

7. 速硬型の砂質土系安定処理による埋戻し工法（その4）

Backfill Industrial Method by Sandy Soil System Stability Processing of Type that Hardens Fast (Part.4)

技術支援課 大野正宏、田中輝栄、峰岸順一、小林一雄

1. まえがき

道路占用工事等の埋設管が輻輳している狭隘で十分な転圧ができない箇所においては、しゃ断層用砂の水締めによる埋戻しを行ってきたが、即日復旧を行う箇所では空洞を生じやすく、道路陥没の一因ともなっていた。

このため、道路陥没抑止の観点から流動性や長期的安定性に優れる流動化処理土が活用されている。

しかし、固化まで一定の時間を要することから即日復旧を行うような小規模工事には適用しにくい現状と、図-1に示すような長期強度が大きくなって、再掘削が困難な現状でもある。

即日復旧を前提に、道路陥没が生じにくい輻輳管回りの急速な埋戻し工法として、速硬型の砂質土系

安定処理土（以下、処理土という。）の実用化に向けた検討を行っており、平成21年度は、水締め施工の配合と遅延剤の効果確認について実験等を行ったので、その内容を報告するものである。

実験としては、処理土をプラントで製造し、現場へ運搬後、水締め施工による方法を想定している。

処理土は、しゃ断層用砂に石こう系固化材（以下、固化材という。）と遅延剤（ペプトン）を混合したものであり、固化材は、半水石こうと酸化マグネシウムを混合したものである。なお、実験では、購入したしゃ断層用砂を用いた。

2. 材料試験結果

(1) 土質試験結果

処理土の原料土であるしゃ断層用砂について、含水量試験、土粒子の密度試験、粒度試験、および細

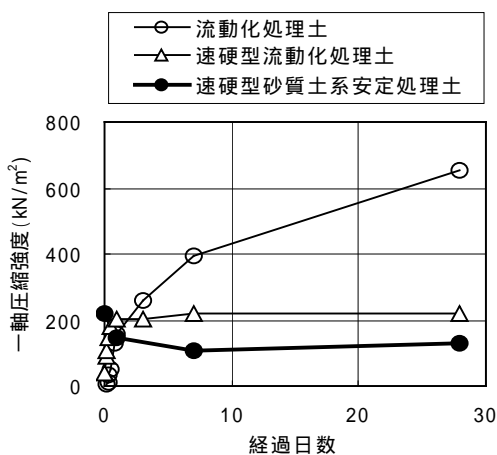


図-1 処理土別の強度特性(室内)

表-1 しゃ断層用砂の土質試験結果

試験年度		H21	H20	H19	H18	H17	
土粒子の密度 s (g/cm^3)		2.740	2.692	2.712	2.682	2.698	
含水比 n (%)		11.3	12.0	15.0	13.3	13.9	
粒度特性	粗粒分	礫 分 G (%)	3.8	2.1	0.0	0.6	0.8
		砂 分 S (%)	94.1	95.6	96.6	95.8	96.3
	細粒分	シルト分 M (%)	2.1	2.3	3.4	3.6	2.9
		粘土分 C (%)					
	最大粒径 (mm)		9.5	4.8	2.0	4.8	9.5
	均等係数 U_c		2.14	2.46	1.87	2.08	1.99
曲率係数 U_c'		1.01	0.85	0.91	0.87	0.87	
地盤材料の工学的分類	分類記号	(S)	(S)	(S)	(S)	(S)	
	分類名	砂	砂	砂	砂	砂	
土懸濁液の pH		7.2	7.1	6.5	6.7	4.8	

粒分含有率試験を行った。

試験結果は、表 - 1 に示すとおりである。

(2) pH試験

処理土の主たる原料であるしゃ断層用砂、半水石こう、酸化マグネシウムと処理土 6 試料について土懸濁液の pH 試験を行った。その結果、しゃ断層用砂 7.6 と半水石こう 7.2 はほぼ中性を示し、酸化マグネシウムと処理土はそれぞれ 11.2、10.0 (6 試料の平均値) と強アルカリ性を示した。なお、この傾向は従来¹⁾の結果と同様であった。

(3) 土壌溶出量試験

処理土の材料であるしゃ断層用砂、半水石こう、および酸化マグネシウムと打設 28 日後の処理土 6 試料について表 - 2 に示す土壌溶出量試験を行った。

六価クロム化合物は、しゃ断層用砂、半水石こう、酸化マグネシウムともに定量下限値 0.005mg/L 未満であり、処理土の値も最大 0.010mg/L と、いずれも基準値を下回った。また、ふっ素およびその化合物は、平成 21 年のしゃ断層用砂が 1.9mg/L 平成 17~20 年の半水石こうが 1.1~5.1 mg/L と大きく、基準値の 0.8mg/L を満足していないが、結果として処理土 0.1mg/L は基準値未満であるので問題ないと判断した。

3. 水締め施工の実験

(1) 室内配合実験

1) 配合と実験条件

水締め施工を行う場合、水(全水量のことであるが、実際は添加水で調整)の量がある程度増やす必

要があることが、昨年度の実験²⁾で判明している。実験からは、水と固化材(半水石こうおよび酸化マグネシウム)の量を同時に増やすことによって所定の強度が得られ、強度が低下しないことを確認した。

昨年度用いた配合量は、1m³ 当たりの全水量 465kg、半水石こう 140kg、酸化マグネシウム 60kg であったが、今回の実験で用いたベースとなる配合量は、含水量 465 kg、半水石こう 90kg、酸化マグネシウム 70kg と固化材量を小さくした。これは図 - 3 に示すように C B R が大きくなったことにより、固化材量を減らしたものである。

水と固化材の倍率は、1.1 倍、1.2 倍という形で水と固化材を増やした配合の割増率である。水と固化材の倍率を 1.1 にする配合は、

$$\text{全水量}(W) = 465 \times 1.1 = 511.5 \text{ 512kg}$$

$$\text{半水石こう}(C) = 90 \times 1.1 = 99\text{kg}$$

$$\text{酸化マグネシウム} = 70 \times 1.1 = 77\text{kg}$$

となる。なお、これらの材料が増えた分だけ、砂は少なくなる。

実験では、水と固化材を同倍率で増やした場合に強度が低下しない範囲を確認するために行った。

2) 処理土の密度

水と固化材の量を増やした処理土の密度は、図 - 2 に示すように、水と固化材の倍率が 1.0 の場合に比べて 1:1 の線の上側にプロットされた。すなわち、

表 - 2 処理土使用材料の土壌溶出量試験結果

溶出量試験項目	実施年度	しゃ断層用砂	半水石こう	酸化マグネシウム	処理土	基準値 (mg/L)
六価クロム化合物	H17	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.008	0.050
	H18	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	
	H19	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	
	H20	< 0.005	< 0.005	< 0.005	-	
	H21	< 0.005	< 0.005	< 0.005	最大0.010	
ふっ素及びその化合物	H17	< 0.1	1.1	0.3	0.1	0.8
	H18	0.1	5.1	0.5	< 0.1	
	H19	< 0.1	3.5	0.1	0.1	
	H20	< 0.1	3.1	< 0.1	-	
	H21	1.9	0.2	< 0.1	最大0.1	

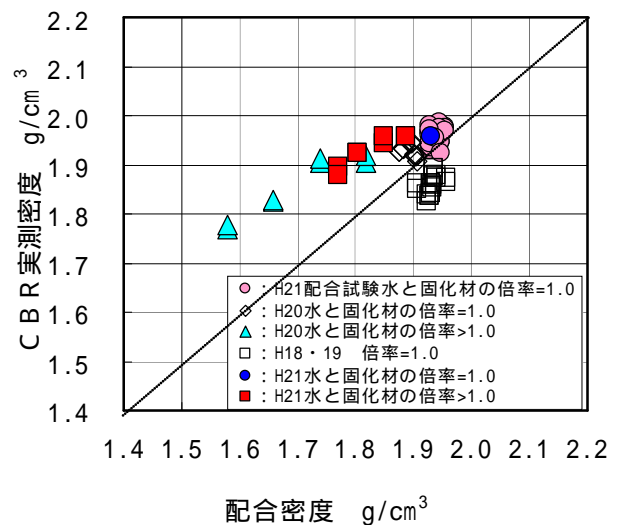


図 - 2 処理土の配合密度と実測密度

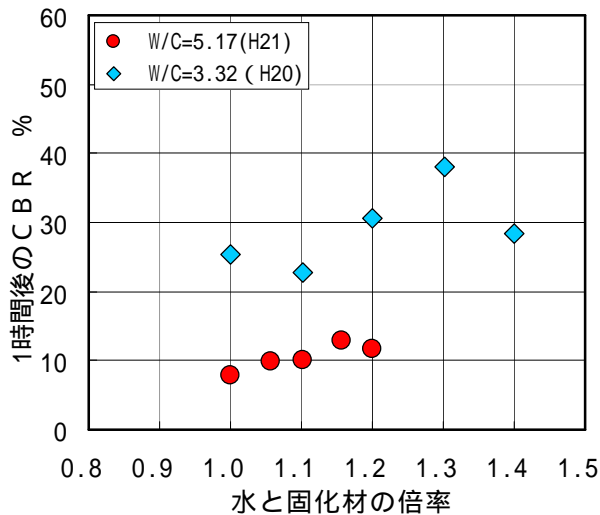


図 - 3 水と固化材の倍率と1時間後のCBR

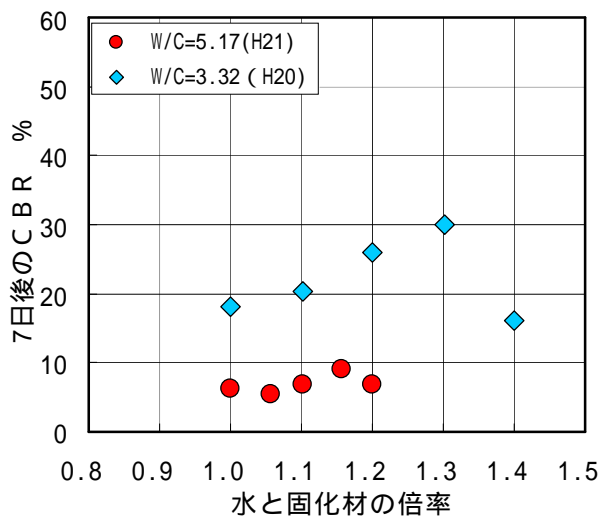


図 - 4 水と固化材の倍率と7日後のCBR

配合密度よりも実測密度が大きくなっていった。これは、CBRモールドにカラーをつけて、処理土を余分に流し込み、試験時期に整形をして試験を行っており、余分な水が処理土の上に排出された結果、大きくなったのである。

3) 処理土の強度

1時間後のCBR

図 - 3 は、水と固化材の倍率と1時間後のCBRの関係を示したものである。1時間後のCBRは、昨年度の実験で22.7～38.1%であったが、今年度は固化材量を減らしたため9.8～12.9%の範囲にあった。また、倍率が1.0から増えるに従いCBRの強度が大きくなった。しかし、上限があり、昨年度は

表 - 3 実験条件

No.	水と固化材の割増率	製造・打設方法	補助工法
4-1	1.00	水混合	なし
4-2	1.70	〃	〃
4-3	1.10	〃	〃
4-4	1.00	水締め	突き棒20回以上
4-5	1.20	水混合	なし
4-6	1.00	水締め	突き棒10回
4-7	1.10	〃	突き棒20回以上
4-8	1.10	〃	突き棒10回
4-9	1.20	〃	突き棒20回以上
4-10	1.20	〃	突き棒10回



写真 - 1 アクリル管への処理土打設状況

1.3倍であったが、今年度は1.15倍となっていた。

7日後のCBR

7日後のCBRは、図 - 4 に示すように1時間後のCBRとほぼ同様に、水と固化材の倍率が1.0から大きくなるに従って強度が増加しているが1.15倍程度が強度増加の限界であった。

(2) 水締めの目視判断実験

1) 実験条件

現場で水締め施工を行うにあたり、水量の計測をしないで水締め施工が行えるような目視判断方法を検討するための実験を行った。実験には、写真 - 1 に示す外径150mm、内径140mm、長さ600mmの透明アクリル管に処理土を打設して、打設後の処理土の体積、分離した材料（水および固化材）の体積を計測して、分離した水の処理土に対する体積率（ブリージング率と同じ意味であるが、定義上は異なる）に換算した。なお、水混合とは、砂、水、固化材を同時に混入してハンドミキサーで1分間混合したもの

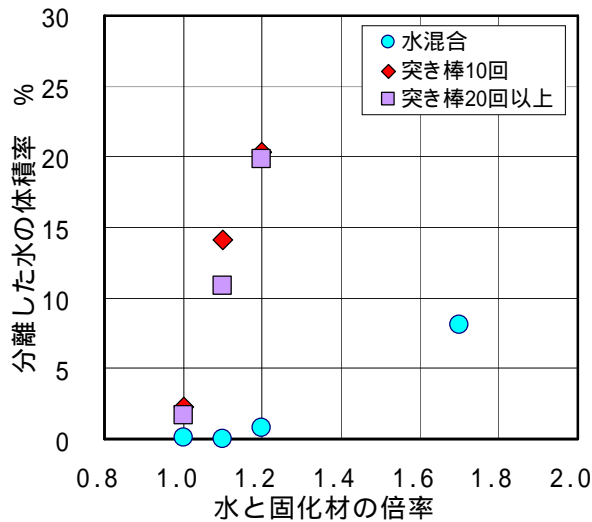


図 - 5 水と固化材の倍率と分離した水の体積率

であり、水締めは、砂と固化材をハンドミキサーで1分間混合した後に水を加えて20秒間攪拌したものである。実験条件を表 - 3 に示す。

2) 実験結果と分離した水の体積率

図 - 5 は、水と固化材の倍率に対して打設直後に分離した水の体積率をプロットした図である。水混合の場合と水締めでは、分離する水の量が大きく異なっている。例えば、水と固化材の倍率が1.2と同じでも水混合は、水の体積率が0.8%と非常に小さいのに対して、水締めの場合は、水の体積率が約20%になっていた。したがって、水締めは水混合に比べ打設直後での水の分離が多いことがわかった。

(3) 水締めの屋外施工実験

1) 配合・実験条件

屋外施工実験は、水と固化材を割り増した配合で実験を行い、次の項目について検討した。

水混合を行う室内配合実験と水締め施工の屋外施工実験の強度比を求め、水締め施工に用いる配合の割増率を検討した。

遅延剤を用いた屋外施工実験の結果を用いて、打設7日後および28日後のCBRと剣スコップ掘削性の関係を把握した。

2) 処理土の密度

処理土の密度は、7日後または28日後のCBRモールドで測定した。図 - 6 に配合密度との関係を示す。水と固化材の倍率が1.00のケースは、7日後が

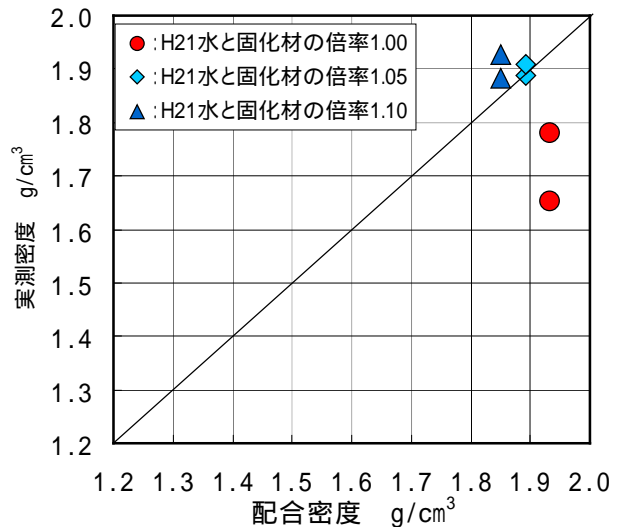


図 - 6 配合密度と実測密度

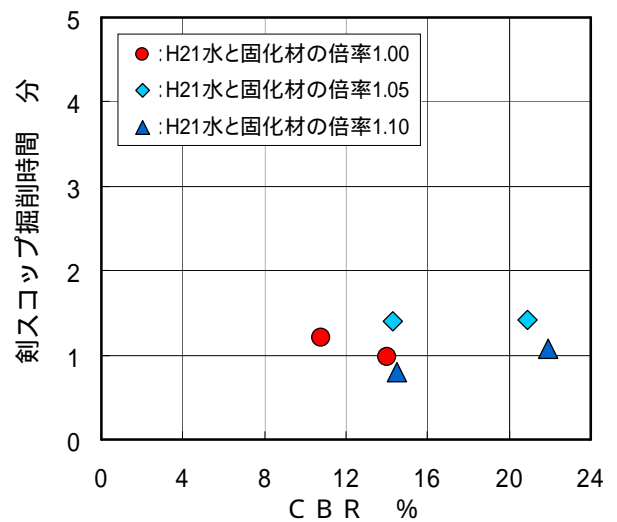


図 - 7 CBRと剣スコップによる掘削時間

1.782 g/cm^3 、28日後が1.653 g/cm^3 といずれも1:1の線より下側にプロットされ、大きくばらついた。しかし、水と固化材の倍率が1.05または1.10のケースは、実測密度が約1.900 g/cm^3 で1:1の線より上側に集中して分布していた。

水と固化材の倍率1.00のケースでは、水量が少なく混合が不十分であり、密度が不均質になるとともに値も小さくなったと、判断される。

一方、1.05以上のケースでは実測密度が配合密度より大きくなり、地盤に排水されることによって、水締めが効果的に行われたと判断した。

3) 処理土の掘削性

図 - 7 にCBRと剣スコップによる掘削時間の関

係を示す。剣スコップによる掘削時間は 0.8～1.4 分であった。過去の実験結果³⁾より、締固め度 90% に締固めた C-40 の掘削時間は 6 分程度、しゃだん層用砂で 0.5 分程度であったことから、C B R 20% 程度でも、C-40 に比べ容易に掘削が可能と言える。

4. 遅延剤の効果確認

(1) 遅延剤の室内実験

1) 配合と実験条件

半水石こうは水と反応すると直ちに硬化し始めるため、砂に固化材を混合した時点で砂中の水分と反応して硬化しはじめる。そのため、プラントでの処理土製造から現場への運搬・打設を考えると、製造時刻から現場施工までの待機時間が必要となる。また、現場においても余裕のある施工時間を確保する必要がある。

そこで、待機時間を確保するために、遅延剤を添加することが有効であることから、実験では遅延剤の添加量と遅延時間との関係を検討した。

遅延剤は、大豆のアミノ酸から製造されるペプトンを使用した。ペプトンは、顆粒状で販売されており遅延効果を上げるために、実験では、微粉末にすりつぶしたものをを使用した。

実験で使用したペプトンの添加量は、半水石こうに対する割合(以下、添加量という。)で計算している。例えば、石こう量が 99kg でペプトンが 0.15% の散布量の場合、1m³ 当たりの添加量は、以下のようになる。

$$99 \text{ kg/m}^3 \times 0.15\% = 0.1485 \text{ kg/m}^3 = 148.5 \text{ g/m}^3$$

ペプトンの散布量は、昨年度までの実験結果²⁾より、1 時間待機の場合で 0.15% から開始し、実験結果をみながら 3 時間待機の 0.6% まで変化させた。実験では、現場での水締め施工を想定して、水と固化材の倍率を 1.1 に割増しした配合で行った。その結果、水と固化材の倍率が 1.1 では水が多すぎる結果となったので、1.05 のケースについても実験を行った。

(2) C B R と山中式土壌硬度計による貫入量

図 - 8 に 1 時間後の C B R と山中式土壌硬度計による貫入量(以下、貫入量という)の関係を示す。貫入量は C B R と概ね良好な相関関係を示し、C

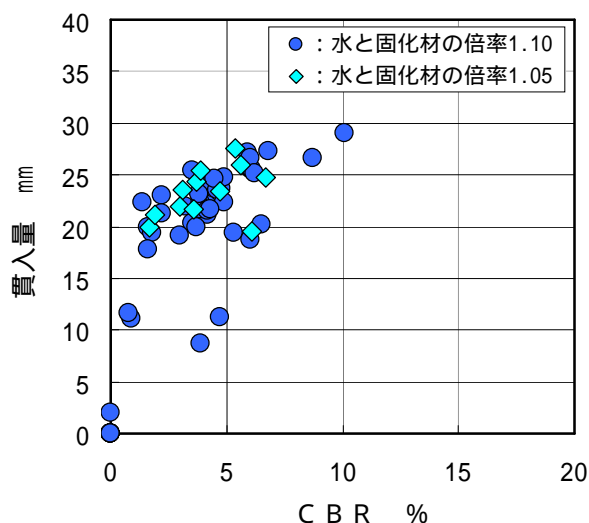


図 - 8 C B R と貫入量の関係

B R 3% に相当する貫入量は、おおよそ 23mm 以上であることを確認した。

(3) 遅延剤の屋外実験

1) 配合実験条件

屋外での遅延剤の効果を確認するため室内配合実験と同様の方法で配合実験を行った。なお、実験条件のうち、水と固化材の倍率は 1.05 とした。

2) 待機時間と強度発現性

遅延剤の効果を確認するため、実験材料に遅延剤を混合後、所定の待機時間をとって水締め、その後、1 時間後と 7 日後または 28 日後の不攪乱試料による C B R 試験と土研式円錐貫入試験による打撃回数で検討した。

貫入量

1 時間後の貫入量は、図 - 9 に示したように、遅延剤の散布量が多くなるに従って、低下する傾向を示した。

例えば、待機時間毎の最大値をみると、遅延剤を添加しない場合は約 25mm であるが、1～2 時間待機で約 24mm、3～4 時間待機で約 20mm、5～6 時間待機で約 18mm であった。しかし、同じ待機時間でも遅延剤の量によるばらつきがあり、同じ添加量であっても強度に差が出るなど、添加量と強度の関係は不明瞭である。これは、待機時間中の気温や材料温度が影響しているものと考えている。

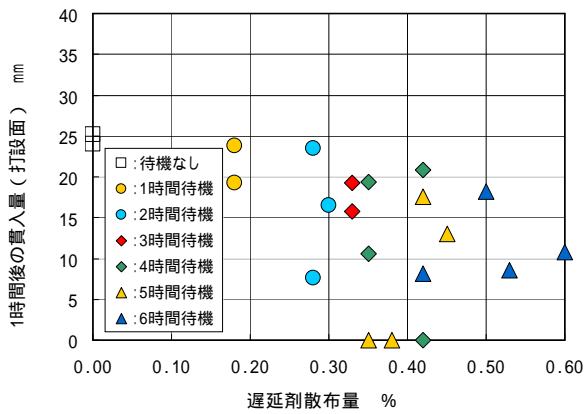


図 - 9 遅延剤散布量と1時間後の貫入量

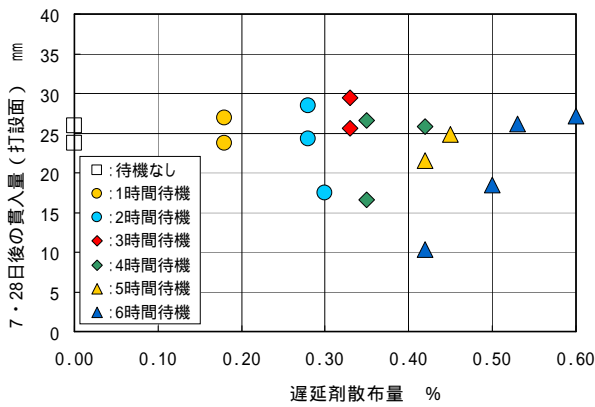


図 - 10 遅延剤散布量と7日および28日後の貫入量

7日および28日後の貫入量は、図 - 10 に示すように、各待機時間の最大値が特に長いケースで更に大きくなった。遅延剤なしの場合は約25mmで、1～3時間待機では、26～29mm、4～6時間待機の場合では、約25～26mmであった。

したがって、遅延剤の散布量を適切に管理すると、待機時間が6時間までは、1時間後の貫入量が23mm以下であっても、28日以後にはC B R 3%に相当する23mm以上になることがわかった。

土研式円錐貫入試験の打撃回数

土研式円錐貫入試験による打撃回数は、表層から10cmがやや小さく、中央部の30cm間が大きくなり、最下部で再び小さくなるような変化を示していた。そこで、打撃回数は、軟弱地盤の影響を受ける最下部を除く表層から40cmまでの平均値（平均値と呼ぶ）について整理し、これらの打撃回数とC B Rの関係を図 - 11 に示した。その結果、多くの試料が16回/10cm以上で基準値を満足した。

C B R

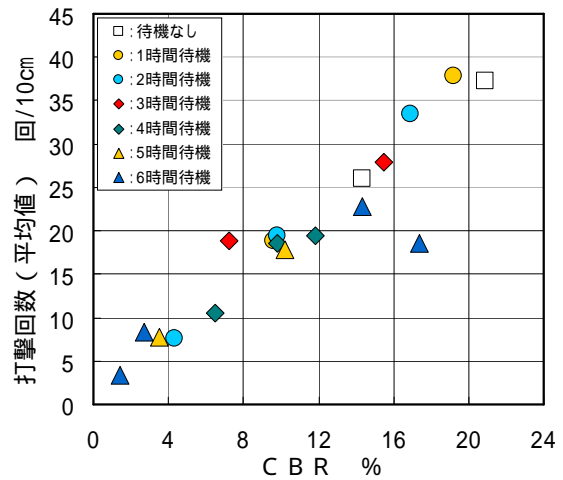


図 - 11 C B Rと打撃回数の平均値

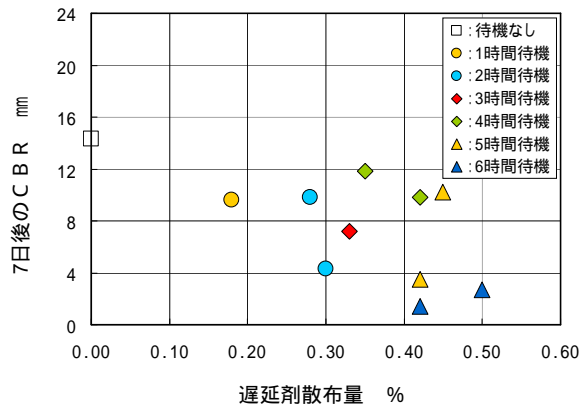


図 - 12 遅延剤散布量と7日後のC B R

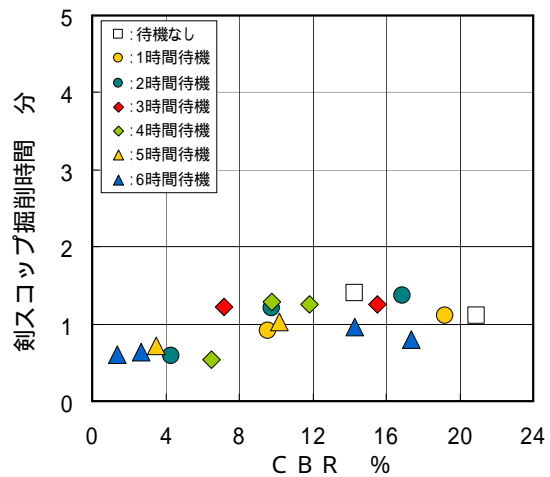


図 - 13 C B Rと剣スコープによる掘削時間

遅延剤散布量と7日後のC B Rとの関係を図 - 12 に示す。多くの試料が、C B R 3%を満足していたが、2試料については、3%に達しなかった。これらはいずれも打設前に固化が、生じたものであった。

3) 処理土の掘削性

図 - 13 に 7 日または 28 日後の C B R と剣スコップ掘削時間の関係を示す。剣スコップによる掘削時間は、C B R と良好な関係を示し、C B R 20% における掘削時間はおよそ 1.5 分程度であった。したがって、水締め実験と同様に C B R 20% 程度までは、人力による掘削が容易であると考えられる。

5. まとめと今後の課題

(1) まとめ

1) 処理土の適正配合

処理土の適正配合は、1 時間後の強度で C B R が 3% 以上、28 日後で C B R が 20% 未満という条件を仮定して検討を行った。

また、処理土の強度は、1 時間後の強度が水 / 半水石こう比に支配されており、28 日後の強度が水 / 固化材比によって決まることがこれまでの実験結果から得ている。そこで、1 時間強度に対する適正配合は、図 - 14 に示す水 / 半水石こう比により決定し、28 日後の強度は、図 - 15 に示す水 / 固化材比により検討した。1 時間後の C B R が 3% 以上 : 水 / 半水石こう比 8.0 以下

28 日後の C B R は、剣スコップでの掘削が困難となる C B R を想定しているが、今回の結果では C B R 20% でも容易に掘削できたので、上限値は求められなかった。C B R 20% 未満にすると水 / 固化材比 2.2 以上となった。

2) 処理土の施工実験

室内実験においては、水と固化材を適正配合の 1.15 倍まで増やしても処理土の強度は、適正配合の場合と同等かやや大きくなることが確認できた。

屋外施工実験では、水と固化材の倍率が 1.00 倍のケースでは性状が不均質になり、強度にもばらつきがあった。また、1.05 倍と 1.10 倍のケースは、1.00 倍に比べて、大きな土研式円錐貫入試験による打撃回数と C B R を示していた。さらに、1.05 倍と 1.10 倍では 28 日強度にやや差が見られたものの、密度や強度の点で大きな差はなかった。

このことから、現場で施工する場合の水と固化材の倍率は 1.05 倍が適当であると判断した。

3) 遅延剤の効果

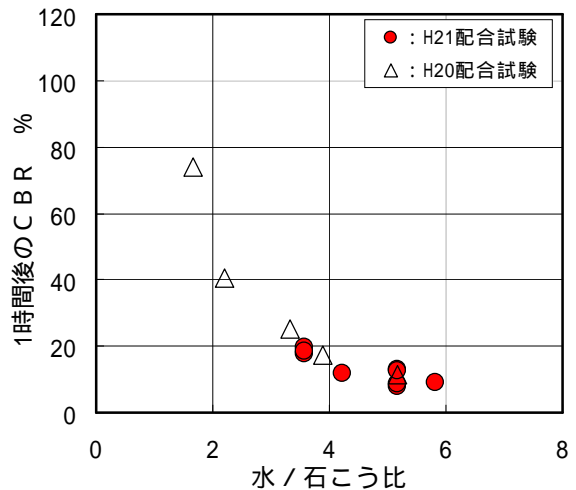


図 - 14 水/石こう比と 1 時間後の C B R

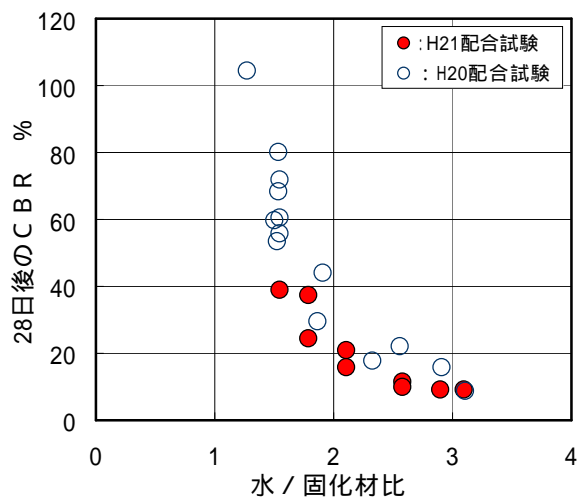


図 - 15 水/固化材比と 28 日後の C B R

遅延剤にペプトンを用いて配合実験を行った結果、固化材を混合してから待機時間が 2 時間までは、打設 1 時間後の貫入量が 23mm 以上 (C B R 3% 以上に相当) となる配合の確認ができた。また、待機時間が 6 時間までの範囲では、28 日後の強度が貫入量で 23mm 以上になる配合があることも確認した。

初期強度の発現性にばらつきが見られるものの、製造、運搬、および打設方法を工夫すれば、6 時間までの待機時間が可能であることがわかった。

(2) 今後の検討課題

実験等により、半水石こうと酸化マグネシウムを固化材とした処理土の現場施工への適用性は概ね確認できたと考えるが、しかし、現場へ適用するには、次のような課題がある。

遅延剤による待機時間の長時間化と強度の発現性
現場規模での施工方法・使用機械の検討
長期強度の確認

1) 遅延剤による待機時間の長時間化と強度の発現性

今回の実験では、概ね6時間までの待機時間と強度の発現性を確認できた。しかし、待機時間が長くなるにつれて、初期強度の発現が遅くなることや強度が小さくなる傾向が認められた。今後、遅延時間を長くしていくには、遅延剤の添加量を調整して遅延時間を長くするとともに、強度発現の遅れをできるだけ短くする配合の検討をしていく必要がある。

また、今回の屋外実験では、同じ散布量であっても待機時間中に固化してしまうことがあった。これは主に温度の影響によるものと考えられた。気温や材料温度などに対する許容範囲等も今後検討する必要がある。

2) 現場での施工方法・使用工機械の検討

これまでの屋外実験では、最大150Lのミキサーを使用してきたが、実際の現場施工を考えると、より多量の処理土が必要となるので、現場規模に実用可能な施工方法や施工機械の検討が必要となる。具体的には、輻輳管や交差部など比較的小規模な施工箇所を想定すると、作業場所も限られるので現場での混合・打設という施工方法は難しい。

したがって、プラント混合 散水車による水の搬入（散水量の計測可能） 運搬（遅延剤の活用）
現場での水締め施工を中心に考える必要がある。

3) 長期強度の確認

1時間程度の短時間で強度が発現することは、これまでの実験で確認できているが、長期的な強度については最大28日までしか把握できていない。

処理土は製造直後からおよそ1日程度まで強度は増加するが、その後漸減して7日後には1時間強度の5割から8割程度まで低下する傾向がある。その後は次第に大きくなり、1ヶ月後には初期強度とほぼ同じところまで回復していた。しかし、今年度の実験では、28日強度が1時間強度の1.5~2倍程度になるケースが確認できた。なお、このような違いについては、今後更に検討する必要がある。

また、1年後の強度など長期的な強度特性を把握していくことや、地下水の有無など地盤状況の違いによる影響を考慮することも必要である。

6. あとがき

即日復旧を前提に、道路陥没が生じにくい輻輳管回りの急速な埋戻し工法に用いる材料として処理土の実用化の可能性が確認できた。特に、遅延剤の検討を進めたことにより、待機時間を長くする配合が可能となったため、プラント等における処理土の製造後、最大6時間程度の時間内で、処理土を現場へ運搬し、現場では水締め施工が行える可能性を確認できた。

本調査を進めるに当たり、道路管理部保全課の方をはじめ、関係者各位に多大なご協力を得たことを感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 小林一雄、上野慎一郎（2008）：速硬型の砂質土系安定処理による埋戻し工法、平成20年、東京都土木技術センター年報、119 - 128
- 2) 小林一雄、上野慎一郎（2009）：速硬型の砂質土系安定処理による埋戻し工法（その3）、平21都土木技術支援・人材育成センター年報、89 - 98
- 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都土木技研年報、61 - 70