

技術開発賞 その後 人工軟岩材料の開発

DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL SOFT ROCK

岸 清

Kiyoshi KISHI

東京電力(株)フェロー
(〒100 東京都千代田区内幸町1-1-3)

Key Words: artificial soft rock, improvement of foundation, soft sedimentary rock, chemical hydration activity

1. 材料開発の背景

ダム、長大橋、原子力発電所等の大型重要構造物は、健全な岩盤の上に直接設置されるのが一般的であり、基礎となる岩盤が構造物の設置レベルよりも深い場合、あるいは基礎岩盤の一部に風化岩や破碎岩が存在する場合等には、その部分を良質の人工材料で置換し健全な人工岩盤を造る場合が多い。この場合、置換材料としては、長期的に安定であり、かつ、大量に使用実績のあるコンクリートを用いるのが一般的である。

しかし、筆者が携わった東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所の建設に際しては、対象となる基礎岩盤が「西山層」と呼ばれる新第三紀鮮新世の均質で塊状無層理の泥岩(軟岩)からなり、コンクリートで基礎岩盤の一部を置き換えた場合には、コンクリートの剛性が周辺岩盤の剛性と比較して大きいことから、置換部あるいは周辺岩盤に局部的に応力集中が生じたり、地震時における岩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、周辺の軟岩と同程度の剛性を有し、長期的に安定したものが適しており、あわせて施工性、経済性に優れていることが要求されることから、上記品質を有する置換材料、すなわち人工軟岩材料の開発を行った。

2. 人工軟岩材料の開発概要

(1) 材料の選定

置換材料の開発対象とした西山層は、湿潤密度が $1.7\sim 1.8\text{ t/m}^3$ 、変形係数が $5,000\sim 10,000\text{ kg/cm}^2$ 、一軸圧縮強度が $30\sim 50\text{ kg/cm}^2$ 程度の泥岩(西山泥岩)からなる。そこで、材料の開発に当たっては、上記物性値を安

定した形で得ることができると判断した土質を選定した。

ソイルモルタルは、「粘性土+砂+固化材+水」で構成される材料である。人工軟岩材料に用いる粘性土としては、発電所の建設工事で発生する西山泥岩(主な構成鉱物は石英、長石類)をスラリー状に湿式粉碎したものを、また、砂は単位体積重量を調整する目的で現地が発生する砂をそれぞれ用いることとした。固化材としては、強度、剛性等所要の物性を比較的早期に発現させ、長期にわたって安定していることが要求されることから、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成果を参考にして、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(表-1)を開発した。

(2) 硬化機構

人工軟岩材料の強度は、固化材及び泥岩スラリー中に僅かに含まれる粘土鉱物の水和反応によって発現し、その概要は図-1に示すとおりである。

すなわち、初期の段階で、固化材に含まれる石膏の効果により多量のエトリンガイト(針状の結晶)が生成し、これが材料の骨格を形成する。その後、ゲル状の珪酸カルシウム水和物等が生成し、エトリンガイトにより形成された骨格の周辺を充填して、時間の経過とともに緻密な構造となっていく。

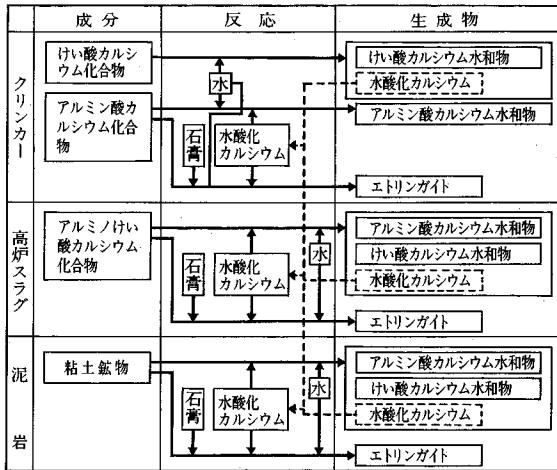
また、人工軟岩材料の硬化後の物性は、セメント系材料と同様に、西山泥岩スラリー、砂及び固化材の配合条件によって決定される。

(3) 長期的な安定性

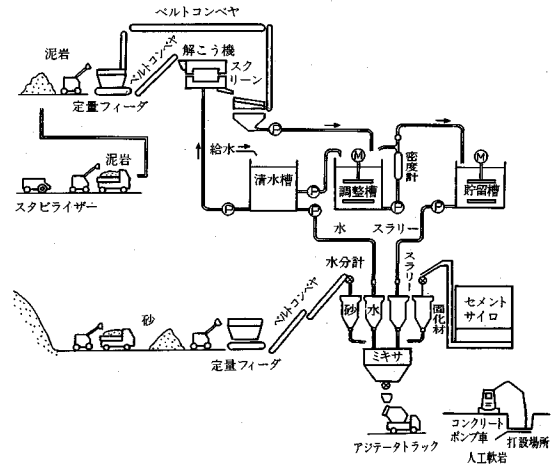
人工軟岩材料の長期的な安定性について、水和反応機構及び水和生成物の安定性、構成材料(泥岩、砂)の安

表一 1 固化材の構成割合と化学成分

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



図一 1 人工軟岩材料中の水和反応



図一 4 人工軟岩材料の製造工程

定性、物性の長期的変化、環境要因に対する安定性等の観点から、種々の検討を実施した (図一 2 参照)。

図一 3 は、人工軟岩材料の物性の長期的変化に関して実施した長期材令にわたる一軸圧縮強度試験結果である。同図から、人工軟岩材料の強度発現は、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現象は認められない。また、X 線回折や電子顕微鏡観察による水和生成物の追跡調査、各種の薬液 (硫酸ナトリウム、塩化ナトリウム等) を用いた浸漬試験結果においても、当該材料の長期的な安定性が確認されている。

(4) 製造設備

人工軟岩材料の製造工程は、図一 4 に示すとおりである。

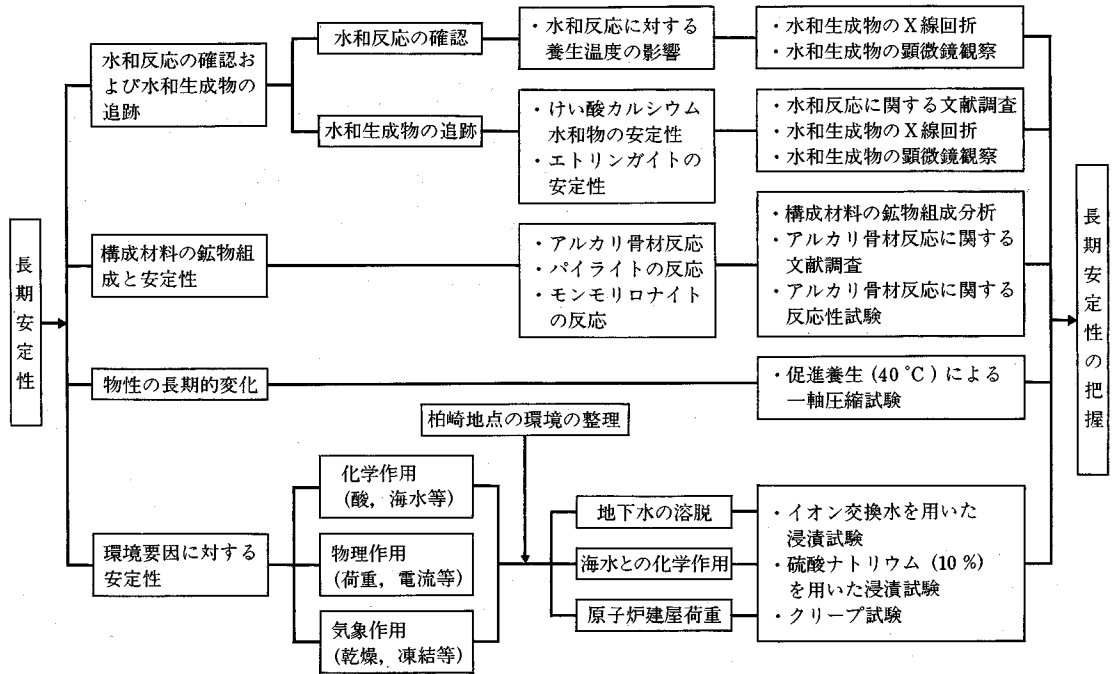
人工軟岩材料の製造プラントは、通常の生コンクリートの製造に用いるバッチ式コンクリートミキサーと泥岩の解こう機を組み合わせたものであり、泥岩の解こう機は、砕石の角をとる骨材研磨機を改良したものをを用いることができる。

3. 柏崎刈羽原子力発電所基礎岩盤への適用

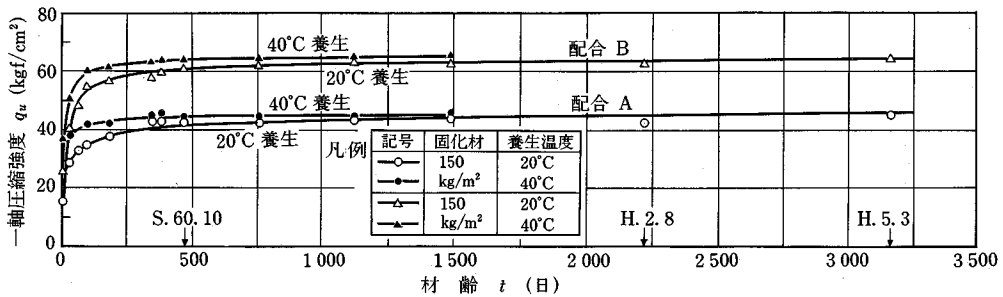
柏崎刈羽原子力発電所は、新潟県柏崎市と刈羽郡刈羽村にまたがる約 420 万 m² の敷地を有し、110 万 kW 5 基、135.6 万 kW 2 基、合計 7 基 821.2 万 kW の発電設備が計画されている。既に、1～5 号機が運転中であり、現在 6, 7 号機の建設が進められている。

(1) 現地における実証試験

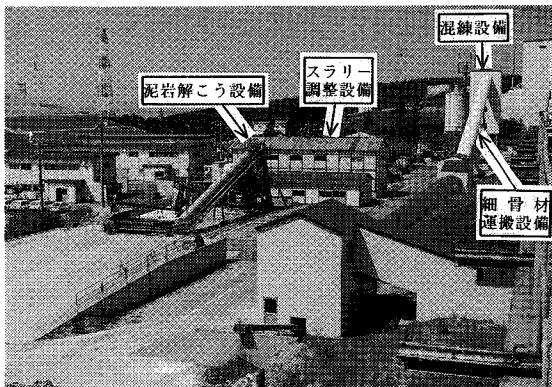
今回開発した人工軟岩材料を、柏崎刈羽原子力発電所の建設工事に適用するため、同発電所構内に人工軟岩材料製造プラント (120 m³/h) を設置した (写真一 1)。そして、実際に製造した材料をタワークレーン等の仮設備基礎や重要度の低い一般構造物の基礎岩盤等に適用し、種々の現地実証試験を実施した。その結果、製造工程における品質管理としては、泥岩スラリーの解こう度及び密度管理を重点的に実施することにより、通常の生コンクリートと同程度の一定した品質が得られることが明らかとなった。また、施工箇所からボーリングサンプリングした試料による各種試験結果によっても、施工された人工岩盤が所定の品質を得ていることが確認された。



図一 人工軟岩材料の長期安定性検討フロー



図一 人工軟岩材料の一軸圧縮試験結果



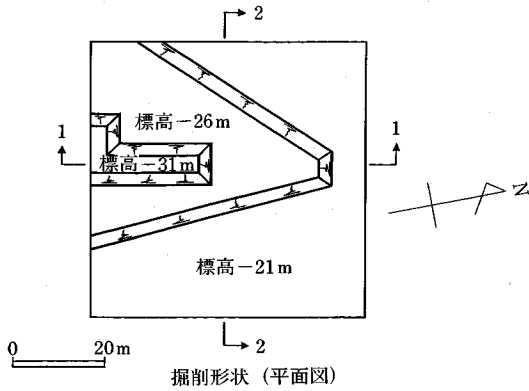
写真一 人工軟岩材料製造プラント

(2) 7号機原子炉建屋基礎岩盤への適用

a) 経緯

原子力発電所の建設に際しては、建設予定地に関して、ボーリング調査、試掘坑調査等を実施し、地質・地質構造及び岩石・岩盤物性を把握するとともに、これらを踏まえて基礎岩盤の地震時安定性について検討する必要がある。

柏崎刈羽原子力発電所6、7号機の増設の際に実施した各種調査の結果、7号機原子炉建屋直下の基礎岩盤である西山層中には、浅部に小規模な断層(L1及びL2断層)が分布することが明らかとなり、これらの小断層の形態、性状を詳細に把握するために、さらに試掘坑を掘削して調査を行った。



掘削形状 (平面図)

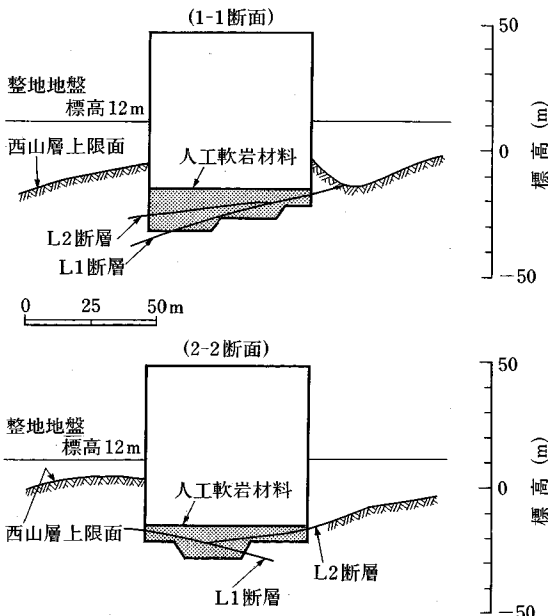


図-5 人工軟岩材料による置換形状

その結果、断層そのものは原子炉建屋の地震時安定性上問題のないことが確認されたものの、原子炉建屋の施工に際しては、建屋直下部の試掘坑について確実に処理する必要があるため、図-5に示すようにL1及びL2断層で囲まれた土塊を試掘坑も含めて取り除き、その範囲(約43,000m³)を新たに開発した人工軟岩材料で置き換えることとした。

人工軟岩材料での置換に当たっては、硬化後の変形特性が周辺の西山泥岩と著しく異なった場合には、地震時における基礎岩盤全体の安定性に影響を与えることから、その物性、置換形状等を考慮して、基礎地盤全体の地震時安定性の検討を行うとともに、施工時に発生する温度応力についても検討を行い、いずれも問題ないことを確認している。

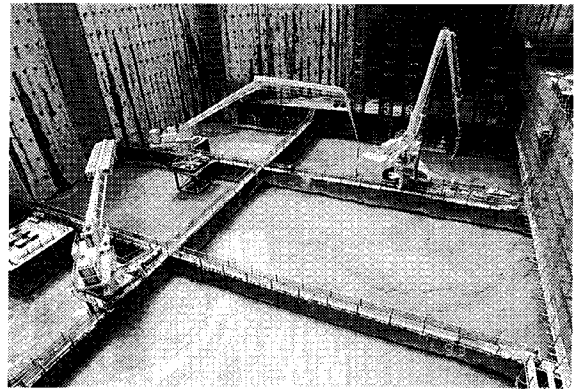


写真-2 人工軟岩材料の施工状況

なお、原子炉建屋基礎岩盤を人工軟岩材料で置き換えることについては、原子力発電所の基本設計の段階で実施される国の安全審査においても、材料の物性、長期にわたる安定性等について厳格な審査が実施され、置換材料として十分適合するものであるとの結論が得られている。

b) 施工

7号機の建設は、国の設置許可を得て平成4年2月に開始し、平成9年7月に運転を開始する予定であり、人工軟岩の施工は平成5年3月～6月にかけて実施した。

当該工事に用いた人工軟岩材料の配合は、西山泥岩230kg/m³、砂700kg/m³、固化材180kg/m³、水597kg/m³であり、1日当たり約800m³の人工軟岩材料を前述の構内製造プラントからトラックアジテータを用いて打設場所まで運搬し、3台のディストリビューターによって、1回の打設高さ約0.5～0.7mで施工した(写真-2)。

また、施工に当たっては、一般のコンクリートと比較して単位水量が大きいことから、特に乾燥収縮に注意し、シート養生及び散水養生により打設面を常に湿潤状態に保った。

c) 品質管理

当該材料を最も重要度の高い原子炉建屋基礎地盤に適用することから、製造・施工に当たっては、生コンクリート製造における品質管理(JASS 5N参照)と同等の管理を実施することとし、各構成材料の品質管理、フレッシュモルタルの品質管理及び硬化後の品質管理について、表-2に示す項目を設定した。

特に、人工軟岩材料の置き換えを踏まえて事前に実施した基礎地盤全体の地震時安定性の検討においては、人工軟岩材料の長期的な物性変化を考慮し、物性値は幅を持たせて設定したことから、基礎地盤の安全性が確認されている物性値の範囲を逸脱しないように物性の管理を実施する必要がある。すなわち、一般の生コンクリート製造の際には、硬化後の品質として一軸圧縮強度の下限

表-2 人工軟岩材料の品質管理項目

管理対象	品質管理項目
構成材料	固化材 比表面積，凝結，安定性，圧縮強度，酸化マグネシウム，三酸化硫黄，強熱減量，酸化カルシウム
	砂 粒度，比重，吸水率，有機不純物，アルカリシリカ反応性，洗い試験によって失われる量，粘土塊量，塩分，安定性，表面水率
	泥岩 比重，液性限界，塑性限界，有機不純物，泥岩スラリー密度，泥岩スラリー粒度
	水 上水道水を使用
フレッシュモルタルの性状	フロー値，単位体積重量
硬化後の性状	一軸圧縮強度，三軸圧縮強度，変形係数

値を設定して硬化後の物性を管理するのが一般的であるが，今回の工事では，上限値についても管理基準値を設定し，ある範囲内（1回の試験結果 25.5～88.1 kg/cm²，3回の平均値 30.0～76.6 kg/m³）に物性値が入っていることを確認することとした。

図-6 は，原子炉建屋基礎岩盤の置き換えに用いた人工軟岩材料の一軸圧縮強度試験結果であり，目標とした物性を得ることができた。

(3) その他の適用例

今回開発した人工軟岩材料は，周辺の岩盤と同等の物性を有し，長期的に安定していること以外に，

- ① フレッシュモルタル時の性状は，流動性に優れ，ブリージングもほとんどない等施工性に優れている
- ② 他工事で発生した掘削残土を有効利用することから経済的である

こと等から，7号機原子炉建屋基礎地盤の置き換え工事以外にも，配管周辺の埋め戻し，試掘坑の閉塞等，複雑で狭隘な部分の埋め戻し工事等にも採用している。

柏崎刈羽原子力発電所での人工軟岩材料の現在までの使用実績は約 43 万 m³となっている。

3. おわりに

柏崎刈羽原子力発電所の基礎岩盤である西山泥岩を対象として開発した人工軟岩材料は，スラリー化した西山泥岩に砂と固化材を混合し硬化させるソイルモルタルであり，物性，長期安定性，現地適用性等に関する検討結果により，重要構造物基礎地盤の置き換え材料として適

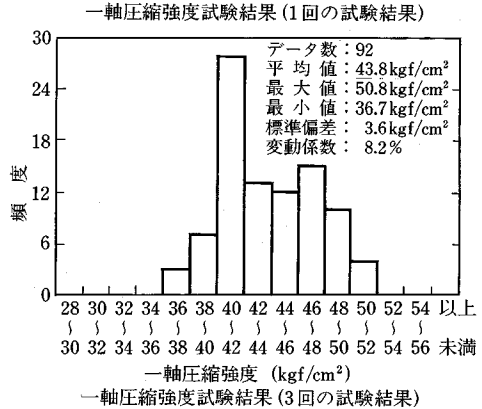
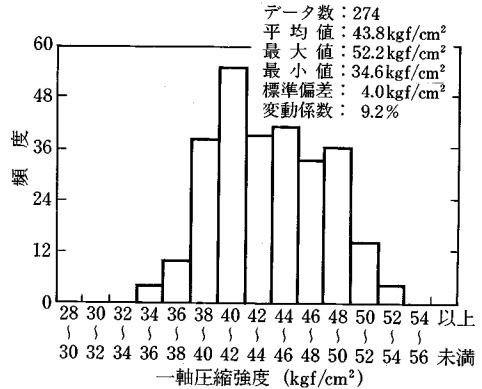


図-6 人工軟岩材料の一軸圧縮強度試験結果

切なものであるとの結論を得た。そして，国の安全審査を経た後，7号機原子炉建屋基礎岩盤の置き換え材料として適用した。

当該材料に関しては，柏崎地点のみならず，今後，他地点へも積極的に適用していくために，西山泥岩以外の各種粘性土を用いた人工軟岩材料の検討，練り混ぜ水として海水を用いた人工軟岩材料の検討等を実施しており，その成果の一部は，随時土木学会年次学術講演会等で発表している。

参考文献

- 1) 高尾誠他：粘性土が人工軟岩に及ぼす影響(その1)，土木学会第 49 回年次講演概要集，1994。
- 2) 古沢晴彦他：粘性土が人工軟岩に及ぼす影響(その2)，土木学会第 49 回年次講演概要集，1994。

(1995.7.12 受付)