

アスファルトコンクリート発生材を用いた 道路路床の構築法に関する実験的研究

山田幹雄¹・松島保志²・佐野博昭³・奥村充司⁴

¹正会員 工博 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)

²正会員 北川ヒューテック株式会社技術研究所 技術係長 (〒923-1276 石川県能美郡川北町橋ヶ1)

³正会員 博(工) 石川工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒929-0392 石川県河北郡津幡町北中条)

⁴正会員 工修 福井工業高等専門学校講師 環境都市工学科 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町)

本研究では建設副産物の有効利用の一環として、また、補修周期の延伸化の一策として、再生混合所に搬入したアスファルトコンクリート発生材の一次選別時に生じるグリスリフィード通過材を活用した路床構築の可能性について検討した。模擬路床の構築試験に先立ち、室内で粒径を揃えた材料を安定材とともに試料土に加えて *CBR* や軸圧縮強さの推移を調べたところ、混入量を多くするほど安定処理効果は大きくなることが確かめられた。さらに、構築試験および事後試験からは、粒度組成にかかわらず舗装の施工基盤として具備すべき締固め度や支持力は十分に確保されること、改良路床土の固化の進行には路床温度が関与すること、耐水性を通常の安定処理土と比較してもとくに遜色のないことが示された。

Key Words: reclaimed asphalt mixture, improvement of subgrade soil, California bearing ratio, unconfined compressive strength, coefficient of subgrade reaction

1. まえがき

新たな道路整備5ヶ年計画(第12次)のもと、高規格幹線道路から生活道路までの多岐にわたる通路の新設、改築および補修工事が円滑に推進されつつある。道路整備事業に関して、過去40年間の舗装の「新設・改築」と「維持・修繕」とに要した費用を集計した資料によれば、1990年以降は後者が前者を上回っており、その傾向は今後も継続する見通しにあるとされている¹⁾。したがって、これまでも増してライフサイクルコストを念頭に置いた舗装技術の開発が重要視されることになる。

補修周期の延伸化、すなわち、舗装の長寿命化を達成する上には①構成材料をも含めた断面構造の見直しと設計法の確立、②舗装と一体となって交通荷重を分散する路床の支持力向上(路床の構築)が不可欠な要因となる。

長寿命化舗装への取り組み例として、日本道路公団においてはコンポジット舗装を、東京都では長期供用舗装(LSP)を中心に経済効果、断面構造や施工法に関する検討が行われている。しかし、これらの舗装は重交通路線を対象とするものであり、設計交通量の区分がL、A交通に該当する路線および国内の大部分を占める簡易舗装区間などの軽交通道路については、別の視点から供用性の長期持続策を検討する必要がある²⁾。

ライフサイクルコストを考慮に入れた舗装設計の端緒は1992年に改訂されたアスファルト舗装要綱³⁾にあるが、そこには上記①の構成材料に関して、新たに地域産材料や副産物が舗装用資材に組み入れられた。このうちの副産物の舗装への活用について、著者らの一部はかつて「再生資源の利用の促進に関する法律(リサイクル法)」で指定副産物⁴⁾に位置付けられている石炭灰を取り上げ、これを主材とする下層路盤および単一層路盤を設計交通量L、A交通の路線に築造して、交通開放後の路面性状や舗装強度の経時変化などを調査したことがある^{5), 6)}。

これらの研究において、石炭灰を天然骨材の代替に用いて築造した路盤であっても施工後短期間のうちに舗装に構造的破損を生じる恐れはなく、かつ、品質規格や等値換算係数は既存の石灰安定処理材料の諸値を準用できることが確認された。ただし、文献5), 6)ともに研究目的を固化した石炭灰路盤の耐久性の評価に置いていたので、試験施工は設計 *CBR* ≥ 12%の堅固な路床上で行った。このため、軟弱路床の上に築造した場合の舗装の挙動まで検証することはできなかったが、それでも、計7箇所での実地検分を通して路床の構築にも副産物を有効利用できる余地と可能性のあることを経験的に認識した。

そこで、著者らは改めて上記②にかかわる方策を、リサイクル法において同じく指定副産物扱いとされている

アスファルトコンクリート発生材（リサイクル法ではアスファルト・コンクリート塊と呼称）を活用して講じることができるとかどうかについて検討することにした。

アスファルトコンクリート発生材は既設舗装の補修工事などに際して生じるものであり、通常は現場からアスファルト混合所に併設されている再資源化施設へ搬入され、解砕・分級工程を経て再生加熱アスファルト混合物用骨材および再生路盤材として製品化される⁷⁾。

文献8)によれば、アスファルトコンクリート発生材の現場排出量は1990年度に約1800万トン、1993年度に約2200万トン、1995年度には約3600万トンとなっており、道路整備の進捗ともない増加の一途を辿っている。これに対して、再利用率は1990年度から1993年度の3年間で50%から78%へと急上昇したものの、1995年度の実績は81%に止まり、幾分鈍化の兆しが現れている。

この点について、文献9)には再資源化施設運営上の問題として、需給の時期的な不均衡により年度途中で累積ストック量が急増し、ストックヤードの調整に支障をきたすこと、そして、これには施設拡張にあたっての用地の確保難が介在することが述べられている。なお、地域にもよるが、需給の不均衡は再生加熱アスファルト混合物用骨材に比べて、主たる用途を下層路盤や各種構造物の裏込めとする再生路盤材に多くみられるようである。

以上のことから、著者らは用途ならびに消費量の拡大を図るための一策として、再生路盤材を用いた路床の構築を試行してみることにした。ここで、再生路盤材は製造プラントの仕様により、搬入したアスファルトコンクリート発生材の一次選別時に生じる粒径40~0mmのグリズリフィード通過材とアスファルトコンクリート、セメントコンクリート、路盤の各発生材を一定の割合で混合したものと大別される¹⁰⁾。このうち、今回の研究に試用したのは前者の方であり、後者との混同を避けるためにこれ以後は単に「発生材」と記すことにする。

本論文では、発生材を安定材とともに混ぜ合わせた試料土の支持力、強度および変形特性を室内CBR試験、一軸圧縮試験にもとづいて調べた結果を第3章に、次いで、屋外に構築した模擬路床（ただし、舗装は設けず）で実施した平板載荷試験の結果ならびに事後試験として改良路床土の温度依存性や水に対する抵抗性を室内で確認した結果を第4章に述べる。最後に、発生材混入の有無とCBRの増分との関係について試算した結果を第5章に記述する^{11)~13)}。

2. 材料の性質および配合条件

上述したように、本研究の主眼はグリズリフィード通過材の路床構築材料としての有用性を探究することにあるが、室内試験に着手するにあたって当初から粒径40~

表-1 発生材の品質

発生材	粒径40~0 mm	粒径13~10 mm
表乾比重	2.18~2.44	2.16~2.43
見掛け比重	2.44~2.57	2.44~2.56
吸水率 (%)	2.6~4.6	2.6~4.7
すりへり減量 (%)	約20	約20

表-2 試料土の物理的性質および化学成分組成

採取地	石川県加賀市	石川県金沢市
試料名	箱富士	二俣土
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.71	2.60
最適含水比 (%)	20.8	29.1
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.67	1.39
砂 分 (%)	60.8	62.4
シルト分 (%)	13.2	29.4
粘土分 (%)	26.0	8.2
均等係数	-	21.61
曲率係数	-	3.13
液性限界 (%)	43.2	42.0
塑性限界 (%)	22.9	27.8
塑性指数	20.3	14.2
日本統一土質分類	粘質土 [CL]	シルト (低液性限界) [ML]
二酸化ケイ素 (%)	67.7	68.1
酸化アルミニウム (%)	16.0	15.4
酸化第二鉄 (%)	6.9	3.0
酸化カルシウム (%)	0.6	1.3
酸化マグネシウム (%)	0.1	0.5
酸化カリウム (%)	0.87	3.14
酸化ナトリウム (%)	0.15	2.34
強熱減量 (%)	7.0	5.0
水素イオン濃度指数 [pH]	5.54	6.84

0mmの発生材を用いるのではなく、このような材料を混ぜ合わせた土の基本的な性質を把握するために粒度範囲を狭めた状態から、すなわち、ふるい分けを行ってほぼ単粒度とした発生材（粒径13~10mm）から先に取り扱うことにした。表-1に、使用した発生材の品質を示す。

試料土としては、石川県加賀市箱宮地区の土取り場より入手した土（以後、箱富士と称する）および金沢市二俣地区の道路拡幅工事現場で採取した土（以後、二俣土と称する）を使用した。室内試験には、空気乾燥した試料土を一旦2mmふるいでふるって、これを通過した部分のみを用いた。箱富士、二俣土の物理的性質および化学成分組成を表-2に示す。

室内試験では、初めに、試料土の含水比とCBRとの関係を調べた。CBR試験は、JIS A 1211に示されている方法¹⁴⁾に準拠して実施した。試験結果を図-1に示す。アスファルト舗装要綱には設計CBR<3%の路床は支持

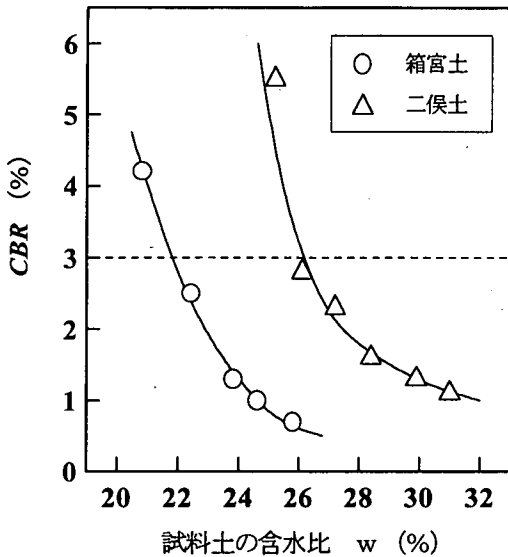


図-1 試料土の含水比と CBR との関係

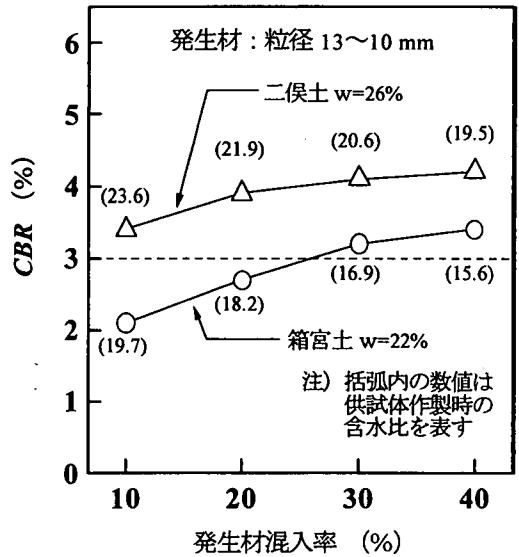


図-2 発生材混入率と CBR との関係

力の改善を要するとされており、これに倣えば箱富士は含水比 $\geq 22\%$ で、二俣土は含水比 $\geq 26\%$ でその規定に当て嵌まることになる。このことから、箱富士は含水比を予め 22% または 25% に、二俣土については 26% または 28% に調整した上で、以降の CBR 試験および一軸圧縮試験に供することにした。

次に、試料土に単粒度とした発生材のみを混入したときの CBR (JIS A 1211 準拠) を求めた。この試験における箱富士の含水比は 22% 、二俣土は 26% とし、発生材の混入率は試料土の乾燥質量の $10\sim 40\%$ とした。図-2は、試験結果をまとめたものである。この図より、発生材の混入率を高くするにしたがって CBR は大きくなるものの、発生材量を4倍としても CBR の増加は 2% 未満に止まることがわかる。これより、発生材の混入率は 10% 、 20% の2種類として、以降の室内および屋外試験を実施することにした。

一般に、土質安定処理において砂質土にはセメントが、粘性土には石灰が効果的とされているが、これらに加えてここ20年ほどの間にセメント系、石灰系の固化材の使用もかなり増えてきている。そこで、今回採用した試料土により適する安定材を選定するために、取り敢えず、箱富士には普通ポルトランドセメント、セメント系固化材(一般軟弱土用)および工業用消石灰(1号)を添加したときの CBR を、また、二俣土には普通ポルトランドセメントとセメント系固化材とを添加したときの CBR を「安定処理土の CBR 試験方法」¹⁵⁾ に準じて求めた。以後、本論文ではこれらの安定材をセメント、固化材、消石灰と略称する。

試験結果を表-3に示す。ここに、安定材の添加率は

表-3 安定処理土の CBR 試験結果 (発生材無混入)

安定材	添加率 (%)	箱富士		二俣土	
		w=22%	w=25%	w=26%	w=28%
普通ポルトランドセメント	2	8.4	6.4	15.5	8.1
	4	70.8	53.4	86.7	74.8
	6	152.2	100.8	170.8	129.6
セメント系固化材	2	12.4	5.9	10.3	5.6
	4	74.5	49.4	102.2	81.2
	6	145.9	112.2	196.6	146.0
工業用消石灰	2	18.8	12.6	-	-
	4	194.2	104.2	-	-
	6	268.3	175.4	-	-

注) 表中の数値は CBR (%) を表す

試料土の乾燥質量に対する値である。この表から、著者らは箱富士、二俣土にセメントおよび固化材を添加した場合の安定処理効果は、箱富士については双方でほぼ同等、二俣土については後者の方がいくらか有利とみなして、引き続き実施する CBR 試験や一軸圧縮試験において箱富士にはセメントを、二俣土には固化材を加えることにした。なお、箱富士に消石灰を 4% 以上添加して作製した供試体の CBR は通常の改良目標値である 20% をはるかに超えて大きくなったことから、セメント安定処理のシリーズと固化性状を比較する必要が生じたときに限っての使用に止めた。

以上の予備的な試験から得られた結果を踏まえて、単粒度の発生材を用いて作製する供試体の配合条件を表-4のように定めた。ここで、シリーズBおよびCにおける発生材の混入率は試料土の乾燥質量に対する値であり、また、安定材の添加率は試料土と発生材との合計乾燥質

表-4 材料の配合条件 (単粒度の発生材を用いる室内試験)

シリーズ	安定材添加率および発生材混入率
A	試料土 ¹⁾ + 安定材 2, 4, 6% ²⁾
B	試料土 + 安定材 2, 4, 6% + 発生材 10% ³⁾
C	試料土 + 安定材 2, 4, 6% + 発生材 20%

- 1) 設定含水比は箱宮土 22または 25%, 二俣土 26または 28%
- 2) 箱宮土には普通ポルトランドセメントおよび工業用消石灰を使用
二俣土にはセメント系固化材を使用
- 3) 粒径 13~10 mm

量に対する値である。

3. 単粒度の発生材を混入した安定処理土の支持力、強度および変形特性

図-3は、各シリーズの供試体で求めた CBR を比較したものである。箱宮土、二俣土ともに CBR はシリーズ A, B, C の順に、すなわち、試料土に発生材を混入する方が、そして、その量を多くする方が大きくなっていることがわかる。

今回の試験では、養生期間中の CBR の変化を調べる目的で1つの配合条件につき同時に3本の供試体を作製し、これらの作製直後、空气中養生終了時および水浸養生終了時における CBR を求めた。

試験結果の1例を図-4に示す。この図は、含水比を22%に調整した箱宮土にセメントを4%添加したシリーズ A, B, C の結果をまとめたものであるが、水浸養生中も CBR は大きくなっており、空气中養生終了時からの増分は通常安定処理土であるシリーズ A で約20%、これに発生材を加えたシリーズ B, C では約50%に達していることがわかる。このような傾向は〔箱宮土+セメント〕および〔二俣土+固化材〕をベースとするすべての供試体で認められ、安定材の添加率を高くするほど水浸養生中における CBR の増分は大きくなった。ただし、試料土の設定含水比との関係および発生材の混入率との関係については明らかでなかった。なお、〔箱宮土+消石灰〕をベースとする供試体からは、水浸養生終了時の CBR は空气中養生時の CBR にほぼ等しい、もしくは、1割程度低下するという結果が得られた。

4日間の水浸養生中に生じた吸水膨張量について、当初は発生材を加えることで反ってその量が大きくなることを懸念していたが、実際には試料土と安定材との組み合わせおよび発生材の多少の区別なく、吸水膨張量はいずれも0.1mm未満であった。

ここまで示した CBR 試験において、粒径の揃った発生材を単体で試料土に混入しても CBR の増加はほとんど期待できないものの、これを安定材とともに混ぜ合わせた場合には路床支持力は相乗的に改善され、かつ、

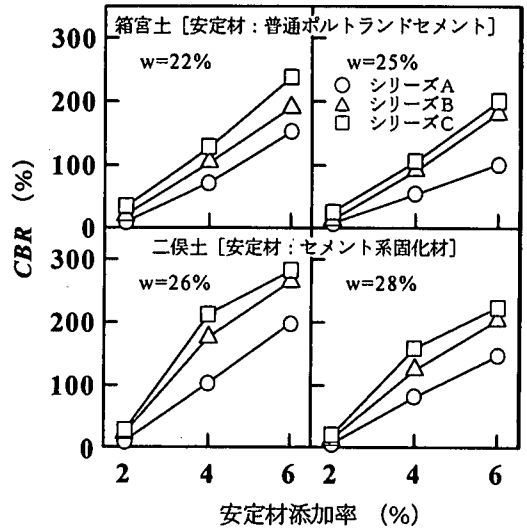


図-3 配合条件による CBR の比較

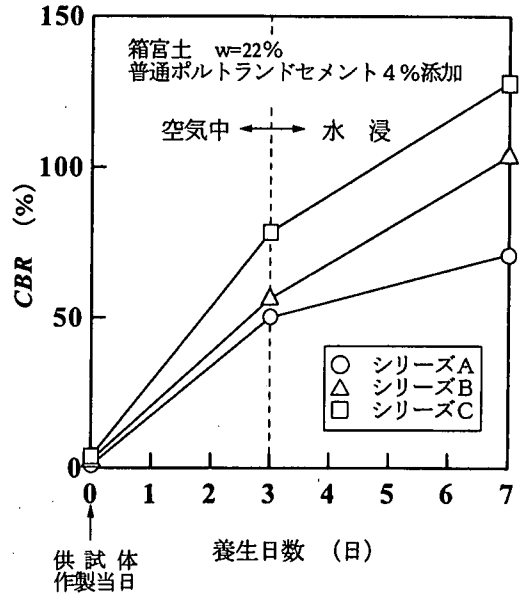


図-4 養生期間中における CBR の推移 (箱宮土の例)

吸水により大きな体積膨張を生じる恐れは少ないことが確かめられた。

そこで、次の段階として、このような相乗的な効果が支持力面のみならず強度面にも現れるかどうかを調べるために、CBR 試験に用いた供試体の初期の含水比と乾燥密度とを目標に作製した供試体に対する一軸圧縮試験に移行した。

一軸圧縮試験に用いた供試体の寸法は直径約100mm、高さ約127mmであり、作製にあたってはそれぞれの配合条件に応じて混合した材料を二つ割りモールドの中に入れ、これを20mm/minの速度で静的に締固めた。作製した供試

箱宮土 w=22%, 普通ポルトランドセメント 4% 添加
○シリーズA △シリーズB □シリーズC

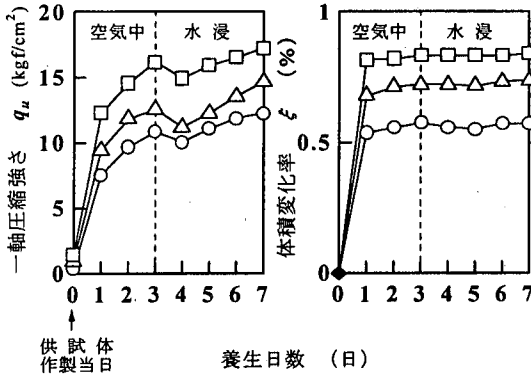


図-5 養生期間中における一軸圧縮強さおよび体積変化率の推移 (箱宮土の例)

二俣土 w=28%, セメント系固化材 4% 添加
○シリーズA △シリーズB □シリーズC

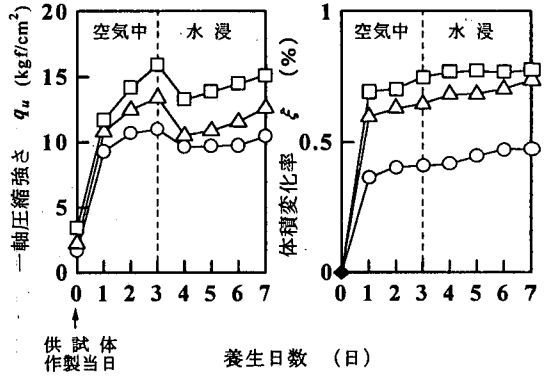


図-6 養生期間中における一軸圧縮強さおよび体積変化率の推移 (二俣土の例)

体は直ちにビニール袋に入れて厳封し、CBR 試験に準じて温度20℃の恒温室内でセメントおよび固化材を添加して作製した供試体は3日間、消石灰を添加した供試体は6日間の空气中養生を行い、その後、供試体をビニール袋から取り出して同じ恒温室の水槽の中に4日間静置した。養生終了時には供試体の直径、高さを数箇所測定し、作製時の寸法と比較した。一軸圧縮試験は、1%/minのひずみ速度で実施した。

図-5, 6はそれぞれ含水比を22%に調整した箱宮土, 28%に調整した二俣土に所定の安定材を4%添加したシリーズA, B, Cの各供試体で測定した一軸圧縮強さ q_u と体積変化率 ϵ とをまとめたものである。これらの図で明らかのように、安定材の添加率が同じでも強度の発現は発生材を多く混入した供試体ほど大きくなり、これは上述したCBR 試験から得られた結果に一致している。また、 q_u の推移をみると、 q_u は空气中養生から水浸養生に移行した時点で一旦低下するものの、その後漸次増加していくことが認められる。このように、水浸養生中に強度の発現を呈することもCBR 試験で示された傾向に似通っている。しかし、図-5を試料土の設定含水比ならびに配合条件が同じである前出図-4と比較すると、水浸養生終了時と空气中養生終了時との強度差はCBRの差ほど顕著ではないことがわかる。一方、 ϵ の推移をみると、供試体は空气中養生の初期の段階で1%未満の体積膨張を生じるものの、それ以降は水中であっても膨張も収縮も生じないこと、さらに、 q_u の大きな供試体ほど ϵ も大きくなることがわかる。

なお、同一の配合条件でも〔箱宮土+消石灰〕をベースとする供試体の q_u は〔箱宮土+セメント〕をベースとする供試体の1.5~2.5倍の値、 ϵ は1/2程度の値とな

り、箱宮土にかぎれば消石灰の添加は固化反応の促進効果と膨張の抑制効果とを同時にもたらしたことになる。参考までに、著者らの一部は、以前に石炭灰に消石灰を混合して締固めた供試体の水浸強度の発現過程や体積膨張過程を調べたことがあるが、その研究においても今回のような消石灰の効用が認められた¹⁶⁾。

ここまでの室内試験から得られた結果を整理したところ、水浸養生終了時におけるCBRと q_u との間には直線関係が認められ、算出した回帰直線式(データ数N=18)によれば〔箱宮土+セメント〕をベースとする供試体のCBRは q_u の約6倍、〔二俣土+固化材〕の供試体のCBRは q_u の約9倍に相当していた。

以上のように、粒径13~10mmの発生材を混入した安定処理土(シリーズB, C)のCBRおよび一軸圧縮強さは通常の安定処理土(シリーズA)を下回ることはなく、また、吸水膨張量や体積変化率からみた変形性状も実用上とくに問題になるようなものではないと考えられる。

このことから、本研究では引き続き屋外に模擬路床を構築して、事前の室内試験では取り扱わなかった粒径40~0mmの発生材をも使用して施工性や構築後の地盤反力係数 K_{30} の経時変化を調べることにした。模擬路床に用いる試料土としては箱宮土、二俣土のどちらでも差し支えなかったが、工事現場で採取した二俣土の残量が懸念されたために入手の容易な箱宮土を採用することにした。

4. 模擬路床の構築試験および室内確認試験の結果

(1) 施工概要および計測結果

屋外試験は、石川県小松市近郊のアスファルトプラン

表-5 原地盤表層土の土質試験結果

土粒子の密度 (g/cm ³)	2.69
砂 分 (%)	73.5
シルト 分 (%)	13.3
粘 土 分 (%)	13.2
均 等 係 数	217.39
曲 率 係 数	14.70
液 性 限 界 (%)	NP
塑 性 限 界 (%)	NP
塑 性 指 数	NP
強 熱 減 量 (%)	2.3
水素イオン濃度指数 [pH]	8.63

ト敷地内の一角で実施した。表-5は試験箇所の表層土の物理的性質を、また、表-6は「模擬路床の構築試験」および屋外での調査を終えてから改めて実施した「室内試験」における材料の組み合わせを示す。ここで、第2章および第3章に示したCBR試験の結果にもとづけば箱宮土に対するセメント添加率は2%としても不足ではないが、後述する箱宮土の構築当日の自然含水比、安定処理厚や施工時期などを考慮に入れて添加率を割り増しし、現場配合では4%とすることにした。

模擬路床の構築手順としては、初めにバックホウで幅2m、長さ12mの区画(4区画)を30cmの深さまで掘削、ブルドーザで不陸整正を行った。続いて、区画の周囲に高さ約30cmの土提を築き、そこへ土取り場から搬入した箱宮土を敷きならした。その際、箱宮土が乾燥している場合には水を散布して含水比調整を行うことも予定していたが、前日から当日未明にかけて降雨があり、含水比は搬入した時点で24~27%に達していたので、とくに水分を調整することなくそのまま敷きならした。在来路床とみなす土層の仕上がり厚さは50cm、乾燥密度は1.5~1.6g/cm³(最大乾燥密度の約90%相当値)を目標に3tのタイヤローラで締固めた。走行1回ごとにRI式水分密度計により乾燥密度を求めたが、2往復した段階で概ね所定の状態に仕上がった。

次に、土層上にセメントを散布、発生材を敷きならした後にスタビライザで1回の混合(混合速度4m/min)を行った。混合後の締固め作業には、3tと15tのタイヤローラを併用した。計4往復の転圧で目標とした乾燥密度1.6~1.7g/cm³に達し、模擬路床の最終的な仕上がり厚さは工区1~4でそれぞれ50cm, 52cm, 53cm, 55cm(各工区とも6箇所の平均値)となった。

このように、室内試験では配合条件のいかに問わず作製した供試体はすべて同じ高さとなるが、実地では発生材の量が増えるほど、そして、最大粒径が大きいくほど施工基盤としての水準面は扛上していくことになり、したがって、本研究で設定した混入率20%というのは実用

表-6 材料の配合条件(路床構築試験、室内確認試験)

構築試験	室内試験	普通ポルトランドセメント添加率 および 発生材混入率
工区1	シリーズ1	箱宮土+セメント4%
工区2	シリーズ2	箱宮土+セメント4%+発生材[13~10mm]10%
工区3	シリーズ3	箱宮土+セメント4%+発生材[13~10mm]20%
工区4	シリーズ4	箱宮土+セメント4%+発生材[40~0mm]20%

上の上限に近い量と考えられる。

各工区には、熱電対(クロメル・アルメル)を2本ずつ埋設して路床温度を計測した。埋設位置は長さ方向3mと9m、深さは約40cmとした。また、定期的に平板載荷試験を実施して、固化の進行状況を確認した。

図-7は、模擬路床を構築した1996年10月から撤去した1997年4月までの路床温度の計測記録(破線)を示す。実線は事後の室内試験で設定した供試体の発生温度であり、これについては次節で述べる。路床面の覆いは市販のビニールシートのみとしたこともあって、路床温度は外気温の変動に概ね追従していた。それでも、日平均気温が下降した1996年12月下旬から翌年2月中旬にかけて、路床温度は日平均気温より2℃前後高く推移した。

現道、すなわち、路床の上に舗装を有する道路における路床温度の季節変動について、新潟市内の車道用透水性舗装および密粒度舗装で計測された事例¹⁷⁾によれば、路面下80cmの深さにおける路床の月平均温度は舗装構造の区別なく7月でおよそ32℃、10月で22℃、12月で9℃、4月では15℃であったとのことである。また、北海道帯広市近傍の農道での計測記録をもとに路床面温度(路面下1m)の年間変動を解析した結果¹⁸⁾によれば、舗装の温度が最高、最低となった約1ヶ月後に路床面温度が最高、最低となり、変動曲線上では8月に23℃、10月に17℃、12月に4℃、2月に-2℃、4月には4℃を辿っていたとのことである。

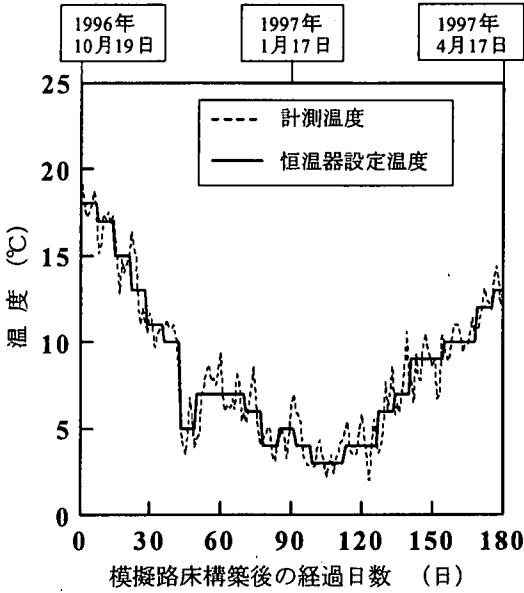
これら2つの報告のうち、文献17)は今回の屋外試験箇所と気象環境が似ている地域での計測事例であり、上記の10月~4月の路床温度を図-7に照合すると、本研究で取り扱った舗装をとまなわなない模擬路床でも、温度条件に関するかぎり結果的には実際から極端に逸脱していなかったと考察することができる。

表-7は表層土の掘削・整正時(原地盤)、模擬路床を構築した当日および構築後7, 30, 90, 180日目に各工区で測定した地盤反力係数 K_{30} をまとめたものである。0日から180日の平板載荷試験において載荷点の隔たりはいずれも2mとし、試験自体は文献19)に解説されている手順にしたがって実施した。この表より、各工区とも改良路床土の支持力は当初の1週間で急増しているこ

表一七 各工区における地盤反力係数 K_{30} の実測値

工区	原地盤	施工後経過日数				
		0日 [構築当日]	7日	30日 [1ヶ月]	90日 [3ヶ月]	180日 [6ヶ月]
1	13.9	1.8	30.9	36.7	39.9	37.1
2	17.4	2.5	36.5	47.9	49.3	53.0
3	17.4	2.1	46.8	54.6	61.8	59.4
4	28.0	3.2	80.1	89.8	94.3	91.2

[単位: kgf/cm^2]



図一七 模擬路床の内部温度と設定した養生温度

と、さらに、7日以降180日までの K_{30} の値は通常のセメント安定処理土(工区1)、単粒度の発生材を10%混入した処理土(工区2)、同じ発生材を20%混入した処理土(工区3)、粒径40~0mmの発生材を20%混入した処理土(工区4)の順に大きくなっていることがわかる。

したがって、表一七に示した K_{30} の経時変化のみに着目すれば、グリズリフィーダ通過材をそのまま使用の方がより大きな改良効果をもたらすことになる。しかし、 K_{30} の値には原地盤の支持力の差や路床の厚さの違いによる影響も多分に含まれているとみなされるので、今回の測定結果だけでグリズリフィーダ通過材(粒径40~0mm)の有用性を的確に評価するのは難しく、この点については次章でさらに検討を加えることとする。

(2) 事後試験および結果

屋外での調査が終了した時点で、模擬路床の固化の進行におよぼした路床温度の影響を明らかにする目的で、現場密度と含水比とを目標に静的に締固めて作製した供試体(直径約100mm、高さ約127mm)に対する一軸圧縮試験に着手した。具体的には、実地計測温度を模倣した温度、すなわち、前出図一七に示した実線のとおり温度を調節した恒温器内にビニール袋で密封した供試体を静置し、所定の養生日数に達したときの一軸圧縮強さ q_u を測定した。なお、恒温器の温度調節は7日ごととし、供試体の材齢は最長180日とした。一軸圧縮試験は、1%/minのひずみ速度で行った。

さらに、屋外試験では確かめることのできなかつた改

良路床土の水に対する抵抗性の良否を判定する手掛かりとして、「安定処理土のCBR試験方法」¹⁵⁾に準拠して求めるCBR(セメント安定処理の場合:空气中養生3日+水浸養生4日)に加えて、空气中養生後の水浸期間を最長90日まで延長したときのCBRも求めた。以後、工区1~4の配合条件に対応する一軸圧縮試験用およびCBR試験用の供試体を、シリーズ1~4と表記することにする(前出表一六参照)。

図一八(a)は、シリーズ1~4の供試体における一軸圧縮強さ q_u の推移をまとめたものである。この図には、恒温器の設定温度も併記してある。どのシリーズにおいても q_u の増加は養生開始後30日までと150日以降に認められ、その間(60~120日)の q_u はほぼ一定となっている。このような q_u の経時変化を恒温器の設定温度に照合してみると、強度を発現していなかった期間というのは供試体を7°C以下で養生していた期間に概ね該当することがわかる。また、養生期間中の q_u は終始シリーズ1、2、3、4の順に大きくなっており、この序列自体は先の模擬路床における平板載荷試験の結果(表一七)に一致している。ただし、シリーズ4と3との強度差は発生材の粒度組成の違いによるものというほど顕著ではない。

養生終了時における体積変化率 ϵ の最大はシリーズ3および4の約2%、最小はシリーズ1の約1.5%であり、わずかな差ながらも発生材の混入率に関連していた。

図一八(b)は、改良路床土の強度特性におよぼす養生温度の影響をより明確なものとするために、シリーズ1および4の供試体をそれぞれ5°C、20°Cに設定した恒温器内に静置したときの一軸圧縮強さ q_u の測定結果を示す。シリーズ1、4ともに5°Cの温度条件下における強度の発現は小さく、養生30日以降に q_u の増加はほとんど認められない。一方、20°Cの温度条件下では q_u は着実に増加し、半年程度の養生では未だ最終強度に達していない。180日目の q_u を比較したところ、シリーズの区別なく20°Cで養生した供試体の q_u は5°Cで養生した供試体の約2倍の値となっていた。さらに、図一八(a)に示したシリーズ1(記号○)およびシリーズ4(◇)の q_u は、図一八(b)におけるそれぞれの5°C、20°Cの強度曲線のほぼ中間に位置することが確かめられた。

養生温度を「調節」または「一定」とした上記の一軸

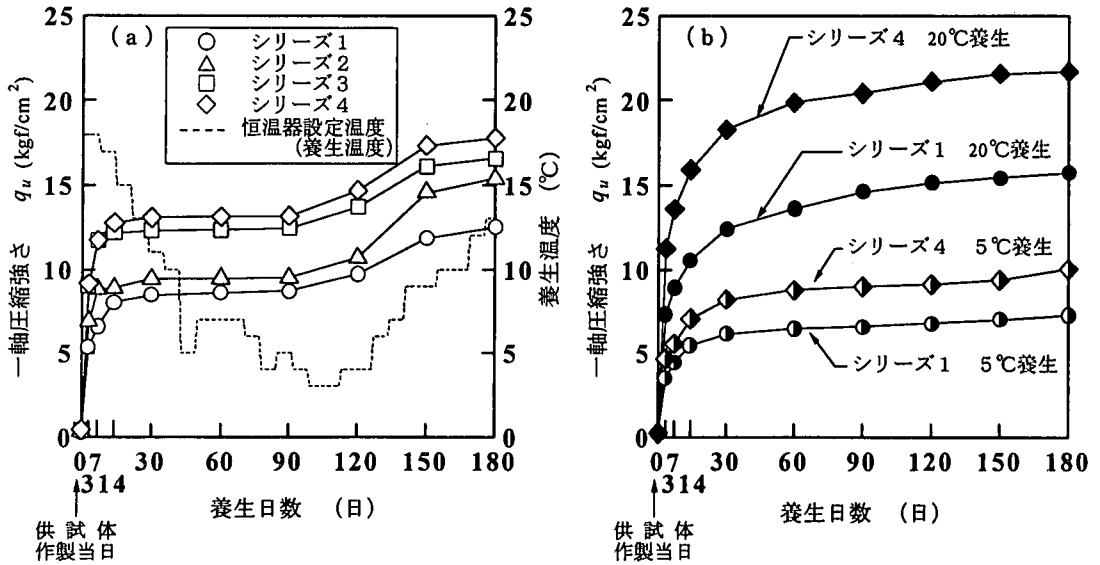


図-8 一軸圧縮強さの経時変化 (温度依存性の確認)

圧縮試験から、模擬路床の固化の進行には路床温度が深く関与していた可能性の高いことが示され、今回は低温期を控えて模擬路床を構築したが、施工時期が4ヶ月程度前倒しであったならば、すなわち、高温期に先駆けて構築していたならば、地盤反力係数 K_{30} の増加割合は一層大きくなっていったものと推測される。

安定処理土の温度依存性について、まさ土に高炉セメントB種あるいは消石灰を4%添加して作製した供試体を、8種類の温度条件(最低:-9°C, 最高33°C)のもとで養生したときの一軸圧縮強さ q_u を測定した結果²⁰⁾によれば、 q_u は高い温度で養生するほど大きくなり、例えば、21°Cの標準温度で120日間養生したセメント安定処理土の q_u (3.1MPa)は3°Cのおよそ2倍に相当するとのことである。また、養生中に-9°Cで供試体を一旦凍結させても、その後標準温度で養生すると q_u は経時的に増加するとのことである。さらに、この論文には、予め空気中で6日間養生した供試体を水浸しても、長期にわたり強度低下を生じないことが併せて述べられている。

したがって、セメントの種類、材料構成や養生方法は異なるものの、前出図-5、6および図-8(a)、(b)に示した強度発現過程のおおよその根拠を文献²⁰⁾の研究結果から窺い知ることができると考えられる。

次に、図-9はシリーズ1および4のCBR試験用供試体を作製した当日、空气中養生(3日間)終了時および水浸養生4、14、30、60、90日目に求めたCBRをまとめたものである。空气中養生の段階でシリーズ4のCBRはシリーズ1の約30%増となっており、その差は水浸養生に移行した後もほとんど変わらないことがわかる。水浸CBRの推移をみると、シリーズ1、4ともに

CBRは極端に低下することなく、むしろ徐々に増加する傾向にあることが認められる。同様の傾向は、単粒度の発生材を混入したシリーズ2および3の供試体においても示された。なお、90日間の水浸養生中に生じた吸水膨張量は、配合条件にかかわらずいずれも0.1mm未満であった。

この章に述べた模擬路床の構築試験において、発生材はその粒度組成を調整しなくても路上混合方式による路床改良工事に適用可能であり、セメントの混合むらや締固め度(路床構築における品質管理の限界値 \geq 最大乾燥密度の85~90%)³⁾の不足を生じる懸念のないこと、ただし、多量に使用するときには在来路床表層の一部撤去を行わないかぎり出来形管理の限界(基準高: ± 5 cm以内)³⁾に抵触する場合もあることが確認された。

室内での事後試験からは、発生材混入の有無ならびに最大粒径の違いを問わず、改良路床土の固化反応の遅速は路床温度に依存する部分が多く、7°C前後を境として強度の発現過程に差異を生じること、また、粒度組成に比べて混入量の方が強度および変形特性に直接的な関係をもつこと、さらに、発生材を混入した改良路床土の水に対する抵抗性を通常のセメント安定処理土と比較してもとくに遜色のないことが明らかにされた。

5. 路床構築後の支持力増分に関する数値計算例

先の第4章(1)で、模擬路床構築後の地盤反力係数 K_{30} には工区による相違、すなわち、発生材混入の有無、加えた発生材の量や粒度組成の違いによる大小関係が認められたことを述べた。一般に、平板載荷の影響がおよ

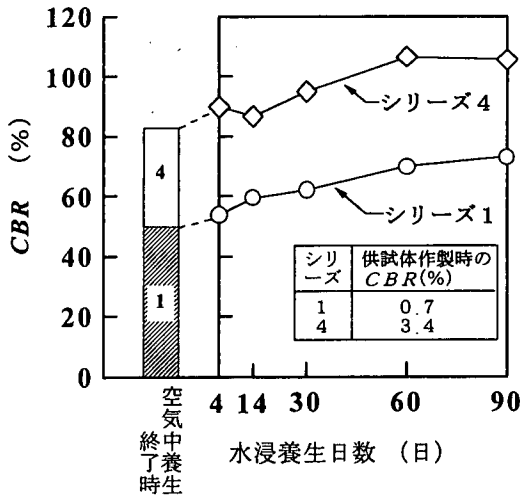


図-9 水浸 CBR の経時変化 (耐水性の確認)

ぶ範囲は深さ方向に載荷板直径の1.5~2倍とされており²¹⁾、これを今回の試験状況に当て嵌めると、各工区における改良路床土層(厚さ50~55cm)と原地盤の一部とを含めた領域の支持力特性を評価していたとも考えられる。ところが、原地盤の K_{30} には工区により倍近くの差があり、加えて、構築7日以降に路床面で測定した K_{30} には、上述した路床温度がかかわっていた可能性が高い。したがって、原地盤と路床温度双方の影響を考慮に入れた手法をもって、発生材の混入が路床支持力の増加に与えた効果について考察する必要がある。

その手掛かりとして、著者らは鉄道の強化路盤の設計などに多用されている「多層系弾性モデルによる路盤効果の推定法」²²⁾に着目し、設計 CBR が 2, 3, 4, 6% の在来路床を前出表-6の配合条件で改良した後に期待される CBR を計算により求めてみることにした。

作成した演算プログラムの概略を示すと、まず、計算過程に原地盤の堅さの影響を組み込むために、次式²³⁾を引用して CBR=2~6%に対応する K_{30} を設定した。

$$K_{30} = 0.55 \cdot CBR + 2.2 \quad (1)$$

演算の第1段階では K_{30} とともに在来路床のポアソン比 ν_s 、層厚 h_s をプログラムに入力して路床の変形係数 E_s を算出するが、その際、 ν_s については文献²⁴⁾を参照して0.4と仮定し、また、 $h_s = \infty$ と置いた。出力データによると、上式により CBR から換算した4種類の K_{30} に相応する E_s の値は、65.3~108.9kgf/cm²(6.4~10.7MPa)となった。

演算の第2段階は路床温度の影響を取り入れた改良後の地盤反力係数 K_{30}^* の算出であり、ここでは上記 ν_s 、 h_s 、 E_s の諸値を有する在来路床の上に改良層を載せた2層系モデルとして計算を進めた。解析にあたって、

安定処理厚 h_n には模擬路床の仕上がり厚さである50~55cmを代入し、その層のポアソン比 ν_n は ν_s と同じく0.4と置いた。そして、もう1つの入力データである改良路床土層の変形係数 E_n には、温度を「調節」または「一定」として養生した供試体の一軸圧縮試験(前出図-8)から得られた E_{50} を代用した。 E_{50} の範囲は、16.8~3578.0kgf/cm²(1.6~350.6MPa)である。

最後に、第2段階で求めた K_{30}^* を式(1)の K_{30} に置き換えて改良後の CBR^{*}を逆算した。

計算結果の1例を図-10に示す。(a)はセメントのみを添加した処理土(シリーズ1)、(b)は粒径40~0mmの発生材を20%混入したセメント安定処理土(シリーズ4)の出力データのうち、路床を構築してから7~60日分をまとめたものである。

この図において、改良後の CBR^{*}をシリーズ4と1との比で表してみると温度条件、改良前の CBR、経過日数にかかわらず概ね1.4となり、計算上でも発生材を混入する方が支持力の増分は大きくなるのがわかる。なお、粒径13~10mmの発生材を10%混入したシリーズ2と1との比は約1.2、同じ発生材を20%混入したシリーズ3と1との比は約1.4であり、CBR^{*}は発生材の粒度組成ではなく混入量に関連して増加することが確かめられた。また、CBR^{*}を温度条件に注目して比べてみると、いずれのシリーズにおいても30日間恒常的に20°Cであった場合の CBR^{*}は5°Cであった場合のおよそ1.7倍に相当し、温度が徐々に下降していった場合の CBR^{*}はこれらのほぼ中間の値となっている。このことから、構築後の路床支持力の早期増加を期待する上には、施工時期に応じて発生材や安定材の量を適宜加減する必要もあるものと考察される。

路床設計の実務においては改良層の CBR の上限は20%とするので、例えば図-10(b)のような大きな CBR を目標に構築を図ることはない。それでも、ここに示した2層系モデルを用いた計算手法によって発生材を混入した安定処理土の支持力増分を調べることは、当該処理土を一種の路床構築材料とみなしたときの材料特性の把握や評価に有用と考えられる。

6. まとめ

供用後のライフサイクルを延長し、維持・修繕に要する費用を低減するためには、大きな支持力を有する路床の上に荷重分散機能を高めた材料、断面構造から成る舗装を設ける必要がある。その一方で、建設サイクル推進計画'97の根幹をなす「ゼロ・エミッション」の達成に向けて、道路工事のみならず土木事業全般にわたり廃棄物の発生抑止ならびに建設副産物の積極的な活用が求められている。

改良後の経過日数			
○	7日	△	14日
□	30日	◇	60日

[温度条件：調節 [†]]				
経過日数	7	14	30	60
温度 (°C)	18	17	11	7

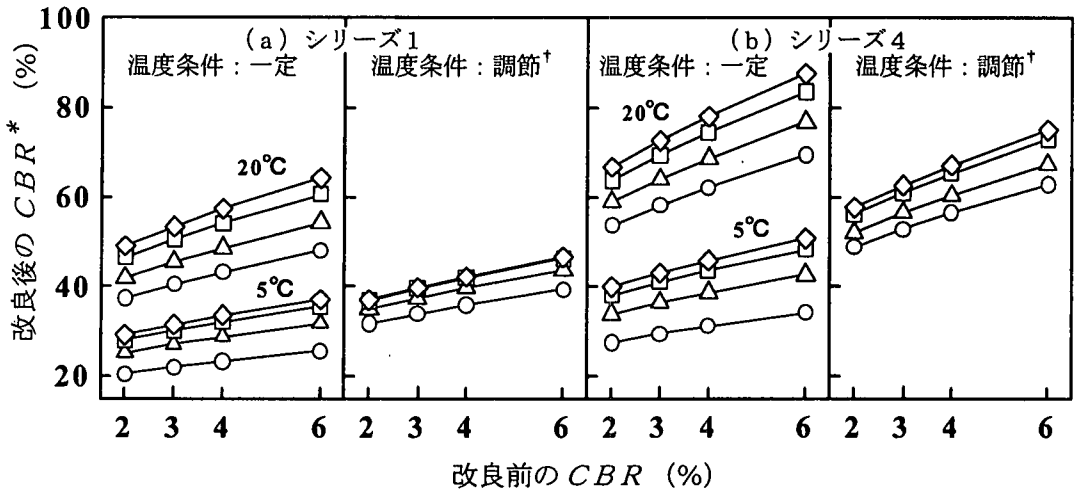


図-10 改良前後の路床支持力の比較 (計算値)

このようなアスファルト舗装の強化，長寿命化にかかわる路床構築技術の必要性和環境保全，天然資源の節約にかかわる昨今の趨勢とを踏まえて，著者らは再生資源の1つである粒径40～0mmのグリズリフィード通過材（発生材）を用いた路床構築の可否について検討することにした。研究では室内CBR試験，一軸圧縮試験により発生材を混入した安定処理土の工学的性質を調べるとともに，屋外で小規模な構築試験を実施して施工性や路床支持力の経時変化を調べた。さらに，簡便な数値計算を行って発生材混入の有無，温度条件とCBRの増分との関係について考察を加えた。

本研究で得られた主要な結果を要約すると，次のようになる。

(1) 供試体を空气中で養生した場合，発生材を混入した安定処理土のCBRおよび一軸圧縮強さ q_u は安定材のみを添加した処理土のCBR， q_u を確実に上回り，その傾向は発生材を多く混入するほど顕著となる。また，水中静置の状態でもCBR， q_u が極端に低下する兆候は認められず，むしろ時間の経過とともに漸増する。

(2) 発生材の粒度組成にかかわらず，最長90日の水浸養生中に生じた供試体の吸水膨張量，最長180日の空气中養生において生じた体積変化率（膨張側）はともに微量であり，構築後に地下水や外気温の影響を受けて路床が変状を呈する恐れは少ない。

(3) 発生材の混入量が在来路床土の2割程度までであるならば，通常の路上混合方式による施工に支障はな

く，管理の限界に適った路床を構築できる可能性が高い。ただし，発生材の大量消費を試みる場合は仕上がり面の打上に注意を払う必要がある。

(4) 安定処理土の支持力増加，強度発現の過程には路床温度の関与する部分が多く，平板載荷試験および事後試験の結果をもとに推測すると，路床温度がおよそ7°Cまで下降した時点から固化の進行に遅滞を生じる。

(5) 上記(1)および(4)に関連して，試算した構築後のCBRを発生材の混入，無混入で比較すると前者は後者の2～4割増に相当し，また，構築後1ヶ月間の路床温度が20°CであったとするときのCBRは5°Cのときの約1.7倍に相当する。したがって，構築時期を見計らうことも目標設計CBRを定める上には肝要となる。

以上，本研究で実施した一連の試験から，グリズリフィード通過材を混ぜ合わせた安定処理土の材料特性についてはおおよそを明らかにすることができたが，その路床の上に舗装を設けた場合の効果，とりわけ交通開放後の供用性能に関しては今後の検証課題として残された。

この点について，現在，アスファルトプラント敷地内のダンプトラック通行路および公道（設計交通量L，A交通）において試験施工を行う方向で立案，準備を進めており，新たな知見が得られたい稿を改めて報告することとしたい。

謝辞：本研究は著者のひとり（筆頭者）が金沢工業大学に在動中から継続して行ってきたものであり，終始適切

なご助言を賜った金沢工業大学工学部土木工学科太田実教授をはじめ、試験や結果の整理にご協力いただいた当時の大学院修士課程学生保本敏伸氏(現、ニチレキ(株)勤務)、富樫重臣氏(現、山形県庁勤務)、山下哲弘氏(現、大成ロテック(株)勤務)ならびに当時の学部卒業研究生諸氏に深甚なる謝意を表す。また、貴重な資料の提供および助言を頂戴した建設省、石川県、日本道路公団の関係各位に衷心より御礼申しあげる。

参考文献

- 1) 池田拓哉：舗装技術の現状と課題，土木技術，第54巻，第2号，pp. 28-34，1999. 2.
- 2) 稲垣竜典：長寿命舗装（現状と問題点），土木技術，第54巻，第2号，pp. 81-87，1999. 2.
- 3) (社)日本道路協会：アスファルト舗装要綱，1992. 12.
- 4) (社)廃棄物学会：廃棄物ハンドブック，pp. 1147-1178，1997. 11.
- 5) 山田幹雄，佐野博昭，黒島一郎，太田 実：石炭火力発電所産副産物の道路路盤材としての有用性に関する研究，土木学会論文集，第510号/VI-26，pp. 125-135，1995. 3.
- 6) 山田幹雄，佐野博昭，黒島一郎，太田 実：フライアッシュおよび排煙脱硫スラッジの軽交通道路用路盤材としての利用に関する研究，土木学会論文集，第546号/VI-32，pp. 199-210，1996. 9.
- 7) (社)日本道路協会：アスファルト混合所便覧（平成8年版），1996. 10.
- 8) 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一現場での実効ある対策の推進のために一（平成10年度版），1998. 8.
- 9) 本多淳裕，山田 優：建設副産物・廃棄物のリサイクル，(財)省エネルギーセンター，pp. 293-353，1994. 8.
- 10) (社)日本道路協会：プラント再生舗装技術指針，1992. 12.
- 11) 山下哲弘，山田幹雄，太田 実，松島保志：再生材を利用した道路路床の構築法に関する基礎的研究，土木学会第51

- 回年次学術講演会講演概要集，第3部(B)，pp. 544-545，1996. 9.
- 12) 松島保志，山田幹雄，太田 実，坂田親紀：再生材を混合した粘性土の強度，支持力特性，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，第3部(B)，pp. 602-603，1997. 9.
- 13) 坂田親紀，山田幹雄，太田 実，谷口克也，松島保志：再生路盤材を混合した路床土の強度，支持力特性に関する一考察，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，第3部(B)，pp. 646-647，1998. 10.
- 14) (社)土木学会：土質試験のてびき，1992. 2.
- 15) (社)日本道路協会：舗装試験法便覧，1988. 11.
- 16) 山田幹雄，佐野博昭，徳岡研三，伊能忠敏：在来線噴泥対策としての石炭灰を用いた置換互層路盤の適用性に関する実験的研究，土木学会論文集，第444号/VI-16，pp. 31-40，1992. 3.
- 17) 荒井 進，大川秀雄，田口 仁，大竹和彦：新潟市における車道用透水性舗装の試み，舗装，第33巻，第3号，pp. 8-15，1998. 3.
- 18) 美濃宏樹，秀島好昭，沢田則彦：農業用道路の舗装体温度観測と考察，農業土木学会北海道支部研究発表会講演要旨集，Vol. 39th，pp. 58-63，1990.
- 19) (社)土質工学会：土質工学会基準一地盤の平板載荷試験方法・同解説，1983. 1.
- 20) 三嶋信雄，星野克之，森本美樹：安定処理土の強度特性と耐久性に及ぼす影響，日本道路公団試験研究所報告，Vol. 32，pp. 10-23，1995. 11.
- 21) (社)地盤工学会：地盤調査法，pp. 345-361，1995. 12.
- 22) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説一土構造物一，1992. 11.
- 23) 植下 協：舗装の力学（最終回），舗装，第8巻，第9号，pp. 33-38，1973. 9.
- 24) 伊東孝之，関口吉男，板井幸市：鉄道路盤の支持力，鉄道技術研究所速報，No. A-87-91，1987. 3.

(1999. 5. 31 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECT OF IMPROVEMENT OF SUBGRADE SOIL BY USING RECLAIMED ASPHALT MIXTURE WITH STABILIZER

Mikio YAMADA, Yasushi MATSUSHIMA, Hiroaki SANO and Mitsushi OKUMURA

In order to investigate the effect of reclaimed asphalt mixture content on the mechanical properties of stabilized soils, California bearing ratio (CBR) tests and unconfined compression tests were performed under various compositions. In addition, plate loading tests were carried out to observe the hardening condition of stabilized subgrade soils containing reclaimed asphalt mixture.

As a result, it was found that the unconfined compressive strength and CBR value increased with an increase in reclaimed asphalt mixture content and that the hardening rate of stabilized soil tended to change in accordance with a variation of subgrade temperature. Therefore, selecting the execution season seems to perform an important role in forecasting the effect of improvement.