

浚渫土砂の盛土材適用における管理手法

今井澄雄¹・木村忠一¹・高井力¹・諏訪俊雅²・大川尚哉³・林幹朗³・山内崇寛³

¹東京電力(株) 福島第二原子力発電所 総務部 (〒979-0695 福島県双葉郡楢葉町大字波倉字小浜作 12)

²前田建設工業(株) 東北支店 小高作業所 (〒979-0695 福島県双葉郡楢葉町大字波倉字小浜作 1-1)

³正会員 前田建設工業(株) 土木本部 土木設計部 (〒179-8903 東京都練馬区高松 5-8)

東京電力(株)福島第二原子力発電所構内の沈澱池に収容している細粒分含有率や含水比のばらつきの大きな浚渫土砂を、大規模造成工事の盛土材として活用するために、沈澱池における事前分類を細粒分含有率と含水比で行うことが有効であること、また細粒分含有率、締固め度、空気間隙率の3つを指標とした締固めの品質管理方法及び細粒分含有率を指標とした沈下予測方法について報告する。

キーワード：浚渫土砂、盛土管理手法、細粒分含有率、締固め度、空気間隙率、圧密沈下

1. はじめに

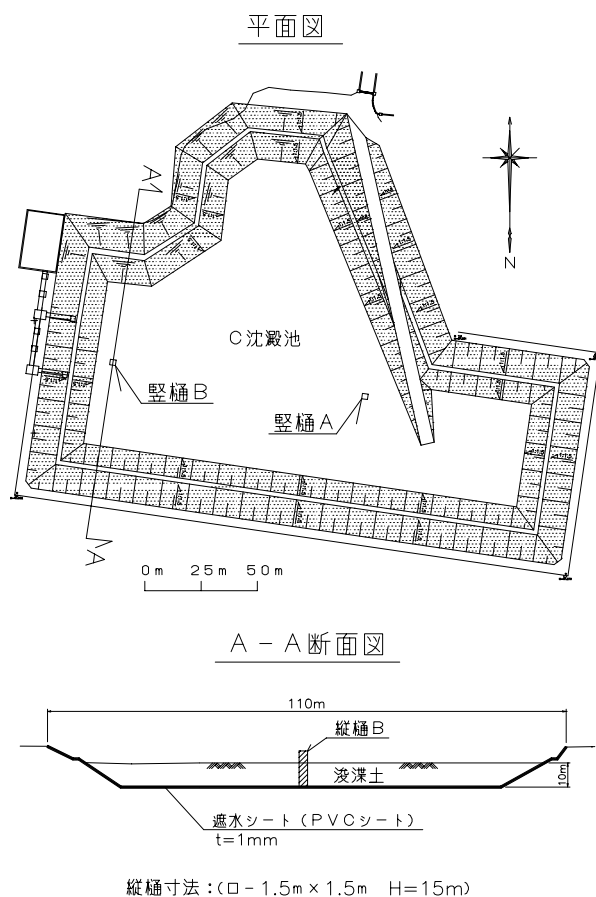


図-1 沈澱地形状



写真-1 浚渫土砂搬出状況

福島第二原子力発電所専用港湾では、航路確保のために、年間約8万 m^3 を浚渫し、3ヶ所の沈澱池（合計容量は約60万 m^3 ）に収容している。

この沈澱池に収容している浚渫土砂を約35km離れた福島県相馬郡小高町まで、ダンプトラックで運搬し、大規模造成工事（盛立て高さ約23m）の盛土材として活用している。各沈澱池は、図-1に示すように、縦樋を数カ所設置しているため、地表面は、湿地ブルドーザが稼働できる状態（写真-1）まで、含水比が低下するが、下部には高含水比の浚渫土砂が堆積していることから、コスト面、環境面を考慮して、極力改良せずに盛土材として使用する方法を検討した。図-2に当工事における盛土の品質管理フローを示す。

そこで、本稿では、土性のばらつきの大きな浚渫土砂の盛土材としての適性（＝締固め作業のトラフィカビリティ確保）を沈澱池内で事前に評価、分類する方法、及び降雨浸水による強度低下を考慮した締固め品質管理方法ならびに沈下予測方法を報告する。

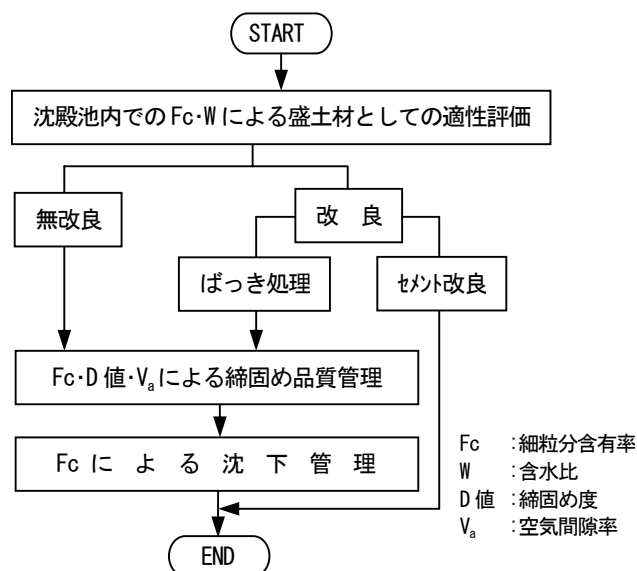


図-2 管理フロー

2. 浚渫土砂の盛土材への適用

(1) 盛土材への適用条件

現在、沈澱池に収容されている浚渫土砂の細粒分含有率（Fc）、含水比（W）は図-3に示すとおりであり、いずれもばらつきが大きく、一部、液性限界より高い含水比を有した状態で収容されている事がわかる。

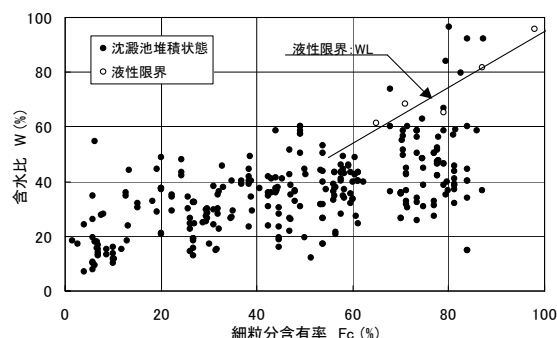


図-3 沈澱池浚渫土砂の性状

このため、湿地ブルドーザでの締固め作業のトラフィカビリティの確保を考慮し、盛土材に使用するための条件を $q_c=300$ (kN/m²) とし、浚渫土砂を表-1のように分類した。したがって、沈澱池での浚渫土砂の Fc, W という物理特性から締固め作業時の強度 (q_c) を推定して、

盛土材としての適性事前評価を行う必要がある。

表-1 浚渫土砂分類表

コーン指数 (kN/m ²)	浚渫土砂の対応	
$q_c \geq 300$	A : 無改良	
$q_c < 300$	B : 改良	B 1 : 含水比低下 (ばっき改良)
		B 2 : 固化材混合 (セメント改良)

(2) 締固め品質管理方法の課題

従来の締固め品質管理方法は、粗粒土系の盛土材料は締固め度（D値）、細粒土系の盛土材料は空気間隙率（ v_a ）を指標としている。この2つの管理方法は、盛土材料が比較的均一である事を前提にしており、また締固め後の強度と各指標との相関が確認できない。このため、今回の浚渫土砂のように土性のばらつきの大きな盛土材に、従来の管理方法を適用した場合、盛土体の強度にばらつきが生じ、必要な強度を満足しないケースが発生する。また、直接コーン指数（ q_c ）を管理指標とする事も考えられるが、この場合、降雨浸水による強度低下を考慮する事ができない。そこで、多様な土性の盛土材に対しても、適用が可能で、かつ降雨時の強度低下（浸水後の必要強度： $q_c \geq 300$ (kN/m²)) を考慮した締固め品質管理を行う必要がある。

3. 沈澱池での事前分類方法

(1) 浚渫土砂の材料特性

沈澱池のコーン指数は、ほとんどの浚渫土砂が $q_c=300$ (kN/m²) を満足していたため、締固め時のトラフィカビリティは問題なく、無改良で盛土材適用が可能であると考えられていた。しかし、掘削、運搬、敷均しを行う過程で、図-4に示す様に練返しによる強度低下により、 $q_c=300$ (kN/m²) を満足しなくなり、無改良で盛土材として適用不可能な浚渫土砂が多い事が判明した。

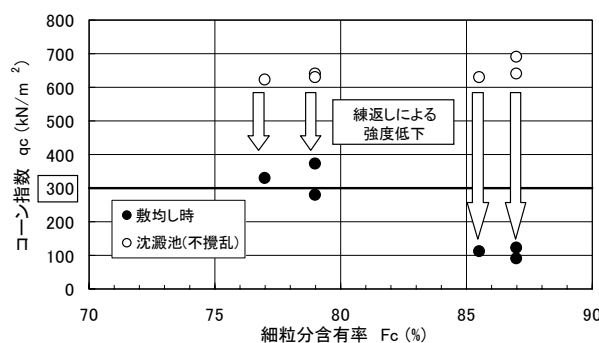


図-4 敷均し時の強度低下

この強度低下現象を室内で再現するために、まず、現場で掘削・敷均した状態でコーン試験を実施した。次に同じ材料を用いて室内で直径10cmのモールドに2.5kgランマーにより1層当たり25回、突固め層数を3層（締固め仕事量＝1Ec）とした締固め試料のコーン試験を実施した。図-5に試験結果を示すが、現場で敷均した状態のコーン指数は、締固めた試料のコーン指数とほぼ一致することが判明した。この傾向は他の細粒分含有率（Fc）の試料で試験した結果でも同様であった。このことから、現場敷均し時に低下した浚渫土砂の強度を締固めた試料のコーン試験で再現できることがわかった。

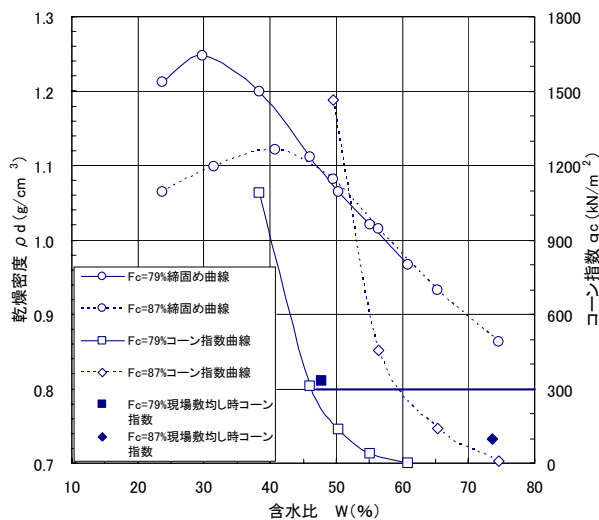


図-5 敷均し時と室内締固めコーン指数

(2) 事前分類方法

現場敷均し時の浚渫土砂の強度が、締固めた試料のコーン試験で再現できる特性（図-5）を利用して、沈澱池で事前分類する方法について以下の検討を行った。

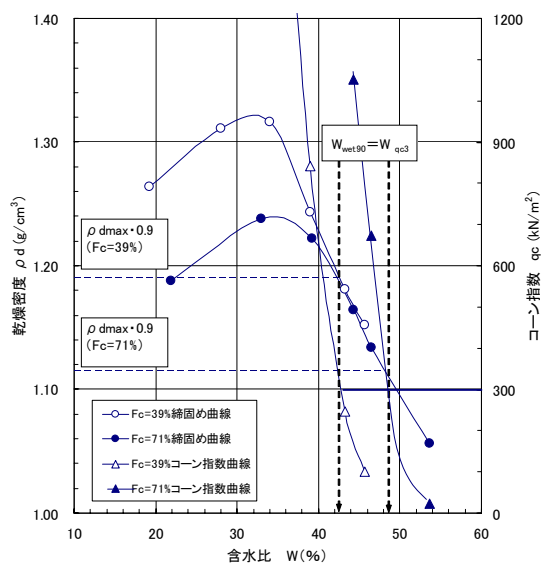


図-6 締固め曲線とコーン指数

図-6に細粒分含有率：Fc=39, 71%の浚渫土砂の締固め曲線および室内コーン指数を示す。これより、 $q_c=300$ (kN/m²)を満足する含水比 (W_{qc3})と締固め度（D値）90%の湿潤側含水比 (W_{wet90})がほぼ一致することがわかる。各Fcで上記試験を実施し、算定された W_{qc3} , W_{wet90} を図-7に示す。この結果、Fcによらず W_{qc3} と W_{wet90} はほぼ一致しており、Fc— W_{wet90} (W_{qc3}) 関係は直線比例関係であることがわかる。よって、浚渫土砂の含水比が W_{wet90} ライン以下であることが、敷均した状態で締固め作業に必要な強度 ($q_c=300$ (kN/m²)) を満足する事前分類指標と判断できる。

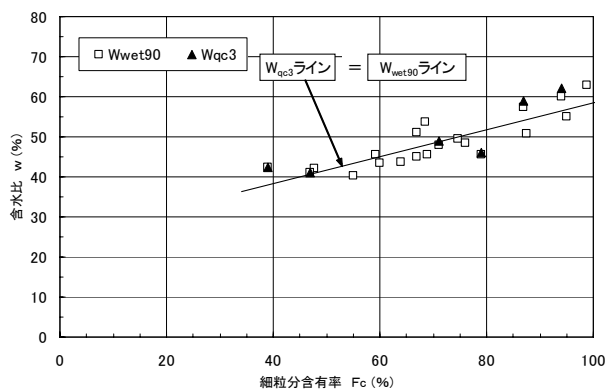


図-7 W_{wet90} と W_{qc3} の比較

ここで、 W_{wet90} ラインの妥当性を検証するために、実際の盛立て現場において含水比、コーン指数の測定を行い $q_c=300$ (kN/m²)以下であったものを図-8に示す。 $q_c=300$ (kN/m²)以下であるものは、ほぼ W_{wet90} ライン以上である結果となり、実施工においても、 W_{wet90} ラインを事前分類指標とする事の妥当性が確認された。よって、沈澱池でFcとWを測定し、これを W_{wet90} ラインと比較することで、沈澱池の各エリアを図-9に示す様に事前分類する事が可能となる。ここで、 $Fc \leq 30\%$ では、高含水比の浚渫土砂でも短時間のばっきで含水比が W_{wet90} まで低下することが確認できたので、すべてA分類（無改良）とした。

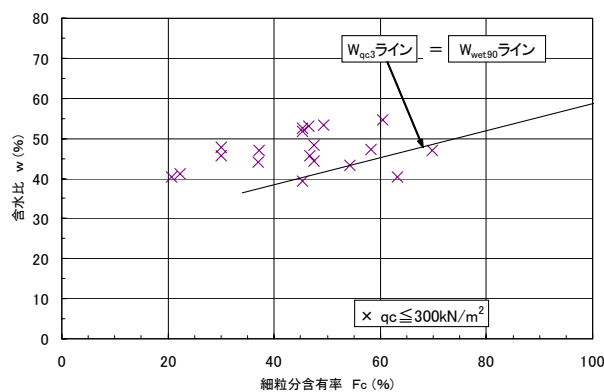


図-8 現場検証結果

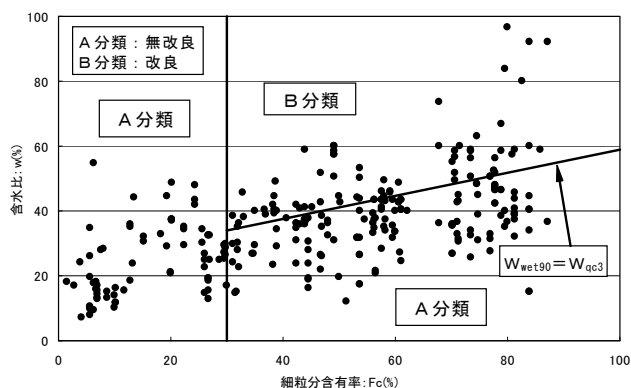


図-9 浚渫土の事前分類

ただし、B分類（改良）の浚渫土砂でも、図-6に示すように自然含水比を W_{wet90} 以下にすることによって、十分盛土材への適用が可能となる。そこで、現地でばつき試験を実施して、図-10に示すような各ばつき期間毎（図-10は2週間、4週間のみ記載）に F_c —含水比低下量 (ΔW) を作成しておき、B分類と事前分類された沈澱池各エリアで図-9の F_c に応じた W_{wet90} ラインまでの含水比低下が可能となるばつき期間を確保できる様な、掘削・搬出計画を立案することで最も経済的な盛土が可能となる。

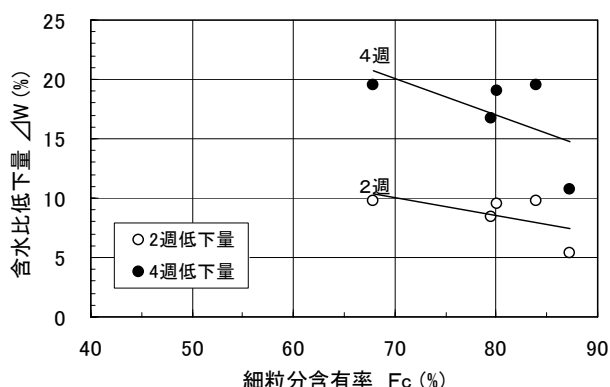


図-10 ばつきによる含水比低下量

4. 締固め品質管理方法

(1) 検討方法

降雨浸水の強度低下を考慮しても、 $q_c=300$ (kN/m^2) を満足できる締固め品質管理方法を検討した。管理指標は、その簡便性から、RI計測による密度（締固め度D値）、空気間隙率 (v_a) を用いるものとした。

(2) 室内試験方法と結果

a) 試験方法

3種類の細粒分含有率 ($F_c=47, 71, 98\%$) $\times$ 3種類の乾

燥密度 (D値: 80, 85, 90%) $\times$ 4種類の空気間隙率 (v_a : 5, 10, 15, 20%) の合計 36 試料をモールドで作成し、浸水前後のコーン指数を測定した。図-11に $F_c=98$ (%) の場合の供試体の状態を締固め曲線とともに示す。また、浸水条件は、降雨に伴う地下水の浸水の評価するために、モールドを 24 時間水槽に浸した。

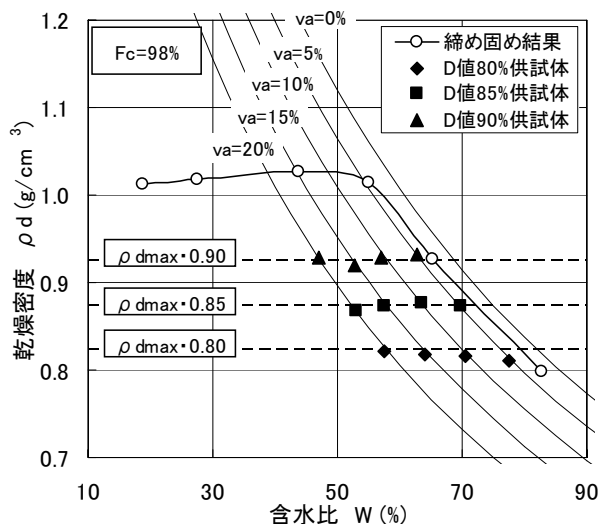


図-11 締固め曲線と供試体状態 ($F_c=98\%$)

b) 試験結果

図-12に各 F_c のD値と浸水前後の q_c の関係を示す。浸水前の状態では、 F_c が小さいほどD値の増加に対するコーン指数の増加が大きくなり、D値 85%付近でコーン指数が急増している。しかし、浸水後の状態では F_c の違いによらずほぼ同じ直線になっており、浸水後の必要強度を満足するD値は F_c によらず 85%程度以上が必要であることがわかった。

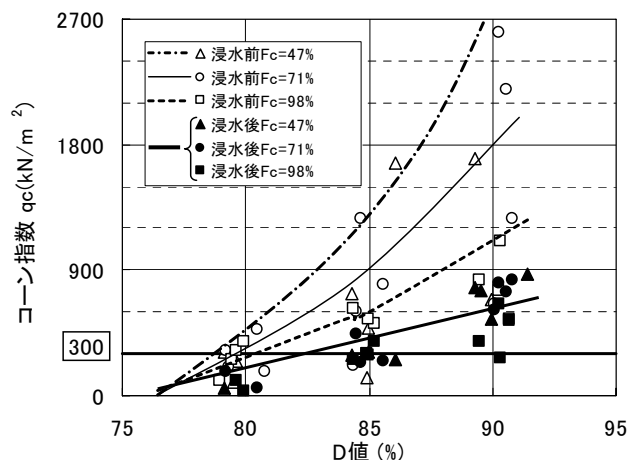


図-12 浸水前・後D値— q_c 関係

ここで、図-13にD値=90%の浸水前後の v_a と q_c を示す。浸水前の $v_a=5\%$ の q_c は F_c によらずほぼ同一の値である。また、浸水後の v_a は、 F_c によらず、ほぼ5%程度となっているので、浸水後の q_c も F_c によらずほぼ同程度の値になった事が推定される。

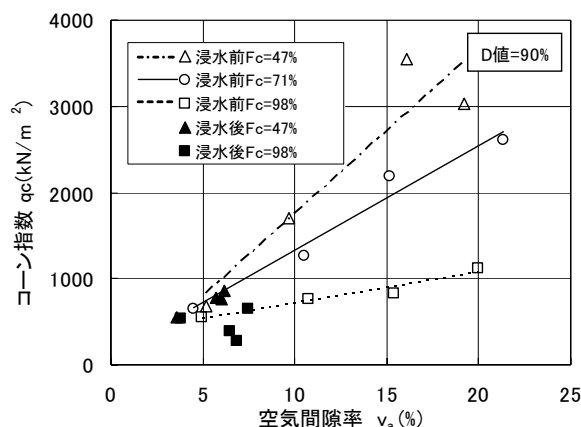


図-13 浸水前・後 v_a - q_c 関係 (D 値=90%)

図-14~16 に、各細粒分含有率 ($F_c=47, 71, 98\%$) のD 値85%供試体の浸水前 v_a と浸水前後の q_c の関係を示す。浸水前の状態では v_a が大きくなる(含水比が小さくなる)と q_c は大きくなるという関係が見られるが、浸水後では v_a が大きくなると q_c が低下量するという結果となった。これは、浸水前の v_a が大きいものほど、吸水膨張の影響を受けて、乾燥密度 ρ_d が浸水後に減少する比率が大きい事に起因していると考えられる。図-17 に浸水前後の乾燥密度比と強度比を示すが、乾燥密度比が小さくなるほど、強度比が減少する傾向があり、乾燥密度比の低下率が強度の減少に起因していると判断できる。

また、図-14~16 に示す様に浸水前後で必要強度を満足する空気間隙率 (v_{aqc3}) の範囲が存在することがわかった。同様のことが、D 値 90%供試体でも確認され、D 値、 F_c に応じて、締固め後の空気間隙率 v_a をこの範囲内とすれば、降雨浸水による強度低下を考慮した品質管理が可能となる。

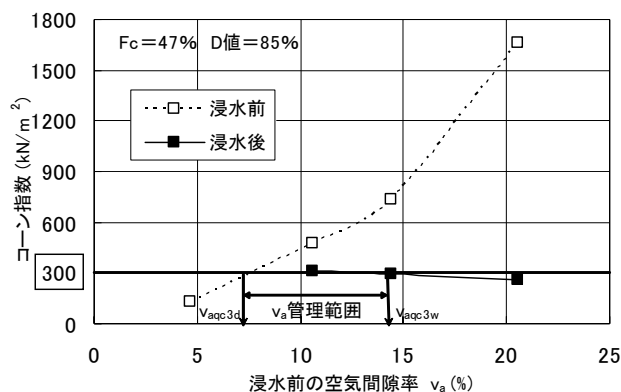


図-14 浸水前・後 v_a - q_c 関係

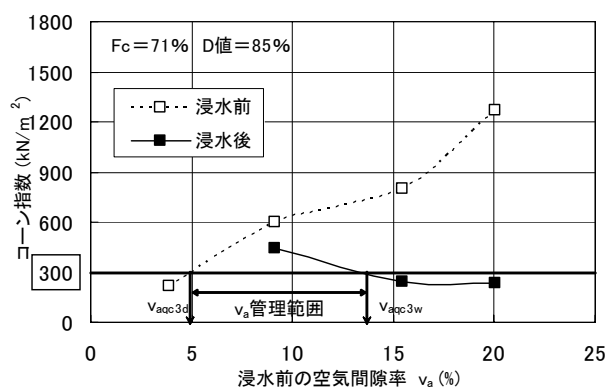


図-15 浸水前・後 v_a - q_c 関係

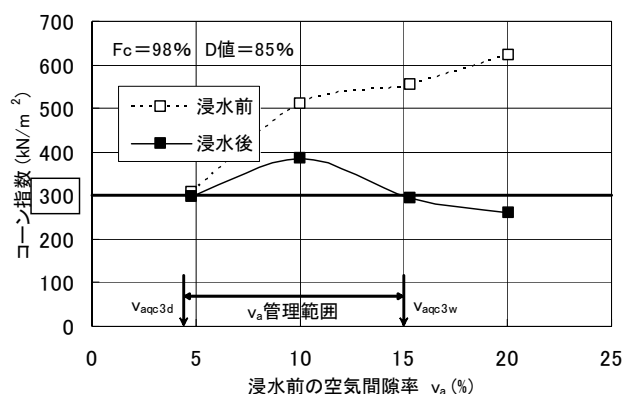


図-16 浸水前・後 v_a - q_c 関係

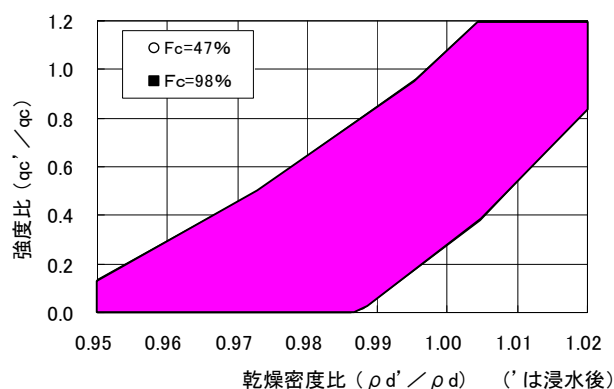


図-17 浸水前後の乾燥密度比-強度比

(3) 締固め品質管理方法

図-14~16 の手法で算定した浸水前に必要強度 ($q_c \geq 300$ (kN/m²)) を満足する空気間隙率 (v_{aqc3d}) と浸水後に必要強度を満足する空気間隙率 (v_{aqc3w}) から、図-18~20 の締固め管理グラフを作成する事ができる。このいずれかの管理グラフを用いれば、様々な F_c の材料にも、降雨浸水による強度低下を考慮した品質管理が、R I 計測による v_a 、D 値を用いて行うことができる。

①Fc-v_{aqc3} 管理グラフ (図-18)

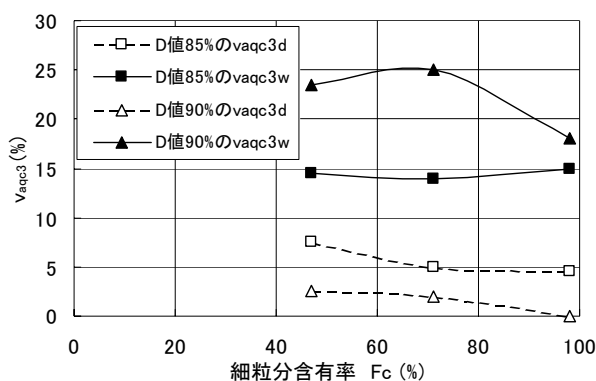


図-18 Fc-v_{aqc3} 関係

例えば、Fc=70%の土が締固め後のR I 計測よりD値85%と計測された場合、 v_a が5~14%の範囲であれば、浸水前後で必要強度を満足することになる。

②D値-v_{aqc3} 管理グラフ (図-19)

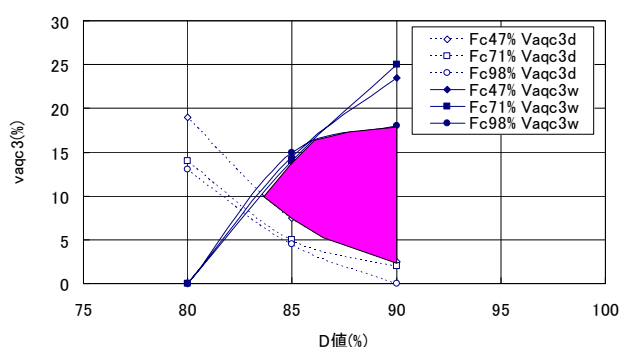


図-19 各FcのD値-v_{aqc3} 関係

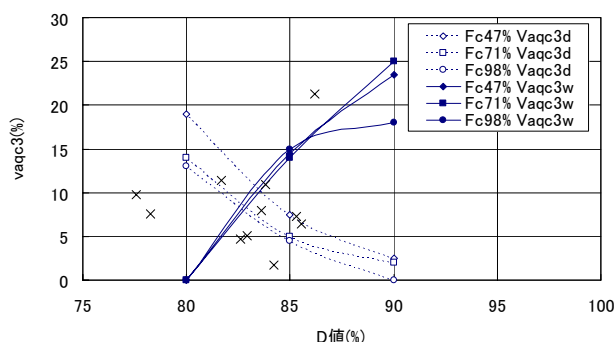


図-20 図-19の検討結果(現場計測結果)

当工事で採用した管理グラフであり、管理の簡便性からどのFcの土に対しても、D値、 v_a は図中のハッチング範囲(安全側に設定)とし、D値は83%以上、 v_a は各D値に応じて2~18%の範囲で設定した。

ここで、図-19の管理範囲の妥当性を検証するために、実際の盛立て現場において測定をおこい、浸水前後を含め、 $q_c=300$ (kN/m²)以下であったものを図-20に示す。いずれも盛土材は管理範囲として設定した図-19のハッチング部の範囲外であり、実施工においてこの管理方法の妥当性が検証された。

③Fc-D値-v_{aqc3} 管理グラフ (図-21)

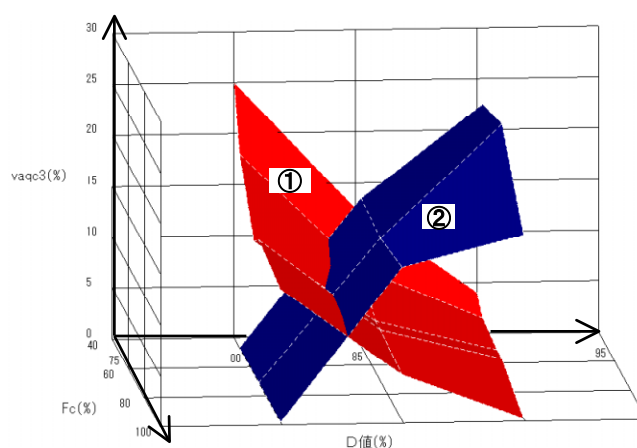


図-21 Fc-D値-v_a 関係

さらに、図-18~19からFc-D値-v_aを図-21に示すように3次元的に表現する事で、より厳密な管理を行う事も可能である。図中、①面より上の領域が浸水前に必要強度を満足する領域であり、②面より下の領域が浸水後に必要強度を満足する領域である。D値、 v_a 、Fcの座標がこの両者を満足する範囲に入っていれば良いことになる。

5. 盛土材の沈下予測方法

(1)検討概要

盛土工事の土量管理を行うためには、締固められた盛土材の沈下予測を事前に行う必要がある。そこで土性のばらつきが大きい当工事において、Fcを指標とした新しい沈下予測方法を提案し、その妥当性を計測結果から検証した。

(2)室内試験方法と結果

a)試験方法

6種類の細粒分含有率(Fc:19, 40, 47, 65, 71, 98%)×1種類の乾燥密度(D値:83%)×2種類の含水比(W:W_{wet90}, W_{opt})の合計12試料を作成し、圧密試験を実施した。ここでD値83%の試料としたのは、図-19に示すように、当工事の締固め管理でD値の下限値が83%となっているからである。図-22にFc=71%の場合の供試体の状態を締固め曲線とともに示す。

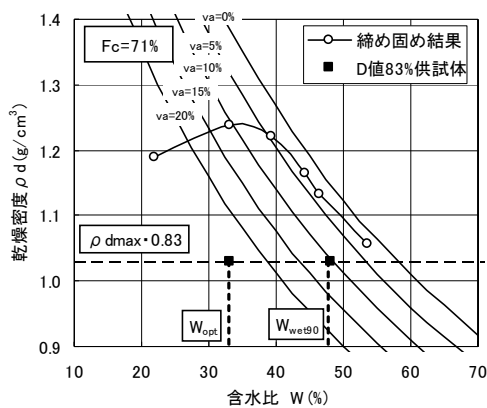


図-22 締固め曲線と供試体状態 (Fc=71%の場合)

b) 試験結果

図-23 に Fc=19, 71% の 2 種類の Fc における圧密試験結果を示す。これにより、同じ Fc の試料では、同じ乾燥密度であれば含水比 ($W: W_{wet90}, W_{opt}$) が異なっても圧密性状は、ほぼ同じであることが分かる。

そこで、図-24 に Fc=19, 40, 47, 65, 71, 98% の圧密性状として、含水比 W_{wet90} のみを示す。

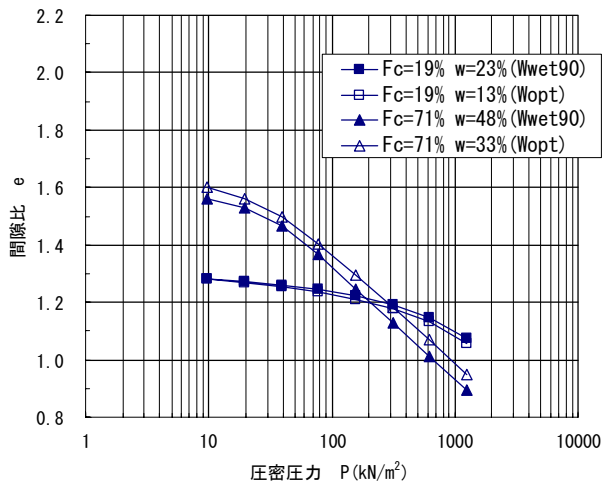


図-23 圧密試験結果 (Fc=19, 71%の場合)

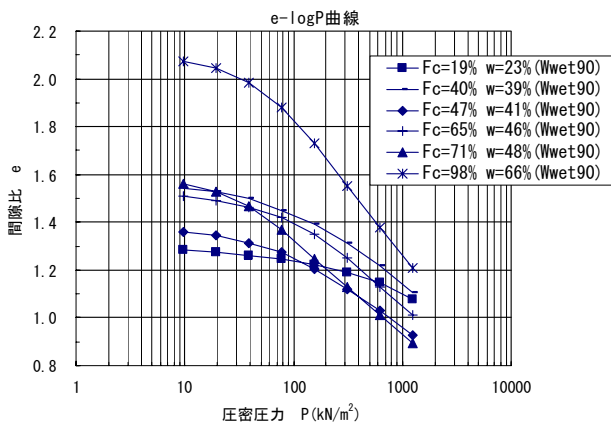
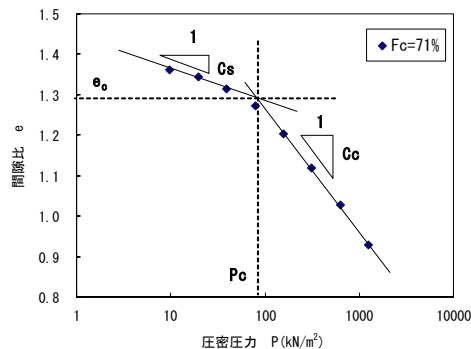


図-24 圧密試験結果 (Fc=19, 40, 47, 65, 71, 98%)

また、図-25 のように圧密諸指数 (P_c, e_c, C_s, C_c) を各 Fc ごとに算定し、Fc で整理した結果を図-26, 27 に示す。これらの結果から、Fc と圧密諸指数との相関性が確認できた。



P_c : 圧密降伏応力 (kN/m^2)

e_c : P_c における間隙比

C_s : 図-23 に示す圧縮曲線の勾配、膨張指数

C_c : 図-23 に示す圧縮曲線の勾配、圧縮指数

図-25 各圧密諸指数の算定方法 (Fc=71%の場合の e-logP 曲線)

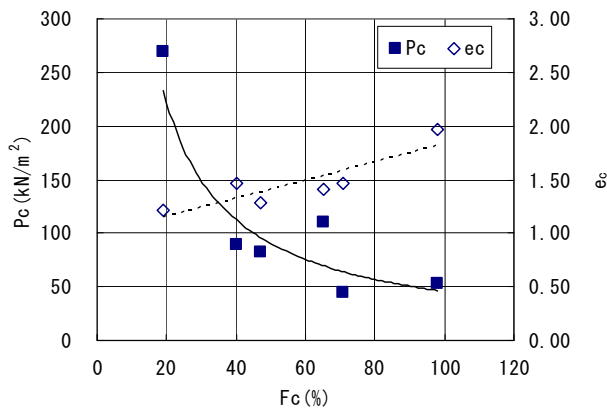


図-26 Fc- P_c, e_c 関係

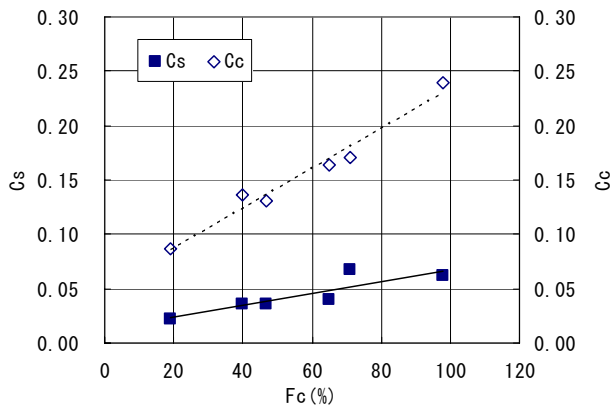


図-27 Fc- C_s, C_c 関係

(3) 沈下予測方法

各盛土層の平均 F_c から、沈下量算定に必要な各圧密諸指数は、図-26, 27 に示す F_c との相関グラフから求め、図-28 に示すような各盛土層毎の e - $\log P$ 曲線を作成し、沈下量は図-29 の式(1), (2)から算定することができる。

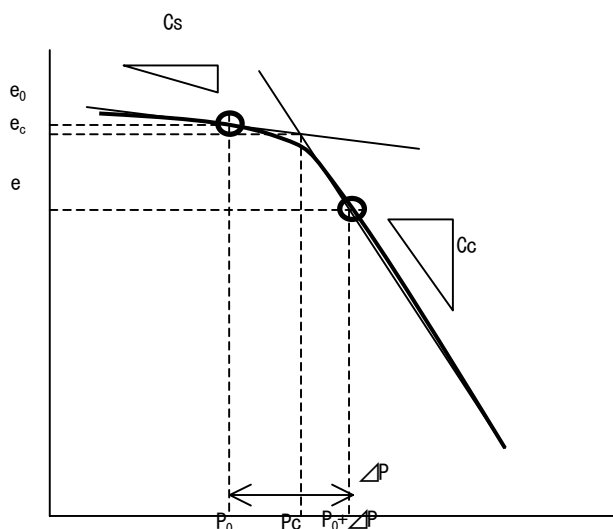
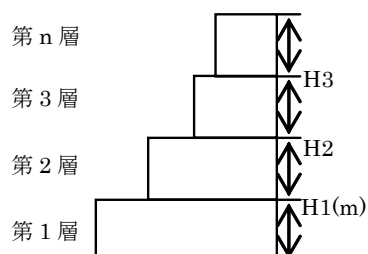


図-28 n層の e - $\log P$ 曲線 (図-26, 27 から作成)



$$S = \sum_{i=1}^n S_n \quad (1)$$

$$S_n = \frac{e_0 - e}{1 + e_0} \cdot H_n \quad (2)$$

ここで、

- S : 盛土の総沈下量 (m)
- S_n : n層における沈下量 (m)
- e_0 : 载荷前における初期間隙比
- e : 载荷後における間隙比
- P_0 : 载荷前の有効土被り圧 (kN/m^2)
- ΔP : 载荷後の増加鉛直応力 (kN/m^2)
- H_n : n層の層厚(m)

図-29 沈下量算定方法

(4) 沈下予測値と実測値の検証

盛土現場で沈下計測した結果と(3)の沈下予測方法により算定した結果を図-30, 31 に示す。

沈下量の計測値と予測値は、ほぼ同値であり、沈下予測手法の妥当性が検証された。

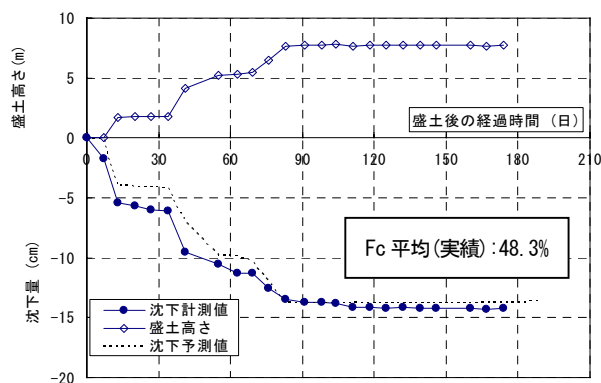


図-30 沈下量比較図(平均 $F_c=48.3\%$ の箇所)

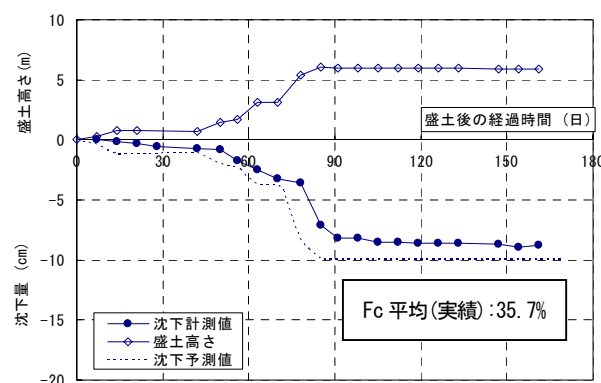


図-31 沈下量比較図(平均 $F_c=35.7\%$ の箇所)

6. おわりに

造成工事の盛土は、平成12年10月より16年10月までを目途に実施しており、総盛立土量は約60万 m^3 で、現在約42万 m^3 (H15.2現在)を実施した。砂とシルトが混じった浚渫土砂はこれまで、十分に時間を置くか、改良を行わなければ、盛土材として適用できなかった。この浚渫土砂を細粒分含有率 (F_c)、含水比 (W) により事前分類を行い、更に締固め度 (D 値) と空気間隙率 (v_a) を含めた管理グラフを作成すれば、改良を極力少なくすることが可能となる。また、細粒分含有率 (F_c) を指標とした沈下予測方法により、事前に浚渫土砂の沈下量を予測することも可能である。なお、この管理手法は浚渫土砂に限定されたものではなく、通常の盛土工事にも適応可能と考えられ、従来は盛土材として不適切とされていた細粒分含有率 (F_c) の高い軟弱な土質の盛土材への適応性拡大や盛土の高品質化を図る手法になると考えられる。