

戻りコンとスラッジを利用した路盤材の開発

張 金喜¹・藤原 忠司²・諸戸 桂一³

¹学生会員 工修 岩手大学大学院 生産開発工学専攻 (〒 020-8551 盛岡市上田 4 丁目 3-5)

²正会員 工博 岩手大学教授 工学部建設環境工学科 (〒 020-8551 盛岡市上田 4 丁目 3-5)

³工修 日本道路公団 大阪管理局技術部 (〒 569-0817 大阪府高槻市桜ヶ丘北町 15-25)

生コン工場の多くは、戻りコンやスラッジの処理に苦慮している。本研究では、戻りコンを積載したままのアジテータ車のドラム内に、天日乾燥スラッジを投入して攪拌し、排出して硬化させた後、破砕して路盤材に利用する方法を考案し、その実用性を検討した。はじめに、実験室において、一連の工程を具現化し、戻りコンとスラッジの混合割合、戻りコンの種類およびスラッジの含水率などによる路盤材の支持力特性などの相違を調べ、条件を適切に選定すれば、優れた性能の路盤材を製造できるとの見通しを得た。続いて、生コンプラントで製造した路盤材を用いて試験路盤を築造し、支持力などを求めたところ、実用に耐え得ると判断された。工程が単純で、経済的な本方法は、既に実用化の段階に入っている。

Key Words: ready mixed concrete plant, natural drying sludge, returned concrete, base course material, recycling, modified CBR, durability, water proofing, site test

1. まえがき

コンクリートの打設現場では、必要な生コンクリート（以下、生コン）の量を正確に予測するのが難しく、一般に、余裕を見込んで発注する。そのため、すべてを荷卸しできずに生コンが残ったり、さらには積んでいる生コンをそのまま戻されてしまう場合もある。前者を残りコン、後者を戻りコンと呼んでいるが、ここでは、両者を総称して戻りコンと呼ぶ。戻りコンの発生量は、生コン生産量の 0.9%程度であると言われており¹⁾、決して少なくない。

戻りコンから、骨材を回収すれば、スラッジ水が発生する。スラッジ水は、ミキサやアジテータ車などの洗浄によっても発生する。スラッジ水を回収水として、コンクリートの練混ぜに利用する場合はあるものの、たいていは、余剰のスラッジが残留する。回収水にしなれば、スラッジの発生量はなおさら多い。多量の水分を含むスラッジの処理は困難であり、沈殿池から汲み上げたあと、天日乾燥したり、機械脱水したりして、減量化および固形化を図る。それでも、全国の年間スラッジ発生量は 300 万 m³を超え、処理費用は 300 億円近くに達すると言われている²⁾。

戻りコンおよびスラッジとも、その組成からして、本

来、有用な物質であり、ただ単に、廃棄処分するのではなく、有効活用が望まれる。実際にも、このような認識のもと、多くの利用方法が考案され、試されてきた。スラッジなどの発生量、現有設備および立地条件等は、各生コン工場で異なる。その意味で、多様な方法が検討されてきたのは、有意義であり、各工場は、それぞれの事情に合った方法を採用すればいい。

本研究も、戻りコンおよびスラッジの有効活用を主題としたが、すべての生コン工場に適用可能な方法を指向するのではなく、戻りコンから骨材を回収せず、しかもスラッジは天日乾燥している場合を想定している。具体的には、戻りコンと天日乾燥スラッジを一括して、道路等の路盤材として利用する方法を考案し、有用性を屋内実験ならびに試験路盤によって検証した。有用性が確認されたこの方法は、既に実用化されている。

2. 考案した方法

戻りコンやスラッジを有効に利用しようとの試みは、種々行われている。しかしながら、その多くが実用に供されていないのは、技術的な難しさ、複雑な工程、供給と需要のアンバランスおよび経済性の欠如などに起因し

表-1 戻りコンの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	呼び強度 (N/mm ²)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AE
25	16	8	5.0	67	41	170	253	742	1039	0.63
25	21	8	5.0	56	40	149	265	727	1096	0.66
25	30	8	5.0	46	38	163	352	668	1050	0.88

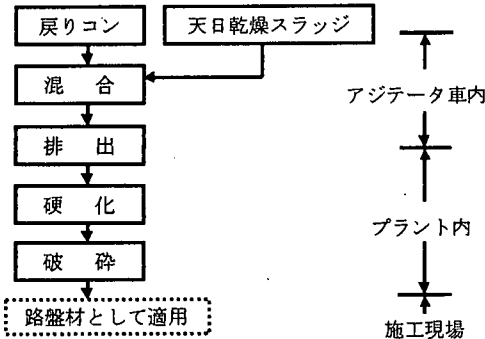


図-1 考案した方法

ていると思われる。本研究では、実用性を重視し、図-1に示すような方法を考案した。

まず、戻りコンを積載して帰社したアジテータ車のドラム内に、ストックしてあるスラッジを、適当な機械を用いて、適当量投入する。この際のスラッジとしては、天日乾燥したものを対象としている。アジテータ車のドラムを回転させ、戻りコンとスラッジとを均一になるまで攪拌し、この混合物を適当な場所に排出する。ここは、風雨や日射等の影響を避けるため、屋根付きが望ましい。混合物がある程度硬化したのち、適当な機械を用いて破碎する。この破碎物を、道路等の工事現場に搬入し、路盤材として利用する。

この発想の段階では、たとえば、「適当な機械」や「適当量」などのような曖昧な表現を多用せざるを得なかったが、工程は単純であり、技術的に容易で、経済的な方法であると予見された。路盤材の需要は高く、販路も無理なく確保できると期待した。生コン工場にとっても、戻りコンとスラッジとを一括して利用でき、望ましい方法であるのは疑いない。

3. 屋内実験

はじめに、想定している一連の工程を、すべて実験的に具現し、戻りコンとスラッジを混合したコンクリート（以下、混合コンクリート）および硬化した混合コンクリートを破碎した材料（以下、混合破碎物）の状態や性質を調べ、考案した方法の実現可能性を検討すること

にした。

(1) 実験概要

スラッジは、生コン工場から採取した。天日乾燥したものであり、含水率は、採取する日によって、異なっていた。したがって、スラッジの含水率は、実験を通して一定ではないが、スラッジの含水率が、混合コンクリートおよび混合破碎物の性質に影響を及ぼす可能性は十分に考えられるため、これを比較要因とした実験も行った。

戻りコンについては、実際に発生した戻りコンを対象とせず、これを想定したコンクリートを実験室で練り混ぜた。骨材には、川砂利（最大寸法：25mm、表乾比重：2.51、吸水率：3.9%）および川砂（粗粒率：2.92、表乾比重：2.52、吸水率：3.7%）を用い、セメントには普通ポルトランドセメント、混和剤にはAE減水剤を用いている。戻りコンとしては、主にレディーミクストコンクリートの〔普通-21-8-25-N〕を想定した。もちろん、実際には、様々な種類の戻りコンが発生する。この種類によって、混合コンクリートおよび混合破碎物の性質も変わると予想されるため、戻りコンの種類を比較要因とした実験も行った。戻りコンの配合を表-1に示す。

戻りコンは、傾胴式ミキサを用いて練り混ぜた。練混ぜ終了後、コンクリートをミキサに入れたまま、これにスラッジを加え、混合する。実際には、この混合をアジテータ車のドラム内で行うと想定しており、重力式である傾胴式ミキサを用いたのは、できるだけ実際に近い状態で混合しようとの意図による。スラッジの混合割合は、混合コンクリートおよび混合破碎物の性質に大きく関わると考えられたため、これを幾段階かに設定した実験も行った。

混合後、混合コンクリートを排出し、15×15×53cmの型枠に流し込む。この際、締固めは一切行わない。翌日、脱型し、養生もせず、そのまま放置しておく。これらも、実際を想定しての措置である。3週間後、硬化した混合コンクリートを大割りしたのち、ジョークラッシュャで、最大寸法25mm程度に破碎した。破碎の時期は、混合後3週間を基本としたが、翌日に破碎する条件も検討している。混合破碎物の実験項目としては、支持力の評価に主眼をおいた。

表-2 天日乾燥スラッジの性質

実験項目	実験値
そのままの試料	
含水率 (%)	205
湿潤密度 (g/cm ³)	1.24
乾燥密度 (g/cm ³)	0.41
0.075mm通過量 (%)	80.4
乾燥した粉末	
比重	2.10
ブレン値 (cm ² /g)	12,200
細孔容積 (cm ³ /g)	0.905
窒素吸着表面積 (cm ² /g)	236,300
PH 値	12.7

屋内では、以上の主要な実験のほかにも、スラッジの性質をはじめ、関連する項目についても、実験を行なっている。

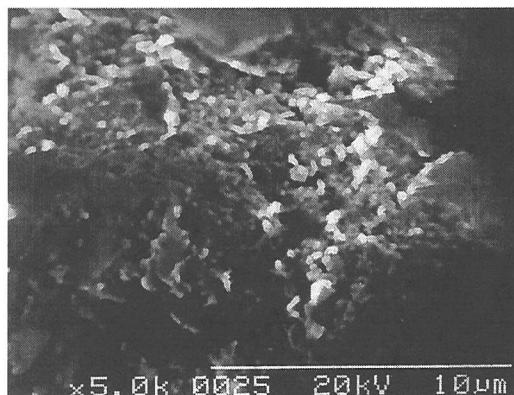
(2) スラッジの性質

本研究では、スラッジとして、天日乾燥したものを対象とした。機械脱水によるスラッジケーキであれば、ケーキ自体が所要の強度 (8N/mm² 以上) を有するという条件付きで、安定型として廃棄処分できる。また、脱水の時期によっては、ケーキを形成する粒子が水和性を有するため、ケーキを粉末状にして、コンクリートの混和材料として利用するなどの方法が考えられ、実際に試されている³⁾。

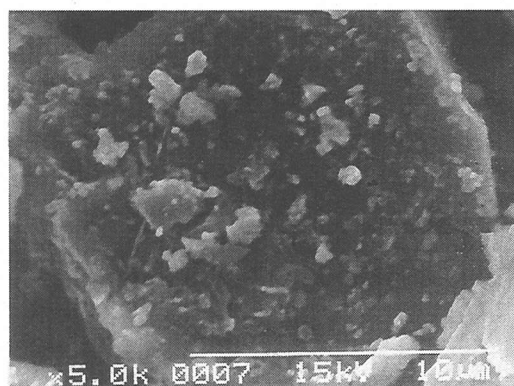
これに対し、天日乾燥スラッジの場合、泥状であって、紛れもなく、管理型の廃棄物であり、有効利用に関しても、ほとんど検討されてこなかった経緯がある。たしかに、天日乾燥スラッジは、比較的長い間、攪拌槽や沈殿池に滞留し、汲み上げられたあとも、水分が過剰な状態にあるため、含まれているセメント粒子のほとんどは、水和を終えている可能性が高い。ただし、水中もしくは水中に近い条件下であるため、水和した粒子同士が結合して、緻密な組織を形成しているとは考えにくい。

表-2は、本実験で用いた天日乾燥スラッジの一例を示している。含水率はきわめて高く、湿潤密度および乾燥密度は小さな値を示す。水を流しながらふるい分けしたところ、0.075mmふるいの通過質量百分率が80%以上となっており、このことから、塊状の水和物は、ほとんど形成されていないと推察される。

スラッジを絶乾にし、それをほぐして、求めたブレン値は、セメントの3倍程度であり、この値からも、スラッジは非常に細かいことが知られる。この粉体を対象とし、セメントと同様の方法で求めた比重は、2.10程度であって、スラッジの主成分がセメントや細骨材であることを考慮すれば、意外に小さな比重であると言わざるを得ない。この原因を探るため、窒素吸着法によって粉



(a) 天日乾燥スラッジ



(b) セメント

写真-1 天日乾燥スラッジおよびセメントのSEM写真

体の比表面積および細孔容積を求めた。これらは、きわめて大きな値を示す。したがって、スラッジの粒子は多孔質であり、そのため、比重が小さいと言える。

写真-1に、スラッジおよびセメント粒子の電子顕微鏡写真を示す。セメントに比べ、表面は粗く、おそらくは内部の組織も粗鬆であると推察される。スラッジの粒子は、既に水和をほぼ終了していると思われる。ただし、粒子単独の水和であるため、他の粒子の水和と複雑に絡み合っ、緻密な水和物を形成するには至らない。セメントを水に懸濁させた状態で、水和の時間的な変化を調べた研究例⁴⁾によれば、消石灰やモノサルフェートの生成が卓越し、通常のセメントペーストとは、異なる水和生成物になると言われている。

図-2は、乾燥スラッジを用いて実測したX線回折の結果を示している。消石灰のピークがいくつか見受けられ、スラッジにおいても、研究例と同様な水和物が生成されていることを示唆している。これらの生成物の組織は粗く、そのためスラッジの比重が小さいと考えられる。

電子顕微鏡を用いたX線分析による元素割合を表-3に

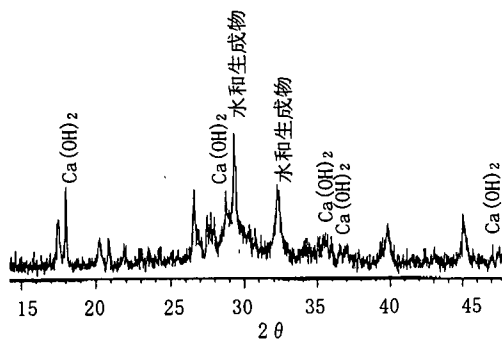


図-2 天日乾燥スラッジのX線回折結果

表-3 天日乾燥スラッジおよびセメントの元素割合

物質	Al	Si	S	K	Ca	Fe	その他
スラッジ	7.5	27.6	1.2	0.7	55.7	5.3	2.0
セメント	2.9	11.5	2.1	1.9	76.7	3.8	1.1

示す。セメントに比べ、Ca が少なく、逆に Si が多くなっているのは、スラッジには、セメント水和物の他に、砂も含まれていることを示している。

このように、天日乾燥スラッジの特徴は、粒子が非常に小さく、しかも多孔質であって、吸水性に富むことにある。

戻りコンと混合した場合、スラッジには、路盤材の間隙充填材としての役割を期待することになるが、それ自体の支持力を知るため、スラッジ単独で、修正 CBR を測定してみた。用いたスラッジは、絶乾状態にした粉末であり、これに水を加えて、締固め試験により、最適含水比および最大乾燥密度を求め、その含水比で CBR と乾燥密度との関係から、修正 CBR を得る。所要の締固め度は、95%とした。

図-3 がその結果であり、スラッジ単独でも、比較的大きな修正 CBR を示し、よく締まる材料であると評価できる。

(3) 混合コンクリートの性状

戻りコンを練り混ぜたあと、天日乾燥スラッジを投入して、さらに攪拌すれば、混合コンクリートはあたかも流動化コンクリートのような外観を呈する。スラッジには、多量の水が含まれ、それが流動性を高めるのは疑いない。換言すれば、両者の混合は容易であり、実際にアジテータ車のドラム内でこの混合を行うとしても、問題はないと推察された。ただし、スラッジの混合割合を大きくすれば、材料分離が激しくなるため、混合物の状態を観察して、戻りコンに対するスラッジの外割りの混合割合は、質量で50%までとした。

なお、スラッジとしては、機械脱水によるスラッジケ

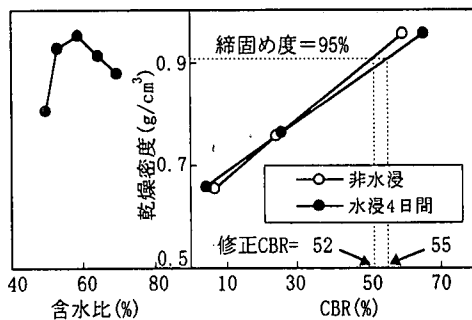


図-3 天日乾燥スラッジ粉末の修正CBR

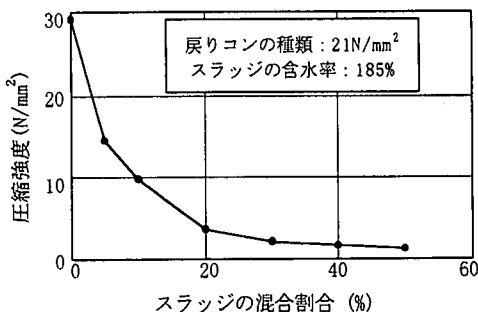


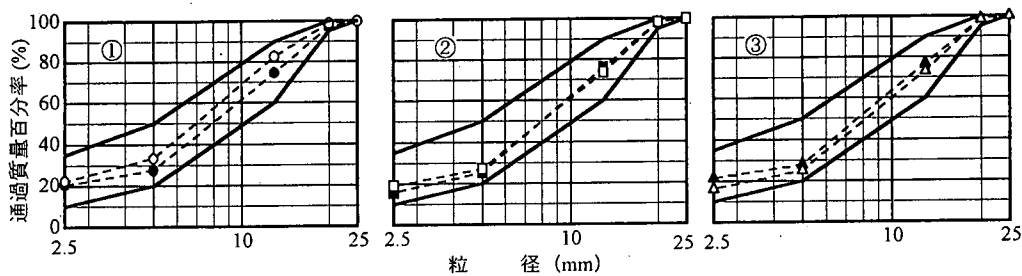
図-4 スラッジの混合割合と混合コンクリートの圧縮強度の関係

一キの適用性も検討してみたが、傾胴式ミキサでは、塊となっているケーキが十分にほぐれず、戻りコンとの均一な混合は無理であると判断された。ケーキを絶乾にして粉碎し、粉末状にすれば、均一な混合を期待できるものの、絶乾および粉碎の工程が加わることになり、経済的でない。

戻りコンに天日乾燥スラッジを混合した混合コンクリートが、硬化後に適度な強度を有すれば、生コンあるいは二次製品用としての利用を期待できる。図-4 は、通常のコンクリートと同様の方法で、混合コンクリートの材齢 28 日における圧縮強度を求めた結果を示している。

戻りコンの種類は、呼び強度 21N/mm² であり、配合強度としては、30N/mm² であった。これに、スラッジをわずかに 5% 混合しても、強度は半減してしまい、混合割合を更に増せば、強度をほとんど期待できない。この実験で用いたスラッジの含水率は 185% であり、スラッジに含まれる多量の水が、混合コンクリートの水セメント比を増大させ、結果的に強度を低めたことは疑いない。また、スラッジは既に水和をほとんど終了しており、強度の増進に寄与しないことをうかがわせている。

したがって、混合コンクリートには、通常のコンクリートと同様の用途を期待できないため、破碎して、路盤材としての適用性を検討することとした。強度が低いため、硬化した混合コンクリートの破碎は容易であり、



①スラッジの混合割合：-●-0% -○-50%
 ②スラッジの含水率：-■-148% -□-260%
 ③戻りコンの種類：-▲-16 -△-30 N/mm²
 C-20 粒度範囲：——

図-5 混合破碎物の粒度分布

表-4 碎石の品質の目標値

項目	用途		測定値
	表層・基層	上層路盤	
表乾比重	2.45以上	—	2.48
吸水率(%)	3.0以下	—	7.0
すり減り減量(%)	30以下	50以下	34.3

実際の破碎工程も無理なく行えると予見された。

(4) 混合破碎物の性質

混合破碎物は粒状材料である。一般に、道路用路盤材としては、粒状材料の碎石が用いられ、上層路盤には粒度調整碎石、下層路盤にはクラッシャーが多用されている。混合破碎物は、そのままの状態では、クラッシャーと同様に碎き放しであり、上層路盤に用いるには、粒度調整を必要とする。これを生コン工場で行うには、新たな設備を要し、経済的でない。また、混合破碎物に用いる戻りコンおよびスラッジの性質は、大きく変動すると予想され、安定した高い品質が望まれる上層路盤材としての用途を、混合破碎物に期待するのは、危険でもある。そのため、たとえ実験的に、路盤材として高い支持力が得られたとしても、混合破碎物の用途としては、下層路盤材に限ることとした。

アスファルト舗装要綱には、表層・基層および上層路盤に用いる碎石の表乾比重、吸水率およびすり減り減量について、表-4のような目標値が示されている。表には、混合破碎物(5mm以上)の測定値の一例も示した。

混合破碎物の比重は小さく、吸水率およびすり減り減量は大きくて、粒子自体は、堅硬とは言い難い。目標値と比べれば、混合破碎物を表層・基層用として用いるのは、明らかに不適切であり、上層路盤材としても、すり減り減量の規定は満たしているものの、粒子の弱さが懸念される。一方、アスファルト舗装要綱には、下層路盤材としての目標値は示されておらず、集合体としての粒度や支持力などが適切であれば、粒子としての性質は問

わないとの考えが根底にあるように思われる。

図-5は、混合破碎物の粒度分布であり、JIS K 5001に規定されているクラッシャー C-20の粒度範囲も示してある。また、粒度分布は、スラッジの混合割合、スラッジの含水率および戻りコンの種類によって異なったが、図では、それぞれの要因に対し、最も粗い粒度および細かい粒度の場合を示した。

すべての粒度分布とも、クラッシャーの規定の範囲に収まっている。しかし、この点は、それほど重要ではない。なぜなら、この実験では、ジョークラッシャーを用いて破碎したが、実際には、生コン工場に同様の破碎機を設置するのは、経済的に無理と思われる、特別の設備を要しない破碎方法を工夫する必要があり、その際には、本実験とは異なる粒度の破碎物が得られると予想されるからである。すなわち、図の粒度分布は、この実験に特有のものであって、より重要なのは、実際に工場で得られる混合破碎物の粒度となる。

ただし、図によれば、粒度曲線は比較的滑らかであり、混合破碎物の粒度分布は、連続的になることを期待させている。また、スラッジの混合割合が大きいほど、スラッジの含水率が大きいほど、および戻りコンが低強度であるほど、混合破碎物の粒度分布は、幾分細か目となっており、後述する支持力に関連すると思われる。

アスファルト舗装要綱では、下層路盤材として粒状材料を用いる場合、0.425mmふるい通過分の塑性指数(PI)は、6以下でなければならぬと規定している。混合破碎物の塑性指数は、いずれの場合も、NP(Non Plastic)であった。構成材料からして、粘土分の混入があるとしても、ごく僅かであると考えられ、粘土分混入による支持力低下の懸念はない。

(5) 混合破碎物の支持力

a) スラッジの混合割合の影響

アスファルト舗装要綱によれば、下層路盤に粒状材料を用いる場合、修正 CBR20%以上の支持力が望まれる。混

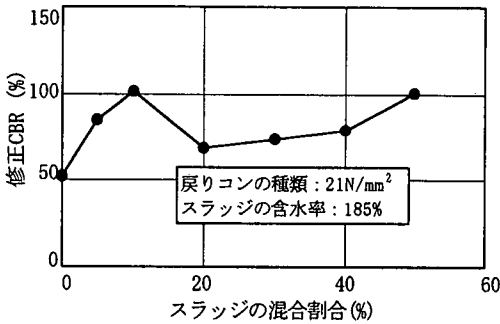


図-6 スラッジの混合割合と修正CBRの関係

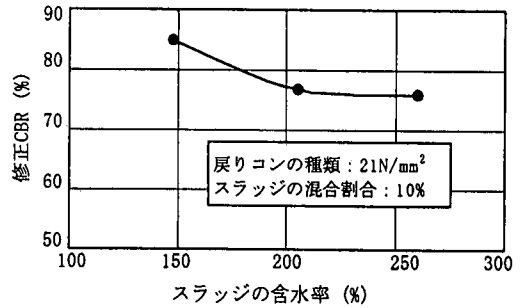


図-7 スラッジの含水率と修正CBRの関係

合破砕物については、条件によって支持力が異なると考えられるため、条件を様々に設定して、修正 CBR 試験を行なった。図-6 は、戻りコンの種類およびスラッジの含水率を一定とし、戻りコンに混合するスラッジの割合を変えた場合の修正 CBR を示している。試験は、破砕後ただちに、非水浸で行なった。

戻りコンのみ（スラッジ混合割合：0%）を硬化させて、破砕したものの修正 CBR は 52%であり、下層路盤材として要求される 20%以上の規格を満たしている。ただし、上層路盤材の規定値である 80%以上には届いていない。この結果は、戻りコンを単独で使用しても、下層路盤材としてならば、十分適用可能であることを示している。とくに、本実験では、戻りコンの粗骨材として、川砂利を用いており、もし、それが碎石であるならば、より大きな支持力を示す可能性は高い。

戻りコンにスラッジを混ぜた混合破砕物の修正 CBR は、混合割合によって異なる値を示すが、戻りコン単独に比べ、おしなべて大きい。とくに、混合割合 10%の場合には、戻りコン単独を大きく上回って、100%を超える修正 CBR を示している。また、これより混合割合を増やした場合に、修正 CBR は小さくなるものの、さらに増やせば、再び修正 CBR が増大する傾向に転じ、実験で設定した最大の混合割合 50%で、修正 CBR は 100%を超える。

スラッジの混合割合が 10%程度では、全体に占める戻りコンの割合が卓越し、粗骨材も多い。その粗骨材が骨格となり、その間隙を砕かれたモルタルさらには微粒のスラッジが埋めて、よく締め固まるため、支持力に優れると推察される。一方、スラッジの混合割合が 50%ともなれば、全体に占めるスラッジの容積割合が 4 割以上に達し、その分、骨格となる粗骨材が減少する。しかし、前述のように、スラッジは吸水性であって、水との親和性に富み、適切な含水状態であれば、それ自体でよく締め固まる。したがって、スラッジが間隙充填材としての役割を適度に果たす場合およびスラッジが主体となって密に詰まる場合に支持力が増大し、図のような結果が得られたと推察される。

もし、スラッジの混合割合を 50%より大きくすれば、さらに優れた支持力が得られる可能性もあるが、戻りコンとスラッジの混合において、材料分離が激しくなるのは明らかである。実験室では、混合物を型枠に詰め、硬化後に破砕して、均一になるまで混合し、路盤材料としての適性を判断する。したがって、材料分離はそれほど問題にならない。一方、実際に想定すれば、アジテータ車のドラム内で攪拌した混合物は、床の上に排出する。この際、スラッジの混合割合が大きければ、混合物は薄く広がり、おそらく中央部には骨材が溜まり、先端にはほぼ液体状の混合物が達する。これを適当な時期に破砕したあと、均一に混合できれば問題は少ないが、工程が増える。そのため、屋内実験の段階では、スラッジの混合割合は、10%程度が妥当であると判断することにした。

いずれにしても、戻りコンを単独使用するよりは、スラッジを混合した方が、路盤材としての支持力は確実に高まる。これは、戻りコンとスラッジとを一括して利用する方法を見い出そうとしている本研究にとって、非常に好ましい結果と言える。

b) スラッジの含水率の影響

天日乾燥スラッジは、一般に屋外に放置されており、降雨や日射などの影響を受け、含水率は大きく変動すると予想される。実際に、本実験用のスラッジを採取した生コン工場で、ヤードに積み重ねられている天日乾燥スラッジの含水率を 1 年以上にわたって測定したところ、表面から 20cm 程度の箇所、107~178%の範囲であった。実験に用いたスラッジは、さらに深い部分から採取しており、200%近辺の含水率となっている。

この含水率の変動による混合破砕物の支持力の違いを調べるため、採取してきた含水率 205%のスラッジをそのまま用いた場合、自然に乾燥させて 148%まで含水率を低めた場合および水を加えて含水率を 260%に高めた場合の 3 通りを設定して、修正 CBR を求めた。スラッジの混合割合は 10%であり、結果を図-7 に示す。

スラッジの含水率が大きいほど、混合破砕物の修正 CBR は小さくなる傾向を示すが、それほど顕著なものではな

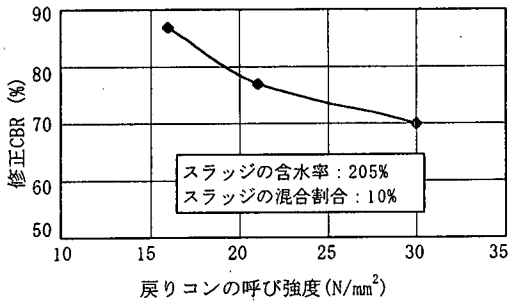


図-8 戻りコンの呼び強度と修正CBRの関係

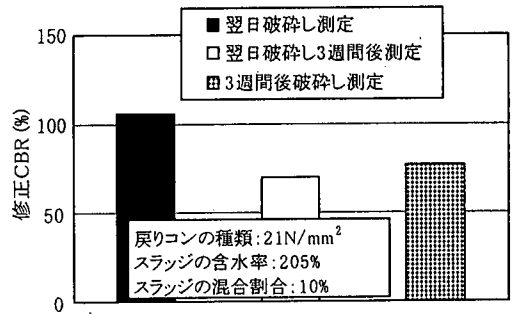


図-9 修正CBRに及ぼす破砕時期の影響

い. 前掲の図-5に示されるように、スラッジの含水率による混合破砕物の粒度分布の違いは小さく、そのため、支持力の差も小さいと考えられる。とくに、含水率を極端に260%まで高めても、下層路盤材としての修正CBRの規定値を十分に満たすとの結果は、実用上、スラッジの含水率の調整は必要ないことを示唆しており、意義深い。

c) 戻りコンの種類の影響

戻りコンの種類による影響を示したのが、図-8である。戻りコンの種類が異なっても、混合破砕物の修正CBRに顕著な差は見られず、いずれも下層路盤材としての規格を余裕をもって満たす。予想に反し、呼び強度の低いもののほど、相対的に大きな修正CBRを示したのは、前掲の図-5より、細かい粒子が多く、それが間隙充填材としての役割を果たしたためであると思われる。

d) 破砕時期の影響

以上の修正CBRは、混合コンクリートを型枠に詰め、翌日脱型して、3週間気中放置し、その後破砕してから求めた。破砕前に、比較的長期間、気中放置したのは、その間に水和が進行し、破砕後の支持力が高まると期待したからにほかならない。しかし、実際を考えれば、混合コンクリートを排出して、しばらくの間、そのままにしておくとするれば、続く排出のため、広大な敷地を要する。前の排出物の上に、新たな排出物を重ねれば、排出物はうずたかくなり、破砕が困難になる。長期間放置による水和の進行そのものは望ましいと思われるものの、破砕を困難にする一面もある。そのため、実際上は、排出した混合物を、できるだけ早い時期に破砕して、他の場所に移し、続く排出への場所を確保するのが望ましい。この際、懸念されるのは、早期に破砕した混合破砕物の支持力である。

この点を検討するため、混合コンクリートを型枠に詰め、翌日脱型したのち、ただちに破砕してみた。修正CBR試験は、破砕後、ただちに行なった場合と、破砕物を3週間放置した後に行なった場合との2通りとした。図-9に、その結果を示す。

ここでも予想外であるのは、脱型後、破砕して、ただ

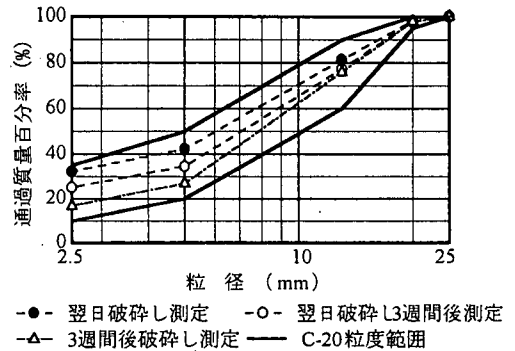


図-10 破砕時期の異なる混合破砕物の粒度分布

ちに測定した場合の修正CBRが、きわめて大きな値を示す点である。図-10は、破砕物の粒度分布を示している。脱型して破砕し、すぐに求めた粒度分布は、脱型3週間後に破砕したものに比べ、かなり細かく、その細かさが有効に働いて、優れた支持力特性を示したと考えられる。脱型後に破砕しても、そのまま3週間放置しておけば、水和により、細かい粒子同士が結合するためか、粒度は粗く、修正CBRは、脱型3週間後に破砕した場合よりやや小さい。それでも、下層路盤材としての規格は十分に満たしている。

この結果は、混合コンクリートがある程度硬化したならば、できるだけ速やかに破砕し、さらに、できるだけ速やかに路盤材として使用するのが有利であることを示唆している。使用の時期はともかく、破砕の時期を早めるべきとの結果は、実用上、非常に好ましい。ただし、以下の屋内実験では、資料の整合性を図るため、3週間後に破砕したものをを用いた。

(6) 種々の環境における性状

混合破砕物は、基本的に、優れた支持力特性を有すると認められたが、ストック中および使用後においては、様々な環境に晒される可能性があり、これらの条件下での性状を確認しておく必要がある。

寒冷地では、冬場の凍結などが懸念される。そこで、

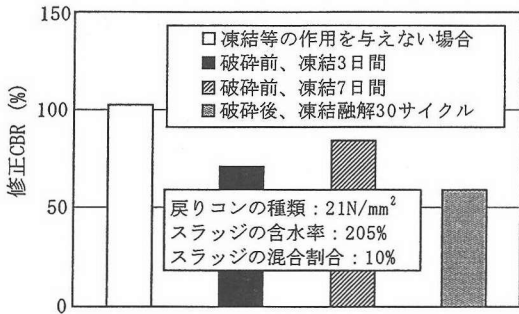


図-11 修正CBRに及ぼす凍結などの影響

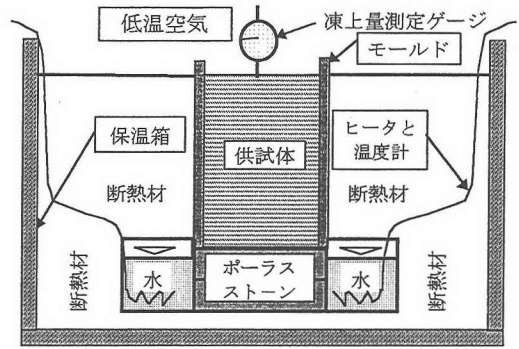


図-12 凍上試験装置

表-5 凍上試験に用いた材料

材 料	PI	最 大 乾燥密度 (g/cm ³)	最 適 含水比 (%)	粒 度 分 布 (通過質量百分率 %)		
				5mm	0.475mm	0.075mm
粘土	14.3	1.478	27.2	100.0	90.0	73.7
砂質粘土	11.0	1.400	28.0	100.0	64.5	33.0
クラッシュランC-40	NP	2.253	3.0	37.0	8.0	3.0
混合破砕物	NP	1.712	16.8	27.2	4.0	1.2

排出した混合コンクリートが凍結した場合および混合破砕物が凍結融解作用を受けた場合を想定した実験を行ってみた。前者については、混合コンクリートを型枠に詰めた後、 -10°C の冷凍室内に3日および7日間放置し、その後脱型して、3週間空中放置してから破碎した。後者では、混合コンクリートを型枠に詰め、翌日脱型し、3週間空中放置してから破碎したのち、 $-20^{\circ}\text{C}\sim+20^{\circ}\text{C}$ の槽内温度範囲で、気中凍結・気中融解の繰返し作用を30サイクル与えた。結果を図-11に示す。

混合コンクリートの状態で凍結した場合、たしかに、破砕物の修正CBRは小さくなる。しかし、下層路盤材としての規格は、十分に満たしている。予想に反して、凍結期間の長いものほど、支持力が大きいのは、破砕物が適度に細くなるためと考えられ、この点は、求めた粒度分布によっても確認された。混合破砕物に凍結融解作用を与えれば、用いた粗骨材が比較的低品質の川砂利であるためか、骨格となるべき材料も、損傷を受けてしまった。これも一因となり、支持力は低下する。しかし、下層路盤材としてみた場合、支持力は十分に確保されていると言える。

混合破砕物には、下層路盤材としての利用を想定している。路盤材は、非凍上性でなければならず、この点の確認も必要となる。図-12は、この検討に用いた装置である。

修正CBR試験と同様に、材料をモールド内に入れ、突き固める。突き固め回数は92回とした。モールドに詰めたまま、24時間吸水させ、これを供試体とする。供試体

の側面は断熱材で覆い、上面は開放しており、底面は水に接している。この装置を冷凍庫および気中凍結・気中融解方式の凍結融解試験機に設置し、凍上性を調べた。

冷凍庫を用いる凍結試験では、庫内の温度を -12°C としており、底部の水温は $+6^{\circ}\text{C}$ である。凍結時間は48時間とした。また、凍結融解試験では、槽内温度を $-20^{\circ}\text{C}\sim+20^{\circ}\text{C}$ 、水温を $+10^{\circ}\text{C}$ とし、10サイクルまで行なった。1サイクルの所要時間は、約11時間である。いずれの試験とも、凍結時で終了し、凍結深度を測定した。凍上量をダイヤルゲージで求めており、これを凍結深度で除した値を凍上率とする。

路盤材の凍上性に関しては、判定基準が明確でないため、他の材料との比較を行う。表-5は、使用した材料を示しており、凍上率の結果が、図-13である。

凍結試験の場合、混合破砕物の凍上率は、粘土や砂質粘土に比べ、きわめて小さな値となっており、直接的な比較の対象となるクラッシュランと比べても、若干小さい。一方、凍結融解試験の場合は、凍結融解作用によって、混合破砕物がある程度破壊して細くなるためか、混合破砕物の凍上率は、クラッシュランを上回る。しかし、実際の路盤、とくに下層路盤において、凍結することはあっても、一冬に凍結融解を繰り返すとは考え難い。そのため、凍結融解試験の結果を過大視する必要はなく、凍結試験の凍上率でもって、混合破砕物の凍上性は、クラッシュランと同程度であると判断しても差し支えないと思われる。

路盤材料にとって、耐水性も重要になる。これまで掲

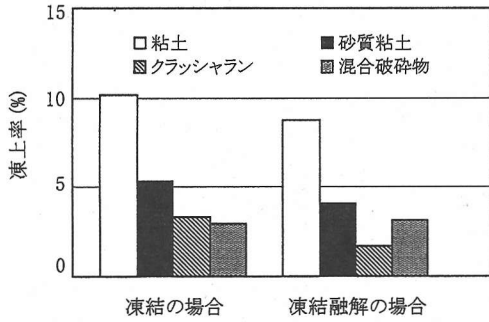


図-13 各種材料の凍上率

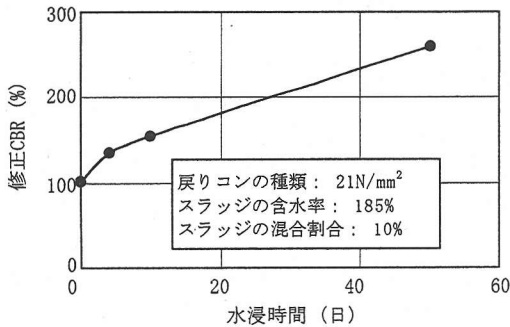


図-14 水浸時間と修正CBRの関係

げた混合破砕物の修正 CBR は、すべて非水浸のもとで求めた値であり、水浸の条件でも、支持力特性を検討しておく必要がある。図-14 は、水浸した場合の混合破砕物の修正 CBR を示している。

一般の路盤材料では、水浸によって支持力が低下する傾向にあるのに対し、混合破砕物の修正 CBR は、水浸時間の経過とともに増大し、50 日水浸では、200%を超え、異常と表現できるほどに高い。混合破砕物には、主として戻りコンに由来する未水和のセメントが含まれ、これが水浸期間中に水和して、高い支持力をもたらしたのは疑いない。この結果は、混合破砕物の優れた耐水性を示している。

4. 試験路盤

戻りコンとスラッジとを一括して路盤材に利用する方法に関し、屋内実験的には、十分可能であるとの結果が得られた。これをもとに、実用性を検討するため、混合破砕物を実際に生コンプラントで作成し、アスファルトプラントでこの材料を用いた試験路盤を築造してみたことにした。

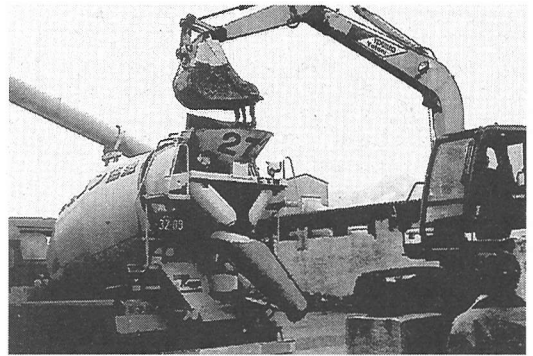


写真-2 ドラムにスラッジを投入

(1) 混合破砕物の作成

生コンプラントでの混合破砕物の作成は、図-1 の工程に従った。最初の工程である戻りコンを積んでいるアジテータ車のドラム内へのスラッジの投入は、写真-2 に示すように、バックホウで行う。この際、問題となるのは、混合割合の確保である。屋内実験では、戻りコンの質量に対して、所定の混合割合となるよう、スラッジを質量で計量して、混合した。プラントでは、コンクリートをまったく荷卸しできずに帰社した場合は別として、戻りコンの量を正確に把握するのは難しく、ドラム内を覗いて、残っているコンクリートの容積を推量するしか手はない。それを、質量に換算し、所要のスラッジを質量で計量して混合することも考えられるが、その計量はきわめてやっかいとなる。そのため、容積で、混合することとした。具体的には、あらかじめ、バックホウのバケット 1 杯分が、どの程度の容積となるかについて、見当をつけておき、目分量で、所要のスラッジを投入する。スラッジの混合割合は、推量した戻りコンの容積に対し、2 割程度とした。屋内実験で最も望ましいと判断された質量割合 10%より、多少大きい混合割合（質量で約 15%）であるが、スラッジをより多く消費しようとの意図による。

表-6 は、使用した戻りコンおよびスラッジを示しており、戻りコンの品質およびスラッジの含水率は一定でない。合計 10 回にわたり、20m³ 程度の混合物を練り混ぜた。練り混ぜは、ドラムを高速で回転させることにより行い、この攪拌でもって、比較的短時間でも、両材料は良好な混合状態となるのを確認している。

混合コンクリートは、骨材貯蔵用として空いていた屋根付きのストックヤードに排出した。破砕時期として、屋内実験では 3 週間後を基本としたが、排出した翌日も、問題ないとの結果も得られており、原則として、翌日に混合物を破砕した。排出された混合物は、流動して、薄く平らになり、この破砕には、写真-3 のように、シヨ

表-6 試験路盤に使用した戻りコンとスラッジ

No.	戻りコン		天日乾燥スラッジ	
	種類	量(m ³)	含水率(%)	量(m ³)
1	16 - 8-25-H	0.5	167	0.1
2	25.5-18-25-N	3.0	178	0.6
3	27 -18-28-N	5.0	186	1.0
4	25.5-18-25-N	3.0	186	0.6
5	18 -18-25-N	3.5	181	0.7
6	16 -15-25-N	1.0	181	0.2
7	21 -18-25-N	1.0	181	0.2
8	16 - 8-40-N	1.0	169	0.2
9	18 -18-25-N	2.0	169	0.4
10	18 -18-25-N	0.5	141	0.1
合計		20.5		4.1
平均			174	

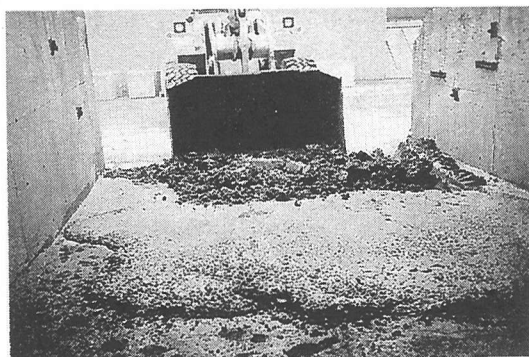


写真-3 混合コンクリートの破砕

ベルローダを用いたが、あたかも除雪をするかのように、ショベルで下からすくい上げただけで、混合物は破砕した。しかも、大割りという程度ではなく、比較的細かく破砕している。ただし、目に付く程度の大きな塊も混在していた。

このように、混合破砕物の作成には、特別な装置・機械を要せず、手の空いている従業員が作業にあたるだけで事は済み、経済性に優れていると言える。

(2) 試験路盤の築造

生コンプラントで作成した混合破砕物を、アスファルトプラントにダンプで運び込み、試験路盤を築造する。路盤の幅は、3.5mとし、長さを8mとした。厚さは18cmを目標としている。比較のため、クラッシュラン C-40を用いて、同一規模の碎石路盤も築造した。

施工は通常と同様であり、材料を所定の場所に搬入した後、モータグレーダで敷き均し、転圧する。転圧は2段階で行われ、初期転圧には、10tのマカダムローラを、二次転圧には、同じく10tのタイヤローラを用いた。転圧に際しては、適当量の水を散布したが、散布量につい



写真-4 試験路盤の転圧

ては、従事している技術者の判断に委ねた。写真-4は、タイヤローラによる転圧の状況を示しており、左手前が碎石路盤、右奥が混合破砕物を用いた路盤である。

敷均しおよび転圧を行なった機械のオペレータによれば、混合破砕物に関するこれらの作業は無理なく行われ、施工性についての問題はなく、碎石と同様に扱ってもよいとの見解であった。また、混合破砕物の場合、粉分が多く、よく締め固まるとの感想でもあった。事実、混合破砕物を転圧した面は、密実でよく締まっている感があり、平坦性も優れていた。粒度の偏りなどに起因する締固め不良箇所もわずかであり、碎石路盤に比して、むしろ良好な仕上がりであるように見受けられた。

(3) 試験路盤の性質

築造した試験路盤については、ベンケルマンビーム試験によるたわみ量、平板載荷試験による支持力係数および現場密度試験による乾燥密度を測定した。結果を表-7に示す。

碎石路盤に比し、混合破砕物を用いた路盤のたわみ量は小さく、支持力係数は非常に大きい。したがって、混合破砕物を用いた路盤は、荷重による変形が少なく、支持力もきわめて優れていると評価できる。

混合破砕物の乾燥密度は、碎石に比して小さい。この特質を活かし、軟弱な路床の上に構築する路盤の材料として用いることも考えられる。

(4) 試験路盤に用いた材料の屋内試験

試験路盤に用いた材料を実験室に搬入し、粒度、PIおよび修正 CBR を求めた。用いた材料の路盤材としての適性や試験路盤における締固めの良否の判断が、この試験の目的となる。

PIについては、混合破砕物およびクラッシュランともに、NPであり、粘土分混入の問題はみられない。

混合破砕物の粒度試験によれば、最大寸法が80mm程

表-7 試験路盤の結果

材料の種類	わたみ量 (mm)	支持力 係 数 (kgf/cm ²)	現 場 乾燥密度 (g/cm ³)	締固め度 (%)
クラッシュラン	1.30	18.0	2.050	100
混合破砕物	1.18	43.2	1.676	97

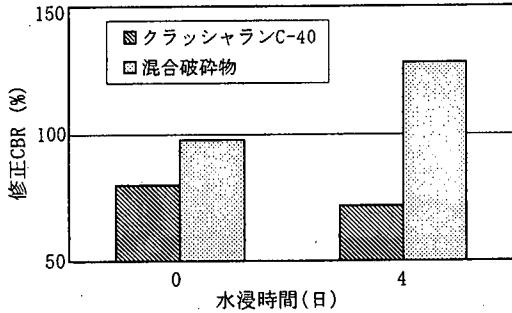


図-15 試験路盤に用いた路盤材の修正CBR

度であり、中には 100mm 程度の比較的大きな塊も混在していた。最大粒径が大きくなれば、施工管理が難しくなるため、アスファルト舗装要綱では、下層路盤材の場合、最大粒径を 50mm 以下とするのが望ましいとしている。ただし、やむを得ないときは、100mm 程度まで許容してよいと注釈しており、本試験で作成した混合破砕物は、許容値に近かったことになる。このような粒度分布でも、施工は無理なく行われ、支持力も十分であった。したがって、混合破砕物の場合、比較的大きな塊が含まれていても、問題は少ないと思われる。

修正 CBR の試験結果を、図-15 に示す。混合破砕物の修正 CBR は、碎石を上回っており、とくに、水浸の条件では、碎石の修正 CBR が非水浸に比べて低下するのに対し、混合破砕物の場合は増加する傾向にあり、支持力のみならず、耐水性にも優れていることを如実に示している。

締め固め試験により求まる最大乾燥密度は、混合破砕物の場合、1.722g/cm³であった。試験路盤の乾燥密度が、表-7のように、1.676g/cm³であり、したがって、試験路盤における締固め度は、97%となる。所要の締固め度は、一般に95%とされており、これを確保できたことは、通常の転圧方法でも、適切な締め固め状態となることを示しており、実用上、きわめて貴重な資料であると言える。

この試験で用いた混合破砕物は、生コンプラントで作成しており、屋内で作成した場合に比べ、品質確保の点から、不利な条件が多々あった。すなわち、戻りコンの品質やスラッジの含水率が一定ではなく、両者の混合も目分量で、所要の混合割合となっていたかは定かでない。さらに、混合して排出後、比較的短時間で破砕しており、硬化は十分でなかったと思われる。比較的大きな塊が残

留し、堆積された混合破砕物の品質が、場所によって異なっていたことも、大いに考えられる。

それにもかかわらず、生コンプラントで作成した混合破砕物は、大きな修正 CBR を示し、試験路盤での支持力にも優れていた。したがって、生コンプラントでの混合破砕物の作成に際し、それほど細心の注意を払わなくても、所望の混合破砕物が得られることになり、実用上、きわめて好都合な結果と言える。

5. 再生路盤材の実用化

屋内実験および試験路盤で得られた良好な結果をもとに、岩手県生コンクリート協同組合は、混合破砕物を再生路盤材と名付け、その製造と販売に着手した。その実施は、組合内のある工場が担当しており、事業化にあたって、新たに導入した機械は、スラッジを投入するためのバックホウのみである。投入箇所が比較的高所になるため、バックホウが乗る足場を設け、また、破砕物中の大きな塊を取り除くための 80mm ふるいも準備したが、設備投資はそれほど多額ではない。

組合の調査によれば、組合員全工場で発生する戻りコンとスラッジは、ほぼ等量であり、再生路盤材を製造する工場も、同様の事情である。再生路盤材を製造する場合、使用する戻りコンとスラッジとでは、前者が多い。そのため、製造する工場のみでは、両者のバランスが取れず、近隣の工場から戻りコンを搬入することにした。この際、戻りコンを廃棄物として、有料で引き取るため、産業廃棄物中間処理業の資格が必要となり、これを取得した。

資格の取得にあたっては、再生路盤材が環境に対して悪影響を与えないことを証明する必要があり、再生路盤材の溶出試験を実施した。試験は、昭和 48 年環境庁告示 13 号「産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法」に従って行ない、表-8 に示す結果が得られた。いずれの項目も、判定基準を満たしており、再生路盤材に有害物質が含まれているとしても、きわめて微量であって、問題は見られない。

再生路盤材の製造にあたっては、戻りコンに対するスラッジの混合割合を容積で3割程度としている。試験路盤のときより、さらに大きい混合割合であるが、スラッジを多く使いたいとの意図による。これにより、懸念される品質については、公的機関に試験を依頼して調べており、結果を表-9 に示す。

きわめて大きな修正 CBR が得られ、懸念は払拭された。屋内実験と異なり、戻りコンには碎石が含まれ、また 4 日水浸の試験条件であることも、極端に大きな値につながったと考えられる。製造した再生路盤材の支持力特性

表-8 再生路盤材の溶出試験結果

計量対象	計量方法	判断基準(mg/l)	試験結果(mg/l)
水素イオン濃度 (PH)	JIS K 0102-12.1	—	12.4
カドミウム及びその化合物	JIS K 0102-55.2	0.100 以下	0.005 未満
鉛及びその化合物	JIS K 0102-54.2	1.000 以下	0.010 未満
六価クロム化合物	JIS K 0102-65.2	0.500 以下	0.020 未満
砒素	JIS K 0102-61.2	0.500 以下	0.001 未満
全シアン	JIS K 0102-38.1.2	1.000 以下	0.100 未満
有機リン	昭和49年環境庁告示64号	1.000 以下	0.100 未満
総水銀	昭和49年環境庁告示59号	0.005 以下	0.005 未満

表-9 再生路盤材の性質

表乾比重	単位容積 質量 (kg/l)	修正 CBR (%)	最大 乾燥密度 (g/cm ³)	PI
2.34	1.62	189	1.78	NP

表-10 再生路盤材の使用例

No.	使用量(m ²)	用途	使用箇所
1	126	舗装用路盤材	事業車用駐車場
2	40	舗装用路盤材	事務所駐車場
3	72	住宅基礎埋戻し用	店舗付き住宅基礎
4	24	舗装用路盤材	一般住宅敷地
5	104	舗装用路盤材	ディーラー駐車場
6	137	舗装用路盤材	宅地造成地の私道

に関しては、当研究室でも、定期的に測定しており、変動は見られるが、修正 CBR は 80%以上で推移しており、問題はない。むしろ、当初の想定を変更し、上層路盤材として利用することも、検討に値すると言えようである。

なお、戻りコンとして、軽量コンクリートが搬入された時があり、支持力が心配されたため、再生路盤材の修正 CBR を求めてみた。その結果、非水浸で 90%、4 日間水浸で 142%の修正 CBR が得られ、戻りコンが普通コンクリートの場合と同等の支持力を示した。再生路盤材の材料として、ほとんどの戻りコンが適用可能であることを示した例と言える。

1997 年 9 月に製造を開始し、1 年半余で、合計 590m³の再生路盤材が得られた。このうち、550m³が販売されており、主な使用例を表-10 に示す。すべて、民間工事での使用であり、施工業者からは、普通に敷均しおよび転圧を行なっても、よく締め固まり、路盤材として優れているとの評価を得ている。No.6 はそれまでの実績や試験値をもとに、再生路盤材を舗装の上層路盤材として適用した例である。

6. あとがき

本研究では、戻りコンとスラッジを一括して、道路用の路盤材として利用する方法を考案し、その適性を屋内試験および試験路盤によって検討した。得られた結果によれば、本材料の品質および施工性などは良好であり、路盤材としての適性に優れていると言える。この結果をもとに、本方法は、既に実用化されている。経済性に関しては、詳細を記述できないが、設備投資は比較的少額で済み、これまで要していた廃棄処理の費用が大幅に削減され、代わりに、他からの戻りコンを有料で引き取っ

て、さらに有価物に変身させるのであるから、経済的であるのは、明らかである。

ただし、課題も存在する。その最たるものは、製造量が限られている点であり、大口の需要に応えられず、現状では、小口の使用に限定されている。そのため、世に認知されているとは言い難く、販路を見いだすのに、苦慮している状態にある。廃棄物の有効利用という社会的要請に合致した材料であり、製造量を増大させ、公共工事などで採用されるようになれば、事情は好転するに違いない。もちろん、製造量の増大のためには、戻りコンおよびスラッジを大量に要し、それを人為的に増大させたのでは、本末転倒である。多くの工場で発生するそれらを集約すれば、大量生産が可能となるはずであり、組織的な取組みが望まれる。

謝辞：本研究遂行に多大なご協力を賜った岩手県生コンクリート協同組合および西岩生手コンクリート株式会社の各位に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート資源有効利用小委員会：コンクリートと資源の有効利用，pp. 1-92 - 1-95, 1998.
- 2) 日本コンクリート工学協会コンクリートスラッジの有効利用研究委員会：コンクリートスラッジの有効利用に関するシンポジウム（報告書），pp. 1-3 - 1-9, 1996.
- 3) 月岡 存：乾燥スラッジを混入したコンクリートの特性，セメント・コンクリート論文集，No.49, pp. 348-353, 1995.
- 4) 吉兼 亨，鯉江利夫，中島佳郎：セメント水和スラッジの

STUDY ON THE DEVELOPMENT OF BASE COURSE MATERIAL BY REUSING RETURNED CONCRETE AND SLUDGE

Jinxi ZHANG, Tadashi FUJIWARA and Keiichi MOROTO

More and more ready mixed concrete plants are puzzled by the disposal of returned concrete and concrete sludge. In present study, a recycling method of such waste is proposed as below. Sludge is thrown into the drum of a truck agitator in which returned concrete still remains, and then mixed by the rotation of drum. After mixing, the mixture is discharged. Hardened mixture is crushed and used as base course material of road. All of this procedure was imitated and the properties of the mixture were investigated in laboratory. The influence of sludge content, type of returned concrete and the water content of sludge etc. on the modified CBR of mixture was examined. The site test was also performed. All test results showed that this mixture is a good quality base material of road. Now this kind of material has been used as base course material in practical engineering.