

国際線エプロンにおける SGM 軽量土の配合設計について
 ～長期耐久性を配慮した配合設計～

国際線エプロン JV 田中洋輔

キーワード：軽量混合処理土、長期耐久性、空気量、透水性

1. まえがき

国際線エプロン部の京急シールドトンネル上部における荷重軽減のための対策工として、SGM (Super Geo Material) 軽量土¹⁾ (以降、SGM) を採用した。羽田空港では、SGM を新 A 平行誘導路の京急シールドトンネルの上部や外周護岸へ適用している。技術提案時には、SGM の長期耐久性に配慮して SGM 工の外周部を高強度 SGM とした。

上記提案に対して、現地土を用いた配合試験を実施し、SGM の要求品質を満足する配合設計について検討を行った。

2. SGM の施工概要と要求性能

2-1 SGM の施工概要

SGM の施工位置図を図-1 に、施工断面図を図-2 に示す。また、SGM の施工数量を表-1 に、設計値を表-2 に示す。

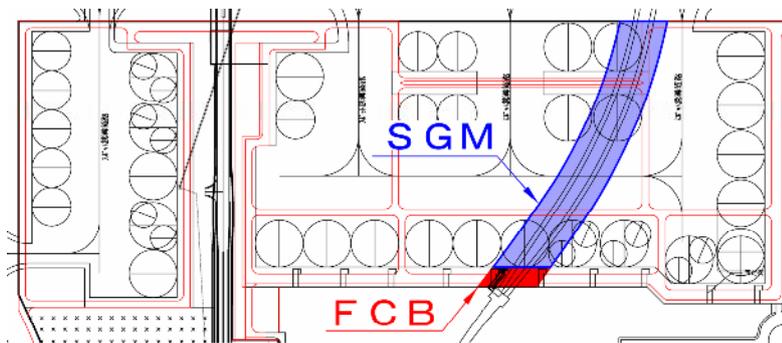


図-1 SGM の施工位置

表-1 施工数量

施工数量	81926m ³
施工延長	460m
幅	70m
層厚	2.5~3.5m

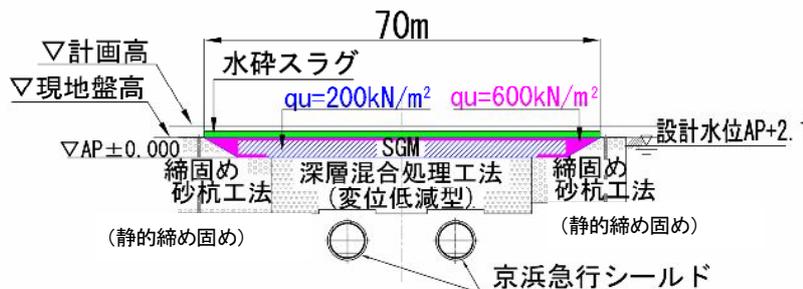


図-2 SGM の施工断面図

表-2 SGM の設計値

設計密度	1.1g/cm ³	
設計強度	一般部	200kN/m ²
	高強度部	600kN/m ²

技術提案時の SGM の設計強度は、一般部を $q_u=200\text{kN/m}^2$ 、外周部を高強度部の $q_u=600\text{kN/m}^2$ とした。これは、SGM の表面からの劣化に起因する沈下を低減するためである。

2-2 SGM の要求性能

SGM は、海底浚渫土や建設発生土などの原料土に固化材および軽量化材を混合した地盤材料であり、軽量かつ安定性の高いものである。また、配合時には所定の流動性を有し、施工性に優れ、かつ水中打設も可能である。SGM の配合においては、所定の品質 (密度、強度) を確保するために、原料土に応じて固化材量や軽量化材を適宜調整する必要がある。今回の SGM の原料土は、国際線エプロン地区内の現地土を対象としている。原料土が砂質土の場合、SGM の空気量の増大により透水係数が増加し、SGM 内に水が浸透することで密度増加や強度低下の発生等の長期耐久性が懸念される²⁾。そのため、難透水性 (透水係数が $k=10^{-5}\sim 10^{-6}\text{cm/s}$ 程度) を確保できるように、以下の点に着目して配合検討を行った。

(1) 難透水性を確保するための SGM 内部の空気量の設定

通常、SGM の原料土としては粘性土が適しているが、砂質土を原料土とした場合、SGM 内部の空気量が増大し、透水性が増大することが懸念される。そのため、SGM 内部の空気量の上限值を設定し、これを下回るように SGM の配合設定を行った。また、配合試験では、透水試験を実施し透水係数を求めた。

(2) 原料土の粒度に応じた配合設定

今回の SGM の原料土を細粒分含有率 (Fc) に応じて、空気量を満足する配合設定を行った。細粒分の少ない砂質土を原料土とする場合は、必要に応じてベントナイト等の粘性土を混合した。

(3) 長期耐久性の検証

既往の知見によれば、固化処理土が水と接触することで、カルシウム分の溶脱、中性化が発生し、土との接触部から劣化が進行するとの報告がある³⁾。今回の施工箇所において、SGM の劣化による沈下の発生が懸念される。そこで、SGM の長期耐久性を検討するために、実際の養生環境を模擬した状態の SGM に対する暴露試験を行い劣化深さならびに劣化によって発生する沈下量の確認を行った。

2-3 SGM の配合試験における配合目標値

配合試験における SGM の目標品質を以下の通りとした。

表-3 配合試験における SGM の目標品質

項目	品質	備考
配合目標強度 (材齢 28 日 q_u)	440 kN/m ² (一般部) 1320kN/m ² (高強度部)	配合強度=設計強度×2.2
配合目標密度	$\rho=1.0\text{g/cm}^3$	配合密度=設計密度-0.10
透水係数 k	$10^{-5}\sim 10^{-6}\text{cm/s}$ 程度	

3. SGM の配合試験

3-1 配合試験のフロー

配合試験のフローを図-3 に示す。

まず、図中の①～⑥の原料土の試験結果より、固化材量試験、透水試験に使用する原料土および水の選定を行い、SGM の配合設定を行う (図中⑦)。続いて、⑧固化材量試験、⑨透水試験を行い、各原料土に対する必要強度を満足する固化材量および透水性を満足する空気量を決定する (図中⑩)。これらの結果より選定した配合で⑪長期耐久性試験を実施し、劣化深さ等を検討し、最終的な SGM の配合を決定する (図中⑫)。

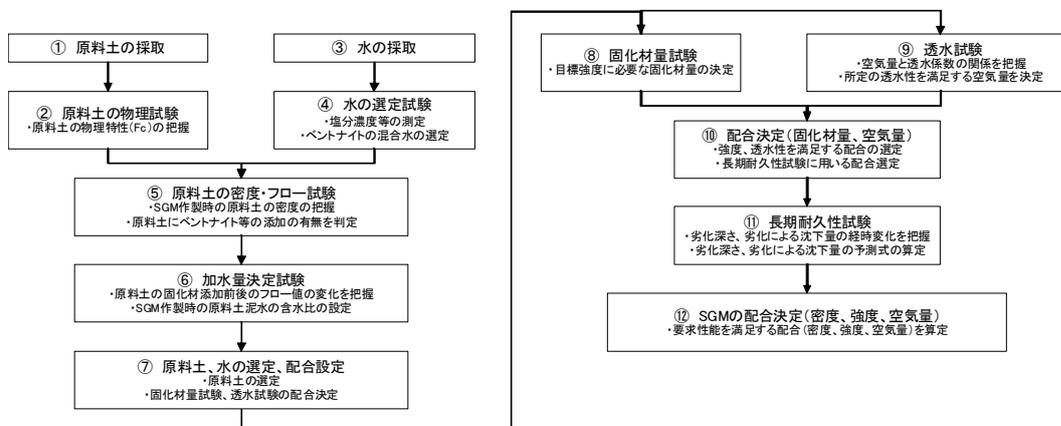


図-3 配合試験のフロー

3-2 配合試験に用いる原料土

SGMの原料土の採取位置を図-4において破線で示す。原料土は、京急シールド上部の掘削土、場内の仮置土のうち北エリア、および南エリアより採取した。当初は、SGMの原料土として京急シールド上部の掘削土を想定していたが、細粒分含有率Fc(5mmふるい通過試料)が概ね15~30%程度の範囲にあり、これらの原料土はそのまま使用すると空気量が増加する。一方、北エリア、南エリアの仮置土に関しては、5mmふるい通過試料のFcが、北エリアで50%弱、南エリアで60~80%程度であり、京急上部に比べて細粒分が多く、そのままの原料土として使用可能となる。また表-4に北エリアおよび南エリアにおける仮置土砂の泥土分布調査より得られたFc=50%以上の仮置土の土量を示す。Fc50%以上の仮置土量が57,400m³程度であり、SGMの総打設量に対して十分足りると考えられる。そのため、Fc50%以上の仮置土をSGMの原料土として配合検討を実施する。また仮置土の不足も考慮し、Fc15~30%の掘削土に対してもベントナイト等の粘性土を混合して配合を検討することにした。配合試験に使用する原料土の物理特性を表-5に示す。

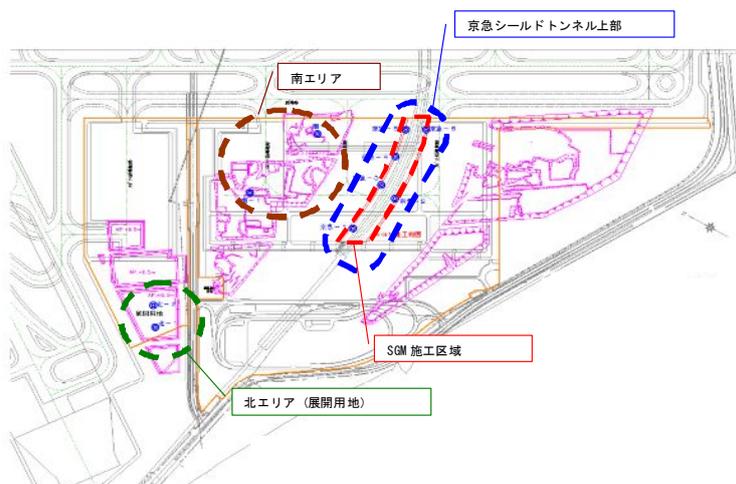


図-4 原料土および採水の採取位置

表-4 SGMに使用できる原料土の仮置土量(北、南エリア)

泥土	土量
Fc=80%以上	27,200 m ³
Fc=70~80%	2,400 m ³
Fc=60~70%	7,800 m ³
Fc=50~60%	20,000 m ³ 程度
合計	57,400 m ³ 程度

表-5 配合試験に使用した原料土の物理特性一覧

項目		Fc=50% (北2)	Fc=80% (南2)	Fc=15% (京急2+3)	Fc=30% (京急5+南1)	Fc=60% (南)	Fc=60% (混合土)
土粒子密度	ρ_t g/cm ³	2.691	2.666	2.695	2.696	2.702	2.686
自然含水比	w_n %	31.3	57.6	32.4	43.6	—	—
液性限界	w_L %	61.2	78.6	NP	NP	57.6	—
塑性限界	w_P %	35.1	42.2	NP	NP	30.0	—
塑性指数	I_P	26.1	36.4	NP	NP	27.6	—
粒度	礫分 %	26.2	7.8	1.0	2.0	2.2	4.6
	砂分 %	35.0	18.7	83.0	67.0	39.6	38.3
	シルト分 %	19.6	39.7	11.0	17.0	43.2	25.8
	粘土分 %	19.2	33.8	5.0	14.0	15.0	31.3
強熱減量試験	%	6.4	7.7	2.2	3.6	6	—
pH		9.6	8.9	7.9	7.8	7.5	—
FC	5mm通過分 %	48.5	78.1	16.0	31.3	58.2	57.1

3-3 固化材量試験および透水試験の配合条件

SGMの配合条件を表-6に示す。原料土は、場内の仮置土 ($F_c=50\% \sim 80\%$) のうち $F_c=50\%$ (北エリア) および $F_c=80\%$ (南エリア) の2種類、および京急シールド上部の掘削土 ($F_c=15\%, 30\%$) の2種類とした。

$F_c=50\%, 80\%$ のケースについては、原料土の含水比を1種類(加水量決定試験により決定)、固化材量を3種類(70、130、190 kg/m^3)とし、一軸圧縮試験は、材齢7日、28日後の供試体で実施した。また要求品質を満足する配合の詳細検討を行うため、3試料($F_c=50\%$ の再配合、 $F_c=60\%$ 、 $F_c=50+80\%$ の混合土)についても表-6に示す条件で追加実施した。

$F_c=15\%, 30\%$ のケースについては、ベントナイトまたは泥水を混合し、SGMの空気量を3種類(Air=25%、30%、35%)、固化材量を3種類($C=70, 130, 190\text{kg}/\text{m}^3$)とした。一軸圧縮試験は材齢7日、28日、91日後の供試体で実施した。

透水試験は、材齢28日経過したSGM供試体を使用し、三軸透水試験により透水係数を求めた。透水試験時の動水勾配は5、有効拘束圧を50kPaとし、通水量が安定した時点の透水係数を算定した。

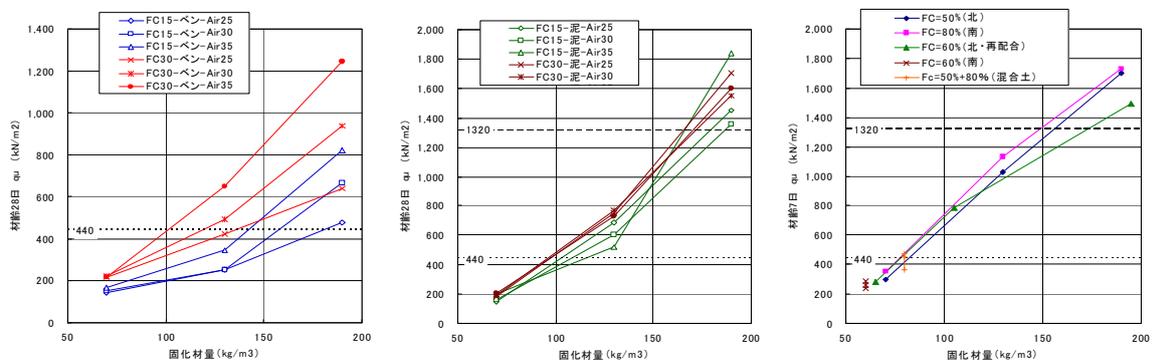
表-6 SGMの配合条件

項目		条件						
SGM密度		1.0 g/cm^3						
目標強度(kN/m^2)		440、1320					440	
原料土	種類	$F_c=15\%$	$F_c=30\%$	$F_c=50\%$	$F_c=80\%$	$F_c=50\%$ (再配合)	$F_c=60\%$	$F_c=50+80\%$ (混合土)
空気量(%)		25、30、35		32.4、34.6、36.8	27.5、30.0、32.5	30	30、32.5、35	30、33.6、35
泥水	種類	ベントナイト、泥水						
	添加量	空気量により決定						
固化材	種類	高炉セメントB種						
	固化材量 (kg/m^3)	70、130、190				65、105、195	60	80
軽量化材		SGM用起泡剤						
供試体 材齢	一軸	7日、28日、91日		7日、28日		28日		
	透水	28日						
備考		当初検討				追加検討		

3-4 配合試験結果

3-4-1 固化材量試験結果 (材齢28日の強度について)

図-5に材齢28日強度と固化材量の関係を示す。図-5(a)は $F_c=15\%, 30\%$ +ベントナイト混合のケース、図-5(b)は $F_c=15\%, 30\%$ +泥水混合のケース、図-5(c)は原料土 $F_c=50 \sim 80\%$ のケース(原料土のみ)である。この結果より、所定の目標強度($q_u=440, 1320\text{kN}/\text{m}^2$)に必要な固化材量を求めた。



(a) $F_c=15\%, 30\%$ ベントナイト混合

(b) $F_c=15\%, 30\%$ 泥水混合

(c) $F_c=50 \sim 80\%$ (原料土のみ)

図-5 材齢28日強度と固化材量の関係

3-4-2 透水試験結果

図-6は、SGM内の空気量と透水係数の関係を示す。原料土 $F_c=15\%$ 、 30% のケース（ベントナイト混合および泥水混合）は、空気量 30% 、 35% のケースのみ示す（ただし、泥水混合のケースについては、固化材量 $C=190\text{kg/m}^3$ のケースは実施していない）。ほとんどのケースについては $k=10^{-6}\sim 10^{-7}\text{cm/s}$ オーダーとなり、目標値（ $10^{-5}\sim 10^{-6}\text{cm/s}$ 程度）を満足する結果となった。

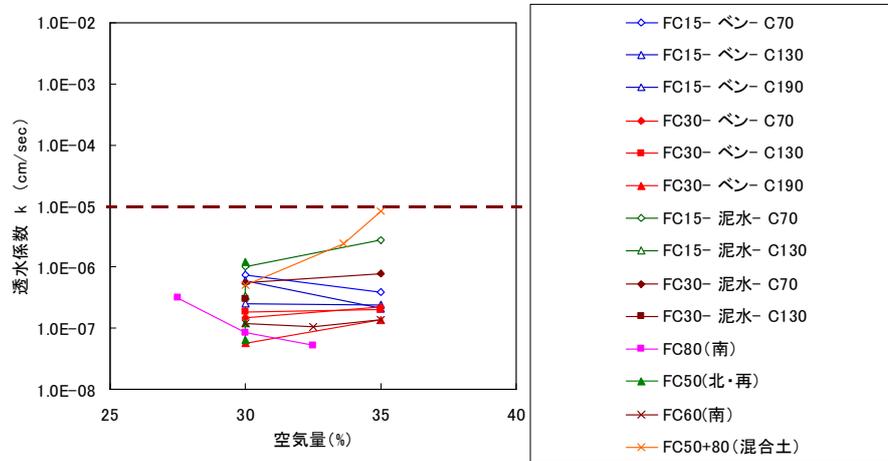


図-6 透水係数と空気量の関係

3-5 固化材量試験、透水試験から得られた要求品質を確保できる配合

各原料土に対する固化材量試験、透水試験から得られた要求品質を満足する配合を表-7に示す。仮置土 $F_c=50\sim 80$ のケース、および仮置土 $F_c=15, 30\%$ の土砂のベントナイト混合のケースについては、目標強度 440kN/m^2 の場合の固化材量が得られた。それ以外のケースは、目標強度 $440, 1320\text{kN/m}^2$ の場合の固化材量が得られた。また空気量については、 35% で所定の透水性（ $10^{-5}\sim 10^{-6}\text{cm/s}$ 程度）を満足する結果となった。

表-7 固化材量試験、透水試験から得られた要求品質を満足する配合（固化材量、空気量）

原料土 F_c (%)	場所	目標強度 (材齢 28 日) (kN/m^2)	添加材 (混合物) (kg/m^3)		空容量 (%)	固化材量 (kg/m^3)
50~80	仮置土	440	-	-	30	80
		1,320				155
15~30	京急シルト' 上部	440	ベントナイト	25.3	35	145
			泥水	129		115
		1,320		141		166

4. 長期耐久性試験

4-1 長期耐久性試験概要

固化材量試験、透水試験の結果より選定された配合を用いて、現場での養生環境を再現した状態でのSGMの長期耐久性について検討した。SGM 供試体を土中またはスラグ中で暴露した状態で、暴露期間に対する暴露面からの劣化深さ、および劣化に伴う沈下量について調べた。劣化深さに関しては、針貫入試験を実施し、劣化に伴う沈下量に関しては、段階載荷圧密試験を実施した。

4-2 試験条件

長期耐久性試験ケースを表-8に示す。SGMの暴露条件は、図-7に示すようなSGM周囲の地盤環境を考慮して、表-9のように設定する。なお、暴露に使用する水は、現地地下水の塩分濃度（海水の1/10程度）を模擬した水を使用し、土およびスラグとも飽和状態での暴露とした。また、暴露期間については、1ヶ月、3ヶ月、12ヶ月とした。また、図-8に長期耐久試験概略図を示す。

表-8 長期耐久性試験ケース

ケース	SGM条件				暴露条件			全ケース数
	原料土	混合物	強度 kN/m ²	密度 g/cm ³	暴露状態	養生期間	暴露期間	
1	Fc15%	ベントナイト	200	1.0	暴露なし (湿潤養生)	1日	1ヶ月	SGM 5試料× 暴露 4条件× 3 暴露期間 =60ケース
2		泥水						
3	なし	600	土中淡水飽和		28日	3ヶ月		
4							200	
5			Fc60%					
5ケース					4ケース		3ケース	

表-9 暴露条件

項目	条件	備考
暴露条件	土中	SGM下部、法面部の土接触部を想定
	スラグ	SGM上部に水砕スラグ路盤接触部を想定
暴露前養生日数	1日	SGM下面部および法面部：SGMを打設した直後
	28日	SGM上面部：養生期間を経た後に水砕スラグ路盤を施工

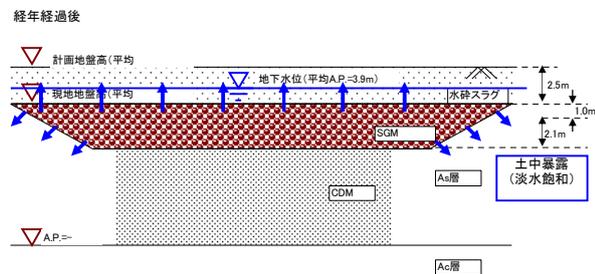
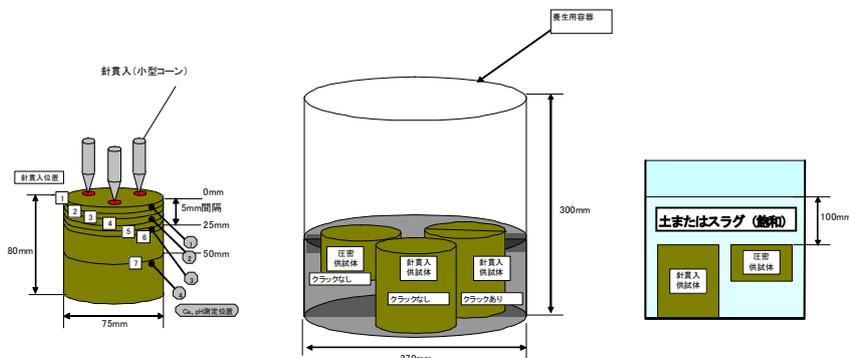


図-7 SGM 周囲の地盤環境



(a) 針貫入試験 (b) 供試体配置状況 (c) 供試体暴露状況

図-8 長期耐久性試験概略図

4-3 暴露期間に対する劣化深さの推定

図-9 は、針貫入試験結果（試験方法は参考文献 4）参照）より得られた暴露に伴う劣化深さの実測値と予測曲線を示したものである。実際の施工で使用されている原料土が $F_c=60\%$ 程度であるため、代表ケースとしてケース 5 の養生 1 日暴露の実測値を示す。なお劣化深さは、図-10 に示す貫入抵抗比（貫入抵抗/非劣化部の貫入抵抗）の深度分布より、貫入抵抗比が 0.9 以下となる深度を劣化深さとした。劣化予測式は、式 (1) を用いる²⁾。

$$D = A^* \times t^{*0.5} \quad \dots \text{式 (1)}$$

D : 劣化深さ

A^* : 係数（暴露 1 年後の劣化深さ）

t^* : 時間を $t=1$ 年で正規化した値

図-9 に示すように、ケース 5 の劣化深さの予測曲線の A^* は 11.3 となり、技術提案時の値と比較して小さい値となった。これは、図-10 に示すように劣化部分の貫入抵抗比が暴露 12 ヶ月でも 0.7 程度であり、極端な劣化が生じていないことや、材齢による強度増加の影響等が考えられる。

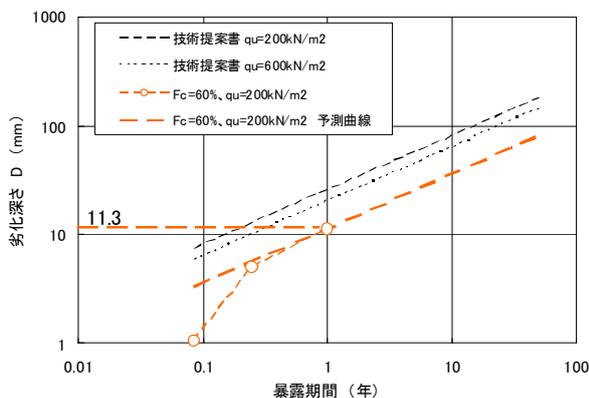


図-9 暴露に伴う劣化深さの実測値と予測曲線

4-4 劣化に伴う沈下量

図-11 は、ケース 5 ($F_c=60\%$ 、 $q_u=200\text{kN/m}^2$) の養生 1 日暴露の圧密試験によって得られた圧縮ひずみ-圧密圧力関係 (ϵ_v-p 関係) である。図-12 に示す劣化により生じる圧縮ひずみの計算方法に従って、実際の上載圧力 ($p=170\text{kN/m}^2$: 図中の縦破線) 作用

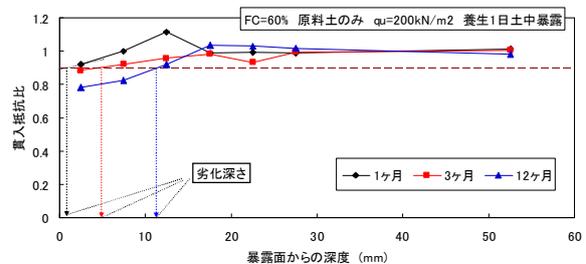


図-10 貫入抵抗比の深度分布
(ケース 5 養生 1 日暴露)

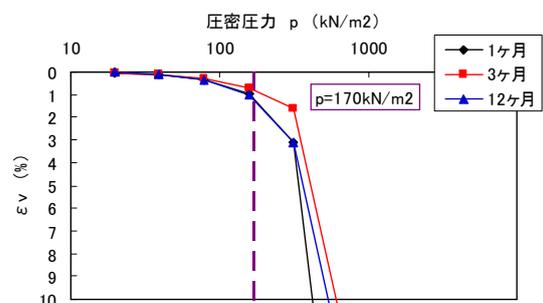
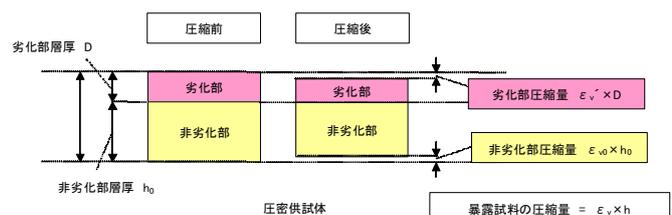


図-11 圧密試験から得られた ϵ_v-p 関係
(ケース 5 養生 1 日暴露)

時の暴露によって生じる圧縮ひずみ差 $\Delta \epsilon_v$ および劣化によって生じる沈下量 S を算定した。

圧密試験の結果より得られた $\Delta \epsilon_v$ は、ケース 5 の場合で 0.7% 程度であった。これらの結果を用いて、劣化によって発生する沈下量 S を式 (2) により計算した。



$$\epsilon_v' (\text{劣化部の圧縮ひずみ}) = (\epsilon_v \times h - \epsilon_{v0} \times h_0) / D$$

$$\Delta \epsilon_v = \epsilon_v' - \epsilon_{v0} (\text{室内養生試験の圧縮ひずみ}) \quad : \quad \text{暴露によって生じる劣化部分の圧縮ひずみ差}$$

図-12 劣化により生じる圧縮ひずみの計算方法

$$S = D \times \Delta \varepsilon_v \quad \dots \text{式 (2)}$$

なお、劣化深さ D は、4-3 で得られた $A^* = 11.3$ を用いて、式 (1) より求める。式 (2) によって求めた劣化に伴う沈下量の経時変化を図-13 に示す。

今回得られた沈下量は、50 年後で $S = 0.6 \text{ mm}$ と非常に小さい値となった。これは、図-10 に示すように劣化の程度が非劣化部の 7 割であるため、劣化部の圧縮ひずみが小さくなったためと考えられる。

以上より、当初は劣化による沈下を配慮して高強度部 ($q_u = 600 \text{ kN/m}^2$) としていた箇所も、通常の SGM ($q_u = 200 \text{ kN/m}^2$) でも十分に対処できると考えられる。

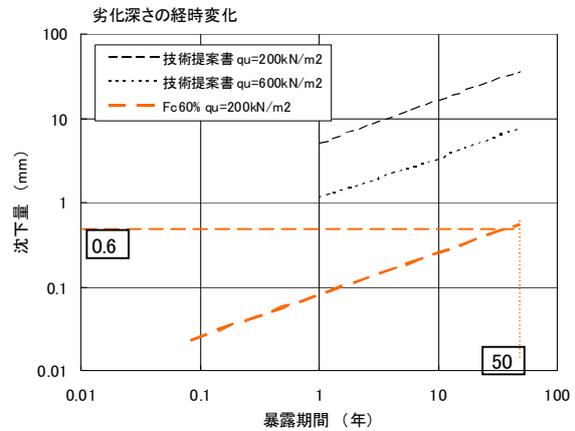


図-13 劣化に伴う沈下量の経時変化

5. SGM の要求性能を満足する配合

配合試験による検討の結果、高強度 SGM

($q_u = 600 \text{ kN/m}^2$) を用いずに、標準 SGM の設計強度 200 kN/m^2 のままで本事業の要求性能・品質を満足して耐久性を確保できると判断した。SGM の要求品質を表-10 に示す要求品質に変更し、材料配合および品質管理を行う。現場配合として、表-11 に示す仮置土砂を用いた配合を採用する。

表-10 SGM の要求品質 (変更後)

	設計強度 (kN/m^2)	設計密度 (g/cm^3)	配合強度 (kN/m^2)	配合密度 (g/cm^3)	透水係数 (cm/s)
標準 SGM	200	1.1	440	1.0	$10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$ 程度

表-11 現場配合

	原料土	固化材量 (kg/m^3)	軽量化 材量 (kg/m^3)	空気量 (%)	調整泥土 密度 (g/cm^3)	添加材量 (混合物) (kg/m^3)
基本配合	仮置土砂	80	16	30	1.374	-

6. あとがき

技術提案後、現地土を使用した SGM 軽量土の配合について検討した。配合検討においては、SGM の長期耐久性に配慮し、低透水性を確保し、かつ長期的な品質を確保できる SGM の配合を決定した。今回の検討において、現地砂質土にベントナイトを添加した SGM の配合、SGM の空気量と透水係数の関係、SGM の長期耐久性等の新しい知見を得ることが出来た。今後の SGM の設計に役立てられることを期待する。

《参考文献》

- (財) 沿岸開発技術研究センター：港湾・空港における軽量混合処理土工法技術マニュアル、沿岸開発技術ライブラリー、1999
- 菊池喜昭、永留健、水谷崇亮：「気泡量の違いによる気泡混合処理土の透水・吸水特性の変化」、港湾空港技術研究所報告、第 45 巻、第 2 号、pp29-49、2006
- 池上正春、佐藤英樹、一場武洋、大即信明、西岡孝弘、寺師昌明、大石幹太：「セメント安定処理土の劣化進行に関する簡便予測手法」、土木学会第 59 回年次学術講演会第 III 部門、pp. 1073-1074、2004
- 田口博文、田中洋輔、御手洗義夫、新舎 博：「砂質土にベントナイトを添加した気泡混合処理土の長期耐久性に関する実験的検討」、土木学会第 62 回年次学術講演会第 III 部門、pp. 763-764、2007