浚渫土砂－廃石膏ボード粉－安定材混合材料の固化性状と ジオテキスタイル被覆による補強効果[†]

山田 幹雄^{*} 坪川 茂^{**} 佐野 博昭^{***}

Solidification Properties of Dredged Materials Stabilized with Waste Plasterboard Powder and Reinforcement Effect Brought by Wrapping the Mixtures in Geotextile

by

Mikio YAMADA^{*}, Shigeru Tsubokawa^{**} and Hiroaki Sano^{***}

Though the sediments dredged from floors of lakes and ports are beneficial earth materials, the utilization is still stagnant due to continuing restraint of construction investment. On the one hand, plasterboard wastes occurring abundantly with the renovation and demolition works of building are recently bringing the stringency of a residual capacity at controlled type landfill site. In the present study, we have investigated the California bearing ratio (hereinafter referred to as “CBR”), unconfined compressive strength, resilient modulus and constant pressure shear strength after having stabilized the base material which was composed of lake mud, sea sand and waste plasterboard powder with equivalent quantities in dry mass. According to the results obtained from CBR-test and unconfined compression test, the mixing of a waste plasterboard powder reduced apparent water content in base material, and as an effect by this, the hardening progress with the passage of time certainly exceeded a difference of the stabilizer amount added. Successively, having examined the resilient moduli concerning mixtures with a material age of 28 days, it was found that these values were equal to or greater than the existing granular base course materials. Secondly, we have examined relation between shearing stress and displacement for specimens (a diameter of 100mm and a height of 50mm) which were made by wrapping the stabilized base material in geotextile and have compared the strength parameter to specimens without covering. As a consequence, it was ascertained that the angle of shear resistance in specimens with geotextile became 10 to 25 degrees larger than that in specimens without covering and that meanwhile the cohesion generally tended to become largish in the latter.

Key words : Dredged material, Waste plasterboard, California bearing ratio, Unconfined compressive strength, Resilient modulus, Structural design of pavement, Geotextile, Strength parameter

1 緒 言

2002年5月に完全施行された「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律（通称：建設リサイクル法）」の滲透，遵守によって，コンクリートなど特定建設資材4品目の再資源化率，再資源化・縮減率は2005年度の目標に掲げた90～98%を達成した。また，「建設リサイクル推進計画2008（2008年4月）」では，例えば，他産業由来再生資材の舗装への適用性評価に取り組むほか，特定建設資材以外の汚泥，混合廃棄物や発生土の循環利用促進にも一層注力することとなった。ここで，建設混合廃棄物の中でも排出量>150万t/年の廃石膏ボードは，リサイクルに係る体制や技術が確立した段階で，特定建設資材の品目に組み込まれる公算が大きいとされている。¹⁾

廃石膏ボードの再資源化策としては，粉碎物（二水石膏）およびその加熱脱水物（半水石膏）を石粉に置換し

てアスファルト混合物のフィラーに用いようとする事例²⁾や，半水石膏と普通ポルトランドセメントとを複合して地盤改良材に用いようとする事例³⁾などが新しい。

このようなリサイクル推進に向けた方針や取り組みを念頭に置きながら，著者らは浚渫土砂と廃石膏ボード粉とを母材に，これに安定材を添加・混合した材料の固化性状を調べる室内試験に着手した。その試験と並行して，材齢28日の供試体で求めた復元弾性係数の値を参考に多層弾性理論にもとづくアスファルト舗装の断面設計⁴⁾を行って，路盤築造材料への転用の可能性を検討した。⁵⁾

さらに，現道での実施工を想定して，早期の交通開放に資するよう路盤築造材料，つまり，安定処理した母材をジオテキスタイルで包むことによる補強効果を，定圧一面せん断試験を通して調べた。⁶⁾

本論文では，次章以下に母材の物理的性質をはじめ，安定材の種類，添加量や養生方法とCBRとの関係，CBR

[†] 原稿受理 平成21年3月9日 Received Mar. 9, 2009 ©2010 The Society of Materials Science, Japan

^{*} 正 会 員 福井工業高等専門学校環境都市工学科 〒916-8507 鯖江市下司町, Dept. of Civil Eng., Fukui National College of Tech., Geshi-cho, Sabae, 916-8507

^{**} 福井工業高等専門学校教育研究支援センター 〒916-8507 鯖江市下司町, Technical Support Center, Fukui National College of Tech., Geshi-cho, Sabae, 916-8507

^{***} 正 会 員 大分工業高等専門学校都市システム工学科 〒870-0152 大分市牧, Dept. of Civil Eng., Oita National College of Tech., Maki, Oita, 870-0152

Fig. 1 Mud collected beside lake.

Fig. 2 Sea sand accumulated within wharf site.

Fig. 3 Waste plasterboard crushed after having separated paper.

および一軸圧縮強さの経時変化、現行の暫定破壊規準に適う舗装構造の試算例、繊維材被覆の有無がせん断強さや強度定数におよぼす影響について報告する。

2 材料の性質と配合条件

Fig. 1 および Fig. 2 は、福井県北部で定期的に浚渫工事を行っている北潟湖および福井港における土砂の仮置き状況を示す。北潟湖では浚った泥土（以後、湖沼底泥と称する）を隣接する水抜き孔を備えた貯留池に一旦投入し、余剰な水分が滲出した時点で発生土処分場へ順次搬送している。一方、福井港の航路泊地を浚った砂（海砂）は用途もわずかで、大部分が埠頭用地や石油備蓄基地に隣り合う民有地に約 3m の高さに積み上げられている。

Fig. 3 は、建築物解体工事で発生した廃石膏ボード片および廃棄物中間処理施設でボード用原紙と分離、細かく砕いた石膏粉を示す。当該施設は北潟湖と福井港との間に在って、石膏粉の大半はセメント原料に充てられている。粉の粒度範囲は $850 \sim 75 \mu\text{m}$ 、JIS A 1202 の試験方法に倣って求めた粒子密度は 2.83 g/cm^3 、pH は 7.0 であり、主成分は SO_3 (46.0%) と CaO (33.9%) である。

今回の研究では、湖沼底泥と海砂と廃石膏ボード粉とを乾燥質量比 1 : 1 : 1 で混ぜ合わせて母材とした。Table 1 は湖沼底泥、海砂および母材の土質試験結果をまとめたものである。ここで、湖沼底泥は安定処理後の強度発現を阻害あるいは遅延するフミン酸、フルボ酸をそれぞれ 3.5%、4.0% 含んでいる。また、埠頭用地などに約 1 年野積みした海砂の塩化物イオン含有量は 15 mg/kg であり、母材の作製に際してはその時点の海砂を配合した。

Fig. 4 は JIS A 1210、A-a 法に準拠して求めた湖沼底泥（記号○）、海砂（△）、母材（□）の締固め曲線を示

す。母材の最適含水比 w_{opt} 、最大乾燥密度 $\rho_{d\text{max}}$ は湖沼底泥と海砂における w_{opt} 、 $\rho_{d\text{max}}$ の中間からいくらか前者の側に偏っていることがわかる。

Table 2 にまとめたように、母材には高炉セメント B 種、セメント系固化材（一般軟弱土用）、工業用消石灰（1 号）を母材の乾燥質量に対して 10% (Case I) もしくは 20% (II) 添加した。なお、湖沼底泥と海砂は取り敢えず液性限界を目標に含水比を調整し、廃石膏ボード粉については実験室に搬入した状態（JIS A 1203 の試験方法を準用して求めた水分量は 15.3%）のままで配合した。

Fig. 4 Compaction curves of samples.

Table 1 Properties of mud, sea sand and base material.

Sample	Particle density (g/cm^3)	Grain size distribution			Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Plasticity index	Coefficient of permeability (cm/s)	Organic matter content (%)	Ignition loss (%)	pH
		Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)							
Mud	2.38	9.7	53.7	36.6	170.5	69.4	101.1	2.42×10^{-5}	26.9	20.8	3.7
Sea sand	2.63	91.2	1.0	7.8	26.0	NP	NP	9.50×10^{-3}	1.0	3.8	9.5
Base material	2.73	44.2	48.0	7.8	102.6	44.7	57.9	3.47×10^{-6}	12.0	12.0	6.5

Note : The base material consists of mud, sea sand and waste plasterboard powder. These mix proportions are the same in dry mass.

Table 2 Laboratory test case.

Case	Additive content of stabilizer (in dry mass)		
	Portland blast-furnace slag cement	Cementitious soil improving agent	Hydrated lime
I-S	10%	—	—
I-C	—	10%	—
II-S	20%	—	—
II-C	—	20%	—
II-L	—	—	20%

3 固化混合物の CBR と一軸圧縮強さ

安定材の種類にかかわらず、母材に 10% 添加したとき (Case I-S, C) の平均含水比は 63%, 20% 添加したとき (II-S, C, L) は 57% となった。これらの安定処理材料を内径 150mm, 容量 2209cm³ の器 (CBR 試験仕様) に入れて 4.5kg ランマーで突固めたところ、いずれの Case においても途中で過度のこね返しを生じた。そこで、CBR 試験では安定処理材料を人力で静的に締固めてモールドに詰めることにした。

充填後の乾燥密度の平均は Case I-S, C で 0.96g/cm³ (締固め度 78%, 飽和度 94%, 間隙比 1.9), II-S, C, L では 1.03g/cm³ (84%, 94%, 1.7) となった。ここに、締固め度は前出 Fig. 4 の母材の ρ_{dmax} に対する値を指す。今回は、これらの乾燥密度を目標に CBR 試験のみならず一軸圧縮試験、レジリエントモデュラス試験および一面せん断試験に供する固化混合物を作製した。

Fig. 5 は、JGS 0811 の養生手順やピストンの貫入速度に準じて求めた CBR を示す。Case I-S, C および II-S, C の養生期間は空气中 3 日、水浸 4 日の計 7 日であるが、CBR は I-S と II-S の方が大きい、すなわち、標準養生での効用はセメント系固化材よりも高炉セメント B 種の方が大きいことがわかる。さらに、これらの Case では安定材量の差 (I: 86kg/m³, II: 172kg/m³) 以上に CBR は増加する傾向がある。II-L の養生期間は空气中 6 日、水

Fig. 5 CBR under the standardized curing condition.

浸 4 日の計 10 日と長く、かつ、消石灰量も多いものの、固化を促進する効果は発揮されないようである。

上記の結果を踏まえて、著者らは Case II-L を除いた I-S, C と II-S, C について養生期間中の CBR の変化を詳細に調べてみることにした。具体的には同一の条件 (配合量, 含水比, 乾燥密度) のもとで固化混合物を 4 つずつ作製し、そのうちの 3 つは空气中養生 1 日, 3 日, 7 日が経過した時点で CBR を求め、1 つは空气中養生 3 日目にモールドを逆さにしてスパーサーディスクを底に装着した状態で CBR を求めた後 (貫入量 5mm まで)、モールドの上下を当初にもどして水浸養生に移行した。4 日後、その固化混合物を用いて改めて貫入試験を行った。

試験結果を Fig. 6 に示す。全ての Case で、空气中養生における CBR (記号○) は日数の経過とともに増加すること、水浸養生での CBR (△) は空气中養生を 7 日間継続した場合の CBR を上回ること、ただし、支持力差は高炉セメント B 種を添加した Case I-S と II-S で顕著に現れることがわかる。一方、空气中養生終了時の CBR に着目すると、セメント系固化材を用いた I-C と II-C の方で大きくなっていることが認められる。

このような結果には、潜在水硬性の有る高炉スラグを原料に含む高炉セメントの特長が関与しているものと考えられるが、いずれにしても、舗装工事で路盤が数日間水に浸るのは稀であることから、著者らは本研究で取り扱う母材に限れば、セメント系固化材による安定処理が妥当と判断した。そこで、引き続き Case I-C および II-C の固化混合物を対象に、空气中養生 28 日までの CBR と併せて一軸圧縮強さ q_u の経時変化を調べた。

Fig. 7 は材齢と CBR, q_u との関係をまとめたものである。ここで、一軸圧縮試験に供した固化混合物の寸法は

Fig. 6 Influence of curing process on CBR.

Fig. 7 Variation with time of bearing capacity and strength.

直径約 50mm、高さ約 100mm であり、作製は圧縮装置を用いた静的締固めに依った。モールドからの取り外しは試験当日とし、JIS A 1216 の方法に準じて載荷した。非水浸 CBR の推移をみると Case I-C は材齢 21 日以降、II-C は 7 日以降でわずかな増減となり、後者は前者の 2.5 倍程度の大きさとなっている。 q_u についても締固め度 84% の II-C における経時増分は大きく、材齢 28 日の q_u は I-C のおよそ 10 倍に達している。

次に、廃石膏ボード粉混入による影響を調べる目的で、湖沼底泥と海砂とを乾燥質量比 1:1 で混ぜ合わせた母材にセメント系固化材を 20% 添加 (140kg/m^3 相当) し

た材料 (平均含水比 78%) の非水浸 CBR、一軸圧縮強さ q_u を求めて Fig. 7 と比較した。その結果、Case I-C に似通った傾向が確認⁵⁾され、したがって、廃石膏ボード粉を同時に加えることで見掛けの含水比が低下し、安定材量の節減に寄与する可能性が高いといえる。

4 固化混合物の推定弾性係数および アスファルト舗装の構造設計例

一般に、等値換算係数 a が未知である新規の、または、廃棄物や副産物を再資源化した材料を用いる場合には、それらの弾性係数とポアソン比を把握した上で多層弾性理論にもとづく解析手法を採って舗装断面を決定する⁴⁾

そこで、繰返し三軸圧縮試験装置を用いて Case I-C、II-C の固化混合物の材齢 28 日におけるレジリエントモデュラス (M_r : 偏差応力/鉛直復元ひずみ) を測定したところ I-C で $M_r \approx 300\text{MPa}$ 、II-C では $M_r \approx 900\text{MPa}$ が得られ、汎用的な路盤材料であるクラッシュラン (200MPa) や粒度調整碎石 (300MPa) と同等、もしくは、これらを上回る弾性係数を有するものとみなされた。

このことから、 M_r の値を参考に普通道路の舗装断面を計算してみた。設計条件は舗装計画交通量 40 以上 100 (台/日・方向) 未満、疲労破壊輪数 $N = 30000$ 回/10 年、ひび割れ率 20%、永久変形 15mm および信頼度 90% とした。なお、路床 (原地盤) の弾性係数を 50MPa と置いて計算を進めたが、これは舗装計画交通量の前提とした廃棄物中間処理施設の構内道路の脇を 0.5m の深さまで掘削して測ったインパクト値 I_a の換算地盤反力係数 K_{30}^* をもとに、静的逆解析⁷⁾で推定した値である。

演算結果を Fig. 8 に示す。アスファルト混合物の厚さを 60mm としたとき上層に粒度調整碎石 100mm、下層にクラッシュラン 150mm の計 250mm の路盤厚 (A) で舗装断面の力学的な安全性が確保され、これに相応する固化混合物の厚さは Case I-C で 200mm (B)、II-C では 150mm (C) となり、いずれも一層路盤で現行の暫定破壊規準に適った舗装構造となることが確かめられた。

Symbol	Material	Elastic modulus E	Poisson's ratio ν
	Asphalt mixture	1900~9000MPa	0.35
	Graded aggregate	300MPa	
	Crusher-run	200MPa	
	Case I - C	300MPa	
	Case II - C	900MPa	
	Conventional subgrade	50MPa	0.40

Fig. 8 Simulations of pavement structure based on multi-layered elastic systems.

5 ジオテキスタイルによる被覆がせん断変位, せん断応力および強度定数におよぼす影響

前章で検討した建設発生土（浚渫土砂）、建設廃棄物（廃石膏ボード）を母材とする固化混合物の路盤への適用を具現化する上には、築造の当初から路盤を拘束して強度の発現を助長する方策を予め提案しておく必要がある。

その手立ての1つまでに、著者らはマットレス工法の利点である荷重分散とせん断抵抗力とがもたらす構造物基礎地盤の支持力改善⁹⁾に注目し、今回は安定処理した母材をジオテキスタイルで包むことによる補強効果を、せん断強さおよび強度定数を指標に調べてみた。

ジオテキスタイルが関係する一面せん断試験について、改正予定の基準⁹⁾では上下の箱に詰めた土の間にジオテキスタイルを挟み、垂直力载荷のもと1mm/minでせん断変位を与えたときの摩擦強さや摩擦定数を求めるとされている。しかし、繊維材で覆った土の直接せん断試験方法は、未だ基準の制定にいたっていない模様である。

Fig. 9は作製した供試体（左：直径約100mm、高さ約50mm）およびせん断過程を終えた供試体（右）の外観を示す。カッターリングの凹部に宛がい、その中へ詰めた安定処理材料を包むジオテキスタイル（織布）の品質は厚さ0.25mm、引張強さ1570N/3cm、伸び率14%である。供試体は、カッターリングごと20℃に調節した恒温器内に最長で14日間静置した。在来型の試験機に装着したせん断荷重計の容量は4.9kN、せん断変位の測定限度は30mmであり、せん断変位速度は0.2mm/minに設定した。

路面に49kNの輪荷重が接地直径300mmで作用するとき、上層路盤面に伝わる垂直応力は接地中心でおよそ0.45MPa、半径150mmの隔たりでは0.15MPaとなる¹⁰⁾ことを根拠に、それに前出Fig. 7に示した一軸圧縮強さ q_u の推移、すなわち、形成されたセメンテーションを壊さない応力範囲と荷重計の容量とを勘案して、Case I-Cに加える垂直応力 σ は0.15, 0.20, 0.25MPaの3段階、II-Cへは0.15, 0.20, 0.25, 0.30MPaの4段階とした。

せん断応力 τ -せん断変位 δ 曲線の例をFig. 10に示す。固化混合物自体、つまり、ジオテキスタイルで被覆しなかった供試体（上）における τ の極大値 τ_f は $\delta_f =$

Fig. 9 Specimen made by wrapping the stabilized base material in geotextile.

Fig. 10 Output examples of shearing stress-displacement curves.

4.1 ~ 5.9mmに生じ、垂直応力 σ に比例して増加することがわかる。同様に、ジオテキスタイルで包んだ供試体（下）の τ_f も σ に依存するとともに、その τ_f は $\delta_f = 4.3 \sim 6.9$ mm ($\tau_{f-initial}$ と称する)と $\delta_f = 11.8 \sim 12.4$ mm ($\tau_{f-final}$)の2点に生じることに特徴がある。さらに、 δ_f に大きな差のない $\tau_{f-initial}$ と τ_f とを比較すると、前者は後者の1割増($\sigma = 0.15$ MPa)ないし2割増($\sigma = 0.20, 0.25$ MPa)であり、安定処理材料-繊維材の複合による効果がせん断抵抗力の向上となって現れている。

$\tau_{f-initial}$ 、 $\tau_{f-final}$ に達した時点のせん断箱の状態を観察したところ、 $\tau_{f-initial}$ を確認した後せん断の進行とともに固定箱は徐々に傾き、 $\tau_{f-final}$ 到達時の可動箱との離れは5mm程度となった。在来型の試験機でせん断中に生じるこのような傾斜は、加圧板が加圧軸に固定されていない構造上の制約によるものであるが、著者らは強度定数の算定には計測精度の高い $\tau_{f-initial}$ を採用することにした。

Fig. 11は垂直応力 σ とせん断強さ τ_f 、 $\tau_{f-initial}$ との関係から求めた粘着力(c_d , $c_{d-initial}$)およびせん断抵抗角(ϕ_d , $\phi_{d-initial}$)をまとめたものである。粘着力は0.25MPa以下で、材齢による変動は全般に小さい。ただし、Case II-Cではジオテキスタイルを併用しない供試体（記号△）の方で約2倍の大きさを呈している。一方、せん断抵抗角は材齢とともに徐々に大きくなり、かつ、ジオテキスタイルで包んだ場合（●, ▲）と包まない場合（○, △）との角度差はI-Cでおよそ10 ~ 15°, II-Cでは15 ~ 25°となっている。そして、ジオテキスタイルの併用に

Fig. 11 Relationship between strength parameter and material age.

より、せん断抵抗角は固化混合物作製時の締固め度に依存することなく、ほぼ同じ大きさにいたる傾向にある。

参考までに、垂直応力 σ を 0.15, 0.20, 0.25MPa とし て求めた最適条件での母材の強度定数は $\phi_d = 39.6^\circ$, $c_d = 0.01\text{MPa}$, $\phi_{d\text{-initial}} = 47.3^\circ$, $c_{d\text{-initial}} = 0.01\text{MPa}$ であった。また、材齢 7 日の Case I-C, II-C の六価クロム溶出量は土壌環境基準を下回る 0.01mg/ℓ 未満であった。

6 結 言

著者らは有効利用量の増加が望まれている浚渫土砂、廃石膏ボード粉に安定材を加えた材料の固化性状および弾性係数の推定値を調べて、これの道路路盤への適用を検討した。さらに、実施工に向けて安定処理材料をジオテキスタイルで被覆して築造することを提案し、それによる補強効果をせん断強さや強度定数をもって評価した。

以下に、本研究で得られた新たな知見を列挙する。

(1) 固化混合物の CBR は、安定材と養生方法との組み合わせによって異なる。すなわち、空気中から水浸養

生へ移行すると高炉セメント B 種による安定処理が、空气中養生を継続するとセメント系固化材が有利となる。

(2) 材齢 28 日の固化混合物のレジリエントモデュラスは汎用的な粒状路盤材料に比べても遜色なく、疲労破壊輪数の小さい路線を対象とすれば、一層路盤のアスファルト舗装断面でも力学的な安全性は確保される。

(3) 繊維材の有する引張強さと伸びの効用により、ジオテキスタイルで包んだ固化混合物のせん断応力は常に 2 箇所のせん断変位で卓越する。また、ジオテキスタイルを併用することで、せん断抵抗角はより大きくなる。

参 考 文 献

- 1) M. Kamon, "Recent situation and the future of materials recycling in construction work", Proceedings of the Eighth National Symposium on Ground Improvement, pp.1-7 (2008).
- 2) T. Imaoka, N. Hirota, T. Niihata and N. Edani, "Reuse of the crushed and processed waste plasterboard as filler", Pavement, Vol.43, No.11, pp.13-17 (2008).
- 3) T. Kamei, K. Ugai and T. Shuku, "Effective use of bassanite produced from waste plasterboard as soil improvement materials", Journal of the Japanese Geotechnical Society (Tsuchi-to-Kiso), Vol.55, No.10, pp.26-28 (2007).
- 4) Japan Society of Civil Engineers, "Introduction to pavement structural analysis based on multi-layered elastic systems -Application with GAMES-", pp.69-94 (2005) Maruzen.
- 5) M. Yamada, F. Mitamura, M. Yoshida, T. Yano, H. Sano and K. Tanabe, "A study on bearing capacity characteristic of dredged materials stabilized with waste plasterboard and its utilization as road sub-base", Construction Materials, Vol.16, No.1, pp.29-36 (2008).
- 6) M. Yamada, F. Mitamura, H. Sano, K. Tanabe, S. Tsubokawa and N. Kojima, "Bearing capacity and strength characteristics of mixture comprising dredged materials, waste plasterboard powder and stabilizer", Proceedings of the Eighth National Symposium on Ground Improvement, pp.9-14 (2008).
- 7) M. Yamada, S. Tsuji, H. Sano and K. Tanabe, "Performance of the packed-foamed cement milk and its applicability as base material", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.57, No.1, pp.60-65 (2008).
- 8) J. Hironaka, T. Hirai and A. Yatsu, "Reinforcement effect of mattress under loading test", Geosynthetics Engineering Journal, Vol.20, pp.211-216 (2005).
- 9) The Japanese Geotechnical Society, "Direct shear test for geosynthetics (JGS 0941:proposed amendment)", Tsuchi-to-Kiso, Vol.56, No.2, pp.44-46 (2008).
- 10) Japan Society of Civil Engineers, "Introduction to pavement structural analysis based on multi-layered elastic systems -Application with GAMES-", pp.52-55 (2005) Maruzen.