

泥土固化碎石の路盤への適用性に関する研究

APPLICATION OF CRUSHED CEMENT-STABILIZED CONSTRUCTION WASTE SLUDGE
TO BASE COURSE

西 元央*・山田 優**

by Motohiro NISHI, Masaru YAMADA

1. はじめに

国土交通省による建設副産物実態調査¹⁾によると、平成12年度における建設廃棄物の排出量は全国で8500万トン、うち建設汚泥は800万トンで、全体の約9%にあたる。この排出量に対して再資源化や縮減された量の割合は41%で、残り59%が埋立処分されている。再資源化の割合は増加傾向にあるが、コンクリート塊やアスファルト塊のそれに比べるとまだ低く、十分とはいえない。また、掘削工事や浚渫工事に伴い発生する高含水比で軟弱な発生土、浚渫土や、碎石・砕砂の製造過程で発生する碎石スラッジなどの泥土も建設汚泥と同様に有効利用していくことが望まれている。

泥土を利用するために種々の方法が検討されているが、経済性や利用用途を考慮すると、固化材を用いて造粒処理を行い、粒状材料として路盤へ適用する方法が有望である。造粒処理には、焼成²⁾や溶融³⁾などの高度処理技術が開発、研究されているが、経済面において不利である。また固化材による粒状材料をクラッシュランの代替材として路盤といった付加価値の高い用途へ適用することが、泥土の有効利用を促進させると考えられる。

固化材を用いた造粒処理には、いったん固化した後に破碎して粒状材料にする方法⁴⁾と固化材を混合しながら造粒する方法^{5) 6)}があるが、本研究では、前者による造粒処理で粒状材料を作製し、路盤への適用性を検討した。従来、路盤には、「高い強度」、「適度な排水性」、「含水による強度低下が小」、「交通荷重による変形に対する抵抗性が大」ということが要求され、粒度調整碎石、クラッシュランなどの碎石が路盤材料として使用されている。路盤材料の品質はほとんど修正CBRで評価されている⁷⁾。泥土を原料とする材料を利用する場合、碎石のように粒子を硬くすることは難しく、それを締固めた層の支持力や透水性は従来の材料と異なる特性を示すと考えられる。また水を含んだ場合や交通荷重による繰返し

作用を受けた場合、再び泥に戻り、安定や変形に対する抵抗性が失われることが懸念される。このような材料は修正CBRのみによる評価だけでなく、水を含んだときの強度特性の検討や動的な荷重試験による評価も必要であろう。

本研究では、路盤に求められる性質と再泥土化の問題を考慮し、以下に示す項目について検討を行い、泥土固化碎石の路盤への適用性について考察した。

- (1) 泥土固化碎石の粒子強度とそれを締固めた層の物理的・力学的性状の関係
- (2) 含水による強度への影響
- (3) 繰返し荷重による変形抵抗性

2. 本研究に用いた泥土固化碎石

(1) 使用材料と作製工程

泥土固化碎石の作製工程を図1に示す。泥土にセメント系固化材とポリマー混和剤を加えて混合し、真空下で押出し成型によって板状に固め、そのまま1ヶ月間気中養生してクラッシュャで破碎して碎石状にした。泥土には碎石スラッジを使用し、その土質性

表1 碎石スラッジの土質性状

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.75
粒度分布	礫分 (%)	0
	砂分 (%)	5.5
	シルト分 (%)	43.5
	粘土分 (%)	51.0
	最大粒径 (mm)	2.0
液性限界 w_L (%)		33.5
塑性限界 w_P (%)		19.0
塑性指数 I_P		14.5
土の分類		粘土

表2 泥土固化碎石の配合

*セメント量 (%)	*ポリマー混和剤 (%)	*加水量 (%)
8	2	0.5
13	2	0.8
20	2	2.1

*泥土の湿潤質量に対する

*大阪市立大学大学院助手 工学研究科都市系専攻
(〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

**大阪市立大学大学院教授 工学研究科都市系専攻

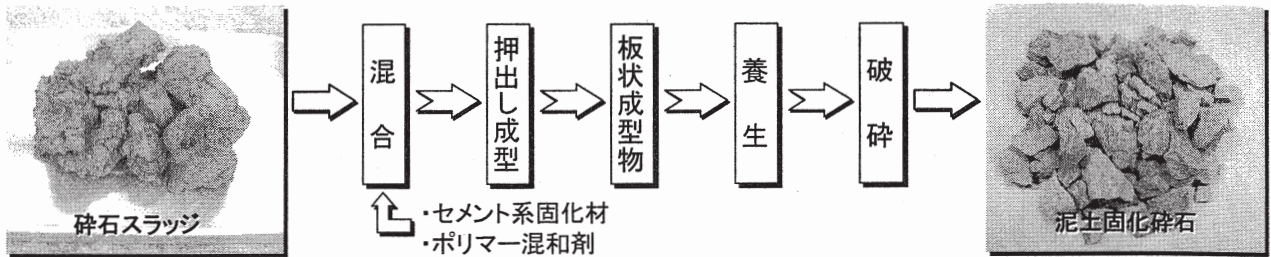


図1 泥土固化砕石の作製工程

状を表1に示す。この泥土固化砕石作製のための配合を表2に示す配合で3種類作製した。

(2) 泥土固化砕石の基本性状

泥土固化砕石を破碎後から3ヶ月以上養生し、クラッシュランC-30の粒度分布に調整して基本性状を調べた。泥土固化砕石の基本性状を表3に示す。

3. 粒子強度と締固めた層の物理的・力学的性状の関係

泥土固化砕石は、天然の砕石と同じ硬さにはならない。それを締固めた層の力学的性状は粒子強度に依存すると考えられる。泥土固化砕石の粒子強度を一軸圧縮試験 (JIS A 1216)、圧壊試験 (JIS Z 8841)、すり減り減量試験⁸⁾ (JIS A1211)、および岩の破碎試験 (KODAN 109) で評価した。泥土固化砕石の粒子強度を表4に示し、それらと最大乾燥密度、修正CBRおよび透水係数の関係を図2に示す。なお、一軸圧縮試験用の供試体は作製工程で板状成型したことからコアを採取した。セメント量が多いほど、すなわち粒子強度が大きいほど最大乾燥密度は減少し、修正CBR、透水係数は増加した。粒子強度が小さい場合、突固めによる粒子破碎に起因する乾燥密度の増加で透水性が低くなった。CBRには締固めた時の密度と粗粒子間の接触摩擦抵抗の影響が大きい。粒子強度が大きいほど粒子間摩擦抵抗が大きくなるので、修正CBRは大きくなった。粒子強度が小さい場合は、高い密度に締固まったが、粒子破碎で増加した細粒分が4日水浸で吸水したためにCBRが低くなったと考えられる。

4. 含水による強度への影響

(1) 締固め含水比とCBR特性

前述したとおり、路盤へ適用するには高い強度を有することはもちろんのこと、含水による強度低下が小さくなければならない。従来材料である砕石では、水を含んだ場合に軟弱化して強度が低下しないように、細粒分の塑性指数 (PI) の限界を下層路盤は6以下、上層路盤は4以下と規定している。ここでは、材料規格を満たしたPI=4.4のクラッシュランと、

細粒分の一部を粘性土と置換したPI=8.5, 14.5のクラッシュランのCBR特性も試験し、それらと泥土固化砕石を比較評価することとした。

表3 泥土固化砕石の基本性状

項目 \ セメント量	8%	13%	20%
絶乾密度 (g/cm ³)	1.78	1.83	1.89
吸水率 (%)	19.0	18.3	17.7
塑性指数 (PI)	15	NP	NP
最適含水比 (%)	20.6	21.0	22.1
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.694	1.665	1.619
修正 CBR (%)	48.5	128.0	138.0
透水係数 (cm/sec)	3.6×10^{-5}	7.2×10^{-4}	4.1×10^{-3}

表4 泥土固化砕石の粒子強度

項目 \ セメント量	8%	13%	20%
一軸圧縮強さ (MPa)	5.36	8.86	15.0
圧壊強度 (N)	134.0	198.7	302.8
すり減り減量 (%)	45.4	31.7	24.2
破碎率 (%)	29.5	16.2	15.1

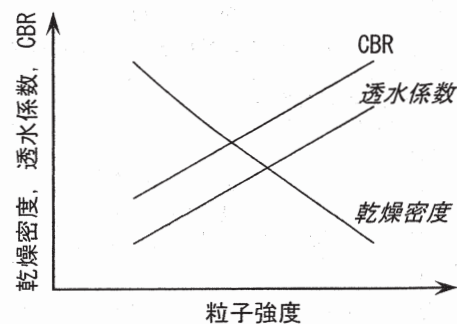
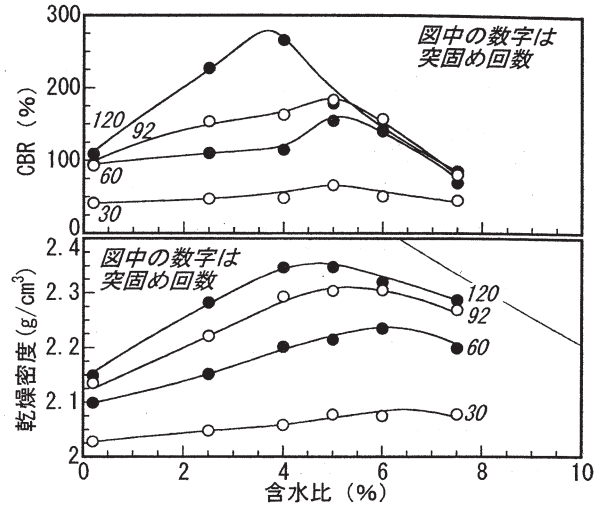
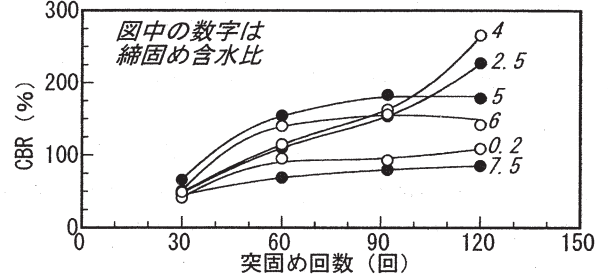


図2 粒子強度と物理力学性状の関係

クラッシュランの締固めとCBRの関係を図3, 4, 5に示す。突固め回数92回における最適含水比は、PIにかかわらず5%付近だった。この最適含水比よりも乾燥側では、どれも突固め回数が増加するにつれて乾燥密度が大になり、CBRも大となった。PI=4.4では、図3に示すとおり、含水比が最適含水比付近か、それ以上になると突固め回数を増しても、CBRはほとんど変化しないか、若干の低下を示した。PI=8.5では、図4に示すとおり、CBRが最適含水比付近で突固め回数が60, 92回するとき最大値を示し、120回になると急激に低下した。さらに含水比が増えると、CBRは突固め回数60回ときに最大値を示し、60回以上突固めるとわずかにCBRは低下した。これは、PI=8.5の細粒分を含むため、突固めエネルギーの増加によってこね返し現象が発生してCBRが低下したと考えられる。PI=14.5では、図5に示すとおり、最適含水比よりも乾燥側の4%のとき、突固め回数120回と92回のCBRがほぼ同じ値を示し、最適含水比より乾燥側でも92回以上になると突固め効果がなくなった。最適含水比付近では60, 92, 120回突固めたときのCBRが、含水比が4%のときのCBRに比べて大きく低下してほぼ同じ値を示し、さらに含水比が増加してもほとんどCBRは変化しなかった。PI=8.5では、最適含水比以上で過度に突固めた場合にこね返された

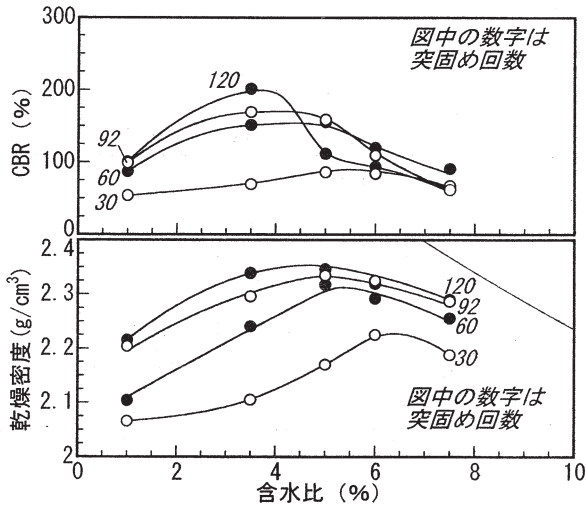


(a) 締固め含水比と乾燥密度, CBRの関係

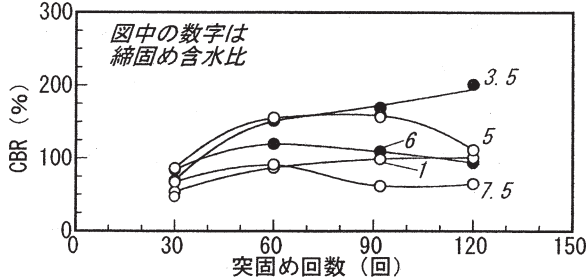


(b) 突固め回数と CBR の関係

図3 PI=4.4のクラッシュランの締固めと CBR の関係

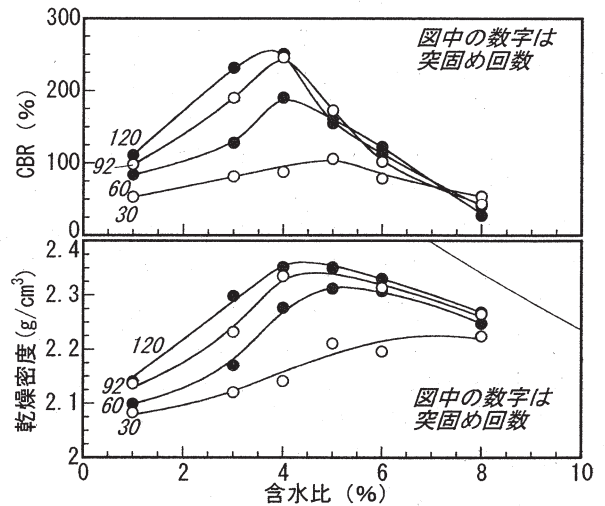


(a) 締固め含水比と乾燥密度, CBRの関係

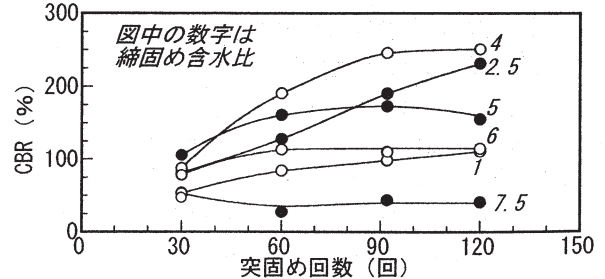


(b) 突固め回数と CBR の関係

図4 PI=8.5のクラッシュランの締固めと CBR の関係



(a) 締固め含水比と乾燥密度, CBRの関係



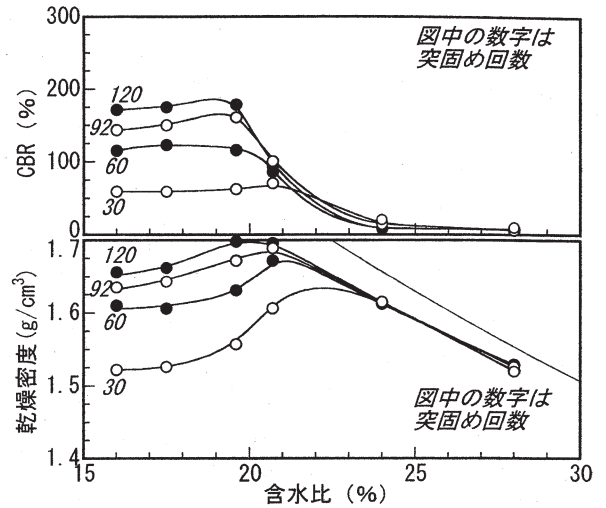
(b) 突固め回数と CBR の関係

図5 PI=14.5のクラッシュランの締固めと CBR の関係

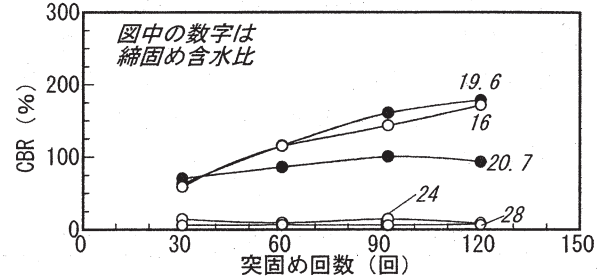
が、さらに塑性指数の高いPI=14.5では、最適含水比付近の含水比で60程度突固めにおいて既にこね返しの現象が発生したと推測される。

泥土固化碎石の締固めとCBRの関係を図6, 7, 8に示す。セメント量8%の泥土固化碎石の場合、突固め回数92回における最適含水比よりも乾燥側では、突固め回数の増加による乾燥密度、CBRの増加が大きかった。この泥土固化碎石の粒子強度が小さく、突固めで適度につぶれて高密度に締固め層が形成されたためである。しかし、最適含水比以上の含水比になると、CBRは著しく低下し、突固め回数の違いによる乾燥密度、CBRの差はほとんどみられなくなった。このCBR特性は、PI=14.5のクラッシュランと同様の傾向を示した。PI=14.5のクラッシュランに比べてCBRの低下が大きいのは、クラッシュランのCBRの低下が細粒分のこね返しによるものに対して、泥土固化碎石がPI=15を示す細粒分を含んでいるほかに突固めで粒子がつぶれてさらに細粒分が増加したためである。

セメント量13%の泥土固化碎石の場合、最適含水比より高い含水比になると、図7に示すとおり突固め回数が92回や60回の際にCBRが最大値を示し、それ以上突き固めるとCBRが低下する傾向がみられた。これはPI=8.5のクラッシュランと同様のCBR特性で

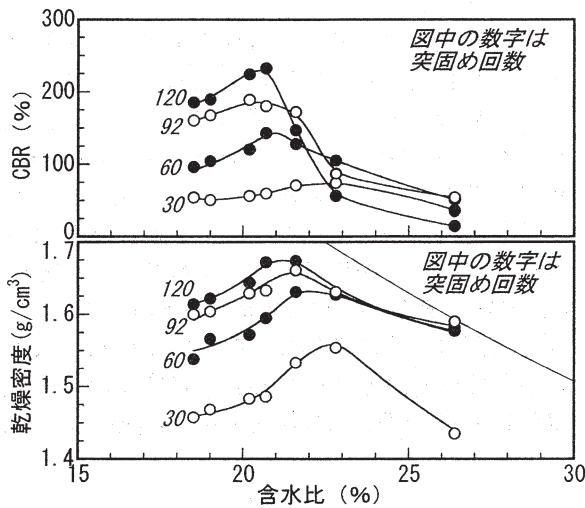


(a) 締固め含水比と乾燥密度、CBR の関係

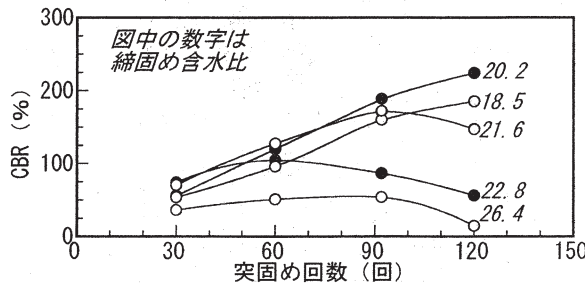


(b) 突固め回数と CBR の関係

図6 セメント量8%の泥土固化碎石の締固めと CBR の関係

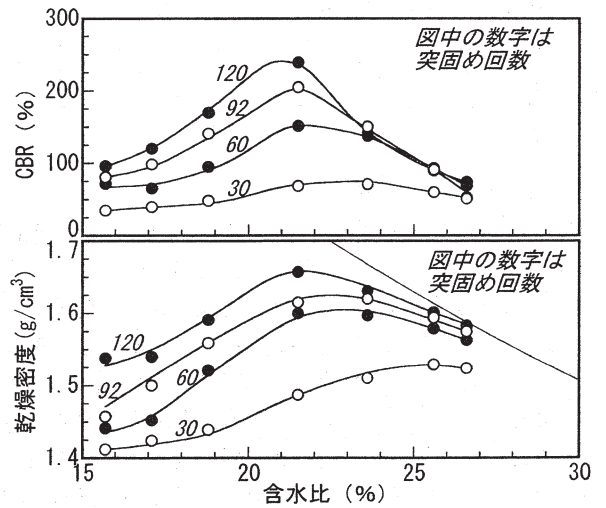


(a) 締固め含水比と乾燥密度、CBR の関係

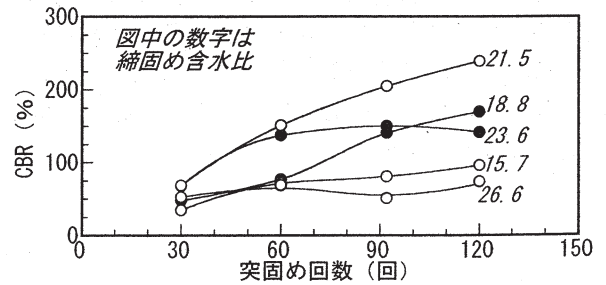


(b) 突固め回数と CBR の関係

図7 セメント量13%泥土固化碎石の締固めと CBR の関係



(a) 締固め含水比と乾燥密度、CBR の関係



(b) 突固め回数と CBR の関係

図8 セメント量20%の泥土固化碎石の締固めと CBR の関係

あった。セメント量13%の泥土固化碎石は細粒分のPIがNP（非塑性）であったが、突固めで細粒分が増加したためにこね返しの現象が現れたと考えられる。

セメント量20%の泥土固化碎石の場合、図8に示すとおり最適含水比はほぼ22%であり、突き固めるほどCBRが増加した。含水比がこれ以上になると、突固め回数120回のときにCBRが低下するが、PIが高い場合や、こね返し現象があらわれるような著しい低下は見られず、PI=4.5のクラッシュランのCBR特性と同様の傾向を示した。セメント量20%の泥土固化碎石もセメント量13%と同様に細粒分がNPを示すが、こね返しによるCBRの低下はみられなかった。そこで、泥土固化碎石の19mm以上の粗粒子を425 μ m以下に粉碎して塑性指数を求めた。その結果を表5に示す。セメント量8%と20%の泥土固化碎石の塑性指数は変わらなかったが、セメント量13%では粉碎後はPI=9.6を示した。したがって、突固めで粗粒子が破碎されて塑性指数が大きくなったため、こね返し現象があらわれたと考えられる。

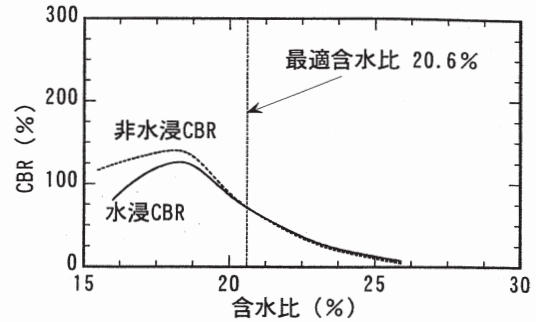
表5 泥土固化碎石の粉碎後の塑性指数

セメント量	8%	13%	20%
泥土固化碎石の細粒分の塑性指数 PI	15	NP	NP
19mm 以上の粗粒子を粉碎した細粒分の塑性指数 PI	16.5	9.6	NP

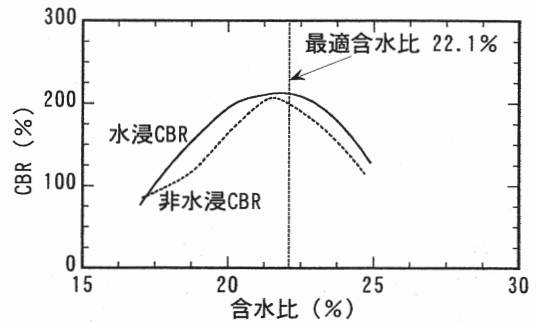
NP：非塑性

(2) 水浸による影響

水浸による強度への影響について、セメント量8%と20%の泥土固化碎石の水浸CBRを調べた。図9に締固め含水比と水浸および非水浸CBRの関係を示す。セメント量8%では、CBRが最大となる含水比付近から乾燥側で水浸CBRが低く、湿潤側では水浸と非水浸の差はほとんどなかった。乾燥側では突固めで増加した細粒分が吸水したために水浸CBRが低くなったと考えられる。セメント量20%の泥土固化碎石では、締固め含水比に関係なく、水浸CBRが大となった。これは水浸によってアルカリ雰囲気中で4日間養生されたために強度増加したのと考えられる。セメント量20%の泥土固化碎石は水浸による強度低下はないと考えてよい。



(a)セメント量 8%の泥土固化碎石



(b)セメント量 20%の泥土固化碎石

図9 水浸による CBR の変化

5. 繰返し载荷による変形抵抗性

(1) ホイールトラッキング試験による繰返し载荷試験の方法

繰返し载荷による変形特性を調べるためにアスファルト混合物に対して用いられるホイールトラッキング試験機を応用した。図10に示すように、泥土固化碎石を長さ300mm、幅150mm、深さ130mmで、底板に水を通す孔のあいたステンレス製モールドの中に突固め、その上に長さ80mm、幅150mmの鋼板を並べてのせ、その板を介して走行荷重（接地圧0.39MPa）を作用させて変形量を測定した。供試体は、最適含水比に調整した泥土固化碎石を最大乾燥密度の締固め度95%になるように突固めて作製した。試験輪の走行速度は21往復/min（42pass/min）で、

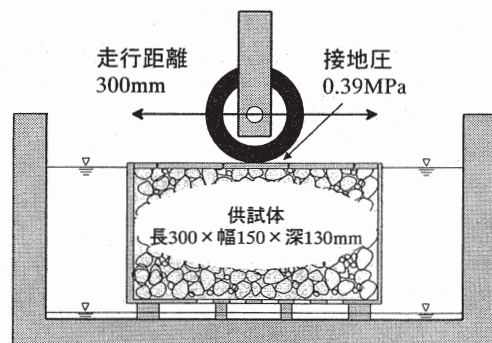


図10 繰返し载荷試験に用いたホイールトラッキング試験機

30000回まで走行させた。なお、試験前の4日水浸の有無と、図10のように全水浸と非水浸で試験を行った。

(2) 非水浸の場合の試験結果

非水浸条件で行った繰返し載荷試験の結果を図11に示す。試験前の4日水浸がない場合、クラッシュラン、泥土固化碎石とも、繰返し載荷によって締固まるだけで、変形量は小さかった。セメント量8%の泥土固化碎石はクラッシュラン並みの変形量であった。突固めのときに粒子がつぶれ、高密度になっていたため、繰返し載荷では粒子の破碎がほとんどなく、変形量が小さかったと考えられる。セメント量13%と20%の泥土固化碎石は、突固め時につぶれることが少ないが、碎石と同等の粒子強度ではないので、繰返し載荷で粒子が破碎し、変形量が大きくなったと考えられる。しかし、試験前の4日水浸があると、セメント量8%のものが突固めのときに増加した細粒分が吸水して軟弱化し、繰返し載荷で細粒度が噴出したために変形量は大きくなった。セメント量

20%の泥土固化碎石は前述したとおり4日水浸すると、アルカリ雰囲気中で強度増加したために変形量は小さくなった。またセメント量20%のものは締固め度90%のクラッシュランと同等かそれ以上の変形抵抗性を示した。

(3) 全水浸の場合の試験結果

全水浸条件で行った繰返し載荷試験の結果を図12に示す。泥土固化碎石はクラッシュランに比べて、試験前の4日水浸の有無にかかわらず、変形量が大きくなった。セメント量8%の泥土固化碎石では突固めで細粒分が増え、さらに水浸下で繰返し載荷を受けるため、多量の軟弱化した細粒分が噴出して変形量が大きくなった。セメント量13%、20%でも、水の存在と繰返し載荷で、粒子同士が擦れ合い、細粒化したものが水とともに上部に噴き出していた。クラッシュランでも細粒分の噴出がみられたが、粗粒子間の接触により骨格を形成しているため、変形抵抗性が大きく、泥土固化碎石のように変形が大きくならなかった。セメント量20%のものは、試験前4日水浸

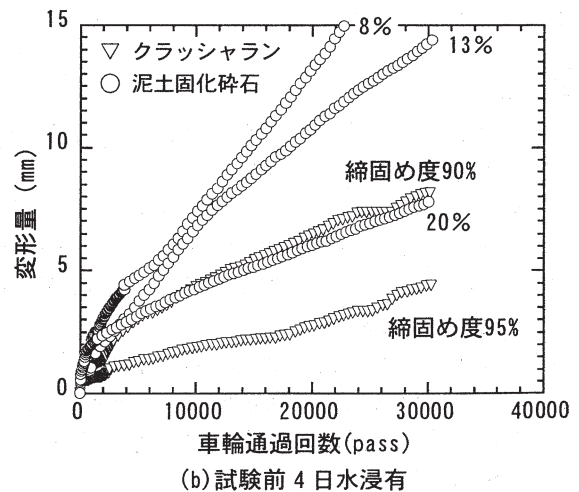
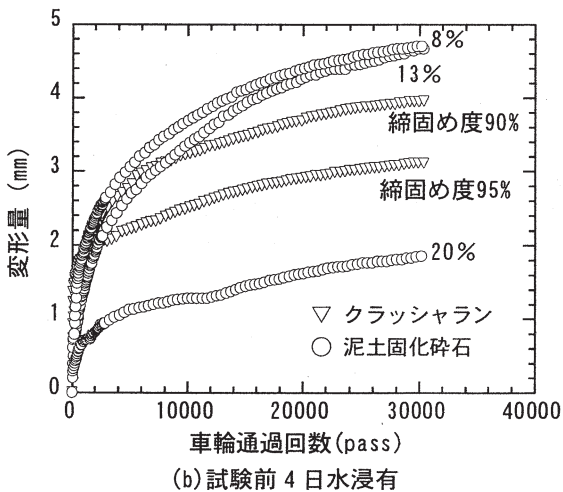
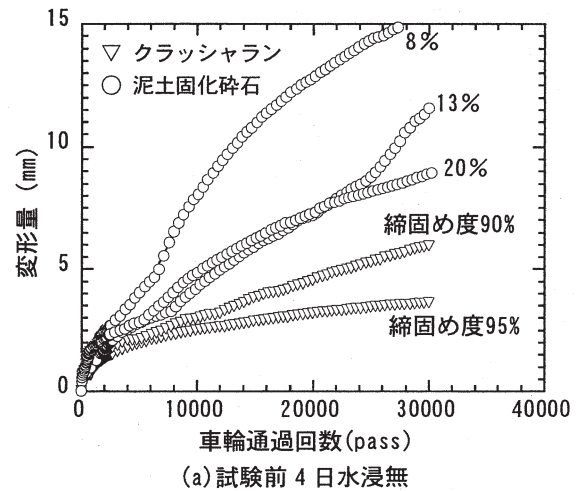
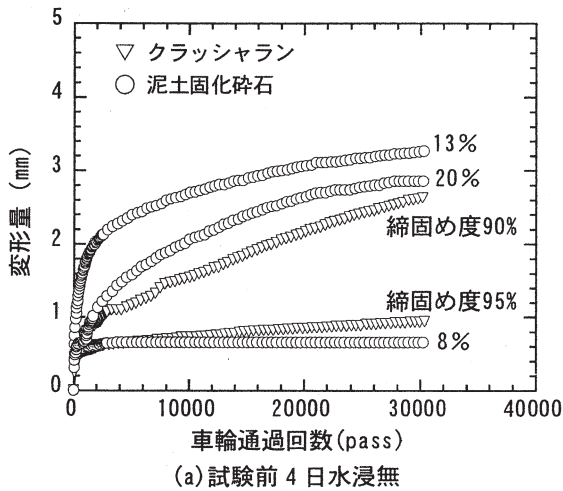


図 11 繰返し載荷試験における変形量と通過回数の関係 (走行時の水浸：非水浸)

図 12 繰返し載荷試験における変形量と通過回数の関係 (走行時の水浸：全水浸)

すると締固め度90%のクラッシュランと同等の変形量を示した。

6. 結論

本研究では、主に泥土固化碎石と従来材料であるクラッシュランの強度・変形特性を比較し、路盤への適用性を検討した。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 泥土固化碎石の粒子強度が大きいほど、それを締固めた層の乾燥密度は小さくなり、透水性や支持力が大きくなる。
- (2) セメント量の少ない泥土固化碎石ほど、こね返しによる強度低下が大きく、PIの高いクラッシュランと同様のCBR特性を示す。
- (3) 泥土固化碎石の細粒分の塑性指数がNP（非塑性）であっても、突固められた後やその粗粒分を粉砕したものの細粒分のPIが高い場合、こね返しによる強度低下が起こる。
- (4) 泥土固化碎石は、全水浸条件で繰返し荷重を受けると変形量が大きく、クラッシュランに劣るが、非水浸条件ではセメント量の多い泥土固化碎石が締固め度90%のクラッシュランと同等の変形抵抗性を示した。

以上から、路盤層が滞水しないような場所であれば、軽交通道路の上層路盤、一般道路の下層路盤へ適用できると考えられる。

【謝辞】

本研究は、財団法人先端建設技術センターの研究開発助成を受けて実施したものである。また碎石スラッジを提供していただいた(株)大阪碎石工業所高槻第二工場ならびに泥土固化碎石の作製にご協力いただいた大阪ベントナイト協同組合の関係者各位に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 建設副産物リサイクル広報推進会議：総合的建設副産物対策平成15年度版
- 2) 川地 武，徳永 豊，小林正宏，本間毅一，塚田幸広，落合良隆：建設汚泥を原料とする焼成物の利用用途，土木学会論文集，No.643/IV-14，pp.21-27（2000）
- 3) 田中益弘，斉藤 聡，原 昌弘，柴田泰典，大北康晴：建設汚泥の熔融処理による再利用について，第1回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.261-266（1994）
- 4) 鍋島康之，松井 保，濱野廣美：汚泥固化・破砕材の土質工学的性質とドレーン材としての利

用，第3回地盤改良シンポジウム，pp.159-164，（1998）

- 5) 鈴木健夫，植田 満，藤川克巳，伊藤章治：高含水比粘性土の粒状化処理について，第4回地盤改良シンポジウム発表論文集，pp.209-216，（2000）
- 6) 西 元央，山田 優，鈴木健夫，圓川憲夫：碎石スラッジの粒状化処理実験と粒状物の土質特性，第5回地盤改良シンポジウム論文集，pp.175-180，（2002）
- 7) 社団法人日本道路協会：舗装設計施工指針，（2001）
- 8) 社団法人日本道路協会：プラント再生舗装技術指針，p.7，（1992）

（2004年5月28日受付 2004年9月6日受理）