～4は、20℃養生における初期材令から4年までの水和生成物の電子顕微鏡観察結果である。

同写真によると、材令12時間で少量の針状結晶（エトリングイト）が認められ、材令7日では発達したエトリングイトの周囲にけい酸カルシウムのゲル状水和物が認められるようになる。材令91日では、これらの水和生成物の大半が生成されており、材令1年～4年では、材令91日とほぼ同様の状態となっており、エトリングイト及びけい酸カルシウム水和物は、長期材令においてもそれらの結晶構造は変化せず、安定していることを確認した。

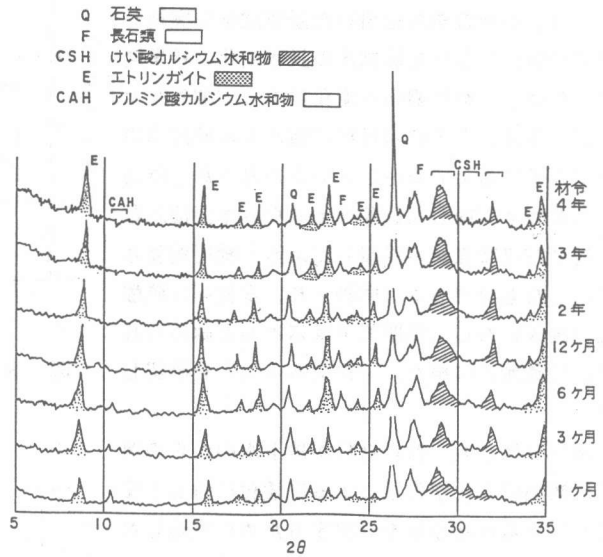


図-7 人工軟岩材料のX線回折結果（40℃養生）

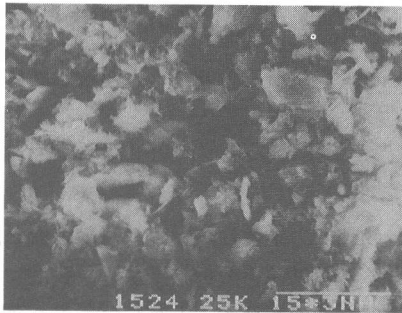


写真-1 水和生成物（材令12時間）

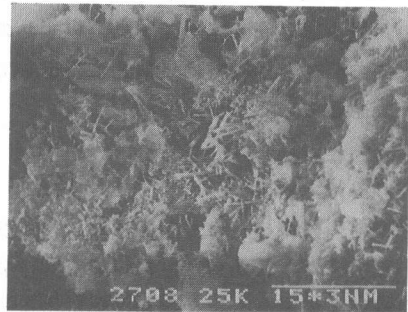


写真-2 水和生成物（材令7日）

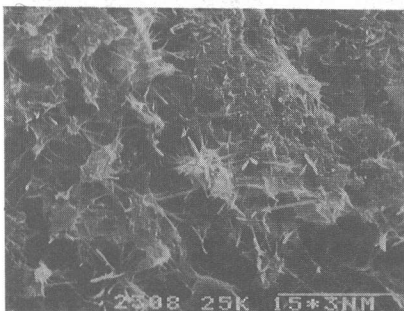


写真-3 水和生成物（材令91日）

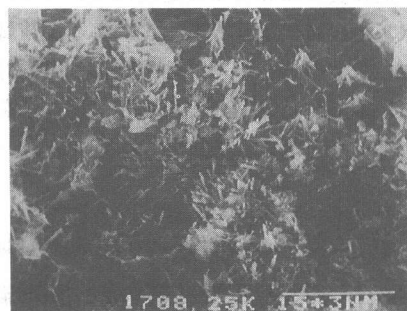


写真-4 水和生成物（材令4年）

5-3 環境要因を想定した各種薬液に対する安定性

本材料の環境要因に対する安定性の検討においては、各種の薬液を用いた浸漬試験を実施し、材料の劣化の有無を供試体の長さ変化、重量変化、及び、一軸圧縮強さ変化によって調査した。

図-8は、人工軟岩材料が海水中の硫酸塩の化学作用に対して安定しているかどうかを確認するために実施した硫酸ナトリウム水浸漬試験（材令28日時点から浸漬）による一軸圧縮強さを示したものである。同図より、本材料は硫酸塩の浸入に対して強度低下はほとんど認められず、耐硫酸性に優れた材料であることを確認した。

図-9は、人工軟岩材料が地下水中からの溶存炭酸物質の化学作用による炭酸化に対して安定しているかどうかを確認するために実施した重炭酸ナトリウム水浸漬試験（材令28日時点から浸漬）による一軸圧縮強さを示したものである。同図より、本材料は炭酸物質の浸入に対して強度低下は認められず、炭酸化に対する抵抗性に優れた材料であることを確認した。

環境要因に対する安定性については、上記の試験の他に塩化ナトリウム水、イオン交換水等を用いた浸漬試験を実施しており、いずれの試験結果においても本材料は長期的に安定していることを確認している。

6. おわりに

軟岩地盤の置換材料として開発した人工軟岩材料は、物理・力学特性が周辺の基礎地盤と同程度であり、また、長期安定性についても材令4年にわたる各種試験、分析結果から、強度は発現状況が安定しており、また水和反応による生成物も不安定な性状を示すことがないことを確認した。更に長期にわたる安定性については、40℃促進養生、水和反応機構の解明及び硫酸ナトリウム水、重炭酸ナトリウム水等による浸漬試験により、物理・力学特性に問題ないことを確認しており、重要構造物の基礎地盤となり得る材料であると判断した。

なお、本材料は、開発実用化して約5年を経過しており、これまでに約13万 m^3 の製造、打設実績を得ている。

<参考文献>

- 1) 藤井孝一, 嶋田洋二, 荒井齊; 水さい-石こう-消石灰による高含水粘性土の固化, セ技年報 36, 昭57.
- 2) 榎場重正, 川村満紀, 鳥居和之; 排煙脱硫石膏および高炉水砕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 320, 昭57.

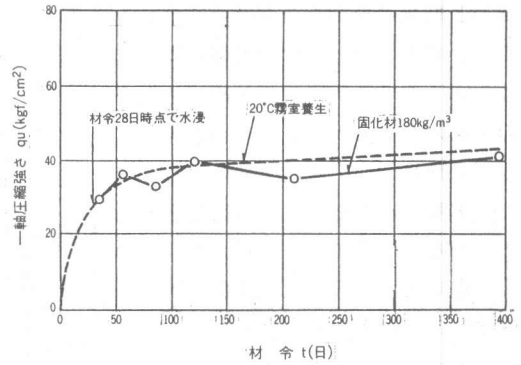


図-8 硫酸ナトリウム水浸漬試験結果

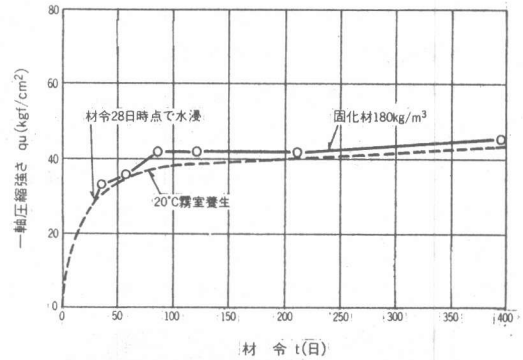


図-9 重炭酸ナトリウム水浸漬試験結果