

石炭灰を造粒した人工地盤材料による盛土試験

Trial Earthfills of the Artificial Ground Material Granulated from Coal Fly Ash

大中 昭	Akira OHNAKA	(宇部興産(株)エネルギー・環境部門)
本郷 孝	Takashi HONGO	(同上)
虫合一浩	Kazuhiro SAIAI	(同上)
吉本憲正	Norimasa YOSHIMOTO	(山口大学大学院)
兵動正幸	Masayuki HYODO	(同上)
中田幸男	Yukio NAKATA	(同上)
宇野浩樹	Hiroki UNO	(大成建設(株)技術センター)
檜垣貫司	Kanji HIGAKI	(同上)

石炭灰の有効利用を目的として、石炭灰（フライアッシュ）を主成分として造粒した人工地盤材料（石炭灰造粒材）の製造技術確立と建設材料としての用途開発を進めており、その一環として盛土試験を実施した。

試験盛土施工を3回行い、石炭灰造粒材の施工性、地盤材料としての安定性、周辺環境に及ぼす影響などについて継続的な調査を行った。これらの結果から、石炭灰造粒材は、路床、路体（盛土）、構造物の裏込めや埋戻し、河川築堤、土地造成の用途に適用可能な強度および支持力特性を有し、設計および施工においては通常の地盤材料と同様の取扱いが適用できる材料で、環境に対しても安全であることが確認できた。

キーワード：石炭灰，造粒，盛土，締固め

(IGC：C-7，C-8，D-9)

1. はじめに

石炭需要の拡大に伴い、石炭灰の有効利用が大きな問題となっている。従来から利用が進められてきたセメント原料用途の他に、新たな有効利用方法の検討が積極的に進められている。

財団法人石炭エネルギーセンターの調査¹⁾によれば、2004年度に日本国内で発生した石炭灰は約1,085万トンで、今後も増大するものと予測されている。その内訳は、有効利用されたものが約90%（約979万トン）、埋立処分が約10%（約107万トン）となっている。有効利用のうち約70%（約688万トン）がセメント分野での利用であり、更なる利用拡大のためには土木建設分野を中心とする他分野での活用が期待されている。

著者らは、石炭灰（フライアッシュ）を造粒化して砂質土と同等の品質、取扱い性を有する人工地盤材料（以下、石炭灰造粒材という）を製造し、建設材料として提供することで、石炭灰の有効活用による再資源化と、天然砂質土に替わる人工地盤材料の利用による環境保全を図ることを目標に、製造技術の確立と建設材料としての用途開発²⁻⁵⁾を進めてきた。写真-1には、石炭灰造粒材を示す。

2. 製造方法と基本的な性質

2.1 製造方法

2002年度に石炭灰造粒材の製造技術を実証するための試験設備（製造能力：年間76,000トン、石炭灰使用量：年間約50,000トン）を設置し、人工地盤材料としての利用を促進するための実証試験を開始した。

写真-2に石炭灰造粒材製造設備の全景写真を示す。図-1には、製造プロセスの概要を示す。石炭灰造粒材の原料は、石炭灰（フライアッシュ）、セメント、添加材（造粒助材）、および水の4種類で、必要に応じて溶出抑制剤を併用する。表-1に、石炭灰造粒材の原材料とその配合を示す。これらの原料を、バッチ式造粒機（円錐型スクリーン混合機）を用い混合と造粒を同時に行う。供給原料の標準的な配合重量比は、石炭灰：セメント：添加材=85：5：10である。供給水量は、粉体材料重量100に対して20～40程度である。

造粒された製品は、ベルトコンベアを經由して養生ヤードに輸送される。製造直後の造粒物は、セメントの硬化反応が進み形状維持が可能となるまでの1～2日程度この屋内の養生ヤード（常温空气中）で初期養生される。初期養生を終えた製品は、屋外の保管ヤードで約1ヶ月間の養生を行った後、出荷製品として保管される。

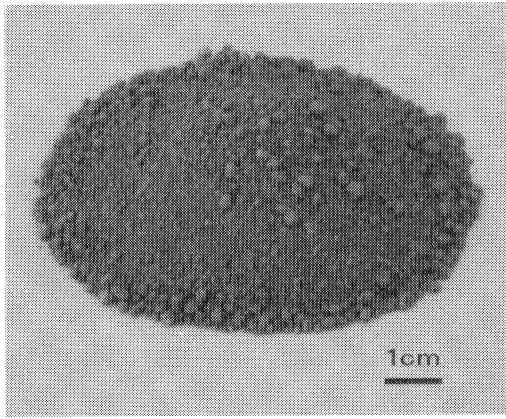


写真-1 石炭灰造粒材

表-1 石炭灰造粒材の原材料と配合

原材料	配合 (重量%)	備考
粉体材料	100 石炭灰：77~92 セメント：3~8 添加材(造粒助剤)：5~15	標準的な配合割合は、以下のとおり 石炭灰：85 セメント：5 添加材(造粒助剤)：10
水	約 25~40	石炭灰の種類や状態等による

表-2 石炭灰造粒材の標準性状

試験項目	管理基準値	試験方法
最大粒径	4~50mm	JIS A 1204
平均粒径	0.3~2mm	JIS A 1204
礫分含有率	15~50%	JIS A 1204
細粒分含有率	30%以下	JIS A 1204
土粒子密度	2.4g/cm ³ 以下	JIS A 1202
透水係数	1.0×10 ⁻⁴ cm/s以上	JIS A 1218
内部摩擦角 φ'	35°以上	JGS 0523
95%修正 CBR	20%以上	JIS A 1211
有害物質の溶出量	環境基準値以下	平成3年度環境庁告示第46号
有害物質の含有量	環境基準値以下	平成15年度環境省告示第19号

2.2 基本的な品質

石炭灰造粒材の標準的な品質管理範囲⁶⁾を表-2に示す。これらの品質を満足することで、石炭灰造粒材は、路床、路体(盛土)、構造物の裏込めや埋戻し、河川築堤、土地造成の用途に適用可能な強度および支持力特性を有し、設計および施工においては通常の地盤材料と同様の取扱いが適用できる材料で、環境に対しても安全である。

3. 盛土試験

3.1 施工条件と使用した材料の性状

盛土試験施工を3回実施し、既存の盛土材料であるまき土と比較することによって石炭灰造粒材の盛土材料としての性能や施工性、安定性等について検討した。さらに、周辺環境への影響についても検証した。

盛土施工試験は、炭種の異なる3種類の石炭(いずれも燃料用一般炭としてのわが国への輸入量が最も多いオーストラリア産の石炭を主とするもの)から製造した石炭灰造粒材を用い、それぞれ「第1回施工」、「第2回施工」、「第3回施工」とし、2001年から2004年にかけて施工した。3回の盛土試験施工の施工条件を表-3に示す。「第1回施工」と「第2回施工」は、主として地盤材料としての強度や支持力特性、施工性等を中心とした評価を実施し、「第3回施工」では周辺環境への影響を評価する目的で盛土周辺に観測井を設置して地下水への影響を調査した。

各施工に用いた石炭灰造粒材の土質性状を表-4に示す。環境庁告示46号法⁷⁾による溶出試験の結果を表-5に示す。なお、ここでpHの測定方法は、JGS0211「土懸濁液のpH試験方法」によった。

また、図-2には粒度分布曲線を、図-3には締固め曲線を示す。締固め試験は、JIS A 1210「突固めによる土の締固め試験方法」(A-b法)に準拠して行った。なお、石炭

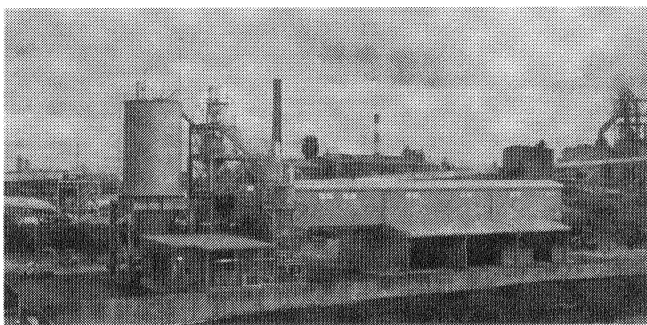


写真-2 石炭灰造粒材製造設備の全景

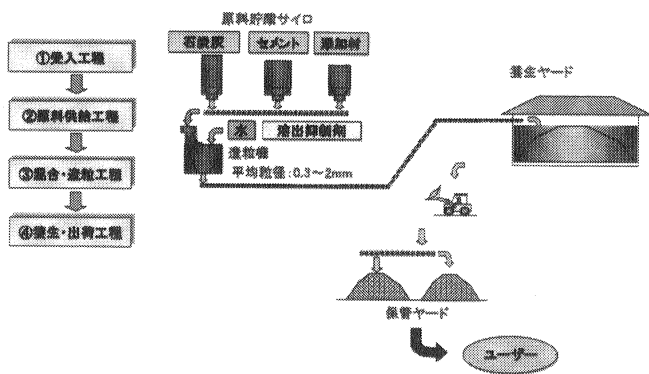


図-1 石炭灰造粒材製造プロセスの概要

灰造粒材の最大乾燥密度と最適含水比は、使用する原料石炭灰の物性により影響されるものの通常各々0.95～1.10g/cm³と40～50%程度の範囲⁶⁾にあり、ここで用いた3種類の材料はいずれもこの範囲のものであった。

3.2 施工性の確認

表-3 に示したとおりの通常の建設機械を用いて盛土施工を行い、運搬、敷均し、転圧の各工程における作業性を調査した結果、作業性は通常の地盤材料と同等であることが確認できた。施工時の各工程における施工状況の写真を写真-3～7 に示す。

一方、施工後12ヶ月経過した時点で盛土（第1回施工を対象とした）の取崩し・掘削を行った結果、強固な硬化体を形成することなく、通常の建設機械によるこれらの作業についても支障のないことを確認した。このことは、掘削時に試験盛土からコア・サンプルを採取し強度試験（一軸圧縮試験）を行った結果、一軸圧縮強さが、28kN/m²であったことから、必要以上の強度発現はないことが確認された。写真-8 には取り崩し状況の写真を示す。

表-3 盛土試験の施工条件

項目	第1回	第2回	第3回
施工年月	2001年 11月	2002年 11月	2004年 3月
石炭灰造粒材 使用量(m ³)	48	330	650
法面勾配	1:1.8 1:1.5	1:1.5 1:1.0	1:1.5
盛立て高さ(m)	1.5	1.5	3.0
仕上がり厚(cm)	30	30	30
締固め層数(層)	5	5	10
転圧回数(回)	6	6	6
使用した 締固め機械	振動 ローラー	タイヤ ローラー	タイヤ ローラー

表-4 盛土試験に用いた石炭灰造粒材の土質性状

項目	第1回	第2回	第3回
最大粒径(mm)	19	26.5	19
平均粒径(mm)	0.55	0.59	0.79
礫分含有率(%)	25.1	23.6	29.0
細粒分含有率(%)	24.5	21.5	12.9
土粒子密度(g/cm ³)	2.32	2.31	2.31
最適含水比(%)	42.3	44.1	51.1
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.055	1.009	1.023
pH(-)	10.6	11.3	10.9

表-5 盛土試験に用いた石炭灰造粒材の溶出試験結果

(単位: mg/l)

項目	第1回	第2回	第3回	環境基準
カドミウム	ND (<0.001)	ND (<0.001)	ND (<0.001)	0.01 以下
鉛	ND (<0.001)	ND (<0.001)	0.002	0.01 以下
六価 クロム	ND (<0.01)	ND (<0.01)	0.019	0.05 以下
ヒ素	ND (<0.001)	ND (<0.001)	0.007	0.01 以下
総水銀	ND (<0.00005)	ND (<0.00005)	ND (<0.00005)	0.0005 以下
セレン	0.003	0.004	ND (<0.001)	0.01 以下
フッ素	0.46	0.24	ND (<0.01)	0.8 以下
ホウ素	0.8	0.4	0.6	1 以下

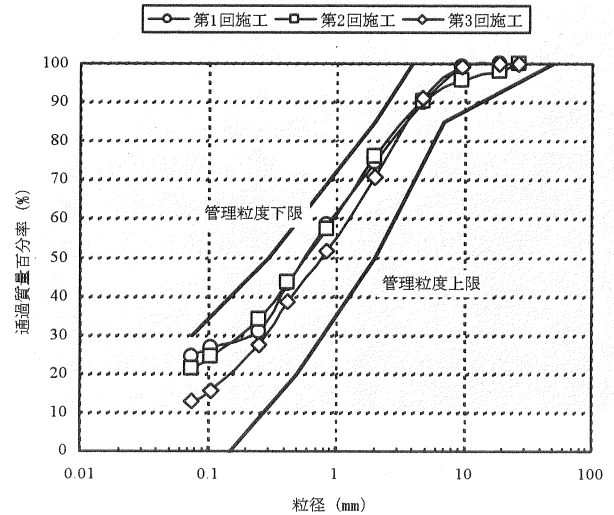


図-2 粒度分布曲線

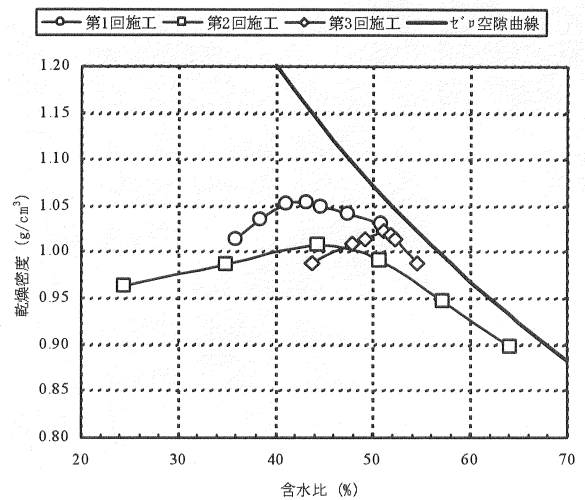


図-3 締固め曲線

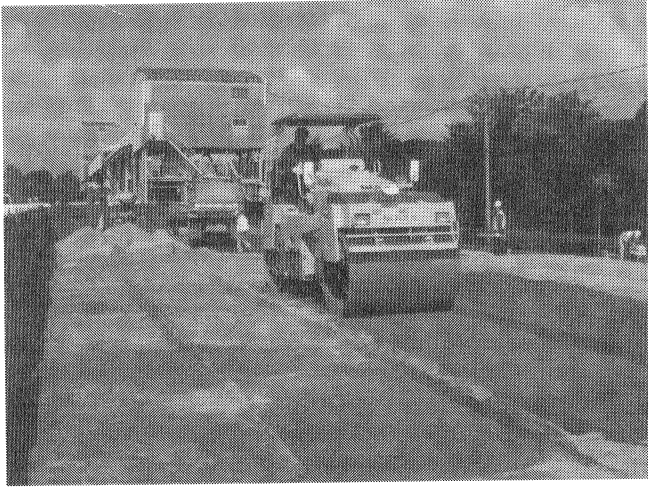


写真-3 盛土施工試験
(振動ローラーによる転圧状況：第1回施工)

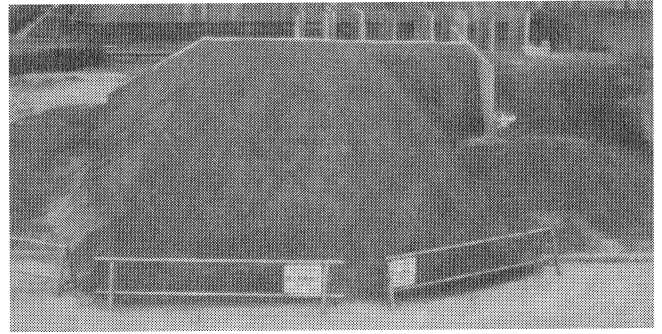


写真-6 盛土施工試験
(施工終了時：第2回施工)

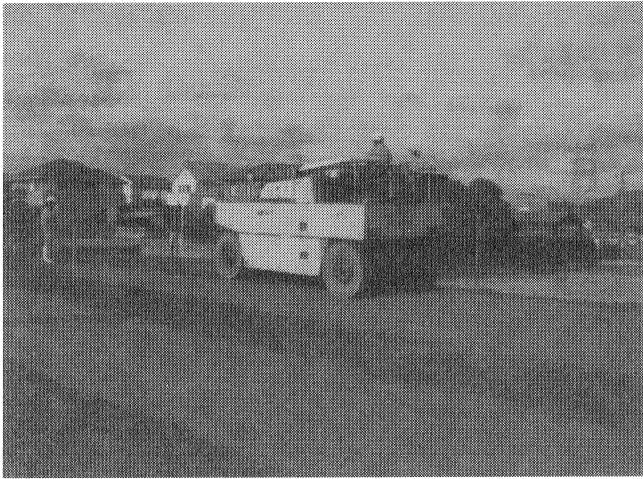


写真-4 盛土施工試験
(タイヤローラーによる転圧状況：第3回施工)

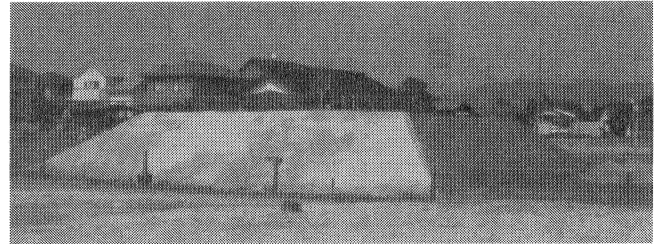


写真-7 盛土施工試験
(施工終了時：第3回施工)



写真-5 盛土施工試験
(法面成形状況：第1回施工)



写真-8 盛土施工試験
(12ヶ月経過後、取り崩し状況：第1回施工)

3.3 原位置地盤調査

石炭灰造粒材を用いて施工した試験盛土の各種性状を把握するため、原位置地盤調査を実施した。調査結果を表-6に示す。

施工直後の現場密度は、締固め度で90~95%程度となることが確認された。また、盛土天端における現場 CBR (JIS A 1222「現場 C B R 試験方法」に準拠)、地盤反力係数 (JIS A 1215「道路の平板載荷試験方法」に準拠)、およびスウェーデン式サウンディング試験 (JIS A 1221「スウェーデン式サウンディング試験方法」に準拠) を行い地盤材料としての強度および支持力特性を調査した。なお、各試験は盛土天端の2地点で測定し、その平均値を求めた (以下同様)。その結果、現場 CBR にして11~20%程度、地盤反力係数 K_{30} にして80~90MN/m³程度の支持力特性が得られることが確認された。スウェーデン式サウンディング試験による貫入量1m当たりの半回転数は、深度1mにおいて150程度であった。これらの結果より、地盤材料としての適用可能な強度および支持力特性を有することが確認⁶⁾できた。

3.4 安定性の確認

第1回および第2回試験盛土に対して、石炭灰造粒材の物理特性、強度および支持力特性に関する安定性について継続的な調査⁶⁾を実施した。なお、第3回試験盛土に対しては、後述のとおり周辺環境に及ぼす影響を中心に調査することとした。

1) 粒度分布の経時変化

施工後12ヶ月および24ヶ月経過後に採取した試料の粒度分布を比較した結果を、表-7に示す。

第1回施工の結果からは、施工後12ヶ月経過した試験盛土の粒度分布は、施工直後と比較してほとんど差異のないことが確認された。一方、第2回施工の結果からは、施工後12ヶ月経過した時点での盛土の粒度分布は、施工直後と比較すると粗粒化していたが、24ヶ月経過時点では施工直後と差異は認められなかった。これらの結果から、粒度分布の経時変化は小さく、いずれも表-2に示した管理範囲内にあることが確認された。このことから、石炭灰造粒材粒子は風化等の影響で細粒化したり凝集によって粗粒化するなどの粒径に変化を及ぼす現象は認められなかった。

2) 盛土天端における現場 CBR および地盤反力係数の経時変化

図-4に示す試験盛土の現場 CBR は、施工直後に12%程度の値を示した後、時間の経過に伴って増加し盛土材料として必要な支持力を保持していることが確認された。また、その後、この増大は収束する傾向にあることも分かった。

一方、盛土天端における地盤反力係数 K_{30} の試験結果を図-5に示す。この結果からも、試験盛土の地盤反力係数は、施工直後に約80MN/m³を示した後、時間経過に伴って増加することが確認された。ただし、増加の割合は次第に

減少する傾向にあることも分かった。

なお、前述のとおり第1回試験盛土については、施工後12ヶ月経過後に一部を残して取り崩したため調査期間はこの時点までとした。

表-6 試験盛土施工終了時の原位置調査結果

項目	第1回	第2回	第3回
最大乾燥密度(g/cm ³)	1.055	1.009	1.023
含水比(%)	47.4	49.1	48.2
乾燥密度(g/cm ³)	0.967	0.953	0.957
締固め度(%)	91.7	94.4	93.5
現場 CBR(%)	11.4	12.6	20.2
地盤反力係数 K_{30} <沈下量 1.25mm>(MN/m ³)	79.3	77.7	90.2
スウェーデン式サウンディング試験による半回転数 <荷重 1kN> (-)	147	154	155

表-7 粒度分布の経時的変化

項目	第1回			第2回			
	原 粒度	施工 直後	12ヶ 月後	原 粒度	施工 直後	12ヶ 月後	24ヶ 月後
最大粒径 (mm)	19	19	19	26.5	26.5	26.5	26.5
平均粒径 (mm)	0.55	0.47	0.55	0.59	0.58	0.93	0.61
礫分 含有率 (%)	25.1	24.5	27.7	23.6	19.0	29.0	27.4
細粒分 含有率 (%)	24.5	26.6	22.6	21.5	22.0	16.0	24.8

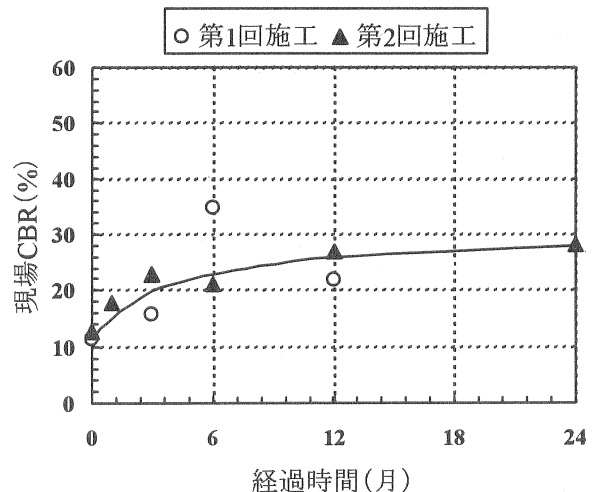


図-4 現場 CBR の経時的な変化

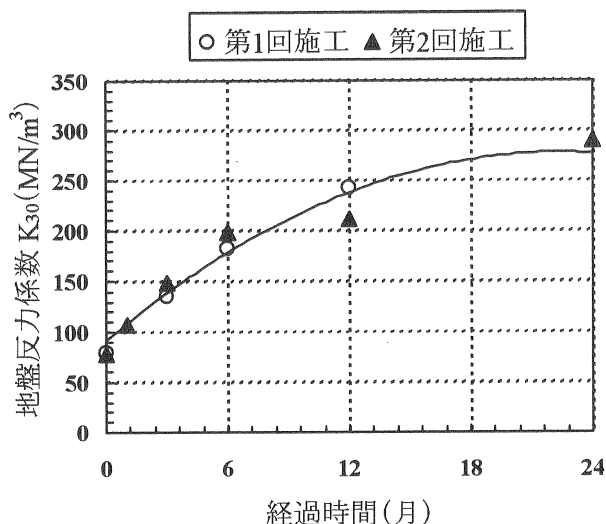


図-5 地盤反力係数の経時的な変化

表-8 試験盛土から採取した石炭灰造粒材の溶出試験結果

(単位: mg/l)

項目	第1回 約16ヶ月 経過後	第2回 約24ヶ月 経過後	第3回 約16ヶ月 経過後	環境 基準
カドミウム	ND (<0.001)	ND (<0.001)	ND (<0.001)	0.01 以下
鉛	ND (<0.001)	ND (<0.001)	ND (<0.001)	0.01 以下
六価 クロム	ND (<0.01)	ND (<0.01)	0.020	0.05 以下
ヒ素	ND (<0.001)	ND (<0.001)	0.005	0.01 以下
総水銀	ND (<0.00005)	ND (<0.0005)	ND (<0.0005)	0.0005 以下
セレン	0.001	0.004	0.009	0.01 以下
フッ素	0.4	0.3	ND (<0.01)	0.8 以下
ホウ素	0.3	0.6	0.4	1 以下

3) 試験盛土から採取した石炭灰造粒材の溶出試験

施工後の試験盛土より試料を採取して溶出試験を行った結果を、表-8 に示す。これらの石炭灰造粒材からの重金属等の有害物質の溶出量も、環境庁告示第46号の定める溶出量基準以下であることが確認された。この結果から、溶出についても経時的な安全性が確保できることが確認できた。

3.5 周辺環境に及ぼす影響に関する確認

石炭灰造粒材は、原料であるセメントならびに石炭灰などに由来するカルシウム分を比較的多く含む人工地盤材

料である。したがって、表-3 に示すとおり、試験盛土で用いた石炭灰造粒材の pH は、10.6~11.3 であった。このため、試験盛土周辺にある水(周辺地下水など)は、石炭灰造粒材の影響からアルカリ性を呈することが懸念されたため、石炭灰造粒材が地下水などの pH に及ぼす影響を継続的に調査した。

ここでは、石炭灰造粒材による周辺環境への影響を把握する目的で、試験盛土表層水(第1回施工)ならびに試験盛土周辺に掘削した井戸水(第3回施工)を継続的に採取して pH への影響を確認した。

1) 試験盛土表層水の pH 調査

第1回施工において、試験盛土法面の表層水を採取して pH の測定を行った。図-6 に、施工直後から約4ヶ月間に亘って採水した表層水の pH とその間の降雨量について調査した結果を示す。この間に採取した表層水の pH は、いずれも 8.6 (公共水域への排水基準上限値) 以下であり、概ね中性域であった。

2) 試験盛土周辺地下水の pH 調査

第3回施工において、周辺観測井からの採水による pH 調査を行い、試験盛土周辺への影響について調査した。

図-7 に原地盤の地層と石炭灰造粒材による第3回試験盛土の概略を示す。4面ある法面のうちの2面は、まさ土で覆土した。原地盤の地層は、GL-2.0m~11.5m にシルト質砂および粘土層が、それ以浅の GL-0.3m~2.0m に砂層がそれぞれ堆積しており、前者が難透水層、後者が不圧帯水層になっている。なお、地下水位は GL-0.3m にあった。施工時には、地表面から層厚 30cm で堆積している表土を掘削して取り除き、石炭灰造粒材による盛土は砂層の上に施工することとした。

採水井戸の設置箇所は、図-8 に示すように、法尻近傍4箇所、盛土中心部に1箇所、比較用として試験盛土からの影響が軽微と考えられる箇所にも2箇所設置した。これらの井戸から定期的(概ね1週間間隔)に採水して pH の測定を行った。なお、採水は、GL-1.6m の位置で行った。

図-9 に、施工後約16ヶ月間に亘り採水井戸から採取した地下水の pH 測定結果を示した。この結果から、いずれの採取箇所からも石炭灰造粒材による地下水への影響は認められず、採取した地下水はほぼ中性であった。このことから、本施工による周辺環境への影響は認められないことが確認できた。

一方、著者らは、石炭灰造粒材を埋戻し材として利用した場合などの事例を想定して、重金属等の微量物質の溶出挙動、地盤内の移動挙動を浸透流解析および移流分散解析の手法を用いて解析し、人の健康被害リスク評価を行うなどの検討⁹⁾も実施し、施工地点近傍の地下水を仮に100年間日常的に飲用した場合も、健康被害リスク評価からは、健康安全性は確保されるとの結果を得ている。

試験施工による周辺環境への影響調査の結果と併せて判断すれば、石炭灰造粒材を地盤材料として適用した場合の環境影響は軽微なものと推察している。

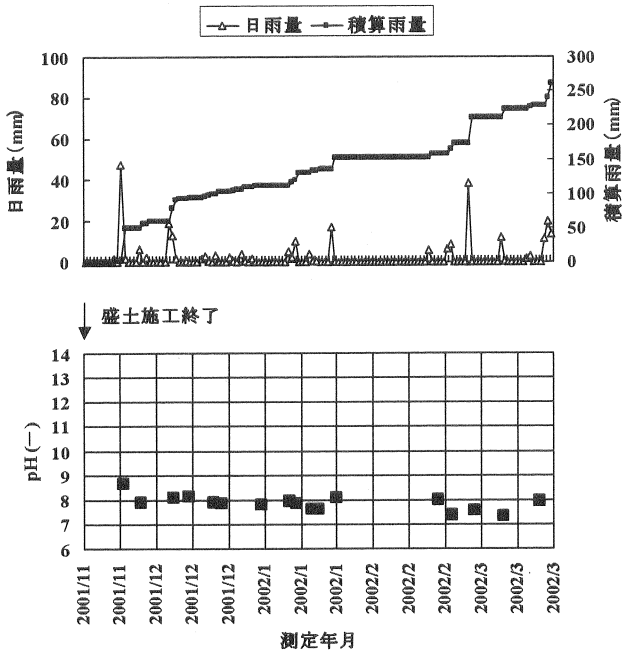


図-6 盛土表層水の pH と降水量 (第1回施工)

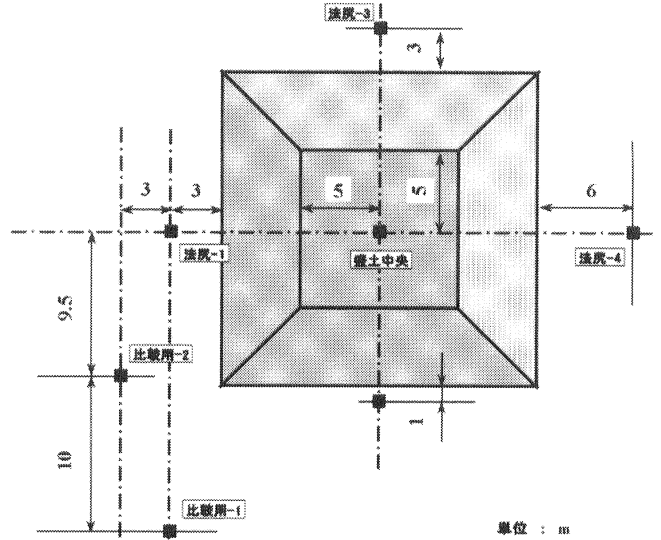


図-8 観測井設置箇所

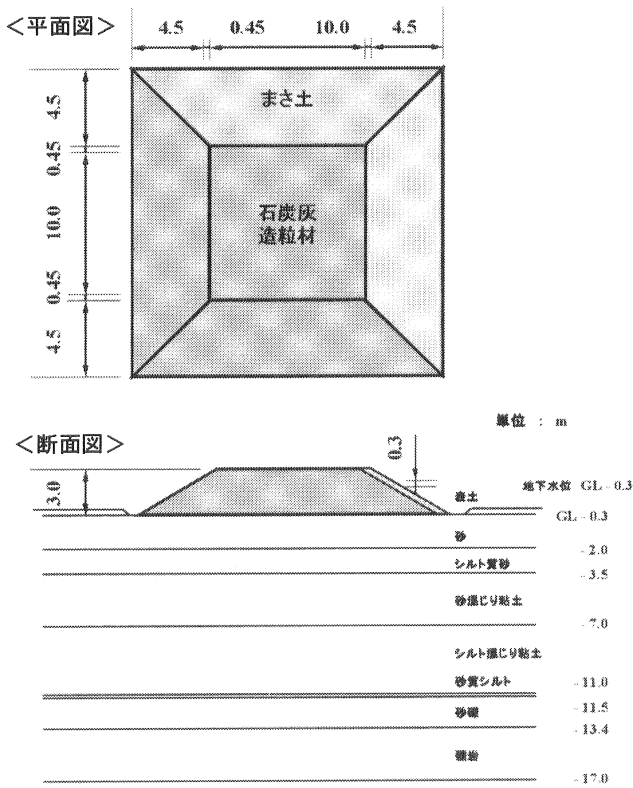


図-7 第3回試験盛土の概形

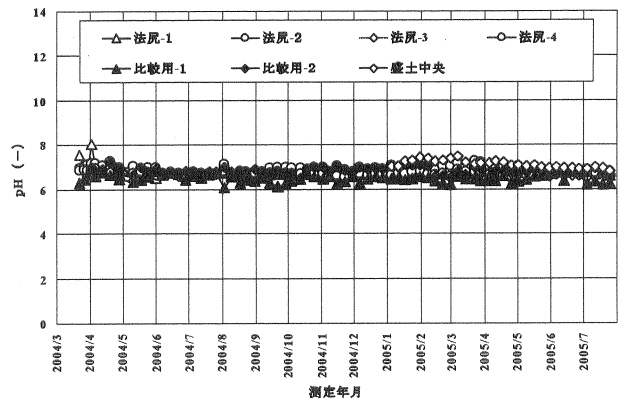


図-9 地下水の pH 測定結果

4. おわりに

石炭灰を造粒した人工地盤材料を用いた盛土試験施工を実施して、施工性、地盤材料としての安定性、周辺環境に及ぼす影響などについて継続的な調査を行った。その結果、①粒度分布などの土質性状は砂質土と同等である、②地盤材料として適用可能な強度および支持力特性を有する、③通常の施工手順および建設機械で施工が可能で、取崩しや掘削においても容易に施工ができることから、長期に亘って適切な強度を発現している、④環境基準に適合する、⑤物理特性、強度および支持力特性に関する性状の時間的な変化は小さく、重金属等の溶出量の変化は小さく、環境基準にも適合しており、経時的な安定性に優れた材料である、⑥周辺環境への影響は、軽微であると推察される、ことなどが分かった。

これらの結果から、石炭灰造粒材は、路床、路体(盛土)、構造物の裏込めや埋戻し、河川築堤、土地造成の用途に適用可能な強度および支持力特性を有し、設計および施工においては通常の地盤材料と同様の取扱いが適用できる材料で、環境に対しても安全であると言える。

謝辞

盛土試験施工を実施するにあたりご協力いただいた各機関、ならびに石炭灰造粒材の製造実証プラントの建設ならびに実証運転に際し、ご指導とご協力を賜りました財団法人クリーン・ジャパン・センターをはじめとする関係者各位に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 財団法人石炭エネルギーセンター：石炭灰全国実態調査報告書(平成16年度実績), pp.1-16, 2006.
- 2) 大中昭, 本郷孝, 古谷幸二：実証プラントによる石炭灰を造粒した土木材料の開発, 日本エネルギー学会第40回石炭利用技術会議講演集, pp.150-151, 2003.
- 3) 宇野浩樹, 檜垣貫司, 川崎宏二, 鶴谷巖, 大中昭, 仲谷朋之：石炭灰造粒材の地盤材料への適用性, 土木学会第57回年次学術講演会, pp.1605-1606, 2002.
- 4) 宇野浩樹, 檜垣貫司, 鶴谷巖, 大中昭：土と基礎, vol.51, No.6, pp.545-547, 2003.
- 5) 宇野浩樹, 檜垣貫司, 鶴谷巖, 大中昭：セメント処理で造粒化した石炭灰による盛土施工試験, 第5回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.251-254, 2003.
- 6) 財団法人土木研究センター：建設技術審査証明報告書(建技審証 第0410号), 石炭灰を用いた人工地盤材料「石炭灰造粒材」, 宇部興産株式会社, 大成建設株式会社, 電源開発株式会社, pp.13-74, 2004.
- 7) 社団法人地盤工学会：土質試験の方法と解説(第一回改訂版), pp.180-183, 2000.
- 8) 大中昭, 本郷孝, 太田幹夫：石炭灰を造粒した人工地盤材料の開発, 第40回地盤工学研究発表会, pp.665-666, 2005.
- 9) 吉本憲正, 中田幸男, 村田秀一, 兵動正幸, 西原浩一郎, 古森幸作, 大中昭, 本郷孝, 虫合一浩：石炭灰造粒材から溶出した微量物質飽和地盤内における移動とリスク評価, 第41回地盤工学研究発表会, pp.2351-2352, 2006.

(2006年7月31日 受付)