

循環型社会形成を目指した泥土（建設汚泥）の再生利用技術について

永松郁生¹・野口真一²・定岡直樹³・中村吉男⁴
奥村哲夫⁵・成田国朝⁵・大根義男⁵

¹正会員 飛鳥建設株式会社 名古屋支店土木部（〒460-0015 名古屋市中区大井町6-14）

²正会員 飛鳥建設株式会社 名古屋支店土木部（〒460-0015 名古屋市中区大井町6-14）

³工修 ㈱アイコ（〒471-0048 豊田市高崎町北脇30-16）

⁴正会員 ㈱アイコ（〒471-0048 豊田市高崎町北脇30-16）

⁵正会員 工博 教授 愛知工業大学都市環境学科土木工学専攻（〒470-0392 豊田市八草町八千草1247）

建設廃材の再資源化に関する研究は、近年急速に進展し、今やコンクリート廃材等については100%近い再資源化率となっている。これに対し、建設汚泥は、平成14年度の建設副産物実態調査報告によると約69%と低迷している。その理由として、泥土の質的多様性により利用目的にあった物質の生産が難しい、あるいはその生産において多額の費用を必要とする等が挙げられる。

本論文は、地盤改良時に生起する自硬性汚泥や土圧式シールドの際排出される非自硬性汚泥等の建設廃材を経済的に処理し、また有効利用するための方法を提案する。更にこれを実務に適用して良好な結果が得られたので、これについて具体的に報告するものである。

キーワード： 泥土，建設汚泥，ゼロエミッション，産業廃棄物，安定処理工法，粒状固化工法

1. はじめに

平成14年度の建設副産物の実態調査によれば、建設泥土の発生量は約800万トンと言われており、その再資源化率は約69%でコンクリート廃材などに比べ低迷している。建設汚泥（泥土）は、従来、管理型最終処分場での埋め立てや海洋投棄で処理されてきたが、環境問題や処分場の残余容量が逼迫している実情に鑑み、減量化や再利用のための技術開発が急務とされてきた。しかし、泥土の減量・最小化は、経済活動の発展を考えると自ら限界があり、また最終処分場の延命対策にはなるが、泥土処理の根本的な解決策にはなり得ない側面を有している。したがって、今後の泥土処理の目指す方向は、リサイクル体制の確立と処理土の有効利用と言ってよい。

従来の泥土リサイクル処理は脱水や乾燥処理が主体であり、泥土を処理場に搬入して、沈殿・濃縮・脱水・乾燥処理の過程を経て固形化し、それを破碎して地盤材料として再利用するものであった。しかし、この処理では乾燥に時間を要し、広大な敷地が必要で、濁水の処理や廃棄に伴う環境問題が指摘されるため、最近では泥土にセメントや石灰等の固化材を添加混合して工学的性質や施工性を改善する“安定処理工法”が主流になりつつあり、固化材の選定や処理技術によって、安定処理工法には現在、

幾多の手法が提案され、処理技術の経済性や適用性、処理土の品質や有効利用の方法が競われている。

本論文で紹介する「粒状固化工法：イーキューブシステム」は発生廃棄物に対し、その流動程度に応じて固化材や高分子凝集剤を添加し、これを新たに開発した連続ミキサーに投入して20～50秒間攪拌することにより、固化した改良土を粒状に生成して地盤材料に再利用する工法である。この工法は、①固化材として石炭フライアッシュ（これも産業廃棄物）を有効利用すること、②処理装置がコンパクトで可動式のため現場環境の制約が少ないこと、③多様な泥土に対応でき使用目的に応じた強度の粒状体が生産できるので改良土の用途範囲が広いこと等、他の類似工法には見られない特徴を有している。

本論文は、地盤改良時に生起する自硬性汚泥、土圧式シールドで排出される泥土、港湾・河川の浚渫土等の非自硬性汚泥を経済的に処理し、有効利用するための方法を提案するとともに、改良土の品質性能と実務への適用性について報告するものである。

2. システムの概要¹⁾

本システムの主装置は、泥土ホッパー、泥土定量供給装置、固化材定量添加装置、混合攪拌装置（特

殊連続ミキサー)等から構成される移動式粒状固化プラントで、10tトラックで運搬が可能である。特殊連続ミキサーは移動翼と攪拌翼からなり、泥土は2種類の固化材と混練されながら搬送され、この過程で、処理土は粉碎・分散されるので処理効率と混練の均質性が向上し連続的な処理が可能となる。

(1) 施工手順

施工手順を**図-1**に示す。また、各工程の概要は次の通りである。

- ① 地盤改良工事等から発生した高含水の泥土等は、ピットないしは水槽にて一時貯泥を行う。この際、ブリーディング率の大きな泥土は固液分離を行い、含水比を低下させる。更に、自硬性汚泥や固結シルトを含む泥土は、性状が一般ではない場合が多く、ローター付スケルトンバケット等を用い調泥を行う。
- ② 泥土供給装置への泥土の投入は、通常、バックホウにて行う。泥土に50mm以上の礫等が混入している場合は、分級機(振動フルイ、トロンメルスクリーン、スケルトンバケット等)を用いて礫等を除いた後、投入する。
- ③ ホッパーに投入された泥土は、スクリーフィーダにより定量供給され、特殊連続ミキサーに搬送される。
- ④ 搬送された泥土は、高分子凝集剤、固化材の順で定量添加され、移動翼と攪拌翼を持つ特殊連続ミキサーで連続的に混練・搬送され、改質土としてベルトコンベアーで排出される。

写真-1に泥土圧シールドにより排出された泥土の貯泥状況を、**写真-2**、**-3**に泥土の投入状況と処理土の搬出状況を示した。投入と搬出の間に要する時間は20~50秒程度である。**写真-4**は改質土の積込状況を示したものである。

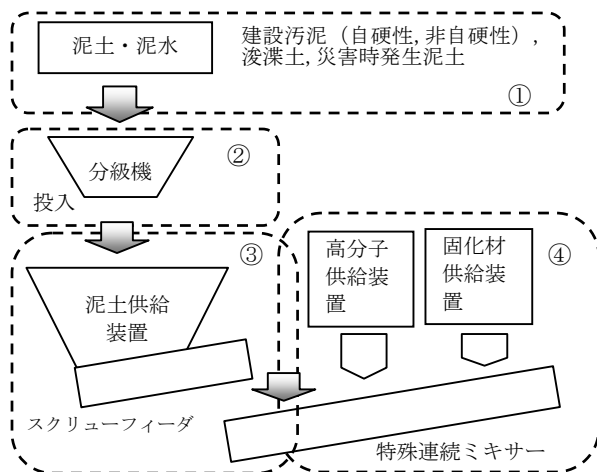


図-1 施工フロー



写真-1 貯泥状況(泥土圧シールド)



写真-2 泥土投入状況



写真-3 搬出状況



写真-4 改質土の積込状況

(2) 本工法の特徴

a) 混練性能の高いミキサーの開発

泥土と固化材を混合するミキサーは、形式的に①2軸パドルミキサ混練方式、②垂直攪拌方式、③傾斜型スクリー混合方式、④バッチ方式の4方式に区

分される。表-1はこれらミキサーの特徴を示したものであり、傾斜型スクリュ混合方式は連続的に処理でき、概して時間処理能力が高いとされている。本工法で新たに開発したミキサーはこの方式に属するもので、可動性に優れ省スペース化が図られている。

表-2は総掘削土量と日最大汚泥処理量の関係を示したものであり、一日の処理量が概ね100~300m³の範囲であれば、各種工事から発生する泥土の処理は可能であると考えられる。本工法では、汎用機として時間当たりの処理能力25~30m³/hを持つミキサーの開発を行った。

表-1 ミキシング方式の比較²⁾

ミキサー名	二軸ポルトミキサ方式	垂直攪拌方式	傾斜型スクリュ混合方式	バッチ方式
工法特徴	<ul style="list-style-type: none"> 処理方式連続処理 FA供給方式フィーダー方式 処理能力10~100m³/h 	<ul style="list-style-type: none"> 処理方式連続処理 FA供給方式フィーダー方式 処理能力25~100m³/h 	<ul style="list-style-type: none"> 処理方式連続処理 FA供給方式フィーダー方式 処理能力50~100m³/h 	<ul style="list-style-type: none"> 処理方式バッチ方式 FA供給方式計量機直投 処理能力10~25m³/h
対象土	第4種処理土 ○	○	○	○
	泥土 ○	○	○	○

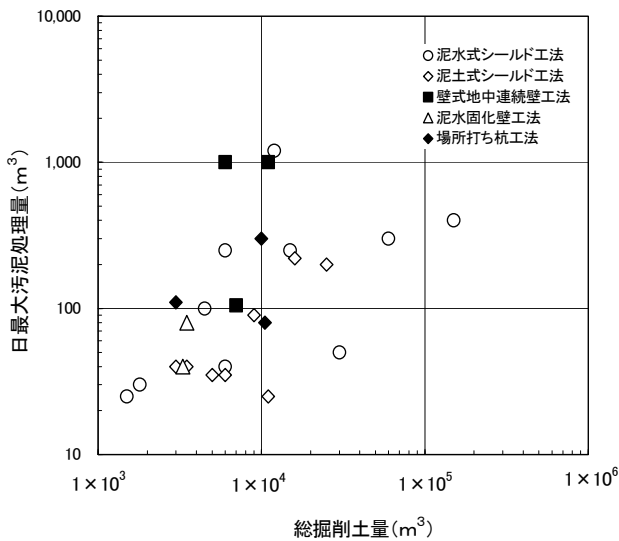


図-2 総掘削量と最大汚泥処理量の関係³⁾

b) 循環型社会を目指した固化材の開発

本工法では、高分子凝集剤とセメント系固化材の2種類の固化材を選定している。高分子剤の作用機能は、高分子中の吸着活性基で静電気力及び水素結合により土粒子に吸着し、粒子間架橋作用により団粒化構造を形成すると考えられている。また、石炭フライアッシュは、それ自体水硬性を持たないが、

セメントを混入して使用すると、セメントの水和過程で生じる水酸化カルシウムと徐々に反応して安定なケイ酸カルシウム等の化合物を作るポズラン反応を示すため、長期にわたり強度が増加し、水密性や耐久性が向上することが知られている。従来技術におけるバックホウやスタビラザ等の原位置混合は均質性に欠け、また処理効率が低いミキサーの使用は往々にして必要以上に固化材を投入する傾向があった。また、固化材の経済性は添加量と効果の関係より評価されるべきであり、したがって材料費自体が廉価であっても効果が希薄であれば添加量を増す必要があり、低廉な固化材を選定することが有利となるわけではない。

本工法では、石炭フライアッシュとセメントを主成分とし、数種類の無機化合物を混合した特殊添加剤を開発し、これを添加することにより固化性能の向上を図っている。普通ポルトランドセメントより若干高いものの、軟弱地盤用土質改良材よりは安価であり、石炭フライアッシュの利用は循環型社会形成の観点から鑑みても有意義であると思われる。

3. 実務への適用

(1) 発生泥土の物理的特性

表-2は、本工法を実務で適用した泥土の物理的性質を示したものである。発生時の泥土の含水比は液性限界より高く、いずれもスラリー状~泥水状を呈するものであり、細粒分が7割以上占めるものや水素イオン濃度pHが高いもの、有機分が多い(強熱減量が高い)もの等、性状の異なる泥土に対して本工法の適用性の評価を行った。なお、同表に示すフロー値及びスランプは、発生泥土に対し日本道路公団規格(JHS A 313-1992)エアモルタル及びエアミルクの試験方法(シリンダー法)、コンクリートのスランプ試験法(JIS A1101:1998)により測定した値であり、それぞれの測定状況は写真-5、-6に示すとおりである。



写真-5 スランプ試験

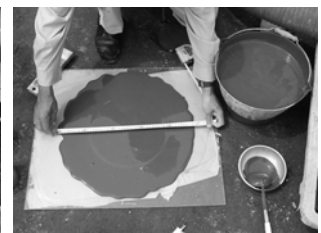


写真-6 シリンダー法によるフロー値の測定試験

表-2 泥土の物理特性

分類	非自硬性汚泥					自硬性汚泥		
	泥土圧 シルト工法 排泥	採石場 沈砂池 堆積土	造成地 沈砂池 堆積土	港湾 浚渫土	河川 浚渫土	RJP工法 排泥	SJM工法 排泥	TRD工法 排泥
土粒子密度 (g/cm ³)	2.704	2.669	2.652	2.627	2.671	2.687	2.651	2.804
湿潤密度 (g/cm ³)	1.611	1.558	1.742	1.385	1.868	1.300	1.307	1.893
含水比 (%)	60.6	75.2	49.8	102	33.7	167	160	29.5
フロー値 (mm)	—	—	90	90	85	205	180	120
スランプ (cm)	21.0	16.5	—	16.5	12.0	—	—	—
液性限界 (%)	37.9	60.1	44.1	41.3	N P	—	—	—
塑性限界 (%)	26.1	26.1	33.1	28.4	N P	—	—	—
塑性指数	11.8	34.0	11.0	12.9	—	—	—	—
液性指数	2.9	1.4	1.5	5.7	—	—	—	—
礫分 (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
砂分 (%)	30.3	43.9	30.0	28.6	57.9	33.0	33.1	84.7
シルト分 (%)	50.0	20.5	40.9	51.6	22.5	36.5	40.8	10.3
粘土分 (%)	19.7	35.6	29.1	19.8	16.9	30.5	26.1	5.0
細粒分 (%)	69.7	56.1	70.0	71.4	39.4	67.0	66.9	15.3
均等係数	31.3	—	—	—	—	—	—	15.9
曲率係数	1.9	—	—	—	—	—	—	1.3
分類名	シルト	粘土	シルト	シルト	細粒分質砂	シルト	シルト	細粒分質砂
分類記号	ML	CH	ML	ML	S F	M	M	S F
強熱減量 (%)	—	5.2	6.9	10.2	2.5	—	—	—
pH	9.7	7.2	6.8	7.5	10.8	11.1	11.8	11.4

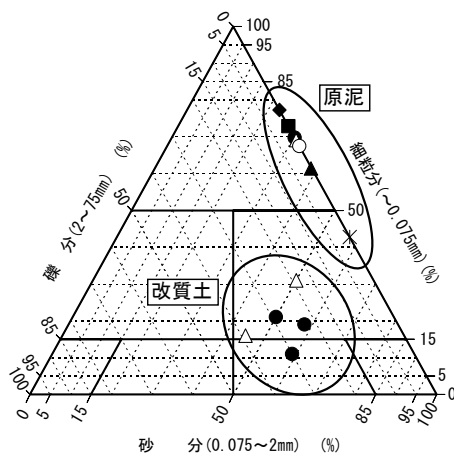


図-3 三角座標

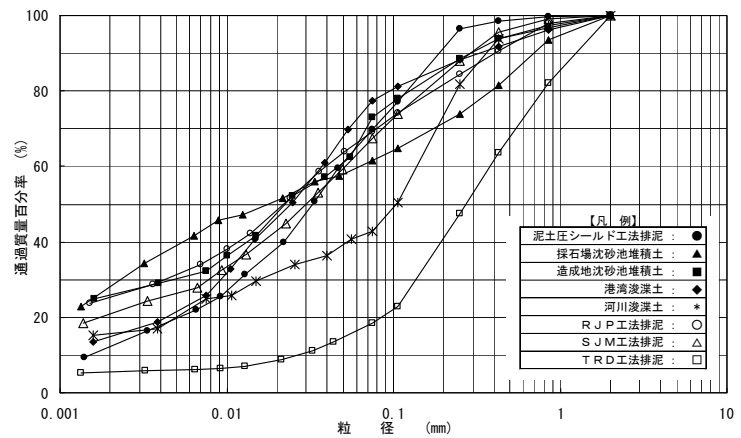


図-4 泥土の粒度曲線

a) 粒度特性

発生泥土の粒度組成は表-2及び図-3（三角座標）に示すとおりであり，粒度曲線を図-4に示す．図-3には改質土の粒度組成も併記したが，いずれも日本統一分類のSF～SGに属する砂質土に改質されていることが分かる．

b) 含水比とフロー値，スランプの関係

図-5，-6は含水比とフロー値及びスランプの関係を示したものである．含水比とフロー値及びスランプの間には，いずれも有意な線形関係（相関係数 $r \geq 0.96$ ）が認められ，直線の勾配は細粒分の多い

泥土ほど小さく，逆に細粒分の少ない泥土ほど大きい．すなわち，細粒分の少ない泥土の流動性は含水比の変化に対し鋭敏に反応する．泥土の改質に必要なとされる固化材添加量の多少が，細粒分含有量に支配されることは周知の事実である．含水比の変化に鋭敏に反応する細粒分の少ない泥土が，細粒分の多い泥土に比べ固化材が少なくて済むことは，流動性と含水比の関係からも理解される．

(2) 室内配合試験

泥土の改質に当たっては，汚泥の性状，要求品質を

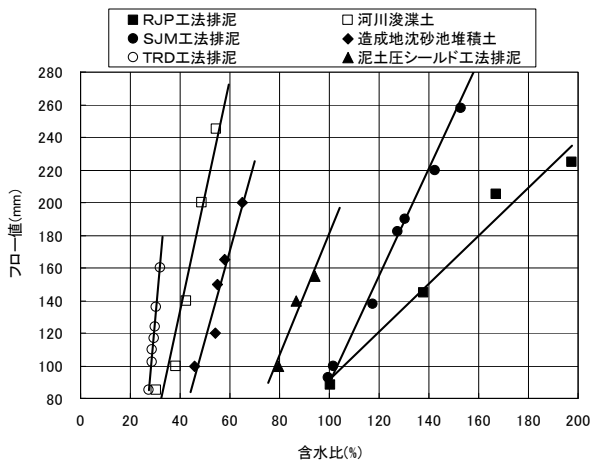


図-5 含水比とフロー値の関係

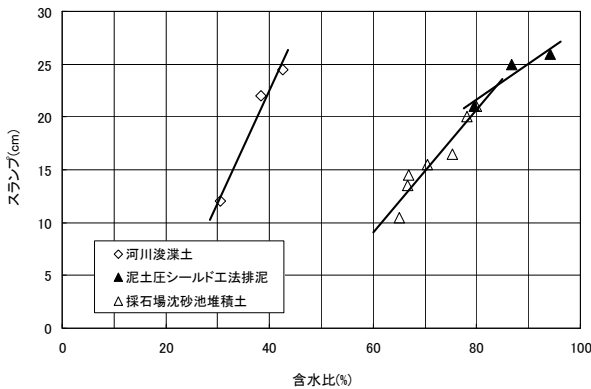


図-6 含水比とスランプの関係

考慮し適切な配合設計を行う必要がある。一般に品質判定のための試験項目には、コーン指数 (JIS T 716)、一軸圧縮強さ (JIS A 1216) 及び CBR (JIS A1211) 等 が用いられる。また、改質土の品質区分はコーン指数を指標としていることが多く、試験方法も簡易であることから、本工法の配合試験でもこの方法を採用した。

改質時における固化材の添加量は、当然のことながら含水比が高く流動性に富む状態にあるほど多く必要とする。前述したように流動性と含水比は高い相関関係を示し、泥土の状態はフロー値もしくはスランプを指標として判断できると考えられる。

図-7は、河川浚渫土の室内配合試験結果を示したものである。この現場では、改質土を河川堤防の築堤用土として流用する計画であり、品質要求は第3種処理土 ($qc \geq 400 \text{ kN/m}^2$) 相当とされた。そこで、泥土の含水比を $W=30, 40, 50\%$ に調整し、それぞれのフロー値、スランプを測定した上で、 1m^3 当たり 10kg の高分子凝集剤 (旭有機材: S-1T) と固化材 ($80, 100, 120\text{kg/m}^3$) を添加しコーン指数を把握した。品質強度を満足する固化材の添加量は含水比 (フロー値、スランプ) と指数的な関係にあり、 $W=50\%$ の状

態にある泥土では、添加量の多少により得られるコーン指数の差は小さい。このことは、経済的な改質を行う上で、2章の(1)で述べた貯泥及び固液分離による調泥作業や、如何に含水比を押さえた泥土を採取するかが重要な課題であることを示唆するものである。

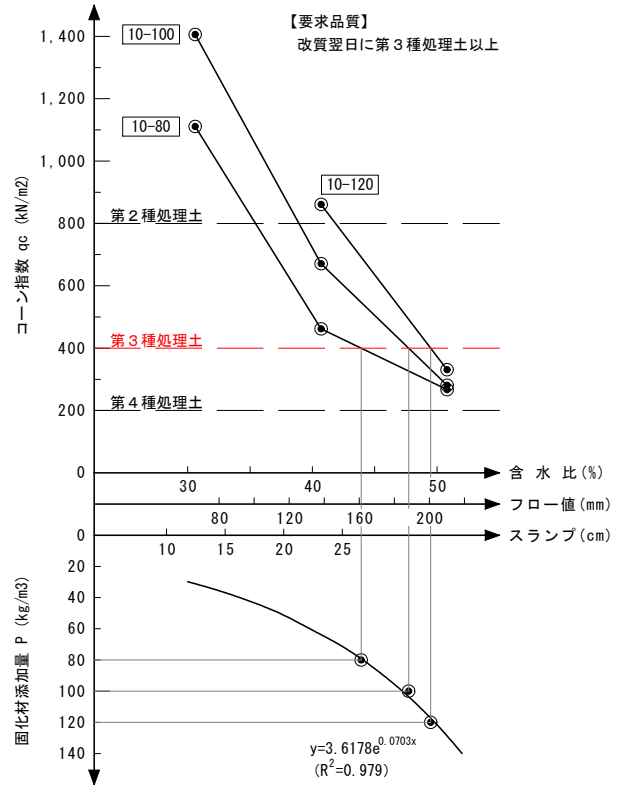


図-7 室内配合試験例 (河川浚渫土)

(3) 改質土の工学的特性

a) 粒度特性

図-8、図-9に実機により改質した処理土の粒度曲線を示す。泥土圧シールドの排泥に対しては高分子凝集剤を 10kg/m^3 添加し、固化材は $80 \sim 250\text{kg/m}^3$ の範囲で変化させ改質を行った。図中 n なる値は、Talbot⁴⁾ が提案した式(1)で表される指数である。

$$P = \left(\frac{d}{D} \right)^n \times 100 \quad (1)$$

ここで、 P : 通過質量百分率、 d : 任意粒径、 D : 最大粒径、 n : 粒度分布を表す指数。

図-8に示すとおり、シールド汚泥における n の値は、固化材の添加量が多い処理土ほど大きく、添加量の少ない処理土ほど小さい。また、自硬性汚泥を改質した場合の処理土は概ね $n=0.3 \sim 0.5$ の範囲にある。大根⁵⁾ はフィルダムの築堤用土として泥岩材料やまさ土を用いた場合、撒出・転圧による粒度組成

と強度低下の関係を調べ、強度低下を起こさないためのn値として $n \approx 0.3$ を提案している。また、Lee⁶⁾は $n=0.25 \sim 0.50$ のTalbot曲線はアースダム用の天然材料を選ぶ場合の基準となり得ることを提案している。固化材の添加量により粒度組成は $n=0.2 \sim 0.5$ の範囲に調整することが可能であり、多種多様な処理土の生産が可能であるものと思われる。

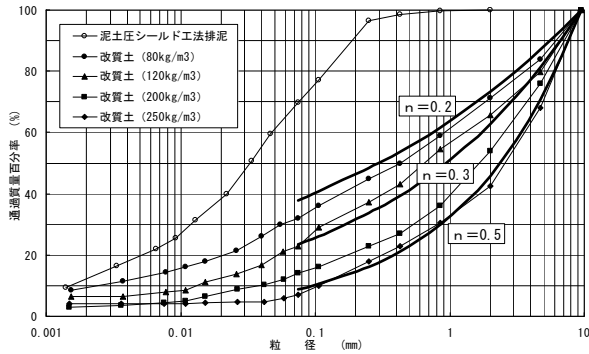


図-8 泥土圧シールド排泥土の改質前後の粒度曲線

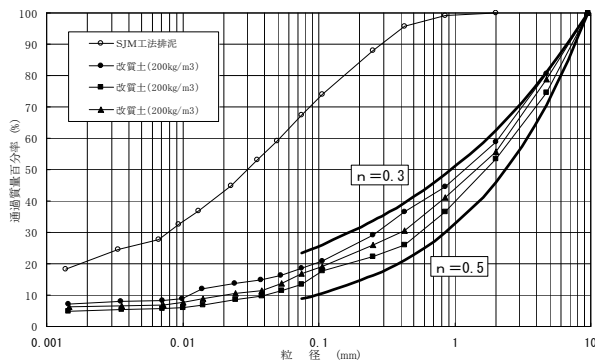


図-9 S J M工法排泥土の改質前後の粒度曲線

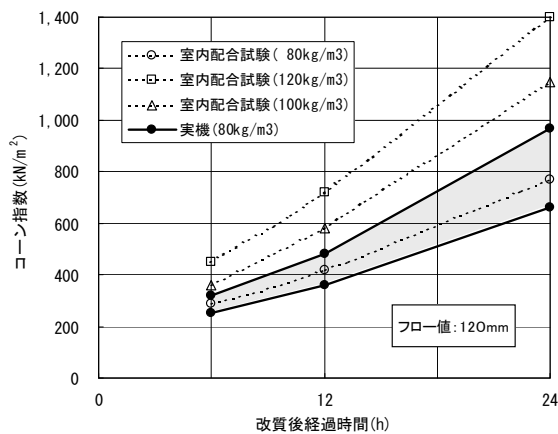


図-10 河川浚渫土における改質土のqcの経時変化

b) 現場強度と室内強度の比較

地盤改良マニュアル⁷⁾によれば、バックホウやスタビライザー等を用いた原位置混合では、現場と室内で得られる強度比（現場／室内）は平均的に0.5程度であるとしている。これは、攪拌性能によ

る混合程度の相違と養生温度の相違に起因する強度の差、及び改良区域での土質のバラツキや含水比の相違による現場強さの変動により生じるものと考えられており、室内配合試験時には、（現場／室内）強度比の逆数を割り増し係数とし、添加量を決定するよう規定している。図-10は、河川浚渫土の改質土におけるコーン指数の経時変化を、実機による結果（実線）と室内配合試験の結果（破線）を対比し示したものである。同図に示すとおり、本工法における（現場／室内）強度比は、ほぼ1.0に近い結果が得られており、混練性能の高いミキサーの使用、調泥作業に土質性状のバラツキの抑制、フロー管理による固化材添加量の適正化等による成果と考えられる。

c) CBR特性

図-11に泥土圧シールド排泥土の改質土の一軸圧縮強度とCBR値の関係を示す。自然土における両特性の間には、概ね $CBR \approx 0.045qu$ の相関があるとされており、ほぼ類似した結果が得られている。また、CBR値はいずれも絶対値が10%以上であり、簡易舗装道路の下層路盤や規格の最も厳しい高速道路の路床にも適用できる結果となっている。また、水浸時の膨張比は1%以下が得られており良好な路床材料の範疇に入る。

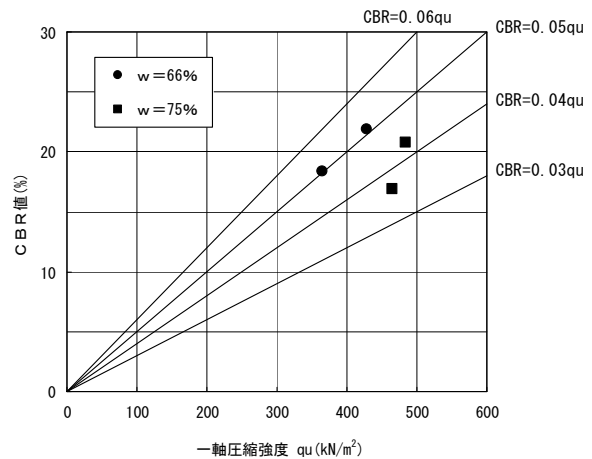


図-11 quとCBR値の関係（泥土圧シールド排泥土の改質）

参考文献

- 1) 野口真一：粒状固化工法による建設汚泥の再資源化，建設機械 2004 Vol. 40. No. 1
- 2) (財) 土木研究センター：発生土改良促進のための改良工法マニュアル，1997
- 3) 建設省土木研究所：建設汚泥再生利用技術暫定マニュアル（案），1996
- 4) W. B. Fuller & S. E. Thompson: The Laws of Proportioning Concrete, Trans. A. S. C. E., 1907, pp. 67-143
- 5) 大根義男：盛立材料としての岩塊としての諸問題，土と基礎，32-7 (1984)，pp. 3-8.
- 6) C. H. Lee.: Selection of Materials for Rolled-Fill Earthdams, Trans. A. S. C. E., 1938, pp. 1-18
- 7) (社) セメント協会：地盤改良マニュアル(第3版), pp46-47