

山陰道「三隅・益田道路」における脆弱な泥岩を流用した盛土の施工報告

中国地方整備局 浜田河川国道事務所 特別会員 ○古本 智識
大日本コンサルタント(株) 正会員 山下 寛

1. はじめに

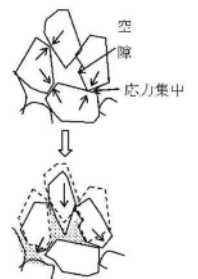
山陰道「三隅・益田道路」の終点に位置する遠田 IC 付近には、スレーキング性を有する新第三紀中新世の泥岩が広域にわたって出現している。事業の効率性、コスト削減の観点から、泥岩を盛土の路体材として流用することを検討しているが、処理すべき切土量は約 26 万 m^3 にもおよび、いかに効率的に安定した品質の盛土材料に仕上げるかが課題となった。本稿では主に盛土工事に先行して実施した室内試験・試験盛土による検証と、岩塊破碎及び添加材混合のための工法選定について述べるものである。

2. スレーキング性岩の基本的性質

スレーキングとは乾燥湿潤の繰返しによる風化細粒化現象であり、図-1に示すように、初期状態に生じている空隙部に風化細粒化した岩塊が移動し、全体として脆弱化する現象である。性質として、掘削時に硬く（硬岩・軟岩）、塊状で産出するが、盛土材料としてこれを使用した場合、「施工中にほとんど細粒化してしまう」ものや、「施工中には塊状であるが、時間の経過とともに徐々に細粒化する」ものが存在する。対象の泥岩は后者であり、スレーキング進行が著しく（写真-1, 2）、盛土完成後に長期に亘る圧縮沈下、舗装へのクラック発生、地震時の盛土法面崩壊などが懸念される。



写真-1 岩塊（掘削直後）

写真-2 スレーキング進行状況
（露岩 13 日後）図-1 泥岩盛土の
圧縮沈下※文献 1)

3. 室内試験による盛土材の適用性判定

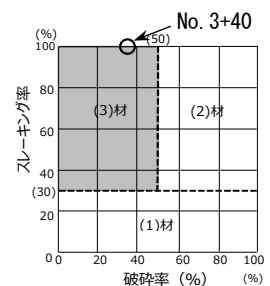
スレーキング性を有する泥岩を盛土材として流用する場合の一般的留意点として、i) 盛土中の岩塊が乾湿繰返しにより細粒化して、圧縮沈下が生じる ii) 細粒化したものは 2~5% 程度の含水比の増加でも泥濘化して、十分なトラフィカビリティが確保できなくなる iii) 浸水すると強度低下し、盛土の安定に必要なせん断強度を維持できなくなること、が挙げられる。道路土工指針等を参考にして、各項目に対する管理規準値を次のように定めた。

i) 空気間隙率 15% 以下（脆弱性岩材の圧縮ひずみが小さな一定値となる閾値） ii) コーン指数 $q_c=400\text{kN/m}^2$ 以上（ブルドーザーのクローラー荷重） iii) レベル 2 地震時の必要せん断強度 $C=90\text{kN/m}^2$ 以上（盛土安定解析結果）
〔盛土材の適用性を判定するため、実施すべき室内試験項目として以下を設定した※文献 2), 3), 6).〕

【室内試験】①物理試験土粒子の密度試験（JIS A 1202）、土の含水比試験（JIS A 1203）、土の粒度試験（JIS A 1204）、土の液性限界試験、土の塑性限界試験（JIS A 1205）②突き固めによる土の締固め試験（JIS A 1210）③ポータブルコーン貫入試験（JGS A 1431）④岩石の促進スレーキング試験方法（NEXCO 試験法 110-2015）⑤破碎性判定のための岩石の破碎試験方法（NEXCO 試験法 109-2015）⑥三軸圧縮試験（CU 又は CUBar）（JGS 0522~0523）

※スレーキング性材料で三軸圧縮試験を行う場合の供試体は、乾湿繰返しを行う「スレーキング性材料の三軸試験の供試体作成方法」（NEXCO 試験法 125-2013）に基づく（供試体作成はスレーキング率が概ね 70% 以上の材料を対象）

④及び⑤はスレーキング性材料が盛土材料として問題となる場合の指標となるもので、破碎率及びスレーキング率を基に（1）材～（3）材まで 3 つに区分する（図-2）。一般的には、十分な排水処理を行うことにより、（1）材は破碎転圧が可能、（2）材は破碎転圧＋安定処理で盛土材として流用が可能で、（3）材は原則適用を避けることが多いとされている。三隅・益田道路の泥岩の室内試験結果を表-1 に示す。切土量の大半を占める本線 No. 3+40 付近では、スレーキング率 100%、破碎率 37.2% という結果であり、（3）材と区分された。盛土材として流用できるように、次段階として試験盛土を実施して盛土材としての適用性を検証する必要があると判断した。

図-2 脆弱岩材料の区分
※文献 1)

キーワード 泥岩、スレーキング、路体材、試験盛土、生石灰、破碎混合

連絡先 〒697-0034 浜田市相生町 3973 国土交通省 中国地方整備局 浜田河川国道事務所 工務課 TEL 0855-22-3147

表-1 室内試験結果（無処理）

測点	自然含水比 Wn (%)	粒度組成 (%)			コンシステンシー (%)			締固め特性		施工含水比 (品質管理) pd90(%)	スレーキ ング率 (%)	破砕率 (%)	自然含水比 時のqc (kN/m ²)	土の三軸圧縮試験	
		礫	砂	シルト ・粘土	WL	Wp	IP	pdmax (g/cm ³)	Wopt (%)					Cu (kN/m ²)	Φu (度)
本線 No.2+60付近下	32.71	1.6	33.3	65.1	46.0	19.7	26.3	1.703	16.4	24.6	—	—	225	29	14.0
本線 No.3+40付近	25.64	2.1	38.3	59.6	42.8	19.5	23.3	1.550	21.1	30.2	100	37.2	225	9	17.7
本線 No.2+60付近上	24.42	0.2	18.9	80.9	50.3	23.0	27.3	1.540	21.1	29.4	—	—	1973	23	12.5

4. 試験盛土による適用性の検証

試験ヤード（図-3）を用いて盛土材としての適用性の検証を行った。試験盛土に使用した岩材は盛土路体一層の仕上り厚の規定値（30cm 以下）である 15cm 以下程度に粉砕し、転圧を行った（締固め回数 0, 2, 4, 6, 8, 10 回）。掘削、集積及び敷均しはバックホウ 0.45m³、転圧は振動ローラ質量 11.8t を使用した（令和 2 年 10 月 21 日）。

※全面にわたって締固め回数0,2,4,6,8,10回（単位：m）

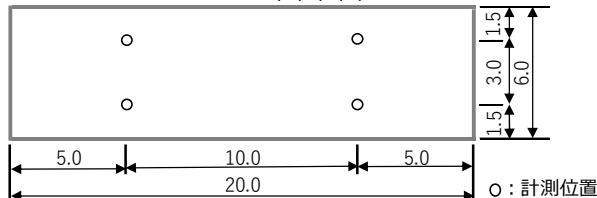


図-3 試験ヤード 形状：幅 6m、長さ 20m ※文献 7)



写真-3 岩破碎後の状態



写真-4 試験盛土状況

締固め度、空気間隙率、表面沈下量を各締固め回数ごとに計測した。

その結果（表-2）、締固め度は 97.6% になり、規準値を満足したが、空気間隙率 21.9% であり、規準値 15.0% を満足できなかった。

締固め度に対して空気間隙率が低減しなかった理由として、表面付近の締固め状態は良好であるが、盛土下面では敷均し、転圧後も岩材の破碎細粒化が進まず、粒子間に空隙が残ることが原因と考えられた。

引き続き、時間経過に伴うスレーキングの影響を確認するため、暫く残置した後に再転圧を実施した。翌 22 日に 6mm/日、23 日に 4mm/日程度の降雨があり、降雨後の変化を知るため 24 日に表面沈下量を計測したが、平均累計沈下量（表-3）の値は増加しなかった。

一方、2 週間後に実施した再転圧では 10 回転圧後の平均累計沈下量は 33.25mm→78.00mm と 45mm 増加した。圧縮沈下率では 7.5% となり、一般的な盛土施工中の実績値 0.2%~2% を大きく上回る結果となった。

以上の結果から、泥岩を無処理の状態で盛土に流用した場合、施工後に大きな沈下が発生する可能性が高いことが判明した。

表-2 締固め度・空気間隙率（転圧 10 回後）

測点	締固め度	最大乾燥密度	最適含水比	空気間隙率
本線 No.3-60付近	97.6%	1.550 g/cm ³	21.1%	21.9%
路体盛土での 規準値	90.0 %以上	—	—	15.0 %以下
結果判定	OK	—	—	OUT

表-3 再転圧による表面沈下量計測結果

月・日		10月21日 試験施工		10月24日 降雨後	11月5日 再転圧10回後
測定 番号	項目	0	10	0	10
1	測定値	36.337	36.295	36.294	36.243
	沈下量累計 (mm)	—	-42	-43	-94
2	測定値	36.369	36.345	36.344	36.306
	沈下量累計 (mm)	—	-24	-25	-63
3	測定値	36.874	36.833	36.834	36.786
	沈下量累計 (mm)	—	-41	-40	-88
4	測定値	36.908	36.882	36.882	36.841
	沈下量累計 (mm)	—	-26	-26	-67
平均累計沈下量 (mm)		—	-33.25	-33.5	-78.00

圧縮沈下率 $\delta_s = h/H = 0.045/0.60 = 7.5\%$

5. 室内配合試験による添加材及び配合割合の決定

盛土材として流用するためには良質土との混合処理、もしくは添加材による安定処理が必要と判断された。混合処理は購入土となること、期待するせん断強度を均一に確保することが困難であることから、安定処理を選択した。室内配合試験の順序を整理したフロー（図-4）を作成し、添加材の種類及び配合量の目安を得るために 4 種類の添加材による配合試験を実施した。スレーキング率 100%（試験済み箇所）から試験土砂を採取。セメント系（一般用・六価クロム対応型）と石灰系（生石灰・消石灰）を使用し、各添加材ともに最小添加量にて配合試験を行った。

その結果、各添加材とも目標コーン指数の 400kN/m² 以上（表-4）を確保することができた。

セメント系固化材（一般軟弱土用）は六価クロム抽出試験で環境基準値以上の結果（0.07mg/ℓ ≧ 0.05mg/ℓ）となり、セメント系固化材（環境保全型）は材料が高価なため、選定対象から除外することとし、石灰系を採用した。

表-4 セメント系・石灰系添加材によるコーン指数

添加材	添加材種類	試験値	結果	添加量 (kg/m ³)
セメント系 固化材	一般軟弱土用	2353	qc(kN/m ²)	50
	高炉セメント	2118	qc(kN/m ²)	
石灰系 固化材	環境保全型	2259	qc(kN/m ²)	30
	六価クロム対応型	1365	qc(kN/m ²)	

表-5 生石灰・消石灰による養生後の試験値

添加材		1軸圧縮試験 qu(kN/m ²)			コーン指数 qc(kN/m ²)		
		50kg/m ³	100kg/m ³	150kg/m ³	50kg/m ³	100kg/m ³	150kg/m ³
生石灰	σ3	334	254	215	5882	6353	6118
	σ7	400	300	249	7012	7482	7200
消石灰	σ3	318	228	205	5365	6212	6306
	σ7	342	245	219	5741	6635	6588

3 ケースの添加量 (50kg/m³、100kg/m³、150kg/m³) についての石灰系の室内試験結果を表-5 に示す。

石灰系の最小添加量は一般に 30kg/m³ であるが、土砂に比べて粒度の大きい粉碎岩であることに配慮し、現場において均一な混合が得られるように 50kg/m³ とした。生石灰、消石灰とも必要な強度（一軸圧縮強度 $q_u=180\text{KN/m}^2$ ）が確保できた。配合量は室内試験では 50kg/m³ よりも 100kg/m³、150kg/m³ の方が逆に一軸圧縮強度が落ちている。それは、低含水比のとき過剰添加で起こる現象と考えられた。発現した強度、経済性の面から、添加材は生石灰、配合量は 50kg/m³ に決定した。

6. 添加材配合後の試験盛土による施工方法の決定

室内配合試験で決定した生石灰 50kg/m³ を使用して、試験盛土施工を実施。現場にてスレーキングで土砂化した材料をバックホウで集積し、添加材と混合した。施工に用いた機種は集積、攪拌はバックホウ 0.45m³、敷均しはバックホウ 0.1m³、転圧は振動ローラ質量 11.8t である。その結果は、締め固め度、コーン指数、一軸圧縮強度ともに転圧回数 4 回で

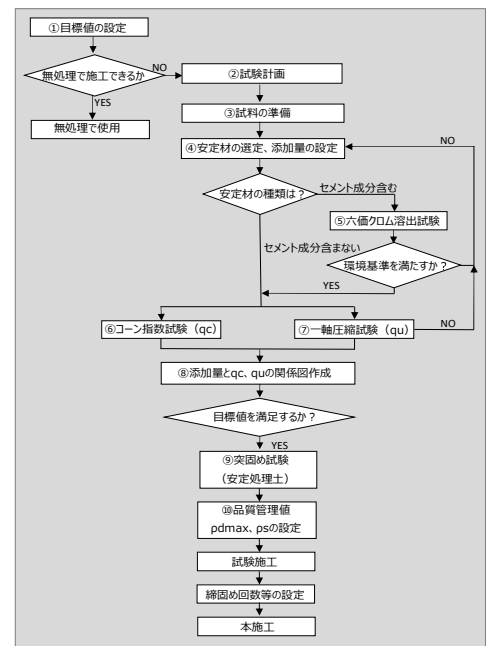


図-4 路体盛土に適用する室内試験の流れ

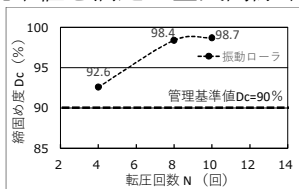


図-5 締め固め度 (Dc)

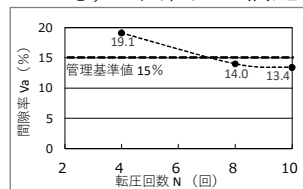


図-6 空気間隙率 (Va)

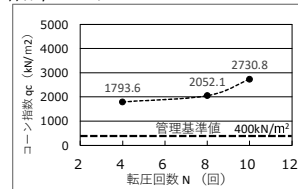


図-7 コーン指数 (qc)

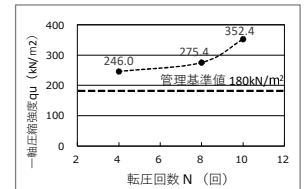


図-8 一軸圧縮強度 (qu)

次ステップとして、浸水後の変化を確認するため、上記の試験盛土を実施した日から 2 日間 (12 月 23 日) の養生と降雨、散水 (図-9、写真-5) を経験させ、再転圧を実施した。

その結果、コーン指数及び一軸圧縮強度ともに強度低下はみられなかった (表-6)。表面沈下量においても、前回試験盛土完了時から最大で 5 mm 程度であり、大きな沈下はみられなかった (図-10)。

以上のことから、生石灰 50kg/m³ を添加材としてバックホウ混合を行い、11.8 t 振動ローラを使用して 8 回以上転圧することで、すべての規制値をクリアし、安定した盛土となることが確認でき、これを採用した。

7. 施工機械の選定 (岩塊破碎及び添加材混合)

試験盛土施工において一応の成果を得られたが、今後本施工を行うにあたり、下記について留意する必要がある。

- ① 今後 4 年間で約 26 万 m³ の盛土を施工する計画であるため、効率的かつ経済的に安定処理土を製造できる設備が必要である。
- ② 今回の試験盛土から、盛土施工後に大きな沈下を発生させないためには、泥岩をできる限り細かく粉碎しておくことが重要と判断した。

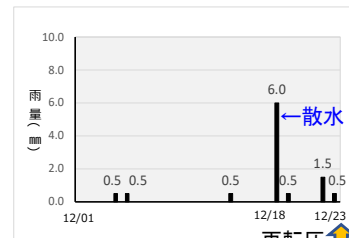


図-9 場内雨量計測値



写真-5 散水の状況

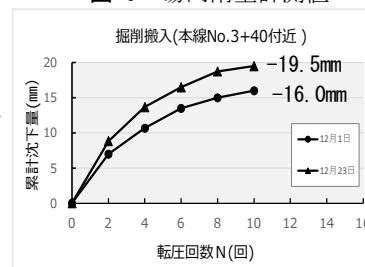


図-10 表面沈下量測定値



写真-6 表面沈下量測定

表-6 各種強度計測値

調査項目	調査月日	転圧回数 (回)			
		4	8	10	
コーン指数 qc (kN/m ²)	12月1日	1793	2052	2730	≥400kN/m ²
	12月23日	1820	2067	2942	
一軸圧縮強度 qu (kN/m ²)	12月1日	246	275	352	≥180kN/m ² (2×90)
	12月23日	249	277	376	
総沈下量 ▽S (mm)	12月1日	10.67	15.00	16.00	≤100mm※
	12月23日	13.67	18.75	19.5	

※維持修繕で平坦性を確保することを前提とした盛土中央部での舗装後 3 年間の許容残留沈下量

一般的な骨材再生工の施工機種としては、自走式破碎機 (ジョークラッシャー、質量 30 t 級) (図-11) が挙げら

れる※文献8)。破碎原理は投入された破碎材を固定歯に押しつけてすり潰すものであり、破碎機の出口隙間は最小幅 50mm（破碎後の粒度範囲は 0～40mm）であるため、処理材は単粒で均等係数が小さくなる傾向があり、本現場では締固めが不十分となるのではないかと考えられた。

これを改善する工法として、回転式破碎混合工法※文献9)を検討した。破碎原理は回転式破碎混合機の円筒内で高速回転するチェーンで岩塊等土砂材料を破碎し、同時に細粒化された土砂と改良材を混合させる工法である。回転数の調整で粒度分布を良くでき、締固めやすい改良土が期待できる。また、製造能力は 300～530m³/日と効率が高く、計画土量に対して現実的な工程内で工事を進行できると判断し、この工法を採用した。

現在、現場では回転式破碎混合機のプラント建設が完了し（写真-7）、順調に稼働させている。同工法によって細粒化された泥岩をプラント計量により事前試験で得た生石灰 50kg/m³ と混合し、試験盛土を施工した。破碎混合機より排出した改良土砂を 3,000m³ 程度毎に採取し、一軸圧縮試験を実施したところ、 $\sigma_7=283\text{KN/m}^2$ （設計 $q_u=180\text{KN/m}^2$ ）であり、原位置の RI 計器によって締固め度 99.6%（ $\geq 90\%$ ）、空気間隙率を 11%（ $\leq 15\%$ ）計測しており、良好な結果を得ている。

8. まとめ

スレーキング性泥岩を流用した盛土施工に関して、室内試験及び試験盛土にて適用性の検証を行った結果を以下にまとめる。

- ① 脆弱岩区分(3)材は盛土材として不適格とされることが多いが、岩塊を十分に破碎細粒化して安定処理を行うことで路体材として使用可能である。
- ② 十分に細粒化され、安定処理が施されていれば、一般的な振動ローラ 11.8 t の転圧によって、空気間隙率を 15%以下にできる。
- ③ 上記で構築された盛土は、浸水を経験した後においても、再転圧による表面沈下はほとんど生じない（但し、スメクタイト等の膨張性鉱物を多含する場合には、浸水の影響を受ける可能性があるため、必ず浸水による強度低下を確認することが重要）。
- ④ スレーキング性の岩の場合、一般的に含水量が少ない。含水量が少ない場合には、一般的にセメント系や石灰系では消石灰が有効とされるが、今回は生石灰においても効果が認められた。このため、事前にいくつかの固化材で配合試験を実施して適正を確認する必要がある。
- ⑤ スレーキング性岩の破碎工法として、回転式破碎混合工法は細粒化に優れ、土質改良に有効である。
- ⑥ 同工法のプラント型は製造効率が高いため、土量が多い現場にはコスト縮減、工期短縮に有効である。

9. むすび

三隅・益田道路は一般国道 9 号の代替機能の確保、スムーズな地域間交通の実現、沿道地域の産業・観光振興による地域経済の活性化に役立つことを目指して現在、鋭意建設中である。建設過程で生じる様々な技術的課題に対して一つひとつ慎重に解決策を見いだし、安全で安心な道路の建設に取り組んでいる。

今回の報告内容もこのような取り組みの一環を紹介したものであるが、本文が公共建設業に携わる方々の参考となれば幸いである。

※参考文献

- 1) 道路土工 盛土工指針 平成 22 年 4 月 (社) 日本道路協会
- 2) 地盤調査の方法と解説 平成 16 年 (社) 地盤工学会
- 3) 地盤材料試験の方法と解説 平成 22 年 1 月 (社) 地盤工学会
- 4) 石灰による地盤改良マニュアル 平成 23 年 12 月 日本石灰協会
- 5) セメント系固化剤による地盤改良マニュアル 平成 24 年 10 月 (社) 日本セメント協会
- 6) NEXCO 試験方法 第一編 土質関係試験方法 平成 29 年 7 月
- 7) TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領 平成 24 年 3 月 国土交通省
- 8) 国土交通省土木工事積算基準 令和 2 年度版 (財) 建設物価調査会
- 9) 回転式破碎混合工法 技術・積算資料 令和元年 6 月版 回転式破碎混合工法研究会



図-11 自走式破碎機



写真-7 回転式破碎混合機によるプラント設置状況