

排煙脱硫石こうによるのり面安定処理に関する実用化研究

PLACTICAL STUDY ON BANKING SLOPE STABILIZATION BY THE USE OF GYPSUM PRODUCED BY FLUE GASS DESULFURIZATION

いな 稲 まつ 松 とし 敏 お 夫* いま 今 こし 越 しげる 茂**
 かな 金 だ 田 あき 秋 お 雄*** わた 渡 なべ 辺 りよう 亮 いら 一***
 とり 鳥 い 居 かず 和 ゆき 之**** やま 山 ぎし 岸 かず 一 たか 隆*****

1. まえがき

近年、火力発電所、製鉄所、化学工場などにおいて発生する亜硫酸ガスによる大気汚染の防止対策として、排煙脱硫装置の導入が積極的に進められてきている。これに伴って副生産される排煙脱硫石こう（以下、排脱石こうという）の供給量が次第に増加し、今日では供給過剰となり、昭和55年度末には約600万トンの過剰在庫となるものと予想されている。このような現状において、排脱石こうの有効利用に関する研究が関係各方面で盛んに行われており、その有効利用の一環として、北陸電力㈱、金沢大学、北電産業㈱の3者共同で、火力発電所において副生産される排脱石こうをのり面安定処理剤として利用することが計画された。

排脱石こうは通常10%程度の自由水を含む2水石こう(CaSO₄·2H₂O)として生成されるので、経済的にはそのままの状態でも有効に利用することが最良であると思われる。

本研究は、排脱石こうをそのまま2水石こうの状態で消石灰又はセメントとともに対象土に添加して、石こう-石灰系又は石こう-セメント系ののり面安定処理剤への有効利用、実用化をはかるものである。本報告はこれまでの一連の研究に従って、基礎的研究、第1次現場試験施工、第2次現場試験施工の3段階に分け、更に本研究の実用化に

表一 排脱石こうの化学成分

CaSO ₄ ·2H ₂ O	96.71 %
CaSO ₄ ·1/2H ₂ O	0.06 %
MgSO ₄	1.23 %
SiO ₂ +C	0.53 %
R ₂ O ₃ (Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	1.514%

*北電産業(株) 取締役土木部長 技術士
 **北電産業(株) 土木課長
 ***北電産業(株) 土木部
 ****金沢大学助手 工学部
 *****北陸電力(株) 土木部副課長

表一 使用土の物理的性質 (基礎的研究)

	粘性土 I	粘性土 II	砂質土
砂 分 (%)	27.4	32.8	76.5
シルト 分 (%)	44.6	62.2	17.5
粘 土 分 (%)	28.0	5.0	6.0
液性限界 (%)	59.8	54.3	—
塑性限界 (%)	34.7	31.0	—
塑性指数	25.1	23.3	—
最適含水比 (%)	32.5	28.1	23.4
最大乾燥密度 (t/m ³)	1.294	1.456	1.570
比 重	2.741	2.653	2.677

ついて施工性及び経済性の検討を加えたものである。なお、本研究において使用した排脱石こうの化学成分は表一のとおりである。また、使用した各添加剤を次のような記号によって示す。G': 排脱石こう, C: 普通ポルトランドセメント, L: 工業用消石灰

2. 基礎的研究

基礎的研究において使用した土の物理的性質は表一のとおりである。排脱石こうと消石灰又はセメント添加による粘性土の安定処理の有効性が柳場・川村らによって確かめられている¹⁾。これによると、粘性土の消石灰又はセメント安定処理において添加する消石灰又はセメントの1/2から1/4を乾石こう(2水石こうを150℃の炉中にて24時間乾燥させたもの)によって置換すると、粘土分の多いものほど一軸圧縮強度の変化は小さく、2水石こう(乾燥させないもの)のまま用いても、強度が大きく低減することはない。また、粘土分の少ない粘性土において、2水石こうを使用した安定処理土では乾石こう使用の場合よりもかなり強度が小さく、その強度差は砂質土の処理土において更に大きくなる。したがって、排脱石こうを2水状態のまま使用するという本研究の立場からいえば、粘土分の多い

No. 1146

粘性土においてより効果的であると思われる。

排脱石こうは消石灰とともに粘性土に添加すると、粘性土中のアルミナ分と反応してセメントパチルス ($3\text{CaSO}_4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) が生成される。このセメントパチルスは溶解度が小さく、また土中の水分を多量に固定し固化するため、降雨侵食抑制の効果が期待できる。更に、セメントとともに添加した安定処理土においても、セメントの水和反応により生成される珪酸カルシウム水和物 (C-S-H gel) の化学的結合力により、ち密な表面構造を作り出すことから、降雨侵食抑制の効果が期待できる。以上のことから、排脱石こうによる安定処理剤をのり面安定処理剤として利用するために、降雨実験装置を製作し、土質安定剤の少量添加による安定処理土の降雨侵食抑制の効果を調べた²⁾。その評価方法としては、供試体の単位面積当たりの土粒子損失量 (g/cm^2) をもって降雨侵食に対する抵抗性を評価した。その結果、粘性土 I の消石灰及びセメントによる安定処理の降雨侵食抑制効果は添加量 (添加剤の使用土の乾燥質量に対する割合) 2.5% では同程度であり土粒子の損失はほとんど見られない (図-1, 2)。また、セメントとの混用において排脱石こう添加の効果が発揮され、7日材令以降の侵食量を減らすことができる (図-3)。砂質土においては、2.5% 程度の消石灰添加では降雨侵食抑制効果はほとんど期待できないが、排脱石こうと混用することによって使用石灰量が 2.5% でも土粒子の損失量は激減している (図-4, 5)。このように、排脱石こうを添加した安定処理は、適用する土質及び添加剤の配合を適切に選択しさえすれば、消石灰及びセメントのみの安定処

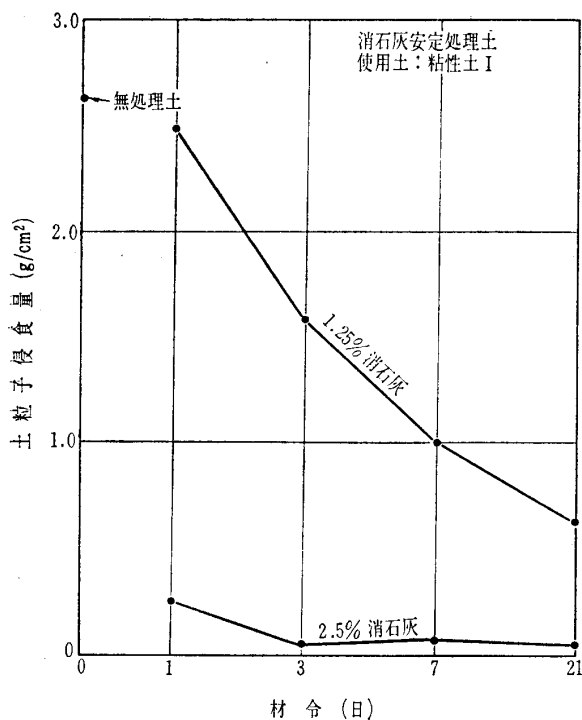


図-1 消石灰安定処理土 (粘性土 I 使用) の侵食量と材令との関係

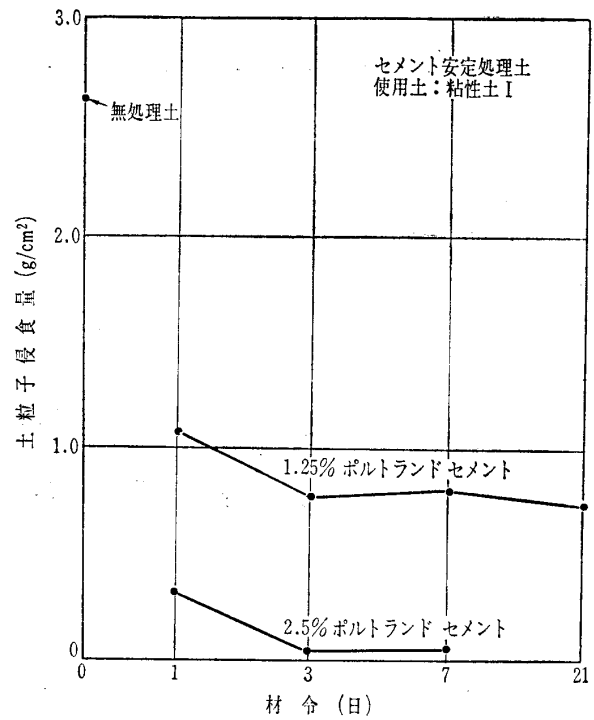


図-2 セメント安定処理土 (粘性土 I 使用) の侵食量と材令との関係

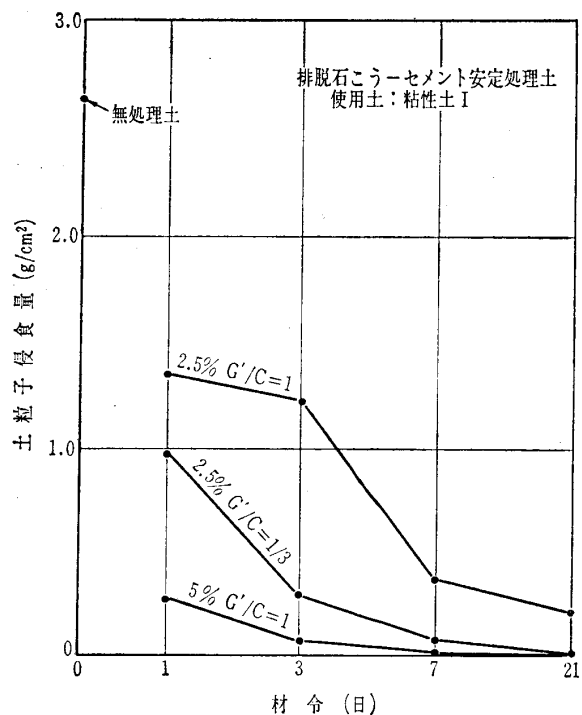


図-3 排脱石こう-セメント安定処理土 (粘性土 I 使用) の侵食量と材令との関係

理に比べて処理効果は大きくなり、のり面安定処理に有効に利用できると思われる。なお、この基礎的研究において排脱石こうと消石灰又はセメントとの配合比は 1:1 から 1:3 が適当であるという結果を得ている。

表-3 使用土の物理的性質 (現場試験施工)

	第1次現場試験施工	第2次現場試験施工
砂 分 (%)	24.0	3.2
シルト 分 (%)	73.7	62.8
粘土 分 (%)	2.3	34.0
液性 限界 (%)	71.8	87.1
塑性 限界 (%)	45.8	36.5
塑性 指数	26.0	50.6
最適含水比 (%)	32.0	31.2
最大乾燥密度 (t/m ³)	1.233	1.370
比 重	2.633	2.684

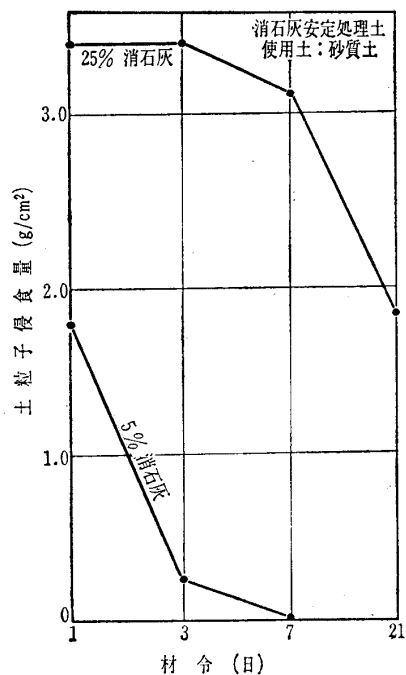


図-4 消石灰安定処理土 (砂質土使用) の侵食量と材令との関係

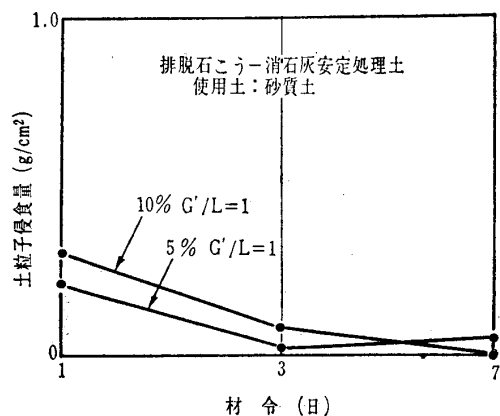


図-5 排脱石こう-消石灰安定処理土 (砂質土使用) の侵食量と材令との関係

3. 第1次現場試験施工 (北陸電力(株)加賀変電所敷地内)

排脱石こうののり面安定処理剤への利用に関する基礎的研究の成果に基づき、のり面保護工としての強度と植生を主目的とした現場試験施工を実

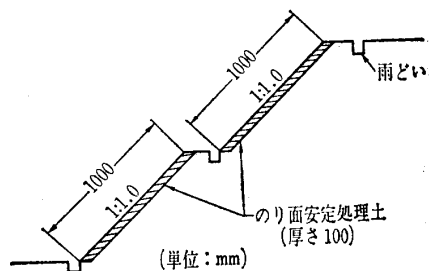


図-6 第1次現場試験施工における盛土標準断面

施した。なお、施工規模はのり面積にして約 50 m² である。試験期間：昭和53年 5月15日～昭和54年 5月15日

3.1 試験材料

使用した土試料は、現地においてのり面整形時に掘削した土で、少し天日乾燥した後シートで表面乾燥を防止した。使用土の物理的性質は表-3に示すとおりである。また、排脱石こうは付着水を含む2水状態のものであり、消石灰又はセメントと組み合わせて安定処理剤として使用した。

3.2 試験方法

(1) 降雨侵食試験

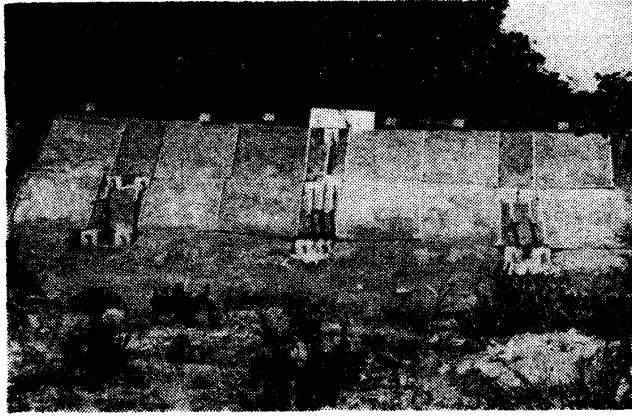
図-6に示すように、のり面を 1:1 に整形し石こう-石灰系及び石こう-セメント系の安定処理についてそれぞれ排脱石こうと消石灰又はセメントとの配合比を 1:1、添加量を 2.5, 5, 10% と変化させ、使用土の最適含水比で最大乾燥密度となるように締め固めて安定処理を施し、のり面に設置した流土集積ますに流出した土粒子の単位面積当たりの乾燥質量をもって、無処理のり面との比較を行った。また、施工においては練り板による手練りで人力土羽打ちによって十分締め固めを行った。なお、施工後の降雨量測定には現場に設置した雨量計により行った。

(2) 植生試験

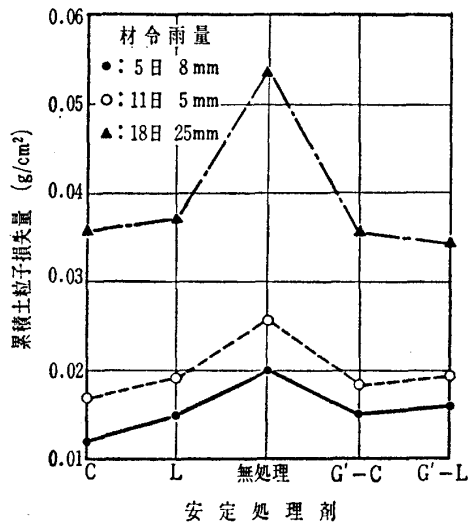
この試験は排脱石こう、消石灰及びセメント添加による植物への影響を調べるために、降雨侵食試験と同様なのり面整形を行い、配合比 1:1 で添加量を 2.5, 5, 10% と変化させて安定処理を施し、施工後長期間発育状態を観察した。なお、植生にはラスゲン (種子安定剤入芝生造成資材) を用い、筋芝方式で行った。

3.3 試験結果と考察

降雨侵食試験において、施工後2か月経過した無処理区画は表面が風化によって肌荒れが著しく、のり表面の約20%の土粒子損失がみられたのに対して、安定処理区画はいずれも施工完了時の状態とあまり変化はみられず、安定処理土はセメントパチルスの生成による耐侵食性の発揮が認められた (写真-1)。また、図-7に示すように、排脱石こう添加 (添加量: 5%, G'/L=G'/C=1) と消石灰又はセメント単味処理 (添加量: 5%) との比較において、



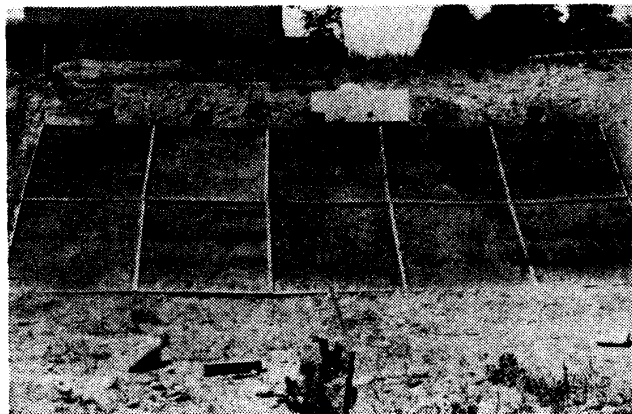
写真一 降雨侵食試験におけるのり面安定処理 (施工後2か月)



図七 各種安定処理土 (添加量: 5%) の侵食量

施工後5日目(5月30日)では排脱石こう添加の処理効果はあまり発揮されず単味処理よりも土粒子損失量は若干多かったが、11日目(6月5日)以降は単味処理と同程度の処理効果を示した。

植生に関しては、添加量5%以下の安定処理区画では無処理区画とほとんど変わらず発育成長したのに対して、添



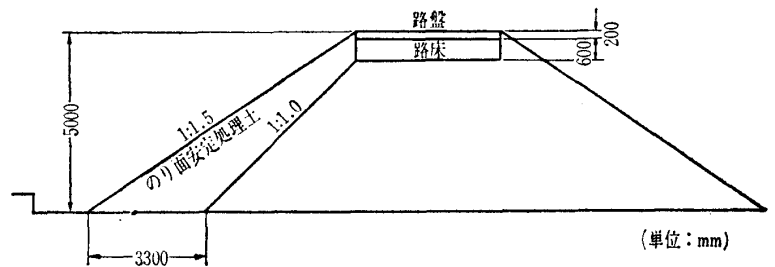
写真二 植生試験におけるのり面安定処理 (施工後2か月)

加量10%になるとほとんど発芽しなくなった。特に石こう-セメント系の方が発育はよくなかった(写真-2)。したがって、実際の盛土工事における植生を考慮した添加量は5~10%が適当であると思われる。

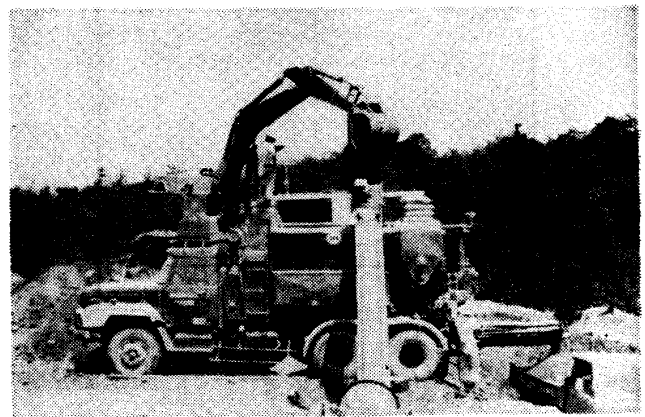
4. 第2次現場試験施工(北陸電力(株)中能登変電所建設予定地内)

基礎的研究及び第1次現場試験施工の成果に基づき、機械施工によって試験盛土にのり面安定処理を施し、各種安定処理の比較を行うとともに、従来工法との比較によって施工性及び経済性の検討を行った。なお、施工規模はのり面積にして約400m²である。試験期間:昭和53年7月25日~昭和54年5月15日

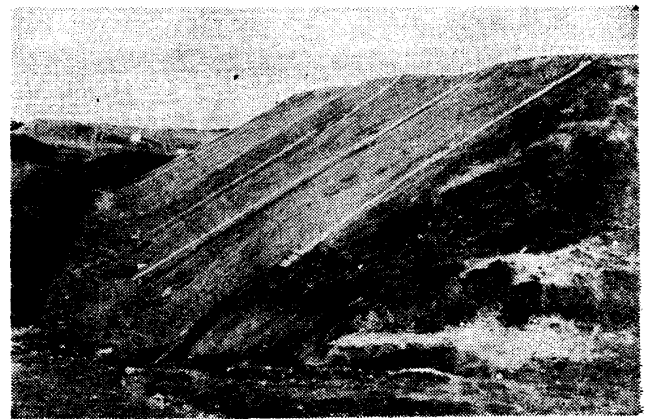
4.1 試験材料



図八 第2次現場試験施工における盛土標準断面



写真三 連続練りミキサー



写真四 第2次現場試験施工におけるのり面安定処理 (施工後6か月)

使用した土試料は盛土周辺の土で、ブルドーザーで細かくはぐように掘削し天日乾燥後集積した。使用土の物理的性質は表-3に示すとおりである。また、添加剤には前回と同様、排脱石こう、消石灰及びセメントを組み合わせて使用した。締固めには土試料の含水比は最適含水比より若干高いほうがよいが、高含水比の場合は消石灰を含水比に応じて生石灰に置き換え、低含水比の場合は試験材料の混合時に散水し、含水量の調整をはかることとした。

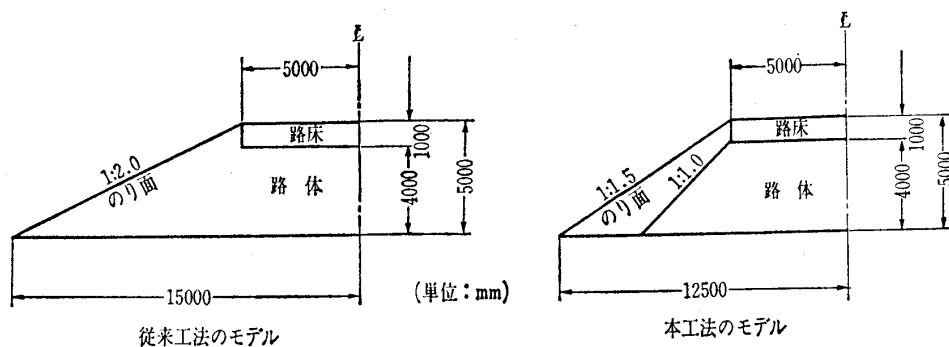


図-9 従来工法及び本工法の経済比較におけるモデル

表-5 経済比較における従来工法及び本工法の使用土

区 分	使 用 土	
	従 来 工 法	本 工 法
路 体	切土流用土	切土流用土
路 床	良質土盛土	安定処理土 (添加量 5%)
の り 面	切土流用土	安定処理土 (添加量 5%)

安定処理工・フローチャート	建 設 機 械	仕 様	摘 要
切崩し	ブルドーザー	11t	ミキサーに投入 ダンプトラックに積込み
集 積	トラクターショベル	ホイール式1.4m ³	
混 合	連続練りミキサー	吐出能力20m ³ /h	
積 込 み	トラクターショベル	ホイール式2.1m ³	
運 搬	ダンプトラック	10t	土羽打ち
敷 なら し	ブルドーザー モーターグレーダー	11t 3.7m	
締 固 め	タイヤローラー バックホー	8~15t 土羽打ち仕様11t	

表-4 施工法

4.2 試験方法

図-8に示すように、直高5mの試験盛土をのり面勾配1:1に整形し、添加剤は添加量5、10及び20%、配合比1:1及び1:3で各種組み合わせ、安定処理を施した。更に、仕上げのり面勾配を1:1、1:1.3、1:1.5と変化させて施工性を検討した。また、各試料の混合には連続練りミキサー（混合能力：20m³/h）を使用した（写真-3）。のり面は3日間シート覆い養生を行いその後種子吹付けを行った。なお、施工法の概略を表-4に示す。

4.3 試験結果と考察

この試験は施工性及び経済性の検討を行うことが主目的であり、強度的には第1次現場試験施工と同様に各種安定

表-6 経済性の検討

	従 来 工 法 (路体・のり面切土流用)			本 工 法			備 考	
	数 量	単価 (円)	金額 (円)	数 量	単価 (円)	金額 (円)		
建 設 費	路 体			56.0m ³	1 400	78 400	運搬距離 5 km	
	路 床	100.0m ³	1 400	14 000	10.0m ³	2 800		88 200
	の り 面				21.5m ³			
	土 羽 打 ち	22.5m ²	230	5 200	18.0m ²	230	4 200	施工性、待機日
	そ の 他	20%		29 000	10%		17 000	
	諸 経 費	20%		34 800	20%		37 600	
	小 計			209 000			225 400	
用 地	32.0m ²	6 000	192 000	27.0m ²	6 000	162 000		
計			401 000			387 400		
維 持 管 理 費	のり面補修費	9.0m ²	2 000	18 000	0	0	年2回 2% 10年間 計40%	
	除 草 費	67.5m ²	70	4 700	0	0	年1回 3年間	
	諸 経 費	20%		4 500	0	0		
	計			27 200			0	
合 計			428 200			387 400	従来工法 の90%	

処理はいずれも十分効果を発揮した。また、植生についても前回と同様、無処理区画に比べて添加量が5, 10, 20%となるにつれて発育はよくなかった。写真-4は安定処理完了後6か月経過したのり面状態を示したものである。

本工法は排脱石こう、消石灰及びセメントを添加し、連続練りミキサーによって均質な混合土を得るが、混合土はかなり細粒となり土粒子表面が乾燥してくる。したがって、仕上げのり面があまり急勾配では施工困難となることもあり、本工法の効果と施工性を考慮して、のり面勾配は1:1.5くらいが妥当であると思われる(図-8)。また、土と添加剤の混合時からすでに化学反応が進んでいるため、むらのないのり面を仕上げるように迅速な施工が望まれる。更に、締固めにおいては、混合土の含水量が強度及び耐侵食性を左右することから、施工開始時より常に含水量の調整に気を配らなければならない。

施工性についての今後の問題点としては、使用土の含水量があげられる。すなわち、本研究の対象土が粘性土であるため、使用土の含水比が最適含水比を大きく下回るようなことはないとしても、上回ることは予想される。したがって、高含水比の場合、安定処理可能な含水比の適用範囲を確立することによって、これまでの工法より一段と施工性が向上すると思われる。

5. 本工法の効果

本工法の効果として次のようなものがあげられる。

- (1) 粘性土中に排脱石こう、消石灰及びセメントを添加することによって、セメントパチルスの生成及びポズラン反応による強度増加及び耐侵食性を発揮し、のり面の安定処理が可能となる。
- (2) セメントパチルス及びポズラン反応による土の含水量調節、コンシステンシーの改善によって施工性が一段と向上する。
- (3) また、通常ののり面勾配より急にすることができ、土工量が少なくてすむ。
- (4) 更に、のり面が固化するためのり面補修が少なくてすむ、添加量によってはのり面の植生を制御し、回数を少なくすることもできる。

6. 経済性の検討³⁾

図-9及び表-5に示すように、路体及び法面は切土流用、土路床は良質土を使用し、のり面勾配を1:2.0とする従来工法と、路体は切土流用土、路床及びのり面は添加量5%の安定処理土を使用し、のり面勾配を1:1.5とする本工法との経済比較を行った。表-6は両工法の経済比較として試算的に行ったものであり、本工法は建設費では従来工法の97%、維持管理費を含めると90%となり、経済的にも十分満足の一つと思われる。なお、路床、路体、のり面のすべてを良質土に置換する場合においては、本工法の

適用効果と比較すると、本工法は従来工法の約65%の工事費となる。

7. ま と め

以上のように、本研究は従来のセメント安定処理及び石灰安定処理を一步進んで排脱石こうの土質安定処理剤としての有用性を発揮させたものである。また、本工法は材料の混合において、連続練りミキサーを使用することにより、従来の路上混合方式に比べて非常に均質な混合土が得られ、より安定な土構造物の築造が可能であるばかりでなく、経済性の検討にみられるように経済的にも満足の一つとなり得る。しかし、前述したように砂質土及び粘土分の少ない粘性土においては、添加剤の配合比及び添加量によってその処理効果はかなり異なり、本研究はある程度土質に制限があると思われる。また、粘土分の多い粘性土の場合でも、添加剤の配合比及び添加量の決定においては、室内実験によって十分検討する必要がある。

8. あとがき

産業副生産物である排脱石こうを有効に利用する目的で計画された本研究も実用化研究の段階にはいることができた。今後の課題としては、使用土にある程度制限を受けることから、土質の適用範囲を確立し、それぞれの土質に応じた添加剤の配合比及び添加量の適用範囲を確立すること、又はこうした土質安定処理においては、より大きな強度増加が望まれ、本研究に使用した安定処理土に更にアルミナの供給源となる材料(例えば高炉スラグ)を添加して、強度増加及び耐侵食性の向上をはかる研究などがあげられる。更に、本報告においては排脱石こうののり面安定処理剤への利用についてのみ述べたが、今後は路盤、路床、路体更に基礎地盤をも含めた土質安定処理も可能であり、排脱石こうを更に有効に利用できると思われる。また、このように産業副生産物である排脱石こうの有効利用をはかることは、省資源の見地からしても有意義なことと思われる。

最後に、本研究を進めるに当たり、終始ご指導くださった金沢大学の柳場教授、川村教授の両氏に心から感謝申し上げますとともに、北陸電力(株)土木部、福井火力発電所及び加賀変電所の関係各位、並びに現場試験などにご協力いただいた方々に心から感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 柳場重正・川村満紀・鳥居和之・高瀬 博(1978): 脱硫副生産物による土質安定処理, 土と基礎, Vol. 26, No. 5, pp. 11~16.
- 2) 鳥居和之・川村満紀・助田佐右衛門(1978): 脱石灰膏—セメントまたは石灰安定処理土の降雨侵食, 土木学会第33回年次学術講演会講演概要集第3部, III-155, pp. 292~293.
- 3) 建設物価調査会積算委員会編(1978): 建設工事標準歩掛, (財)建設物価調査会.

(原稿受理 1979. 6. 4)