

軽量混合固化処理土 (SGM) の空港舗装における路床への適用事例について

堺谷常廣¹・永留健²・野口孝俊³・御手洗義夫²

¹正会員 東亜建設工業株式会社 東京支店 (〒103-0022 東京都中央区日本橋室町 4-2-6)

E-mail : t_sakaiya@toa-const.co.jp

²正会員 東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター (〒230-0035 神奈川県横浜市鶴見区安善町 1-3)

³正会員 国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所 (〒221-0053 神奈川県横浜市神奈川区橋本町 2-1-4)

羽田空港 D 滑走路は、栈橋と埋立のハイブリット構造になっており、地震時における接続部背面での変形抑制や沈下量の低減のため、軽量混合処理土 (Super Geo-Material:以下, SGM) を採用している。SGM は、浚渫土をスラリー化し、セメントと気泡を加える事により重量と強度特性をコントロールできる地盤材料である。SGM を下部路床に採用する事により、接続部に係る荷重を軽減し、岸壁構造の安定を図った。本文では、SGM の材料特性について報告すると共に、SGM の現場 CBR と繰返し平板載荷試験の試験結果、小型 FWD による弾性係数の計測結果、レジリエントモジュラス試験による拘束下での繰返し荷重による弾性係数の計測結果について報告する。路床構造は、現場 CBR 及び弾性係数 E から SGM と礫質土による複合路床を採用した。

Key Words : airport pavemen, subgrade, lightweight soil, CBR, modulus of deformation

1. はじめに

羽田国際空港 D 滑走路 (以下, D 滑走路) は、羽田空港沖に新設される 4 本目の滑走路である。D 滑走路は、多摩川流域に建設されるため、流域阻害などの理由から栈橋と埋立のハイブリット構造となっている。栈橋と埋立の接続部は、井筒構造の自立護岸を採用しており、地震時における接続部背面での変形抑制や沈下量の低減のため、背面裏込めに SGM を採用している。背面の軽量化することにより、井筒構造のスリム化が可能となるため、SGM を下部路床まで採用し設計検討を行った。埋立部の滑走路延長 $L=1,770\text{m}$ に対して、SGM を路床に採用した部分は、 $L\approx 150\text{m}$ である。

従来、滑走路下として舗装路体への採用はあるが、舗装設計の対象となる路床への採用は初めての試みである。舗装構造は、平成 11 年空港舗装構造設計要領¹⁾に則り決定している。舗装設計では、路床の CBR、航空機設計反復作用回数から基準舗装厚を求め、舗装構成を決定している。埋立部は、路床の設計 $\text{CBR}\geq 8$ としており、接続部背面でも設計 CBR を確保するために、複合路床とし合成 $\text{CBR}\geq 8$ とした。上部路床は、礫質土 ($\text{CBR}\geq 20$) を採用している。配合設計での SGM の設計用 $\text{CBR}=5.9$ であるが、最終的な上部路床層厚は、現場 CBR から決定し

ている。SGM の現場 $\text{CBR}=5.5$ と室内試験とほぼ同様の CBR を得ている。

SGM は、砂や礫のような粒状体と違い、固化体内部に微細な気泡を持ったポーラス状の地盤材料である。そのため、圧縮特性や支持性能など、原位置での計測をおこなない、CBR と弾性係数 E の関係を求め従来の路床と同様の性能を持つ事を確認している。また、SGM が航空機荷重による拘束圧下での繰返し荷重による弾性挙動を確認するため、レジリエントモジュラス試験も行っている。レジリエントモジュラス値 Mr から E を計算した場合、拘束圧の増加に伴い E の増加が確認された。最後に、SGM の原位置支持力確認方法として小型 FWD 試験と繰返し平板載荷試験を比較し、ほぼ、等価な E を得ていることから、小型 FWD 試験による品質管理方法について提案を行っている。

2. D 滑走路における SGM 工

(1) SGM 工の概要

SGM は、高含水比の浚渫土に気泡や発泡ビーズなどの軽量材とセメントを混合することで軽量化と強度増加を同時に期待する材料として利用されている²⁾。この材料は、

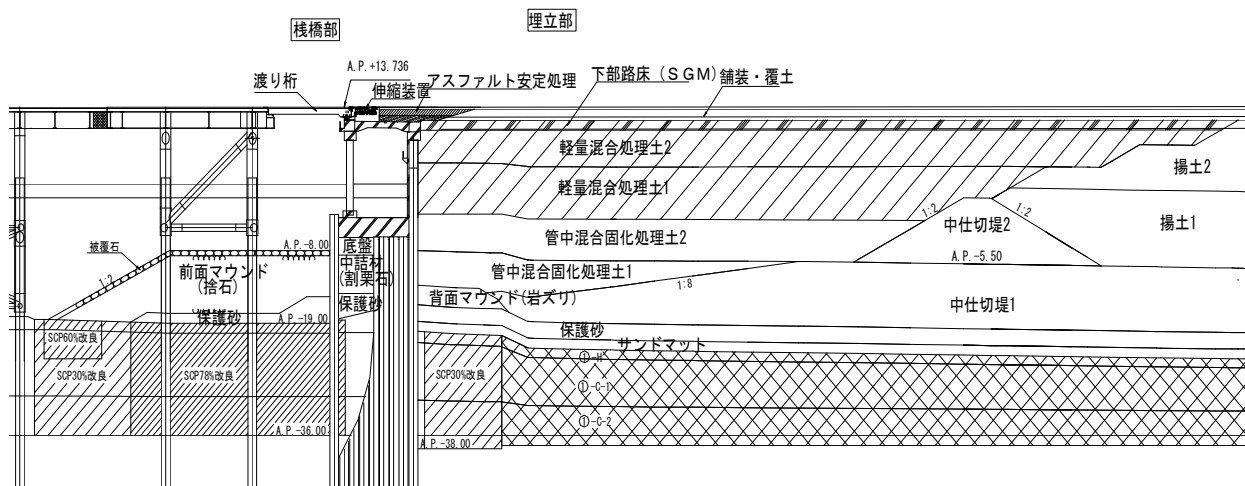


図-1 接続部背面 SGM 断面図

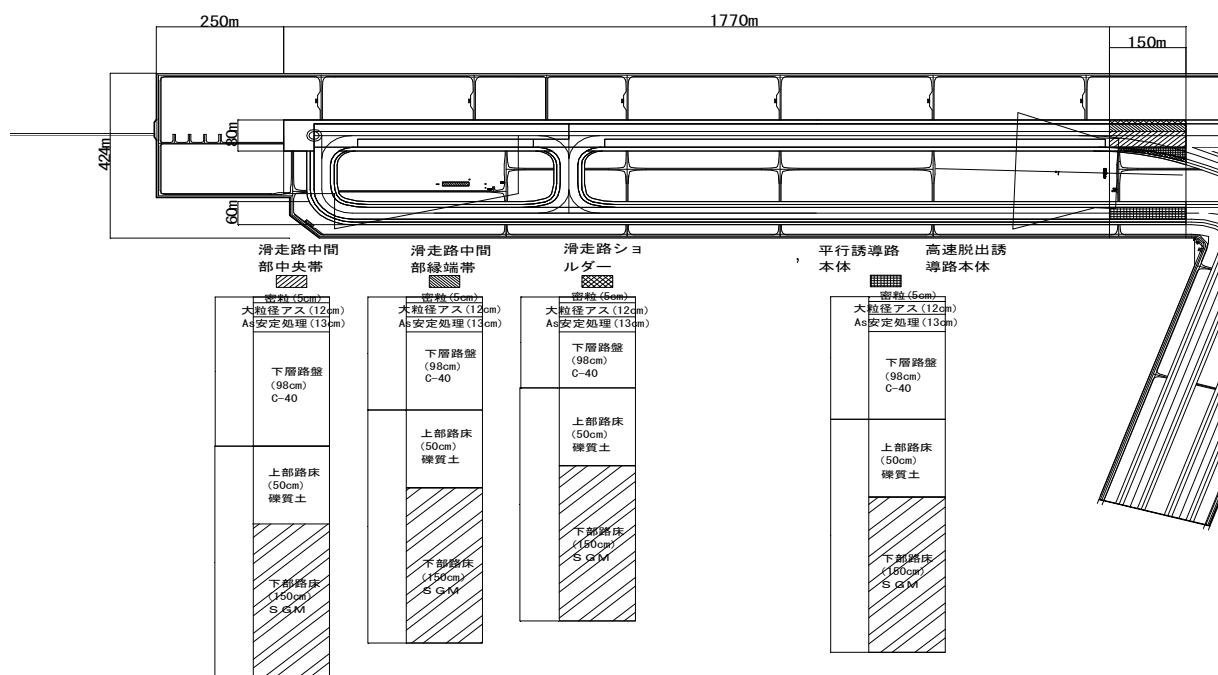


図-2 SGM を路床とする舗装の平面位置図

一般的な地盤材料と比べて軽量であることから軟弱地盤上の盛土材や擁壁、橋台などの裏込め材などに利用されている。

我が国の港湾工事で、SGM が本格的に実工事で使用されたのは、1995 年の阪神淡路大震災で被災した神戸港の復興事業³⁾であり、それ以来、羽田 D 滑走路建設工事に適用されたものを含めて総打設量は、約 131 万 m³に達している（そのうち D 滑走路工事は約 79 万 m³）。

図-1 に示すように、D 滑走路の接続部護岸は、背面の

埋立土砂の偏土圧を支える抗土圧構造としている⁴⁾。そして、護岸構造のスリム化と埋立部の圧密沈下による栈橋部との段差低減を図る目的で護岸背面の埋立土砂に管中混合処理土⁵⁾と SGM が適用された（水中部：管中混合処理土，陸上部：SGM）。接続部背面の軽量化による、護岸構造のスリム化のメリットを最大限にするため、SGM を下部路床に採用している。SGM の室内 CBR は、事前の配合試験から設計 CBR=5.9 であるため、上部路床は礫質土を採用している。図-2 は、接続部背面の舗装構造である。

(2) SGM の設計値および配合

D 滑走路での SGM は、基礎にある軟弱地盤が将来的に沈下した後に残留水位以下となる部分の水中配合（軽量混合処理土 1：目標密度 1.12 g/cm^3 ）とその上部に打設する気中配合（軽量混合処理土 2：目標密度 1.02 g/cm^3 ）の 2 種類の配合で施工されており、どちらの配合も設計基準強度は $q_{\text{ack}}=200 \text{ kN/m}^2$ （材齢 91 日、ボーリング試料の強度、不良率 15.9%以下）としている。ここで、今回対象としている空港舗装での路床部は気中配合で施工された部分となる。

SGM の原料土には、東京湾内で発生する浚渫土が使用され、いずれも細粒分含有率が 90%程度以上の粘性土であった。表-1 に気中配合で使用した代表的な 2 種類の原料土の物性値を示す。試料①の方が、試料②に比べてシルト分含有量が多く、液性限界も低い。実施工ではこれら 2 種類の原料土を判別した上で配合設定を行った。実施工で用いた配合を表-2 に示す。固化材使用量はほぼ同じであるが、気泡混合量が異なる配合とした。

固化材には高炉セメント B 種を、起泡剤にはタンパク系のものを用いて SGM を作製した。

路床部に適用された気中配合の SGM は、打設直前で採取するモールド試料（ $\phi 5\text{cm} \times h10\text{cm}$ ）での湿潤密度が $0.92 \sim 1.02 \text{ g/cm}^3$ 、材齢 91 日の現場配合強度が $q_{u91}=600 \text{ kN/m}^2$ 以上となるように日々品質を管理しながら施工を進めた⁶⁾。

表-1 原料土の物性値

試料名		①	②
湿潤密度 $\rho_t(\text{g}/\text{cm}^3)$		1.449	1.298
土粒子密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$		2.656	2.712
自然含水比 $w_n(\%)$		99.9	112.3
液性限界 $w_L(\%)$		85.4	103.6
塑性限界 $w_P(\%)$		36.2	37.2
粒度組成 (%)	礫	1	0
	砂	9	7
	シルト	53	28
	粘土	37	65
pH		8.5	8.1
強熱減量 $\text{Li}(\%)$		8.2	9.1
有機物含有量 (%)		3.5	3.7

表-2 SGM の標準配合(気中配合)

試料名	調整土		固化材 添加量 (kg/m^3)	気泡 混合量 (体積%)
	湿潤密度 $\rho_t(\text{g/cm}^3)$	フロー値 (cm)		
①	1.155	48	101	17.9
②	1.193	49	102	20.6

(3) SGM の品質管理試験結果

ここでは、本論文で対象としている路床部付近の SGM の品質管理試験結果を記載する。

図-3 には、打設直前に採取したモールド試料の材齢 91 日での湿潤密度の頻度分布を示す（気中配合の全試料）。湿潤密度の平均値は $\rho_{t(M)}=0.987 \text{ g/cm}^3$ で、現場目標密度の $\rho_{t(T)}=1.02 \text{ g/cm}^3$ 以下で作製できており、所定の品質を満足する結果であった。図-4 には、打設直前に採取したモールド試料の材齢 91 日での一軸圧縮強さの頻度分布を示す（気中配合の全試料）。一軸圧縮強さの平均値は $q_{u(M)91}=727 \text{ kN/m}^2$ で、現場配合強度の $q_{u91}=600 \text{ kN/m}^2$ よりもやや大きい値であった。また、変動係数は $CV=11.6\%$ と非常に小さかった。一軸圧縮強さに関しても、目標どおりに管理を行えたものと評価できる。

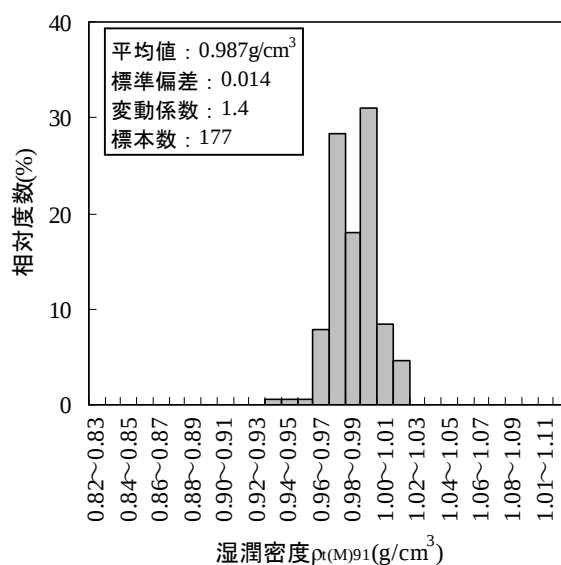


図-3 湿潤密度の頻度分布

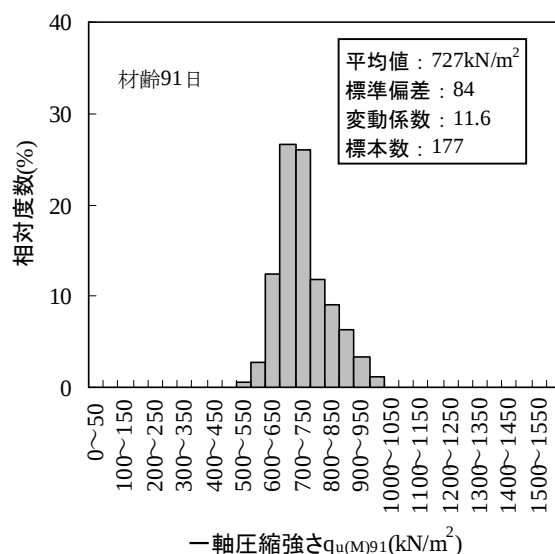


図-4 一軸圧縮強さの頻度分布

3. レジリエントモジュラス試験の結果

(1) レジリエントモジュラス試験の概要

路床材の力学的特性は、一般的に CBR 試験による貫入抵抗によって評価されてきたが、空港舗装の疲労設計のようにひずみを取り扱うためには、路床材料の弾性係数を求める必要がある。しかしながら、一軸圧縮試験による E_{50} など代表的な試験は、静的载荷であり多くの試験は拘束圧がないか、表層などの拘束圧が小さい状態で行われる。実際の舗装の挙動は、動的な载荷や表層、路盤による拘束圧がかかった状態を考慮しなければならない。そこで、拘束条件や動的载荷が可能なレジリエントモジュラス試験を行い、SGM の変形挙動の把握を行った。試験は、载荷波形に動的なパルス波を用い、同一の偏荷重の状態でも 100 回载荷する。载荷後の復元弾性軸ひずみから動的弾性特性を評価するものである。

(2) レジリエントモジュラス試験方法

レジリエントモジュラス試験（舗装調査・試験便覧 E016）は、繰返し三軸圧縮試験装置を用いた。载荷時間の 0.1sec、休止時間 0.9sec のハーバーサイン波で繰返し载荷を行う。予備载荷後に拘束圧 41.4kPa で一定としている。軸差応力 $\sigma_d=13.8, 27.6, 41.4, 55.2, 68.9$ kPa で 100 回繰返し、最後の 5 波の平均復元軸ひずみから Mr を求める。同様の試験を、拘束圧を $\sigma_3=27.6, 13.8$ kPa に減らし行う。それぞれの 15 条件の組み合わせで試験を行った。 Mr の計算は、軸差応力と復元軸ひずみから式(1)を用いて求める。

$$Mr = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_a} \quad (1)$$

Mr : レジリエントモジュラス (MPa)

σ_d : 軸差応力 = $(\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)

σ_1 : 全軸応力 (kPa)

σ_3 : 拘束応力 (kPa)

ε_a : 復元軸ひずみ

(3) レジリエントモジュラス試験結果

Mr と主応力 $\theta = (\sigma_1 + 2\sigma_3)$ を両対数グラフの横軸にとり、 Mr を縦軸にプロットし、回帰式から式(2)の材料係数 (k_1, k_2) を求める。

$$Mr = k_1 \theta^{k_2} \quad (2)$$

θ : 主応力 $(\sigma_1 + 2\sigma_3)$ (kPa)

k_1, k_2 : 材料係数

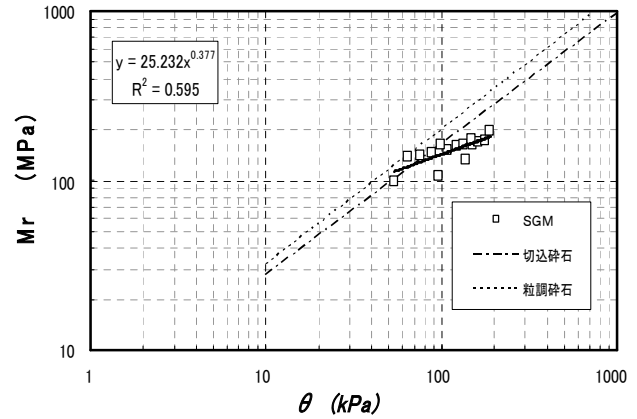


図-5 SGM の $\theta \sim Mr$ の関係

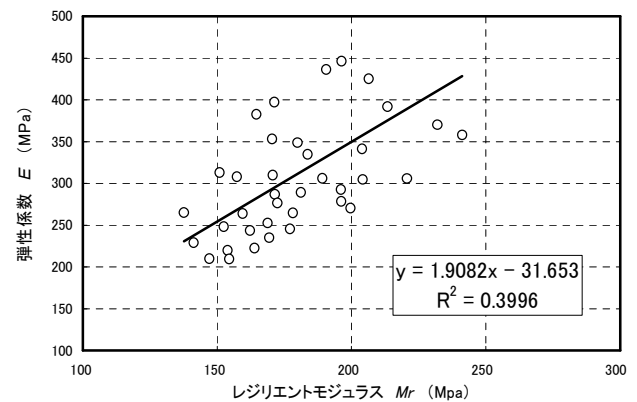


図-6 SGM の $Mr \sim E$ の関係

図-5 は、SGM の Mr と θ の関係を表したものである。図-5 中に、切込碎石・粒調碎石の試験結果⁹⁾を比較のため記載する。材料の状態を表す k_1 は、SGM と切込碎石など比較すると SGM の方が小さい。ただし、 $k_2 > 0$ であるため、 θ と Mr が正の比例関係になっている。 E_{50} などの静的弾性係数との比較のため、動的な E を求める。SGM の Mr が弾性域であると考え、式(3)が成立する。

$$\varepsilon_a = \frac{1+\nu}{E} \sigma_1 - \frac{\nu}{E} \theta \quad (3)$$

E : 弾性係数 (MPa)

ν : ポアソン比 = 0.3

図-6 は、 Mr と E の関係を式(3)から求めたものである。 Mr は、動的な軸差応力に対する変形特性を表すため、静的な E との関係を確認する必要がある。図中の近似曲線の傾きは、正の値を示しているため、 Mr と E は比例関係が確認された。相関係数 $R=0.63$ ($R^2=0.39$) であった。 Mr

から求めた弾性係数の平均は $E=299\text{MPa}$ である。同じ試験料の一軸圧縮試験から得られた弾性係数 $E_{50}=70\sim75\text{MPa}$ であるため、 M_r の結果からは、拘束圧がある場合の動的弾性係数は、静的な弾性係数と比較して大きな値となった。この結果から路盤などの上載荷重が載荷された場合のSGMの弾性係数は、拘束圧が作用していない場合と比較すると大きな値となることが予測される。

4. SGMの路床面の剛性把握（原位置試験）

(1) SGMの原位置試験項目・試験方法

D滑走路では、平成11年空港舗装構造設計要領¹⁾による設計を採用している。この設計法は路床のCBR、反復作用回数から決定されるが、D滑走路ではこれに加え、路床面の疲労照査には、多層弾性理論による疲労度照査を行っている。そのため、打設路床面で、原位置試験を行い、SGMのCBRと E を確認した。SGMの試験面は、打設後57日目で十分に養生日数が確保されている箇所を選定した。原位置試験として、現場CBR試験、繰返し平板載荷試験、小型FWD試験、PANDA-2試験を行っている。また、原位置でのブロックサンプリングを行い、一軸圧縮試験との対比を行っている。各試験方法について記す。

a) 現場CBR試験(JIS A 1222)

設計用CBRは、室内試験によるCBR試験結果を用いる事が多いが、SGMの試験にあたり、モールドの拘束圧の影響や現場の養生条件から現場CBRを採用した。室内試験と同様に $\phi 5\text{cm}$ の貫入ロッドを、反力を用いて貫入し、2.5mm、5mm貫入量のうち、大きいCBR値を用いている。

b) 繰返し平板載荷試験(JHS 103)

繰返し平板載荷試験は、道路の路床・路盤の弾性係数を求めるための試験法である。 $\phi 300\text{mm}$ の鋼製載荷盤に、10kPa、40kPa、160kPaの3段階で、各段階で載荷、除荷を5回繰返す。計算は(4)式を用いて

$$E = \frac{1.18 pr}{\Delta} \quad p = \frac{P}{0.0707} \quad (4)$$

E : 弾性係数 (MPa)

Δ = $S(N, \text{載}) - S(N-1, \text{除})$

$S(N, \text{載})$: N 回目の載荷時の変位計の読み(mm)

$S(N-1, \text{除})$: $N-1$ 回目の除荷時の変位計の読み(mm)

P : 荷重 (kN)

c) 小型FWD試験⁹⁾

FWD (Falling weight Deflectometer) は、重錘の落下に

よる衝撃荷重と載荷点直下のたわみ量から、地盤反力係数や、弾性係数を計測する装置である。図-7は $\phi=300\text{mm}$ の平板を用いた小型FWD試験の外観図である。(落下高0~120cm, 重錘質量30kg) 動的応答であるために、載荷荷重の最大値 P_{max} 、たわみ量の最大値 S_{max} を用いて、(4)式から E を求めている。

d) PANDA-2試験⁹⁾

PANDA-2試験は、 $\phi 20\text{mm}$ のコーン形状の貫入ロッドを付属のハンマーで打設貫入させ、貫入量と動的荷重から先端抵抗を求める動的コーン貫入試験である。図-8はPANDA-2試験計器の形状を含めて、計器構成を示す。対象土は、粘土から礫、安定処理土まで幅広い。動的荷重により貫入させるため、簡便な試験で土中の強度分布が計測できることが特徴である。

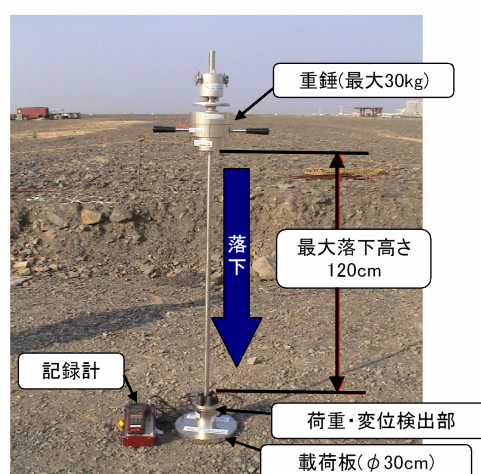


図-7 FWD試験計測機外観図

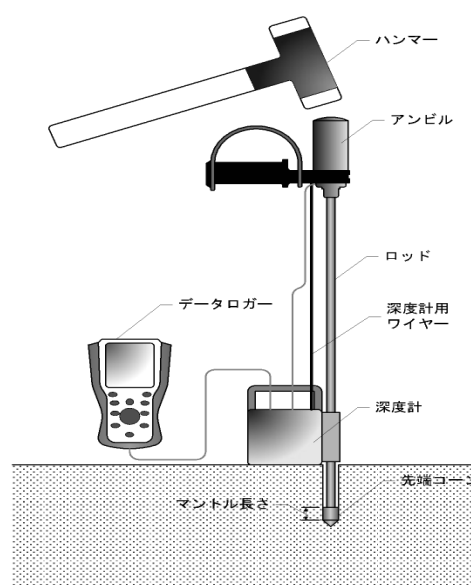


図-8 PANDA-2試験計器構成図

(2) 原位置試験結果

SGM は、従来の粒状体の変形と違い、ポーラス状の構造を持った地盤材料であるため、载荷により微細な気泡構造が壊れる変形が見られる。写真-1, 2 は、平板载荷試験の試験後の载荷面を切り出したものであるが、载荷面周辺が盛り上がるのではなく、载荷盤直下の気泡構造が崩れ貫入した形状となっている。そのため、通常の平板载荷試験 (JIS A 1215) の様に沈下量を規定して E を求めると、地盤の弾性だけでなく、気泡の圧縮に伴う変形を計測する可能性が高い。荷重分散による地盤全体の剛性については、極限支持力以下での試験条件を考慮する必要があるなど SGM 独特の条件が必要となる。本論では、平板载荷試験と合わせて、小型 FWD 試験を行っている。小型 FWD 試験は、動的载荷による弾性挙動を計測するものであるため、実際の航空機荷重が作用した場合の地盤挙動に近い計測が可能である。そのため、SGM に関しては気泡の圧縮と共に、静的な平板载荷試験では分離が難しい分散効果も合わせて検討できるものと考えられる。この点については、今後検討を深めていきたいと考えている。

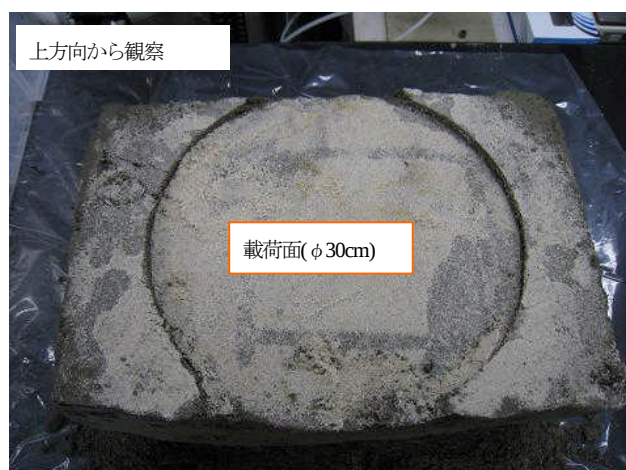


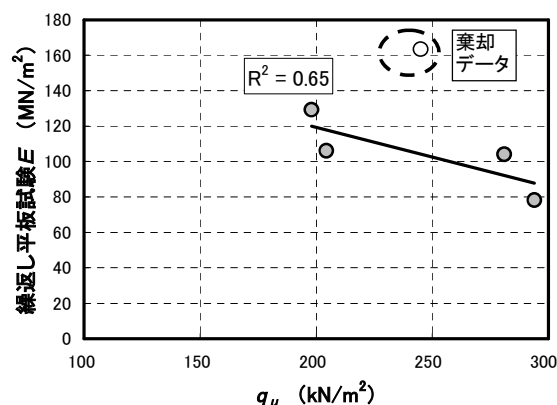
写真-1 平板载荷試験後の SGM 上载荷面（上方から）



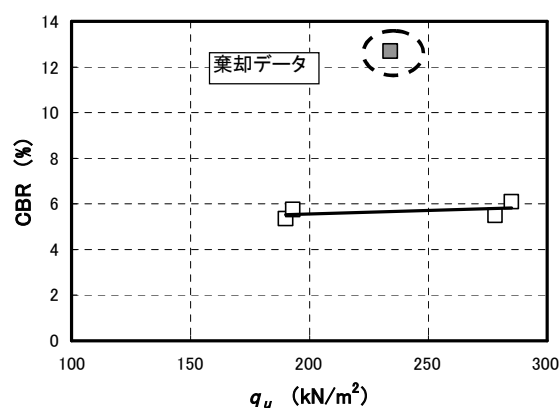
写真-2 平板载荷試験後の SGM 上载荷面（側方から）

SGM の原位置での弾性係数と各種の地盤定数を比較するため繰返し平板载荷試験 (JHS-103) を行い、比較を行った。繰返し平板载荷試験結果と CBR 試験結果を、一軸圧縮強さとの対比で整理したのが、図-9(a), (b)である。一軸圧縮強さ(q_u)は、原位置でのサンプリング試料を $\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ に切り出して供試体としている。原位置試験結果中に大きく外れた計測値があり、これを除いて結果の整理を行った (図-9 中の円で囲った試験値を棄却)。サンプリング試料と原位置試験の結果は、相関係数 $R^2=0.65$ ($R=0.83$) 比較的よい相関を示している。また、現場 CBR 試験結果では、 q_u の値にかかわらず、 $\text{CBR} \approx 6$ となった。

図-10 は PANDA-2 試験による貫入抵抗計測結果である。原位置の SGM の強度は、PANDA-2 試験により深度 1m まで貫入抵抗 (q_d) を計測したが、 q_d の値は深度方向に一樣であり、SGM 打設時の製造精度の高さが確認できる。



(a) q_u と繰返し平板载荷試験による弾性係数



(b) q_u と現場 CBR の試験結果の比較

図-9 ブロックサンプリングによる q_u と原位置試験結果

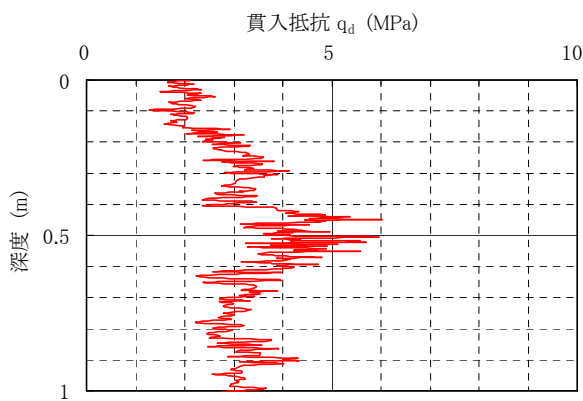


図-10 PANDA-2 試験 貫入抵抗計測結果

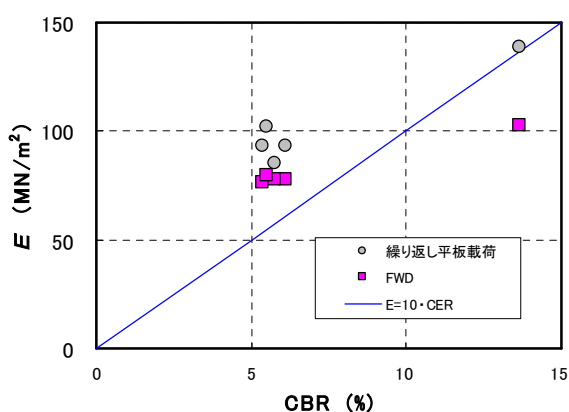


図-11 現場 CBR と弾性係数 E の計測結果

一般的に現場 CBR から弾性係数を推測する場合、 $E=10 \cdot \text{CBR}^1$ の関係を用いるが、繰返し平板載荷試験と小型 FWD 試験について、この関係を整理するとばらつきの範囲であるがほぼ同様の関係が得られた。図-11 が CBR～弾性係数の関係であるが、図中に $E=10 \cdot \text{CBR}$ の関係を併記している。この結果を見ると、原位置での E は CBR とよい相関関係を持っていることがわかる。現場 CBR 試験の結果から、信頼度 5%ディクソン法により棄却判定を行い、最大値が極端に大きい値を棄却した。4 地点の CBR から平均と標準偏差を考慮し、設計 CBR=5.5 とした。この結果から、礫質土の設計 CBR=20、路床厚 $h=200\text{cm}$ として合成 CBR=8 を満たす上部路床厚を計算し、上部路床厚を 50cm とした。

5. 小型 FWD 試験による品質管理

平成 20 年に改訂された、空港舗装構造設計要領¹⁰⁾では、路床の CBR 設計法から弾性ひずみによる疲労照査を用いた性能設計法に移行している。そのため、SGM も E を用

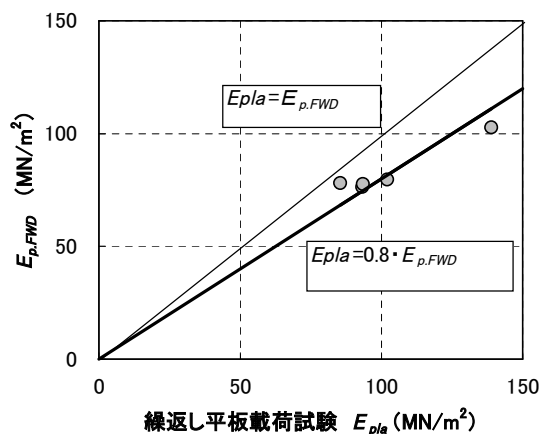


図-12 繰返し平板載荷試験と小型 FWD 試験の E の比較

いた設計が必要となる。実際の設計では、事前の室内配合試験で一軸圧縮試験を行い、 E_{50} による設計舗装構造を決定し、SGM 施工時に原位置での E を検証することになる。この時、原位置での E の結果が設計値より小さければ、舗装構成の見直しが必要となる。舗装構成の見直しは、SGM 打設時に早期に行う必要があるが、繰返し平板載荷など静的な載荷試験では、反力などの計測装置が大型であり、日常的に計測するのは不向きである。そのため、簡易に原位置で E を計測する方法として小型 FWD 試験があるが、動的な載荷の影響を考慮する必要性が生じる。ここで、繰返し平板載荷試験 (E_{pla}) と小型 FWD 試験 ($E_{p,FWD}$) の計測結果を比較すると、 $E_{pla} = (1 \sim 0.8) \cdot E_{p,FWD}$ と繰返し平板載荷試験とよい相関性があることが分かる (図-12)。原位置での E の計測結果から、舗装の疲労照査を行う事により、早期のフィードバックが可能であると言える。ここで小型 FWD 試験の E は(4)式から求めており、解析ソフトによっては、たわみ性板や剛性板の解析式が解析ソフトにあらかじめ組み込まれているため、小型 FWD 試験を用いた E の計測には、あらかじめ解析式を確認することが重要である。

6. 結論

SGM は、砂や礫材とは違い安定処理した粘性土内に気泡を含んでいるため、構造を持った地盤材料と考えられる。そのため、従来の粒状体と同様もしくは、それを上回る CBR や支持性能があるかどうか、原位置で確認する必要があった。十分に養生期間をとった場合、設計 CBR=5.5 となり、下部路床として性能を満たす事が確認された。弾性係数については、 $E=10 \cdot \text{CBR}$ の関係を得ている。また、原位置での弾性係数を求める場合、小型 FWD 試験が有用であることが確認された。今後は、小型 FWD

試験による動的挙動と実際の載荷挙動について更に検討を進め、品質管理への活用を進めていきたい。

参考文献

- 1) 運輸省航空局:空港舗装構造設計要領, pp1-17, 1999.
- 2) 例えば, (財)沿岸技術研究センター:軽量混合処理土工法技術マニュアル(改訂版), 2008.7.
- 3) 輪湖建雄, 土田孝, 松永康男, 濱本晃一, 岸田隆夫, 深沢健:軽量混合処理土工法の港湾施設への適用, 土木学会論文誌, No.602/VI-40, pp.35-52, 1998.
- 4) 大和屋隆司, 御手洗義夫, 小林雅幸:羽田再拡張D滑走路建設における軽量混合処理工の設計と計画, 土木学会第64回年次学術講演会, pp.979-980, 2009.
- 5) 例えば, (財)沿岸技術研究センター:管中混合固化処理工法技術マニュアル(改訂版), 2008.7.
- 6) 永留健, 御手洗義夫, 大和屋隆司, 古藤格正, 野口孝俊:羽田D滑走路における軽量混合処理土の大量急速施工(その1 現場配合の妥当性検証), 第45回地盤工学研究発表会, pp.2091-2092, 2010.
- 7) 阿部長門, 雑賀義人:路盤材のレジリエントモジュラス, 舗装, 29-6, pp9-12, 1994.
- 8) 土木学会舗装工学委員会:FWD及び小型FWD運用の手引き-舗装ライブラリー, 2002.
- 9) 三明崇司, 上熊秀保, 加藤誠二, 土井豆聡之:軽量動的コーン貫入試験(PANDA)の貫入抵抗値とN値の比較事例, 第43回地盤工学研究発表会講演集, pp175-176, 2006.
- 10) 国土交通省航空局:空港舗装設計要領及び設計例, ppII-1-II-4, 2008.

APPLICATION OF LIGHTWEIGHT SOIL (SGM) WITH AIR FORM FOR AIRPORT PAVEMENT SUBGRANDE

Thunehiro SAKAIYA, Takeshi NAGATOME, Takatoshi NOGUTHI and Yosio MITARAI

Tokyo International Airport(Haneda) D Run-way is a high built structure both of the pile and reclamation, and the light weight soil is adopted for the joint back for the stability at the earthquake and the control of the amount of the subsidence. SGM is a class of light weight soil made of high water content dredged clay mixed with air foam and cementing materials. It is characterized by a light unit weight and strong shear strength. The load on the joint was reduced by adopting SGM for the lower subgrade, and the stability of the wharf structure. The objective of this study is to investigate tangent modulus of SGM subgrade for Haneda D Run-way by in-situ experiment. Based on the results, the structure of the subgrade was made in SGM