平 22.都土木技術支援・人材育成センター年報　ISSN 1884-040X
Annual Report
C.E.S.T.C., TMG 2010

8．埋戻し後の再生砂（ＲＣ－１０）の強度増加に関する検討

Strength Characteristics of Backfilled RC-10

技術支援課　上野慎一郎、田中輝栄、峰岸順一、小林一雄

1．はじめに

東京都建設局の電線共同溝事業においては、埋戻し材として再生砂を使用することとしており、無電柱化推進に伴い再生砂の使用が多くなることが想定される。また、コスト削減及びリサイクルの観点からも埋戻し材として再生砂を利用することが求められている。

しかし、再生砂を埋戻し材として使用した箇所では掘削性が低下し再掘削時に埋設管を破損する恐れがあるなどの課題があり、コスト面だけでなく作業性に配慮した材料が供給されることが必要となる。そこで、再生砂について、その原料として最も多く用いられているセメントコンクリート発生材から製造した再生砂（以下、「Co 再生砂」という。）と他材料を混合し、それらの混合割合の違いによる再生砂の強度増加特性、再生砂の製造時期の違いによる品質のバラツキなどを検討したので報告する。

2．調査内容

(1)　強度増加に関する室内試験

長期強度について検討するため、CBR 試験、ハンドスコップによる掘削性試験を行った。

(2)　現場実験による施工性の確認

現場での施工性を確認するため、戸田橋実験場において、幅 50×長さ 120×深さ 70cm の土槽（覆土 10cm）を 4 個作製し、現場実験用の再生砂 4 種類を用いて埋戻し、ランマー転圧により締固めた後、施工直後、4 ヵ月後、13 ヵ月後の土研式円錐貫入試験、剣スコップによる掘削性試験、CBR 試験及びハンドスコップ掘削性試験を行った。

(3)　強度増加原因確認試験

再生砂の強度増加の原因を確認するため、走査型電子顕微鏡（以下、「SEM」という。）及びＸ線回折分析（以下、「XRD」という。）により、未水和セメントの水和反応の有無などの確認を行った。

3．使用材料

(1)　室内で混合した材料（以下、「混合材料」という。）

Co 再生砂、アスファルトコンクリート発生材から製造した再生砂（以下、「As 再生砂」という。）、第二種改良土（以下、「改良土」という。）及びしゃ断層用砂（以下、「しゃ断砂」という。）を購入し、室内で混合割合を変えて使用した。詳細は表－１のとおり。

(2)　出荷状態で使用した材料（以下、「プラント別材料」という。）

8 プラントから 3～4 回購入し、出荷状態のまま使用した。詳細は表－2 のとおり。混合割合は聞き取りによる目安の割合である。

4．強度増加に関する室内試験結果

(1)　混合材料の CBR 試験

舗装調査・試験法便覧 S041 にならって実施した。供試体は 4 日間水浸ではなく、1)に示す 6 種類の養生条件（各 1 供試体、計 72 供試体）とした。

表－1　混合材料

	混合割合	現場実験材料
No.1	Co再生砂 100%	再生砂1
No.2	Co再生砂　75%　As再生砂　25%	
No.3	Co再生砂　50%　As再生砂　50%	再生砂3
No.4	Co再生砂　25%　As再生砂　75%	
No.5	As再生砂 100%	再生砂2
No.6	Co再生砂　75%　第二種改良土　25%	
No.7	Co再生砂　50%　第二種改良土　50%	再生砂4
No.8	Co再生砂　25%　第二種改良土　75%	
No.9	第二種改良土 100%	
No.10	Co再生砂　75%　しゃ断層用砂　25%	
No.11	Co再生砂　50%　しゃ断層用砂　50%	
No.12	しゃ断層用砂 100%	

表－2　プラント別材料

プラント	混合割合		その他の混合材料
A	Co 70%	As 30%	特殊添加材 (六価クロム対策)
B	Co 40%	As 30% 砂 30%	－
C	Co 70%	As 30%	－
D	－	As100%	－
E	Co 50%	土 50%	石灰(含水比調整)
F	Co 100%	－	－
G	Co 70%	砂30%	－
H	Co 70%	As30%	－

1)　養生条件

① 養生なし（供試体作製直後（初期値））

② 水浸養生 0日、室内養生 3ヶ月

③ 水浸養生 0日、室内養生 4ヶ月

④ 水浸養生 1日、室内養生 3ヶ月

⑤ 水浸養生 1日、室内養生 4ヶ月

⑥ 水浸養生 3ヶ月、室内養生 0日

2)　Co再生砂の強度増加確認

Co再生砂100%のCBRと経過日数の関係を図－1に示す。Co再生砂は養生条件によらず日数の経過に従い強度が増加した。

3)　混合割合によるCBR値の傾向

Co再生砂に混合した材料の割合と3ヶ月養生した供試体によるCBRの関係を図－2～4に示す。

①　Co再生砂＋As再生砂のCBR（図－2）

As再生砂の混合割合が多いほど強度は低下する。

混入率 50%以上では初期値からの強度増加はほとんどなかったものの、As再生砂100%でも若干の強度増加があった。

②　Co再生砂＋改良土のCBR（図－3）

全ケースで初期値より強度が増加した。

改良土の混合割合が50%以下ではCo再生砂100%より強度が増加し、50%を超えると減少に転じる傾向がある。また改良土の方がCo再生砂よりCBRは小さい。

③　Co再生砂＋しゃ断砂のCBR（図－4）

しゃ断砂を混合すると初期値より強度が増加した。特にしゃ断砂を25%混合するとCo再生砂100%より強度が増加する。しゃ断砂100%では強度増加は見られない。

④　Co再生砂との混合割合による評価

Co再生砂にAs再生砂を加えていくとCBRは低下するが、改良土、しゃ断砂では25%または50%混合まで上昇し、その後減少に転じる。このように混合する材料により強度の低下傾向は異なる。

CBRは、As再生砂を混合した再生砂が小さく、改良土を混合した再生砂が最も大きくなった。

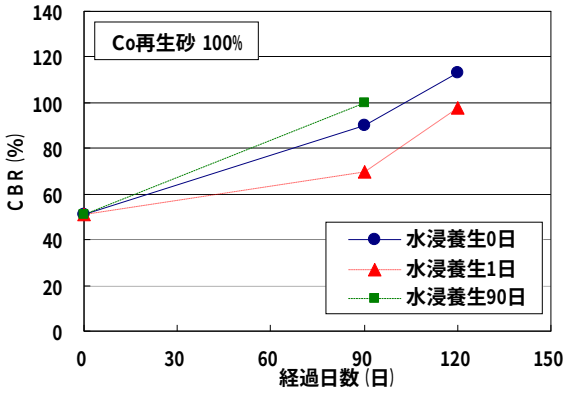
(2)　混合材料のハンドスコップ掘削性試験

ハンドスコップ（写真－1）を用いて(1)のCBR試験後のモールド（容量2.2L）から試料を全て掘削するまでの時間を測定した。試験結果を図－5～7に示す。

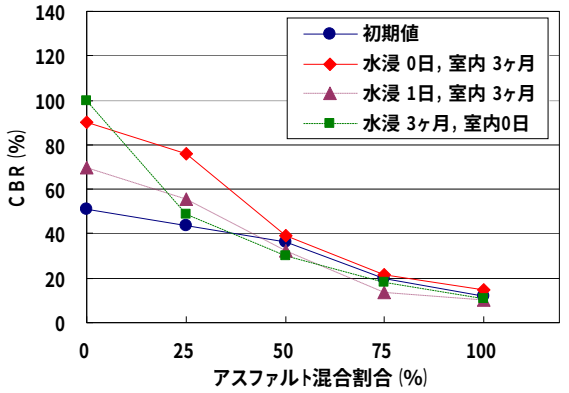
As再生砂、しゃ断砂を混合した材料は、その混合割合が多いほど掘削時間が低下した。しかし、改良土を混合するとCo再生砂より掘削時間が増加した。

As再生砂の混合はCBR、掘削性ともに良好な結果となった。また、しゃ断砂の混合ではCBRは増加したが、掘削性は向上し、掘削時間がAs再生砂の混合よりも短くなった。

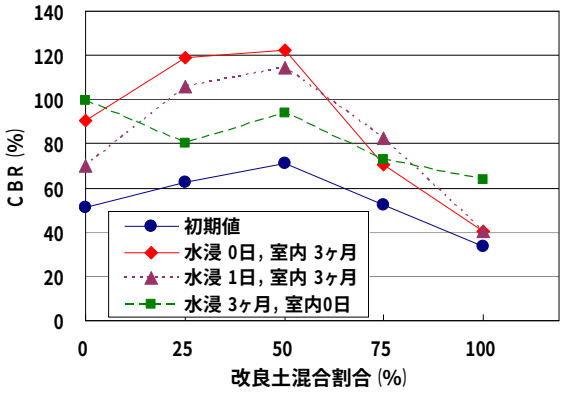
また初期値と3ヶ月養生後の比較では、As再生砂、またはしゃ断砂を 50%以上混合すれば掘削時間にほとんど変化はなかった。しかし、改良土の混合ではどの条件も掘削性が悪化した。時間経過によるハンドスコップ掘削時間の増加を緩和するには、しゃ断砂、As再生砂の混合が有効である。



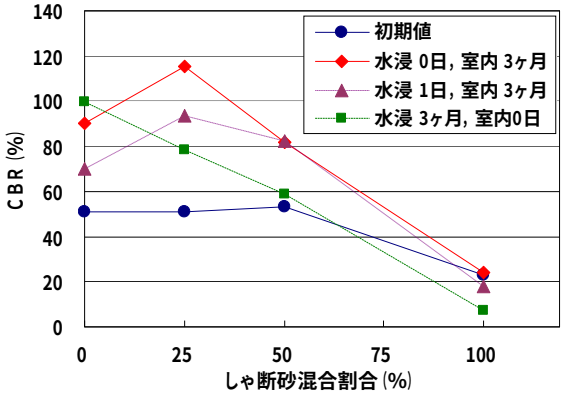
図－1　Co 再生砂 100%の経過日数と CBR



図－2　アスファルト混合割合と CBR



図－3　改良土混合割合と CBR

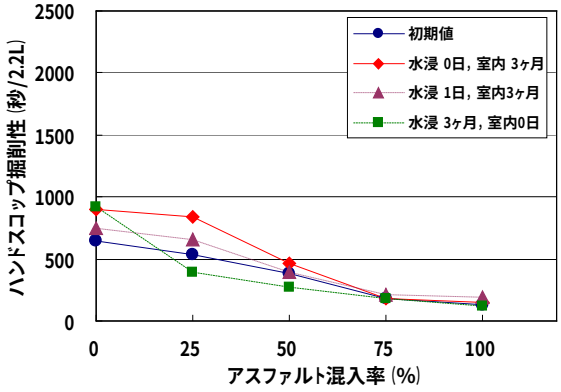


図－4　しゃ断砂混合割合と CBR

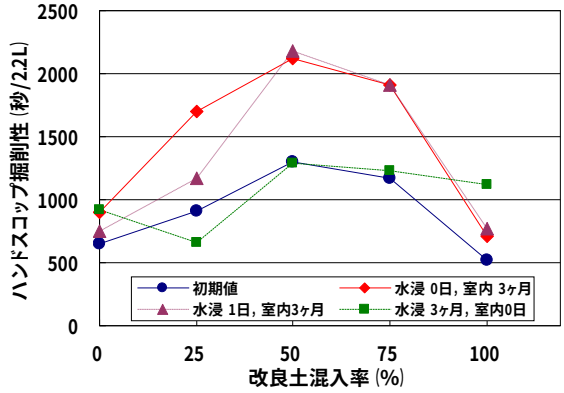
(3)　混合材料の CBR とハンドスコップ掘削性

CBR とハンドスコップ掘削性の関係を図－8 に示す。混合材料別に寄与率（R^2）を求めると、As 再生砂 0.940、改良土 0.654、しゃ断砂 0.854 であった。しゃ断砂を混合した再生砂の回帰式の傾きは最も小さく、CBR が大きくても掘削時間は他の混合材料より短くなる傾向にある。混合する材料により傾向が異なるものの、CBR とハンドスコップ掘削性には高い相関があった。混合されている材料を把握することができれば CBR から掘削性を推測することが可能である。

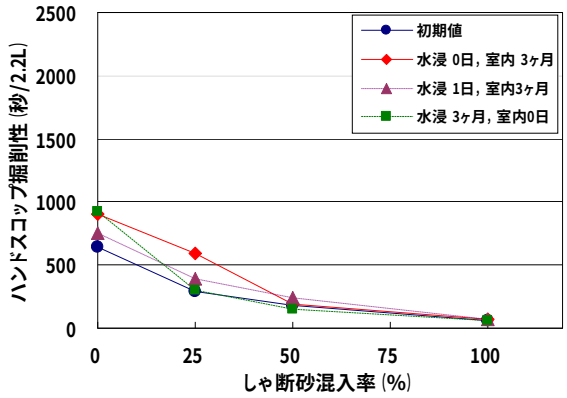
写真－1　ハンドスコップ



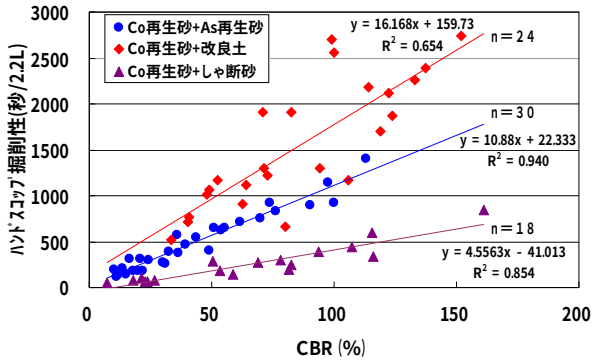
図－5　As 混入率とﾊﾝﾄﾞｽｺｯﾌﾟ掘削性（養生 3 ヶ月）



図－6　改良土混入率とﾊﾝﾄﾞ掘削性（養生 3 ヶ月）



図－7　しゃ断砂混入率とﾊﾝﾄﾞ掘削性（養生 3 ヶ月）



図－8　CBR とハンドスコップ掘削性

(4)　プラント別材料の強度増加確認

混合材料と同様に CBR 試験及びハンドスコップ掘削性試験を行った。CBR 試験は、1)に示す 6 種類の養生条件（各 1 供試体、計 156 供試体）で実施した。ハンドスコップ掘削性試験は条件③、⑥で実施した。

1)　養生条件

① 養生なし（供試体作製直後（初期値））

② 水浸養生　0 日、室内養生 28 日

③ 水浸養生　0 日、室内養生 56 日

④ 水浸養生　4 日、室内養生　0 日

⑤ 水浸養生 28 日、室内養生　0 日

⑥ 水浸養生 56 日、室内養生　0 日

2)　プラント別、製造時期別の強度確認試験

①　CBR 試験結果

室内養生 56 日後のプラント別材料の CBR 試験結果を図－9 に示す。Co、As、砂を混合している試料Ｂが最も大きい値を示し、Co 再生砂のみの試料Ｆも比較的大きい傾向にあった。また土と石灰を混合した試料Ｅに 200%を超える試料があった。最小は As 再生砂のみの試料Ｄであった。各プラントの材料とも購入した時期の違いにより、CBR 値にバラツキがあることがわかる。変動係数は 0.12～0.60 であった。

CBR の最も大きかった試料Ｂの CBR の経時変化を図－10、11 に示す。試料Ｂは室内養生、水浸養生ともに時間の経過により強度が増加している。また養生 0 日では、CBR が 51.2～106.0%、養生 56 日後は CBR が 154.3～260.4%であり、同じプラントの製品でも製造時期により品質にバラツキがある。

次に混合割合が同程度の材料比較として、A、H（Co70%、As30%程度）の室内養生後の CBR の経時変化を図－12、13 に示す。このようにプラントが異なると混合割合が同程度であっても、強度増加の傾向が異なることを確認した。

②　ハンドスコップ掘削性試験結果

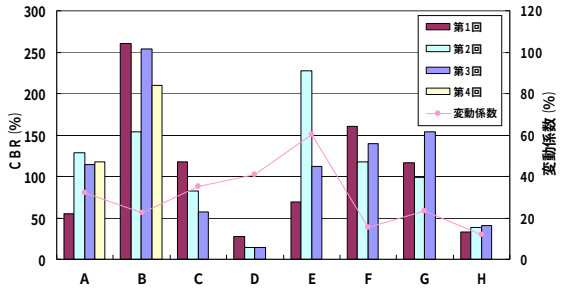
図－14、15 にプラント別材料のハンドスコップ掘削性試験結果（室内養生 56 日及び水浸養生 56 日）を示す。CBR の大きかった試料Ｇが最少の掘削時間であった。混合材料を砂のみとしているのはＧだけであることから、これは(3)に示すように砂の影響によるものと思われる。また CBR と同様、製造時期の違いによる掘削時間のバラツキが大きかった。

(5)　掘削性を向上させる材料混合について

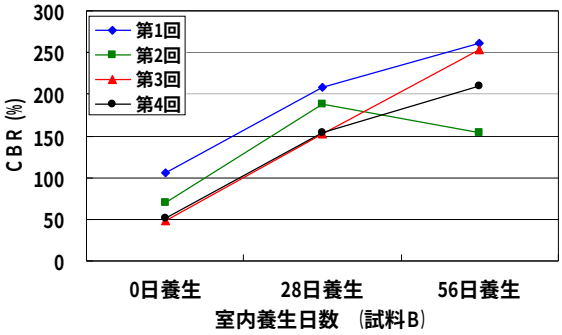
以上より、Co 再生砂は時間経過により強度増加し、掘削性が低下することを確認した。養生期間 4 ヶ月までの室内試験結果からは、Co 再生砂に As 再生砂またはしゃ断砂を混合することにより、掘削性の向上が可能である。

しかし、プラント毎あるいは製造時期により品質のバラツキが顕著であり、混合割合を指定しても期待する強度緩和、掘削性の向上が得られるとは限らない。

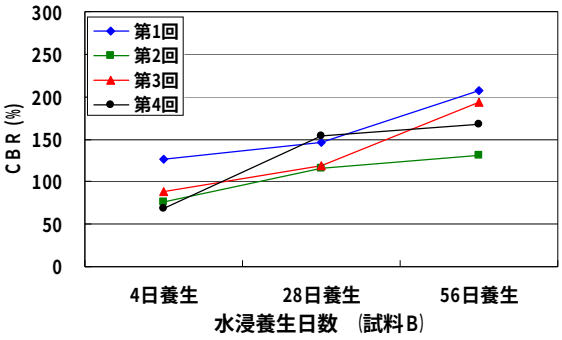
また改良土の混合では強度が大きく増加し、掘削性も低下するため、混合材料としては利用できない。



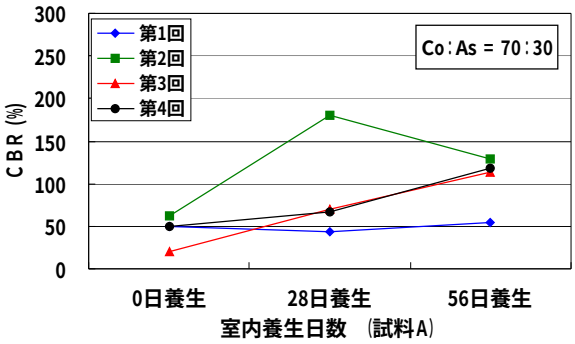
図－9　プラント別材料の CBR 試験結果（室内養生 56 日後）



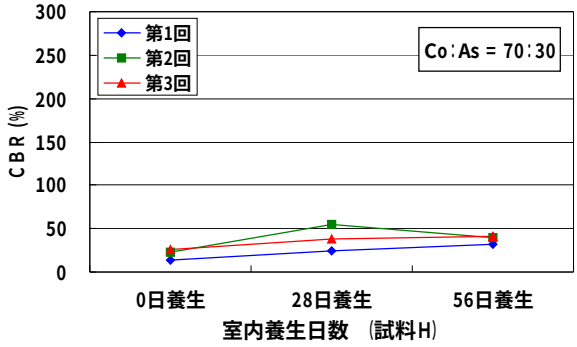
図－10　試料Ｂの CBR（室内養生）



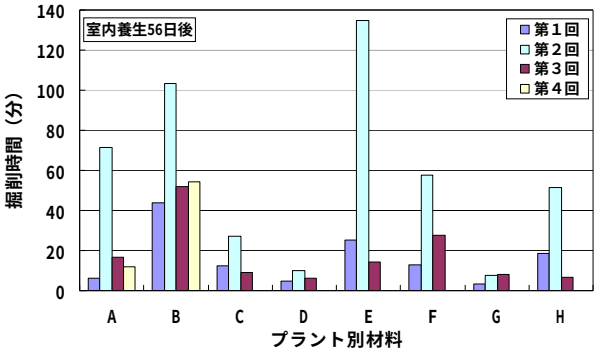
図－11　試料Ｂの CBR（水浸養生）



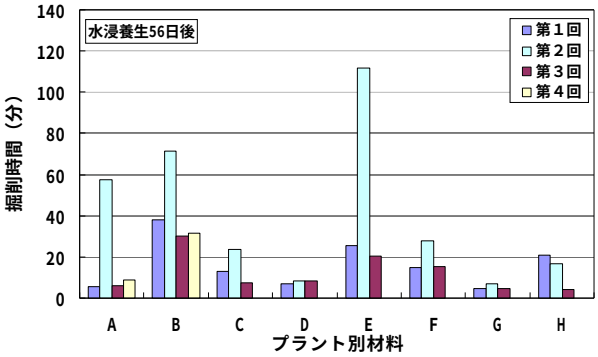
図－12　試料Ａの CBR（室内養生）



図－13　試料Ｈの CBR（室内養生）



図－14　プラント別材料のハンドスコップ掘削時間（室内養生 56 日後）



図－15　プラント別材料のハンドスコップ掘削時間（水浸養生 56 日後）

5.　現場実験による施工性の確認

表－1 に示す現場実験材料（再生砂 1～4）を用いて施工性の確認実験を行った。

施工は 1 層 30cm とし、2 層に分けランマー転圧により締固めた。1 層目転圧後、現場採取用の CBR モールドを設置し（写真－2）、2 層目を敷き均し、ランマー転圧した（写真－3）。土槽作製後、各土槽において、施工直後、4 ヵ月後及び 13 ヶ月後に土研式円錐貫入試験、剣スコップ掘削性試験、現場採取供試体による CBR 試験及びハンドスコップ掘削性試験を行った。

(1)　土研式円錐貫入試験

土研式円錐貫入試験の結果（打撃回数 Nd）を図－16 に示す。貫入量は 60cm であるが、50～60cm は掘削底面の強度に影響を受けていたため、0～50cm の平均値で整理した。

全ての再生砂で、13 ヶ月後の Nd 値が大幅に増加した。室内試験では強度増加の少なかった As 再生砂でも 300 回近い打撃回数となっており、Co を含む再生砂だけでなく As 再生砂の埋戻しでも長期強度が増加することが分かった。

写真－2　モールド設置状況

写真－3　ランマー転圧状況

写真－4　使用した剣スコップ

全ての再生砂の各層の Nd 値はしゃ断層用砂及び埋戻し用砂の基準値（16 回/10cm 以上）（道路占用工事要綱）を満足しており、再掘削を考慮しなければ、埋戻し材料としては適当な材料であると言える。

(2)　剣スコップ掘削性試験

土研式円錐貫入試験及び、2 層目（上層）に設置した CBR 試験用供試体の採取後、1 層目（下層）において剣スコップによる掘削性試験を行った。試験は剣スコップ（写真－4）を用いて人力で土槽を掘削し、18 リットル缶が掘削した再生砂で一杯になるまでの時間を測定した。剣スコップ掘削性試験結果を図－17 に示す。過去の実験から C-40 は 6 分程度、流動化処理土は 1 分程度、しゃ断砂は 30 秒程度の掘削時間である。[3)]

1)　剣スコップ掘削性試験結果

13 ヵ月後の掘削時間は、最短でも 8 分 57 秒（再生砂 2）と C-40 よりも大きくなった。また掘削時間の増加倍率（13 ヵ月後／施工直後）は、2.4～3.0 倍となり、掘削性は大きく低下した。4 ヵ月後との比較でも全ケースで増加倍率 1.5 倍以上となり 4 ヵ月後以降も掘削性の低下が進行していることを確認した。土研式円錐貫入試験と同様に、As 再生砂の埋戻しでも掘削性が悪化した。再生砂 4 は Nd 値が最も小さかったが、掘削時間は約 25 分と非常に大きな値となった。Co 再生砂に改良土を混合すると掘削性が極端に低下するため、改良土は再生砂の掘削性の向上には利用できないことを、現場実験結果からも確認した。

2)　掘削時間と Nd 値の関係

図－18 に剣スコップ掘削時間と剣スコップ掘削試験を実施した下層（30～40cm）の Nd 値の関係を示す。改良土を含み他材料と傾向の異なる再生砂 4 を除いたデータの寄与率（R^2）は 0.87 となった。また図－19 に剣スコップ掘削時間と 0～10cm の Nd 値の関係を示す。寄与率は 0.95。これらから掘削時間と Nd 値には高い相関があり、かつ表層 10cm の土研式円錐貫入試験により剣スコップ掘削時間が想定できることが確認できた。

(3)　現場採取供試体による試験

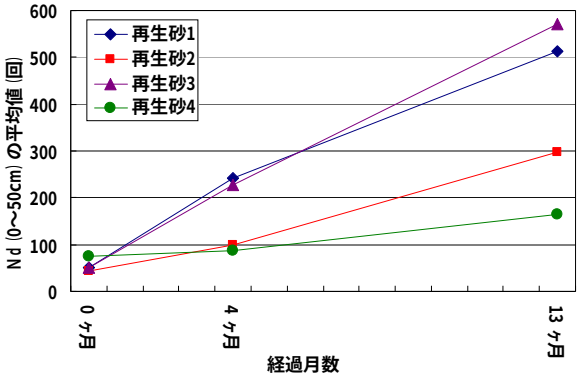
上層に設置した CBR 試験用供試体を採取し、水浸させずに CBR 試験及びハンドスコップ掘削性試験を行った。試験結果を図－20、21 に示す。

1)　現場採取供試体の CBR 試験

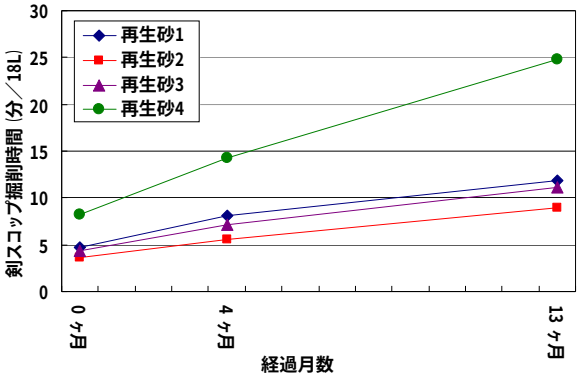
再生砂 1、4 は 4 ヶ月から 13 ヶ月後の増加はなかった。再生砂 2、3 は 13 ヶ月後も強度増加しており、As 再生砂を混合した材料で CBR 値が増加し続ける結果となった。

2)　現場採取供試体のハンドスコップ掘削性

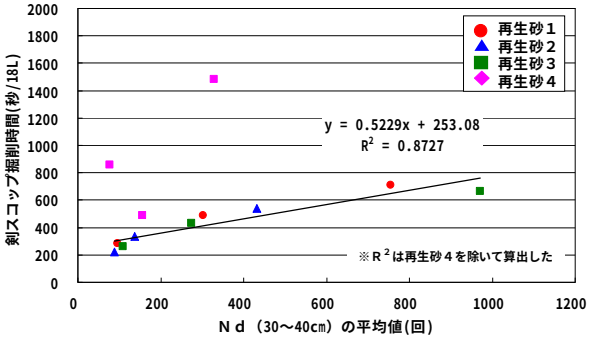
4 ヶ月後では再生砂 1、2、3 は変化がなく、再生砂 4 は減少したが、13 ヵ月後は全てのケースで施工直後より大きな値となった。特に Co50%、As50%の再生砂 3 は施工直後の 16 倍となり、室内試験結果とは異なり、As 再生砂の混合でも掘削性が低下することが確認された。



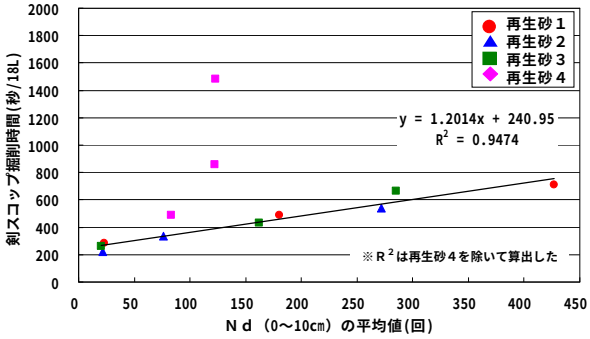
図－16　Nd(0～50cm)の平均値の経時変化



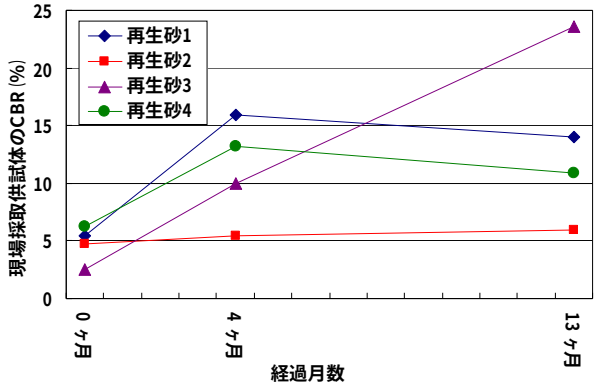
図－17　剣スコップ掘削時間の経時変化



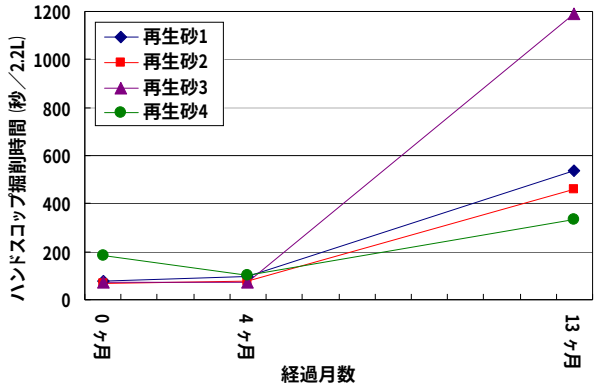
図－18　剣スコップ掘削時間と Nd(30～40cm)



図－19　剣スコップ掘削時間と Nd(0～10cm)



図－20　現場採取供試体 CBR の経時変化



図－21　現場採取供試体のハンドスコップ掘削時間の経時変化

6.　強度増加原因確認試験結果

SEM（写真－5）による観察及び粉末Ｘ線回折装置（写真－6）を用いた XRD を行い、未水和セメント鉱物の有無、水和物の生成の有無、その他ポゾラン反応やその原因物質の有無などを確認した。使用材料は 1 回目に購入したプラント別材料（8 試料）の CBR 試験結果、CBR 値の増加が大きかった 2 試料（B、F）の第 3 回購入試料とした。養生なしの試料及び室内養生 28 日の試料を用いたが、養生なし試料については、購入後に水和反応が進まないように真空凍結乾燥により水分除去を行った。

(1)　SEM による確認

試料Ｂの確認結果（養生なし、室内養生 28 日）を写真－7、8 に示す。参考に一般的なセメントの水和物（エトリンガイト）の例を写真－9 に示す。

養生なし試料から未水和セメント鉱物などは確認できなかった。しかし養生なし、養生 28 日の試料ともに観察倍率 3000 倍以上で形の崩れたエトリンガイトのような針状結晶が見られた。ただし、写真－9 に示した一般的な針状結晶（エトリンガイト）と比較すると

今回観察された針状結晶はかなり少ないことが分かる。

(2) XRD による確認

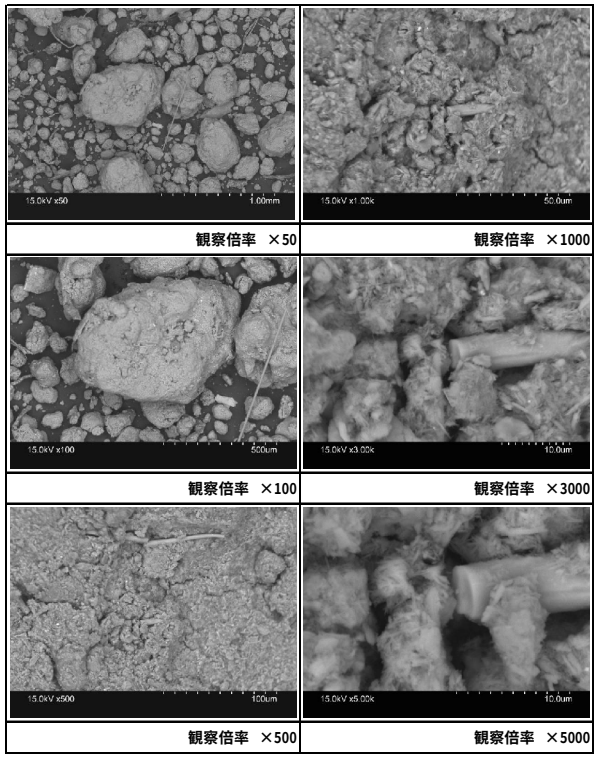
XRD の結果一覧を表－20、試料Bの結果を図－22、23 に示す。図表中の counts とはX線強度（電子数もしくは光子数）を表し、回折ピーク強度は 5,000 以上で「高い」、500 以下で「低い」と判断される。

養生なしの試料では、石英、長石類、雲母類の一般的な骨材成分の回折ピークが確認された、その他にセメント水和物もしくは石灰石の成分であるカルサイトが確認された。またセメントもしくは固化材の成分の一つである二水石こうが微量ではあるが確認された。しかし、ビーライトなどの未水和のセメント鉱物は確認されなかった。室内養生 28 日では養生なしと同様に一般的な骨材成分、カルサイト、二水石こうが確認された。その他に微少ではあるがエトリンガイト（500counts 以下）が確認された。

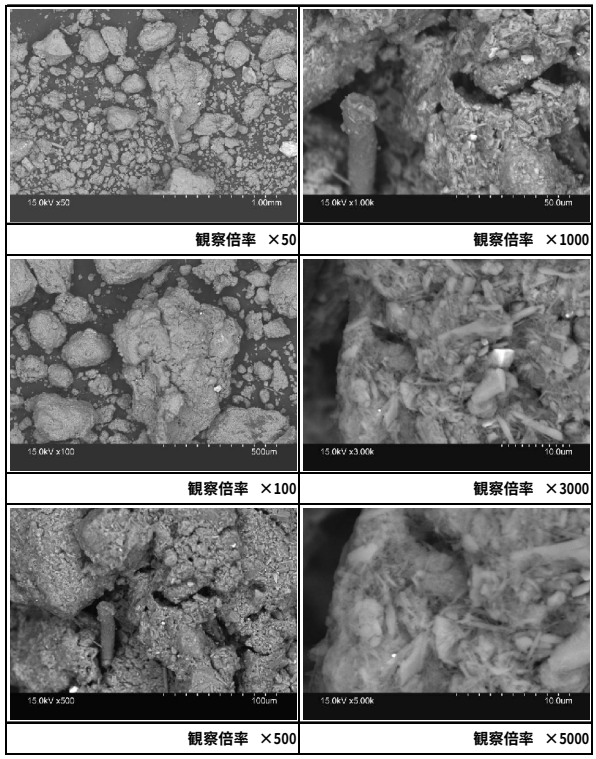
養生なし、養生 28 日ともに未水和セメント鉱物は確認されなかった。しかし、養生 28 日の試料にエトリンガイトが確認された。これは二水石こうの反応により生成された可能性が考えられるが、微量であるためこの反応以外に強度増加の要因があると考えられる。

写真－5　走査型電子顕微鏡（SEM）

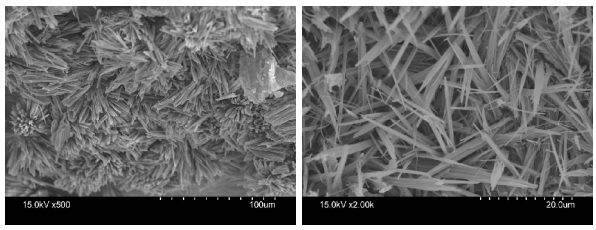
写真－6　粉末Ｘ線回折装置



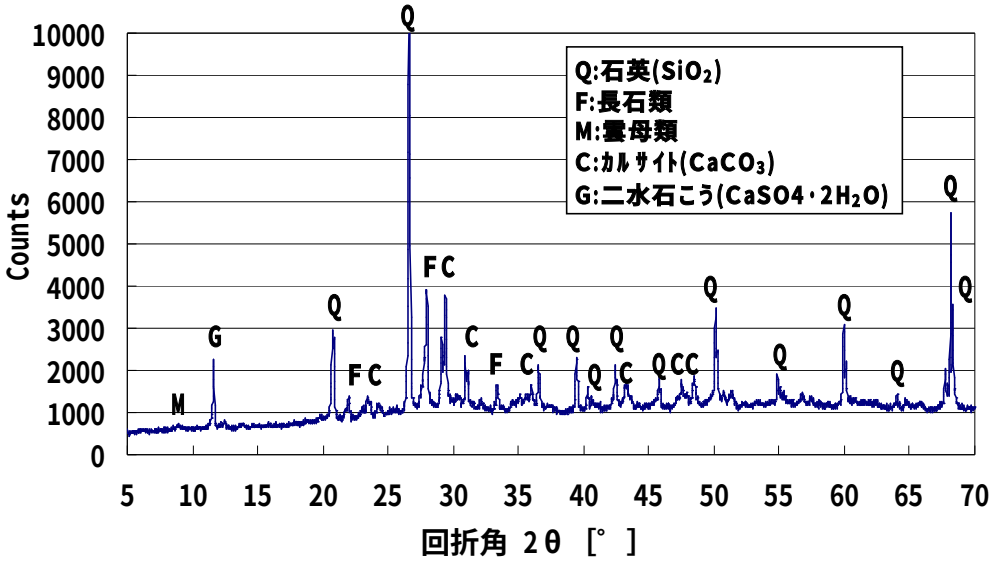
写真－7　SEM 確認結果（試料 B、養生なし）



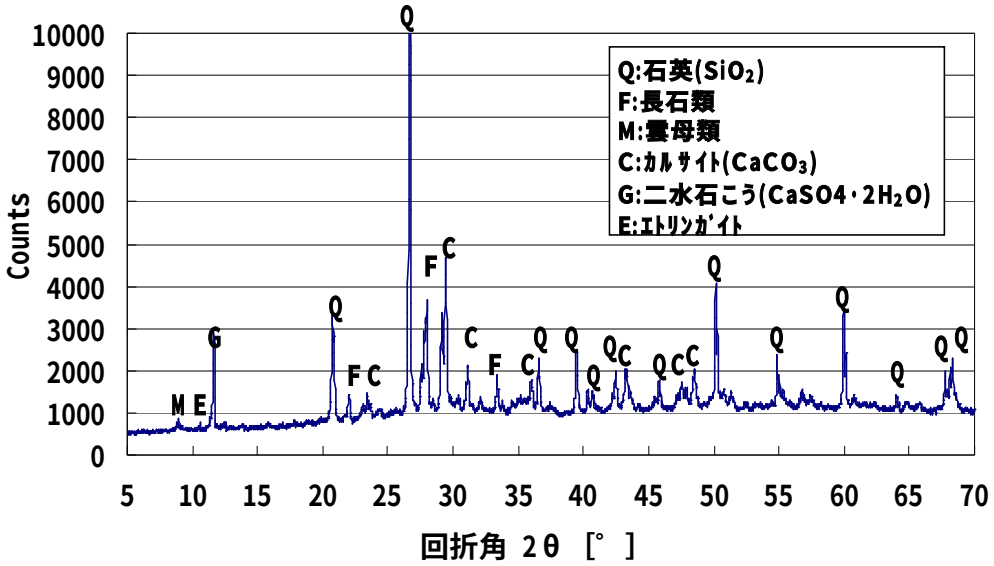
写真－8　SEM 確認結果（試料 B、室内養生 28 日）



写真－9　エトリンガイトの例（x500(左)、x2000(右)）



図－22　XRD 結果（試料 B、養生なし）



図－23　XRD 結果（試料 B、室内養生 28 日）

表－20　XRD 結果一覧

試料名	鉱物名	石英	長石類	雲母類	緑泥石類	カルサイト	二水石こう	ポルトランダイト	エトリンガイト	ビーライト
		SiO_2	－	－	－	$CaCO_3$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$Ca(OH)_2$	－	$2CaO \cdot SiO_2$
	図中記号	Q	F	M	Ch	C	G	P	E	－
① 試料B　養生なし		++++	+++	+	－	+++	++	－	－	－
② 試料B　室内28日養生		++++	+++	+	－	+++	+++	－	+	－
③ 試料F　養生なし		++++	++++	+	+	+++	－	－	－	－
④ 試料F　室内28日養生		++++	++++	+	+	+++	－	－	－	－
備　考		骨材中に含まれる一般的な鉱物				セメント水和物もしくは石灰石の成分	セメントもしくは固化材の成分の一つ	代表的なセメントの水和物		セメントの鉱物

++++：5000counts以上，+++：5000～2000counts，++：2000～500 counts，
+：500 counts 以下，－：検出限界以下

7. まとめ

(1) 再生砂の品質

①再生砂の CBR は時間の経過により増加するが、同程度の混合割合（Co：As＝70:30 等）の再生砂でもプラント毎に、また同じプラントの製品でも製造時期により強度増加の傾向が異なることを確認した。

②ハンドスコップ掘削性も①と同様にプラント毎、製造時期により強度増加、掘削性が異なり、品質にバラツキがあった。

(2) 現場実験による施工性確認

①Co 再生砂は時間経過により強度が増加し、掘削性が低下することを確認した。

②As 再生砂を埋戻しに利用しても１年後には強度増加し、掘削性も低下した。

③Co 再生砂と As 再生砂の混合材料も②と同様に掘削性が低下した。

④Co 再生砂と改良土の混合は掘削性の低下が著しい。

(3) 掘削性を向上させる材料混合

①室内試験からは、Co 再生砂に As 再生砂を 50%以上混合することにより、強度増加及び掘削性は初期値からの変化がほとんどなかった。しかし、現場実験では１年後に強度増加し、また掘削性が低下しており、As 再生砂の混合では掘削性の向上は図れないことが分かった。

②室内試験からは、Co 再生砂にしゃ断砂を混合することにより、掘削性の向上が可能であった。しかし、①の例もあり、現場実験により１年後の掘削性を確認する必要がある。

③(1)で示したように、プラントや製造時期で品質が異なるため、混合する材料や割合を定めても期待する効果（掘削性の向上）が得られない場合があると考えられる。

(4) 強度増加の原因

①SEM、XRD により養生前の再生砂で未水和セメント鉱物の確認や、養生後に水和物などの確認を行ったがほとんど検出できなかった。

②今回の調査では、再生砂の強度増加が再生砂に含まれるセメントが水和反応などの原因で生じることは確認できなかった。

③現場実験において、As 再生砂の長期強度が増加していたこと、砂の混合では CBR が増加しても掘削性は向上していることなどからも、水和反応以外にも原因があると考えられる。

参 考 文 献

1) 小林真澄、安部浩、東海林康二郎（2006）：再生砂の長期強度及び再掘削性について、第 25 回日本道路会議　09109

2) 長森正尚、須貝敏英、小野雄策、渡辺洋一、小林進（1992）：産業廃棄物中間処理に関する研究(V)-コンクリート廃材処理施設―、埼玉県公害センター研究報告　107-121

3) 小林一雄、内田喜太郎、石川靖仁（1991）：道路占用工事における埋戻し工法、平 3.東京都土木技術研究所年報、61-70

4) 小林一雄、上野慎一郎（2009）：再生砂（RC-10）の特性に関する検討、平 21.東京都土木技術支援・人材育成センター年報、99-108

5) 小林一雄、上野慎一郎、田中輝栄（2009）：再生砂（RC-10）の改良と特性、第 28 回日本道路会議　32041