

# 廃石膏ボード粉を混入して安定処理した浚渫土の 支持力特性と道路構成材料としての活用に関する検討

A STUDY ON BEARING CAPACITY CHARACTERISTIC OF DREDGED MATERIALS  
STABILIZED WITH WASTE PLASTERBOARD AND ITS UTILIZATION AS ROAD SUB-BASE

山田幹雄\*・三田村文寛\*\*・吉田真輝\*\*\*・矢野智孝\*\*\*\*・佐野博昭\*\*\*\*\*・田辺和康\*\*\*\*\*

by Mikio YAMADA, Fumihito MITAMURA, Masaki YOSHIDA,  
Tomotaka YANO, Hiroaki SANO and Kazuyasu TANABE

## 1. はじめに

資源・資材の循環活用策の一環として、著者らは建設発生土に分類される浚渫土と建設廃棄物に属する廃石膏ボード粉とを母材に、これに汎用的な3種類の安定材（工業用消石灰、高炉セメントB種、セメント系固化材）を個別に添加した混合物の固化性状を調べるとともに、舗装の性能規定化<sup>1),2)</sup>を踏まえて混合物の道路新設・補修用材料、とりわけ、路盤築造材への転用の可能性を多層弾性理論にもとづくアスファルト舗装の断面設計<sup>3)</sup>を行って検討した。

一般に、再利用を試みる資源・資材の発生箇所とそれを加工し、施工する箇所との隔たりは小さいほど経費面で有利となる。今回、著者らが研究の対象とした福井県北部には石川県との境に周囲14km、面積2.73km<sup>2</sup>、平均水深2.5mの北潟湖が汽水を湛え、その南西方向約10km、一級河川の九頭竜川の河口に延長0.9km（北側）および1.4km（南側）の防波堤に囲まれた地方港湾の福井新港が日本海に面している。北潟湖、福井新港ともに定期的に浚渫が行われており、また、2箇所の浚渫土発生地のほぼ中間に大型の廃石膏ボード/ボード用原紙分離機（粉碎能力：毎時3.5トン）を備えた中間処理施設がある（写真-1）。

北潟湖、福井新港、中間処理施設に通じる公道は観光バス、普通貨物自動車、ダンプトラックなどの大型車両の往来も少なくなく、室内での基礎試験に引き続き現道での試験舗装を立案するにいたった段階においても、舗装計画交通量など交通条件の設定に支障をきたす素因はとくに認められない。

浚渫の目的は北潟湖と福井新港とで異なり、前者は富栄養化にともなう水質悪化の進行を阻止するために、湖底に堆積している約56,000m<sup>3</sup>の泥を2010年度までに除去する事業であり、隣接して設けた貯留池に一旦投入後、余剰な水分が滲出した時点で発生土処分場（0.7ha）へ順次搬送している<sup>4)</sup>。写真-1に示したように、底泥には珪藻の外殻が多量に含まれている。なお、既存の貯留池の数は5、規模は幅13～32m、長さ29～130m、深さ2mであり、側面および水抜き孔を除いた底面は遮水シートで被覆されている。

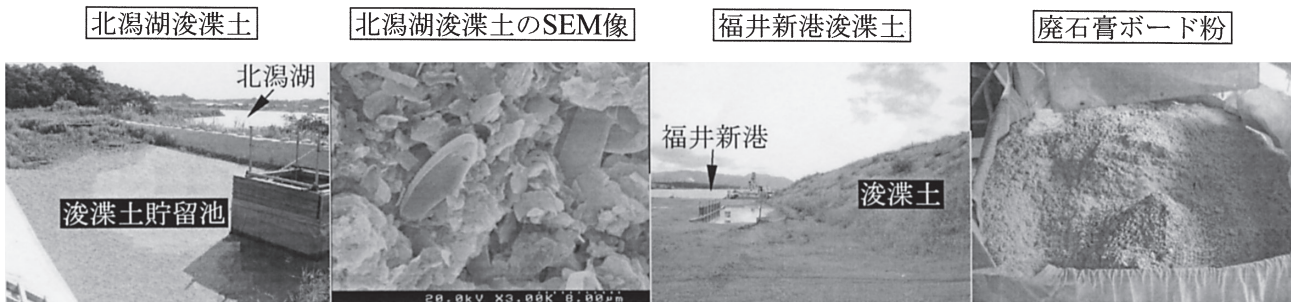
後者は航路泊地の計画水深（北防波堤域：-3.5m～-5.5m、南防波堤域：-10m）を維持するための事業であり、年間約54,000m<sup>3</sup>の砂を浚って陸上へ移送している。砂は、一部は裏込め材や埋戻し材に転用されているものの、大半は埠頭用地（5.7ha）および石油備蓄基地に隣り合う民間所有地（62.8ha）に約3mの高さに積み上げられている<sup>5)</sup>。

浚渫土を土木構造物の構成材料に用いるには、例えばプラント安定処理工法や袋詰脱水処理工法が有効な方策<sup>6)</sup>となるが、差し当たり近隣の自治体で設備投資に見合う大規模な事業計画は策定されておらず、このため、原土のままでの用途の拡大や低廉加工・利用技術の開発が喫緊の課題となっている。

一方、硫化水素の発生を機に2006年6月以降管理型処分場に搬入することが義務付けられた廃石膏ボード粉はセメント原料、路盤材の補強助材や肥料などに用いられているほか、半水石膏化して地盤改良材に活用しようとする研究も進められている<sup>7),8)</sup>。それでも、全量が消費されるわけではなく、建築物解体系排出量の増加（2013年推計値：約180万トン）に加えて処分場の収容量の逼迫（残余年数：7.2年）も懸念されることから、処分費用の削減を目指して再資源化率の向上が求められている<sup>9),10)</sup>。なお、分離した原紙の多くは焼却処分されている現状にある。

これらのことから、著者らは冒頭に述べたように二つの浚渫土と廃石膏ボード粉とを一括利用する先

\* 福井工業高等専門学校 教授 環境都市工学科（〒916-8507 福井県鯖江市下司町）、\*\* 福井県雪対策・建設技術研究所 主任研究員 環境・建設技術研究グループ、\*\*\* 前田工織株式会社 開発製造本部技術部、\*\*\*\* 株式会社吉勝重建 常務取締役、\*\*\*\*\* 大分工業高等専門学校 教授 都市システム工学科、\*\*\*\*\* 福山大学 准教授 工学部建築・建設学科



写真－1 浚渫土の仮置き状況および粉砕した石膏ボード

として道路路盤を想定し、まずは混合物の支持力、強度特性を調べる室内試験に着手した。

本論文では、次章以下に材料の配合量、安定材の種類や供試体の養生方法がCBRおよび一軸圧縮強さにおよぼす影響を述べるほか、暫定的に求めた固化混合物の弾性係数（レジリエントモデュラス）をもとに試算したアスファルト舗装断面の設計例を示す。

## 2. 材料の性質および配合条件

北潟湖浚渫土、福井新港浚渫土の土質試験結果を表－1に、これらの浚渫土と廃石膏ボード粉の蛍光X線分析結果を表－2に示す。実験室搬入時の平均含水比は北潟湖浚渫土で147.8%、福井新港浚渫土で5.8%、廃石膏ボード粉では15.3%であった。

採取した北潟湖浚渫土には樹根片が、福井新港浚渫土には貝殻が混在していたが、それらを取り除けば前者は2mmふるいで裏漉しが可能であり、後者は2mmふるいを全て通過した。また、廃石膏ボード粉は少量の原紙屑のみが0.85mmふるいに留まった。

表－1 浚渫土の土質試験結果

浚渫土	北潟湖	福井新港
土粒子の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.38	2.63
砂分 (%)	9.7	91.2
シルト分 (%)	53.7	1.0
粘土分 (%)	36.6	7.8
均等係数	—	3.08
曲率係数	—	1.77
液性限界 (%)	170.5	26.0
塑性限界 (%)	69.4	NP
塑性指数	101.1	NP
透水係数 (cm/s)	2.42×10 <sup>-5</sup>	9.50×10 <sup>-3</sup>
有機物含有量 (%)	26.9	1.0
強熱減量 (%)	20.8	3.8
pH [H <sub>2</sub> O]	3.7	9.5
土質材料の工学的分類	有機質粘土(OH) [高液性限界]	細粒分まじり砂 (S-F)

黒色で腐植臭を放ち、有機物含有量（文献11）の旧試験法を準用して測定）の多い北潟湖浚渫土には、綿毛状の黒褐色の沈殿性有機物であるフミン酸が3.5%、黄褐色の可溶性有機物であるフルボ酸が4.0%含まれていた。フミン酸、フルボ酸ともに安定処理土の固化を遅延する働きがあり、このうち、フミン酸は微量でも普通ポルトランドセメントや消石灰を添加した処理土の強度発現を阻害するとされている<sup>12)</sup>。

福井新港北側の九頭竜川河口付近で浚渫した砂の塩化物イオン含有量を硝酸銀滴定法<sup>13)</sup>で測定したところ、浚って陸上移送した当初は970mg/kgであったが、降雨や融雪期を経た約1年後には15mg/kgに減少していた。次章に述べる室内試験には、埠頭用地に仮置きしてから1年以上が経過した浚渫土を用いた。

JIS A 1202の試験方法を準用して求めた廃石膏ボード粉の粒子密度は2.44g/cm<sup>3</sup>、また、pH [H<sub>2</sub>O]は7.0であった。二水石膏である廃石膏ボード粉自体に固化を促す効用はないが、本研究では北潟湖の底泥のように余剰水分をとまう土砂の見掛けの含水比

表－2 浚渫土および廃石膏ボード粉の化学成分組成

試料	北潟湖浚渫土	福井新港浚渫土	廃石膏ボード粉
SiO <sub>2</sub> (%)	45.7	61.0	2.36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	16.7	15.0	0.69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6.48	4.89	0.47
CaO (%)	0.43	2.90	33.9
MgO (%)	1.18	1.91	0.26
K <sub>2</sub> O (%)	1.63	2.88	0.15
Na <sub>2</sub> O (%)	0.96	2.10	0.08
TiO <sub>2</sub> (%)	0.54	0.74	0.19
MnO (%)	0.06	0.08	0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.33	0.18	0.12
SO <sub>3</sub> (%)	0.28	0.11	46.0
Ig.loss (%)	25.7	8.21	3.87
結合水 (%)			11.8

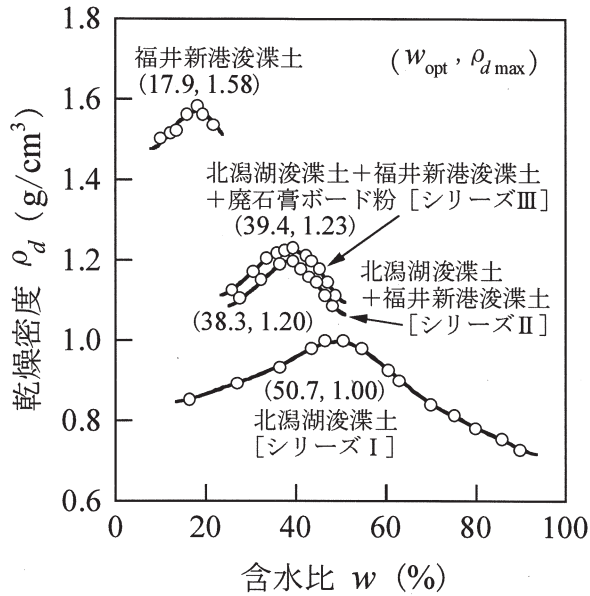


図-1 浚渫土単体および混合材料の締固め曲線

の低下を期待して浚渫土に混入することにした。

そこで、室内試験における材料の組み合わせは、北潟湖浚渫土単体および搬入時の状態のままの廃石膏ボード粉を北潟湖浚渫土の乾燥質量に対して15%ないし25%混入（シリーズI）、北潟湖浚渫土と福井新港浚渫土とを乾燥質量比1:1で混合（シリーズII）、北潟湖浚渫土と福井新港浚渫土と廃石膏ボード粉とを乾燥質量比1:1:1で混合（シリーズIII）の3種類とした。供試体の作製にあたっては、安定材をこれらの母材の乾燥質量に対してシリーズIおよびIIで10~30%、シリーズIIIでは10%もしくは20%添加した。

### 3. 混合材料の締固め、支持力および強度特性

#### 3.1 浚渫土単体および混合材料の締固め特性

図-1はJIS A 1210、A-a法に準拠して求めた福井新港浚渫土単体、北潟湖浚渫土単体（シリーズIで廃石膏ボード粉無混入の場合）、シリーズIIおよびIIIの混合材料の締固め曲線をまとめたものである。図には最適含水比  $w_{opt}$ 、最大乾燥密度  $\rho_{dmax}$  を併記してある。シリーズIIとIIIの締固め曲線の形状は似通っていて  $w_{opt}$ 、 $\rho_{dmax}$  にほとんど差はなく、福井新港浚渫土単体と北潟湖浚渫土単体との中間からいくらか後者に偏向した  $w_{opt}$ 、 $\rho_{dmax}$  であることがわかる。

これらの  $w_{opt}$  を目標に含水比調整した材料のCBRをJIS A 1211の試験方法（突固め回数：67回/層）に準拠して求めたところ福井新港浚渫土単体、シリーズI、II、IIIでそれぞれ5.4%、11.0%、10.4%、10.3%となり、 $w_{opt}$  に調整すればいずれも路床材料として利用できる傾向が認められた。さらに、CBR試験が終了した時点でモールドを逆さにして、供試体の中

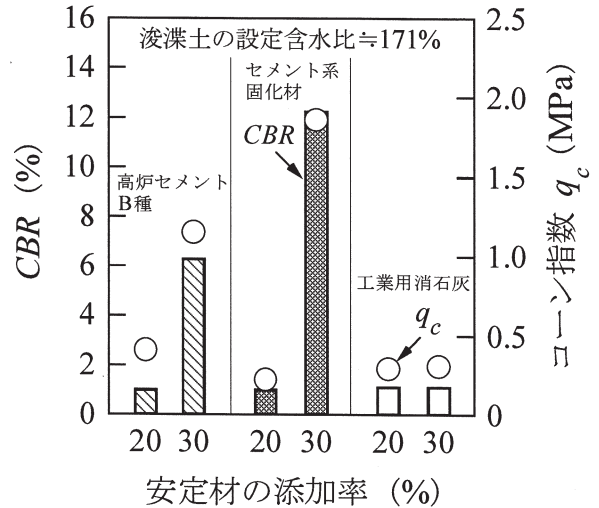


図-2 北潟湖浚渫土の安定処理効果（シリーズI：廃石膏ボード粉無混入）

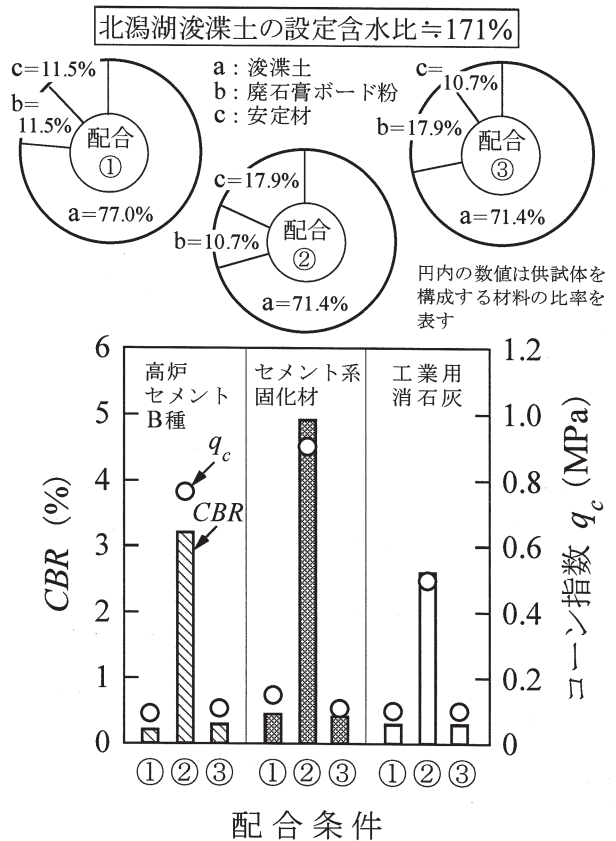


図-3 北潟湖浚渫土、廃石膏ボード粉、安定材の配合量が供試体の支持力特性におよぼす影響（シリーズI）

央に先端角30°、底面積3.24cm<sup>2</sup>のコーンを10mm/sの速度で貫入したときの抵抗力を測定した。その結果、コーン指数  $q_c$  は福井新港浚渫土単体で0.9MPa、シリーズI~IIIでは1.9~1.7MPaとなって、概ねダンプト



ラックの連続走行が可能なトラフィカビリティ ( $q_c \geq 1.2\text{MPa}$ )<sup>14)</sup>に相当することがわかった。

### 3.2 フミン酸を含有する北潟湖浚渫土の安定処理効果

前章にも述べたように、北潟湖浚渫土は3%を超えるフミン酸を含んでいることから、廃石膏ボード粉の混入に先立ち、液性限界である170.5%を目標に調整した北潟湖浚渫土に高炉セメントB種、セメント系固化材（一般軟弱土用）、工業用消石灰（1号）のみをそれぞれ20%、30%の添加率で混ぜ合わせた材料のCBRとコーン指数 $q_c$ とを求めた。

混合直後の含水比は、安定材の種類にかかわらず添加率20%でおよそ135%、添加率30%では125%にまで低下したが、4.5kgランマーで突固めると過度のこね返しを生じたために、供試体は人力による静的締固めで作製することにした。この作業には径148mm、厚さ0.1mmのPETフィルムを貼って孔を塞いだ軸付き有孔板（質量5kg）を用い、準備した処理土を3回に分けて詰めた。このような手法で作製した供試体の乾燥密度は、0.56~0.61g/cm<sup>3</sup>であった。

試験結果を図-2に示す。ここで、供試体の養生期間は「安定処理土のCBR試験方法」<sup>15)</sup>に準じて高炉セメントB種およびセメント系固化材を用いた場合は空气中3日、水浸4日の計7日、また、工業用消石灰の場合は空气中6日、水浸4日の計10日とした。添加率を20%として作製した供試体のCBRや $q_c$ に安定材の種類による差はないものの、添加率を30%とするとセメント系固化材、高炉セメントB種の順に支持力が大きくなることがわかる。ただし、工業用消石灰に添加率とCBR、 $q_c$ との関係は認められない。

次に、含水比約171%の北潟湖浚渫土に廃石膏ボード粉を15%の混入率で加え、これに安定材を添加率10%、20%で混ぜ合わせた材料（配合①、②）、廃石膏ボード粉の混入率を25%とし、安定材を添加率10%で混ぜ合わせた材料（配合③）の支持力特性を調べた。

配合①、②、③の含水比はそれぞれ133%、120%、126%となり、混合材料を静的に締固めながらモールドに充填した。作製した供試体の乾燥密度は、0.55~0.62g/cm<sup>3</sup>であった。

図-3(上)の円グラフは、配合①~③で作製した供試体に含まれる北潟湖浚渫土、廃石膏ボード粉、安定材の乾燥質量を百分率で表したものである。これを図-3(下)に示したCBR、 $q_c$ に照合すると、北潟湖浚渫土の約2割を廃石膏ボードと安定材に置き換えた配合①の支持力は小さく、さらに、約3割を置換した配合②および③でも、安定材量の少ない③のCBR、 $q_c$ は①と同程度であることがわかる。一方、廃石膏ボード粉よりも安定材の量を多くした配合②

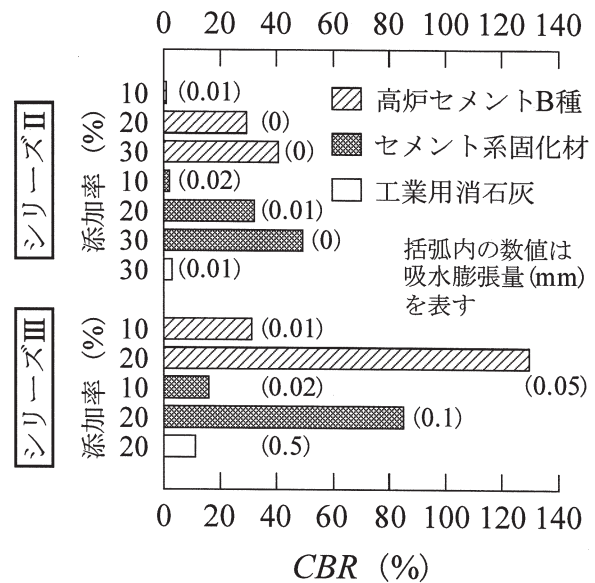


図-4 2種類の浚渫土および廃石膏ボード粉を母材とする供試体の安定処理効果

には固化促進の兆候が現れ、土質区分基準<sup>16)</sup>の上ではセメント系固化材および高炉セメントB種による安定処理は概ね第2種改良土 ( $q_c \geq 0.8\text{MPa}$ )に相当し、工業用消石灰による安定処理は第3種改良土 ( $q_c \geq 0.4\text{MPa}$ )に相当する。したがって、廃石膏ボード粉や安定材の配合量を加減し、かつ、目標とする $q_c$ に応じた安定材を選定すれば第2種、第3種改良土として裏込め、埋戻し、道路盛土や土地造成などへの適用も見込めることになる。

### 3.3 安定材の種類、添加率や養生方法が固化性状におよぼす影響

北潟湖浚渫土を主体としたシリーズIに続いて、同量の福井新港浚渫土を加えたシリーズIIおよび同量の廃石膏ボード粉をも混ぜ合わせたシリーズIIIの試験に移行した。シリーズIIとIIIの締固め曲線が重畳することは前出図-1に示した通りであるが、もとより双方の粒度組成に大きな違いはなく、シリーズIIは砂分を49.2%、細粒分を50.8%含有し、IIIは砂分を44.2%、細粒分を55.8%含んでいる。また、シリーズIIの液性限界は109.1%、塑性限界は47.6%であり、IIIはそれぞれ102.6%、44.7%である。

これらのシリーズでは、北潟湖浚渫土のみならず福井新港浚渫土も液性限界(26.0%)を目標に含水比を調整した。このため、CBR試験用供試体の作製にあたっては、上述した静的締固めを採った。

図-4は3種類の安定材を添加したシリーズII、IIIの供試体で求めたCBRをまとめたものである。図には、4日間の水浸養生中に生じた吸水膨張量を併記してある。混合材料の含水比および供試体の乾燥密度

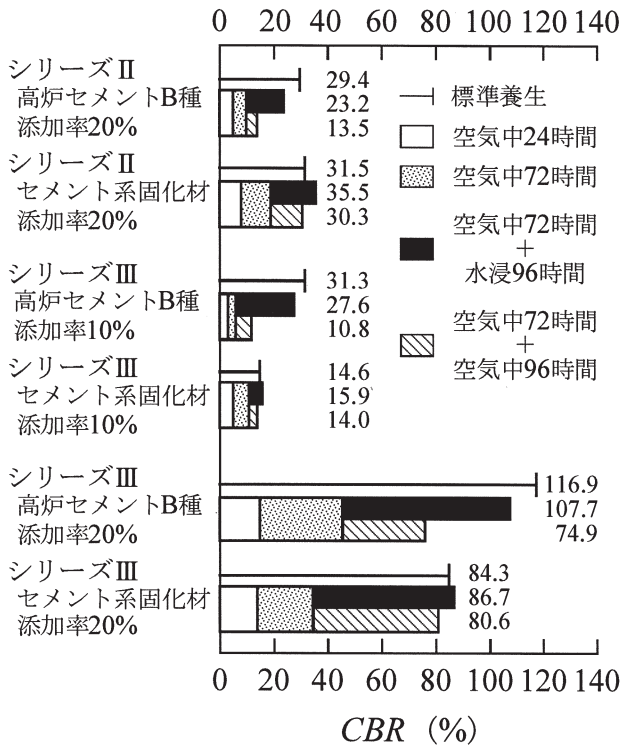


図-5 安定材の種類や養生方法の違いが CBRにおよぼす影響

は、シリーズIIで71~86%および0.78~0.88g/cm<sup>3</sup>、IIIでは57~61%および0.91~1.04g/cm<sup>3</sup>であった。なお、供試体に含まれる安定材の量を比べると、添加率が同じであってもモールドへの充填質量の多いシリーズIIIの方でおよそ2割増となった。供試体の養生は標準期間<sup>15)</sup>としたが、安定材の種類にかかわらず CBRはシリーズIIよりもIIIの混合材料で大きくなること、さらに、シリーズIIではセメント系固化材による安定処理がいくらか有利であるのに対して、IIIでは高炉セメントB種がより効果的であることがわかる。工業用消石灰については、添加率を高くしても支持力の向上にはほとんど関与しない傾向にある。

このような結果を踏まえて、著者らは養生期間における 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）のもとに3本の供試体を作製し、そのうちの1本は空気中養生1日が経過した時点で CBRを求め、2本は空気中養生3日目にモールドを逆さにしてスペーサーディスクを底に装着した状態で CBRを求めた後、モールドの上下を当初にもどして一方は空気中養生を継続、他方は水槽の中に静置した。4日後、これら2本の供試体を用いて改めて貫入試験を行った。

試験結果を図-5に示す。ここで、図中の数値は養生7日目の CBRを表し、「標準養生」は一部を除いて前出図-4の再掲である。シリーズII、IIIともに高炉

(A) シリーズII-セメント系固化材-添加率20%  
(B) シリーズIII-セメント系固化材-添加率10%  
(C) シリーズIII-セメント系固化材-添加率20%

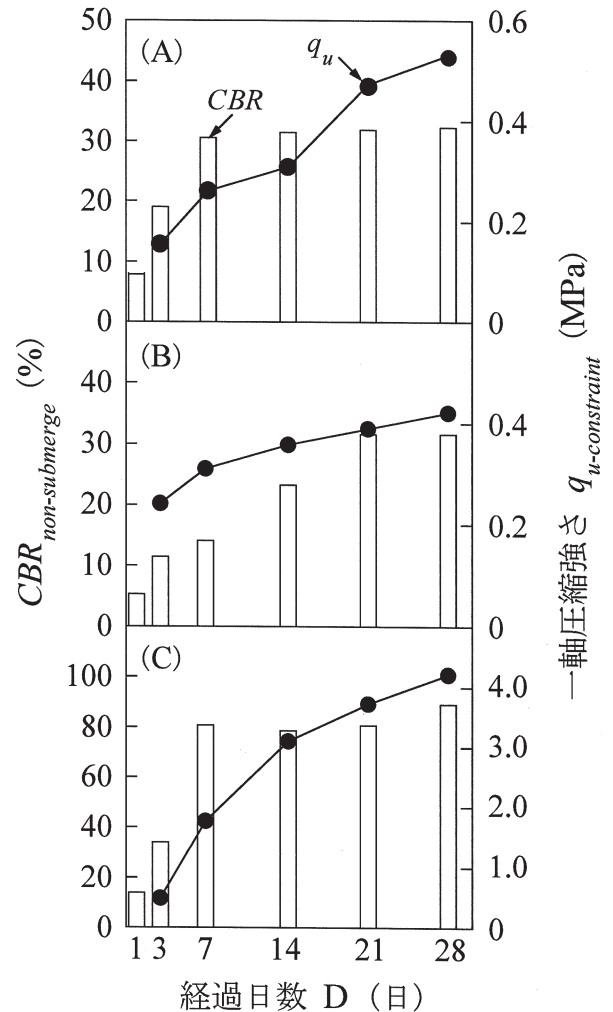


図-6 非水浸供試体における CBR および拘束供試体における一軸圧縮強さの経時変化

表-3 混合材料のレジリエントモデュラス (Mr) 試験結果

シリーズ	セメント系 固化材 添加率 (%)	Mr (MPa)	
		供試体	採用値
II	20	① 466	450
		② 412	
III	10	① 282	300
		② 299	
	20	① 1016	900
		② 812	

【備考】 供試体の寸法：直径100mm，高さ200mm  
供試体の材齢：28日

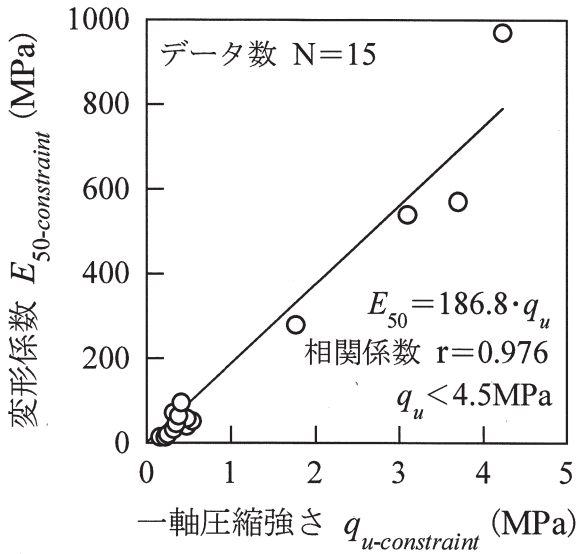


図-7 拘束供試体における一軸圧縮強さと変形係数との関係

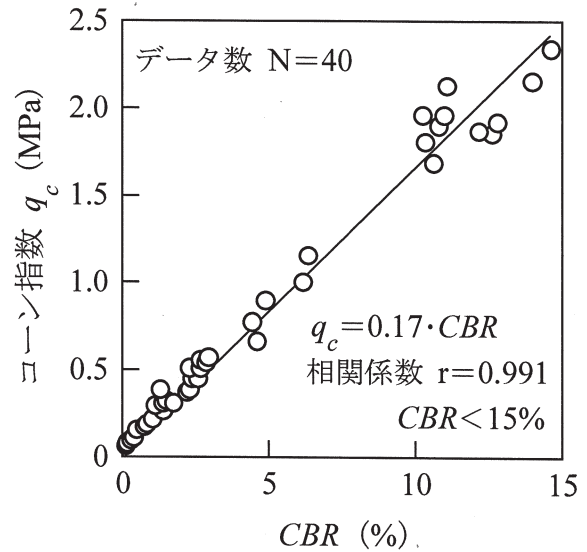


図-8 浚渫土単体および混合材料におけるCBRとコーン指数との関係

セメントB種とセメント系固化材の安定処理効果の相違は、後半4日間の水浸養生でのCBRと空气中養生でのCBRとの差にあることがわかる。すなわち、高炉セメントB種を添加した供試体では、水浸中にCBRは13~62%増えているものの、空气中での増加は4~29%に止まっている。ところが、セメント系固化材を添加した供試体の水浸中のCBRは空气中に比べて2~6%増という程度であり、むしろ、7日間を通して空气中で養生した供試体のCBRは、高炉セメントB種よりも大きくなっている点に注目される。

上記の結果は、潜在水硬性の有る高炉スラグを含む高炉セメントの特長が現れたものと推察されるが、いずれにしても、道路土工において路盤築造や構築路床を施してから表層、基層を舗設するまでに多量の水が浸入するのは稀であり、本研究で取り扱う二つの浚渫土および廃石膏ボード粉に限れば、セメント系固化材による安定処理が妥当な手立てといえる。

図-6はセメント系固化材を添加したシリーズII(配合(A))、シリーズIII(配合(B)、(C))の供試体における空气中養生28日までのCBR、ならびに、別途作製した円柱供試体で求めた一軸圧縮強さ $q_u$ の経時変化を示す。円柱供試体の寸法は直径約50mm、高さ約100mmであり、作製にあたっては混合材料を二つ割モールドの中に入れ、圧縮装置を用いてCBR試験用供試体の乾燥密度を目安に5mm/minの速度で静的に締固めた。その後、モールドごとラップフィルムで厳重に包んで実験室内の暗所に静置した。供試体のモールドからの取り外しは試験当日とし、荷重はJIS A 1216の方法に準じて行った。

図-6において、非水浸CBRの推移をみると配合

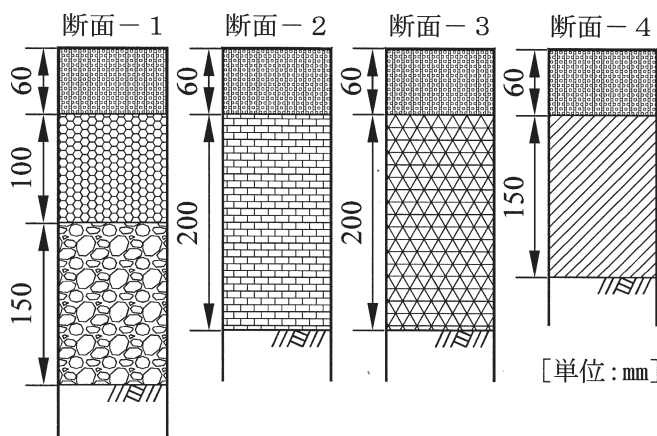
(A)と(C)は7日以降、配合(B)は21日以降での増減は認められない。一般に、補修着工から交通開放までの期間が短いほど舗装のライフサイクルコストは低廉となり、その観点からすれば配合(A)および(C)、とりわけ、CBR=80~90%の(C)は路盤築造材として有利な方向にあるといえる。一軸圧縮強さ $q_u$ は日数の経過とともに漸次増加し、28日経過の配合(C)の $q_u$ は配合(A)の約8倍、(B)の約10倍に達している。

次に、繰返し三軸圧縮試験装置を用いて配合(A)~(C)で作製した供試体の材齢28日におけるレジリエントモデュラス(Mr: 偏差応力/鉛直復元ひずみ)<sup>17)</sup>を求めたところ、表-3に示すような結果が得られた。通常路盤材料であるクラッシュラン、粒度調整砕石の汎用的な値はそれぞれ200MPa、300MPa<sup>18)</sup>であり、また、エアミルクのMrは450~600MPa<sup>19)</sup>であることから、これらの固化混合物は既存の材料の弾性係数に相当するか、もしくは、それ以上とみなされる。なお、Mr試験と並行して六価クロムの溶出濃度(供試体材齢:7日)<sup>20)</sup>を調べたが、いずれの検体も土壌環境基準0.05mg/l未満であった。

### 3.4 一軸圧縮強さと変形係数との関係およびCBRとコーン指数との関係

図-7は前出図-6に示した一軸圧縮強さ $q_u$ と個々の $q_u$ に対応する変形係数 $E_{50}$ との関係について整理した結果、図-8は浚渫土単体も含めて前出図-2~6の試験で求めたCBRとコーン指数 $q_c$ との関係について整理した結果である。ただし、 $q_c$ に関してはコーンペネトロメーターに装着した荷重計の容量0.98kNを超過しない範囲での測定に限られている。 $E_{50}$ - $q_u$ 間および $q_c$ -CBR間には高い相関をもった回帰





記号	材 料	弾性係数 $E$	ポアソン比 $\nu$
	アスファルト 混合物	1900~ 9000MPa	0.35
	粒度調整砕石	300MPa	
	クラッシャラン	200MPa	
	シリーズⅡ 添加率20%*	450MPa	
	シリーズⅢ 添加率10%*	300MPa	
	シリーズⅢ 添加率20%*	900MPa	
	在来路床	50MPa	0.40

\* 安定材：セメント系固化材

図-9 アスファルト舗装の断面設計例

直線が成立し、 $E_{50}$  (MPa) は  $q_u$  (MPa) のおよそ185倍、 $q_c$  (MPa) は  $CBR$  (%) のおよそ0.2倍に換算できることがわかった。

文献21) にはセメント系固化材改良土の  $E_{50}$  (MPa) は  $q_u$  (MPa) の約180倍であったという事例が、また、文献22) にはセメント系固化材を添加した建設汚泥の  $E_{50}$  (MPa) は  $q_u$  (MPa) の50~200倍、 $q_c$  (MPa) は  $CBR$  (%) の0.2~0.4倍に相当していたとの事例が紹介されており、取り扱った土の種類、性質や材料の組み合わせは異なるものの、既往の研究成果に類似した関係が今回の室内試験でも得られたことになる。

#### 4. 固化混合物を路盤に適用したアスファルト舗装の断面設計例

表層・基層、上層および下層路盤から成るアスファルト舗装の各層の厚さを決めるにあたり、等値換算係数  $a$  が設定されている材料を使用する場合には  $T_A$  (必要等値換算厚) 法に依るのが簡便で効率がよく、一方、 $a$  が未知である新規の、あるいは、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  $E$ 、ポアソン比  $\nu$  を把握した上で多層弾性理論にもとづく解析手法を採るのが通例である。

そこで、著者らは大型車両 (ダンプトラック) の通過台数が記録されていて、舗装計画交通量 (台/日・方向) を比較的正確に予測できる廃石膏ボード中間処理施設の構内道路を対象に、多層弾性構造解析プログラム GAMES<sup>3)</sup> を利用して、前出図-6および表-3に示した配合 (A) ~ (C) の混合材料を路盤に組み入れた舗装断面の力学的な安全性を検討した。

設計は普通道路 (輪荷重49kN) として行い、舗装の設計期間10年、交通量区分  $N_3$ 、舗装計画交通量40

(台/日・方向) 以上100 (台/日・方向) 未満、疲労破壊輪数  $N=30,000$  回/10年、ひび割れ率20%、永久変形15mmおよび信頼度90%を演算の要件とした。

出力結果を図-9に示す。ここで、在来路床の弾性係数  $E=50$  MPaは、中間処理施設の構内道路の脇を約0.5mの深さまで掘削して計測したインパクト値  $I_a$  (質量4.5kgの重錘を0.45mの高さから自由落下したときの衝撃加速度) の換算地盤反力係数をもとに、静的逆解析<sup>19)</sup> で推定した  $E=9.8$  MPa (ポアソン比  $\nu=0.4$ ) の5倍相当値である。この乗数5は、同じ路床でも舗装による拘束圧の有無で5~20倍の剛性差を生じるという見解<sup>23)</sup> に根拠を置いている。

図-9には、比較のために一般的な路盤築造材料である粒度調整砕石 (上層)、クラッシャラン (下層) で構成する断面-1も併記したが、固化混合物による断面-2~4は一層路盤で、かつ、舗装厚を50mmないし100mm小さく見積もっても、アスファルト混合物層および路床の破壊回数 ( $N_{fa,d}$  および  $N_{fs,d}$ ) と信頼度に応じた係数  $\gamma_R$  との比が疲労破壊輪数  $N$  以上となって、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。

断面-2~4の固化混合物のうち舗装計画交通量の多い路線、言い換えれば、疲労破壊輪数の大きい公道への用途が期待されるのはレジリエントモデュラス  $M_r=900$  MPaの固化混合物 (配合 (C)) となろう。それでも、性能規定を満足するためにはアスファルト混合物や路盤の増厚を要し、加えて、原地盤の支持力が小さいときには構築路床を施す必要もある。なお、17kNの輪荷重で設計する小型道路に視点を置けば、断面-2および3の固化混合物 (配合 (A) および (B)) も利用先の一つとなる可能性が高い。

## 5. まとめ

一般に、発生地に限られている土砂や廃棄物については、遠方へ搬送することなく近隣で処理、加工して再利用するのが地域内資源循環の端緒となる。

著者らは福井県北部で搬・排出されている浚渫土(湖沼底泥、海砂)と廃石膏ボード粉とを道路用資材として一括利用することを目的に、これらを混ぜ合わせて安定処理した材料の固化性状を調べるとともに、既存の解析手法を引用して固化混合物を路盤に組み入れた舗装断面の力学的な安全性を検証した。

以下に、本研究で得られた新たな知見を列挙する。

(1) フミン酸を含有する湖沼底泥の安定処理効果は使用する安定材の種類によって異なり、*CBR*やコン指数 $q_c$ の増加にはセメント系固化材がとくに効用を発揮する。また、湖沼底泥に廃石膏ボード粉を混入して、セメント系固化材あるいは高炉セメントB種を添加すると、第2種改良土相当の $q_c$ に達する。

(2) 「湖沼底泥-海砂」および「二つの浚渫土-廃石膏ボード粉」を母材とするシリーズにおいて、供試体の*CBR*は空气中養生よりも水浸養生で増加する傾向が認められる。ただし、*CBR*の差は高炉セメントB種を添加した供試体では顕著に現れるものの、セメント系固化材を添加した供試体では数%に止まる。

(3) 「湖沼底泥-海砂-廃石膏ボード粉」を母材とし、これにセメント系固化材を20%添加した材料の*CBR*、一軸圧縮強さ $q_u$ 、レジリエントモデュラス(Mr)はいずれも大きく、したがって、粒状材料による二層路盤に比べて厚さの小さい一層路盤としても、現行の暫定破壊規準に適った舗装構造を設計できる。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、多大なご協力をいただいた福井工業高等専門学校教育研究支援センターの坪川 茂技術員をはじめ、専攻科環境システム工学専攻ならびに本科環境都市工学科の学生諸君に深甚なる謝意を表す。

この論文で報告した室内試験や演算は、科学研究費補助金・基盤研究(C)[期間:2007年度~2009年度、代表者:山田幹雄]の一部として行ったものであることを付記する。

## 参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会:舗装設計施工指針, pp. 1-14 (2006)
- 2) 社団法人日本道路協会:舗装性能評価法—必須および主要な性能指標の評価法編一, pp. 6-53 (2006)
- 3) 社団法人土木学会:多層弾性理論による舗装構

造解析入門—GAMESを利用して—, pp. 69-94 (2005)

- 4) 福井県土木部・農林水産部:平成18年度再評価対象事業一覧, pp. 1-4 (2006)
- 5) 国土交通省北陸地方整備局敦賀港湾事務所:福井のみなど, pp. 15-18 (2005)
- 6) 独立行政法人土木研究所:建設発生土利用技術マニュアル—第3版一, pp. 121-204 (2004)
- 7) イー・コンテクチャー:石膏ボードのリサイクル, 隔月刊9月号, pp. 49-59 (2007)
- 8) 亀井健史・鶴飼恵三・珠玖隆行:廃石膏ボードから再生した半水石膏の地盤改良材としての有効利用, 土と基礎, 第55巻, 第10号, pp. 26-28 (2007)
- 9) 社団法人石膏ボード工業会:廃石膏ボード排出量の推計[1996年~2013年]
- 10) 財団法人先端建設技術センター:よくわかる建設リサイクル—平成19年度版一, pp. 2-3 (2007)
- 11) 社団法人土質工学会:土質試験の方法と解説, pp. 145-151 (1991)
- 12) 社団法人地盤工学会:地盤改良効果の予測と実際, pp. 208-211 (2000)
- 13) 社団法人土質工学会:土質試験の方法と解説, pp. 160-173 (1991)
- 14) 社団法人日本道路協会:舗装調査・試験法便覧[第1分冊], pp. 216-219 (2007)
- 15) 社団法人日本道路協会:舗装調査・試験法便覧[第4分冊], pp. 154-158 (2007)
- 16) 財団法人土木研究センター:発生土利用促進のための改良工法マニュアル, pp. 7-11 (1997)
- 17) 社団法人日本道路協会:舗装調査・試験法便覧[第4分冊], pp. 55-66 (2007)
- 18) 社団法人日本道路協会:舗装設計便覧, pp. 113-118 (2006)
- 19) 山田幹雄・辻慎一郎・佐野博昭・田辺和康:袋詰めエアミルクの性能と道路路盤材料としての適用性, 材料, 第57巻, 第1号, pp. 60-65 (2008)
- 20) 社団法人日本道路協会:舗装調査・試験法便覧[第4分冊], pp. 165-171 (2007)
- 21) 社団法人セメント協会:セメント系固化材による地盤改良マニュアル, pp. 45-46 (1985)
- 22) 財団法人先端建設技術センター:建設汚泥リサイクル指針, pp. 157-159 (1999)
- 23) 坂本康文・久保和幸・中島伸一郎・大下武志:路床の性能に関する実験的検討, 舗装, 第41巻, 第4号, pp. 6-11 (2006)

(2007年11月受付 2008年1月受理)