

6. 速硬型の砂質土系安定処理による埋戻し工法（その3）

Backfill Industrial Method by Sandy Soil System Stability Processing of Type that Hardens Fast (Part.3)

技術支援課 小林一雄 上野慎一郎

1. まえがき

輻輳した埋設管部など、狭隘で十分な転圧が困難な箇所においては、しゃ断層用砂の水締めによる埋戻しを行っているが、関東ロームのような水はけが悪く、しかも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、道路占用工事等では、道路陥没抑止の観点から流動性や長期的安定性に優れた流動化処理土が活用されている。

しかし、流動化処理土は、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 に示すように、長期強度が大きくなり、再掘削が困難な現状もある。

本報告では、即日復旧工事にも適用可能な速硬型の砂質土系安定処理土(以後処理土という)による埋戻しについて検討を行った。

処理土の施工は、しゃ断層用砂に石こう系固化材(以後、固化材という。) 遅延剤をプラントで混合し、現地で水締めする方法を考えている。

固化材は、半水石こう(以後、石こうという。)と酸化マグネシウム(以後、MgOという。)を混合したものとした。

2. 材料試験結果

(1) 土質試験結果

しゃ断層用砂の土質試験結果は、表 - 1 に示すとおりであった。

(2) 土壌溶出量試験結果

土壌汚染対策法に基づく土壌溶出量試験の試験項目のうち、六価クロム化合物、ふっ素およびその化合物の2項目について試験を実施した。

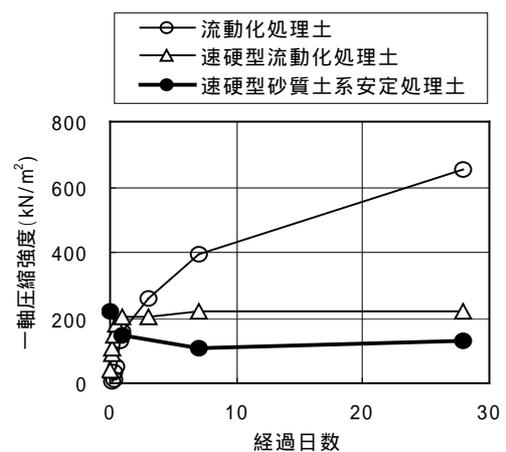


図 - 1 処理土別の強度特性(室内)

表 - 1 しゃ断層用砂の土質試験結果

試験年度		H20	H19	H18	H17	H16
土粒子の密度 s (g/cm ³)		2.692	2.712	2.682	2.698	2.711
含水比 n (%)		12.0	15.0	13.3	13.9	13.3
粒度特性	粗粒分					
	礫分 G (%)	2.1	0.0	0.6	0.8	0.0
	砂分 S (%)	95.6	96.6	95.8	96.3	96.4
	細粒分					
シルト分 M (%)	2.3	3.4	3.6	2.9	2.3	
粘土分 C (%)	-	-	-	-	1.3	
最大粒径 (mm)	4.8	2.0	4.8	9.5	2.0	
均等係数 U_c	2.46	1.87	2.08	1.99	1.99	
曲率係数 U_c'	0.85	0.91	0.87	0.87	0.91	
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		7.1	6.5	6.7	4.8	5.8

石こうからは、表 - 2 に示すように、基準値を越えるふっ素およびその化合物が溶出されたが、処理土は、表 - 3 に示すように、基準値より低かった。

3. 水混合試験結果

(1) 試験方法

配合試験は、自然含水比状態のしゃ断層用砂を用いて、水/石こう比および水/固化材比を変化させて行った。

総水量は $465\text{kg}/\text{m}^3$ を原則とし、石こう量は $90 \sim 280\text{kg}/\text{m}^3$ 、 MgO 量は $40 \sim 84\text{kg}/\text{m}^3$ とし、これらを合計した固化材量は $150 \sim 340\text{kg}/\text{m}^3$ と変化させた。

配合方法は、ハンドミキサでしゃ断層用砂と固化材を1分間混合し、次に水を加えて同様に20秒間攪拌してモールドに流し込み2~3回軽くたたいて試料とした。

(2) 室内配合試験結果

即日復旧の道路占用工事における埋戻し時間は2時間程度であり、輻輳した箇所だけに処理土を使用し、その上は砂等による埋戻しを行う場合が考えられる。したがって、処理土の強度特性を考慮するには埋戻し時間の半分である1時間後に路床としての強度を満足すること、また、長期強度として28日後に掘削性を考慮した強度を満足する必要がある。

表 - 2 処理土使用材料の土壤溶出量試験結果

土壤汚染溶出量試験項目	試験年度	しゃ断層用砂	半水石こう	酸化マグネシウム	基準値 (mg/L)
六価クロム化合物	H17	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.05
	H18	< 0.005	< 0.005	< 0.005	
	H19	< 0.005	< 0.005	< 0.005	
	H20	< 0.005	< 0.005	< 0.005	
ふっ素およびその化合物	H17	< 0.1	1.1	0.3	0.8
	H18	0.1	5.1	0.5	
	H19	< 0.1	3.5	0.1	
	H20	< 0.1	3.1	< 0.1	

表 - 3 処理土の土壤溶出量試験結果

試験項目	19年度	18年度		17年度		基準値 mg/kg	
	7-3 28日後	7-1 28日後	7-2 28日後	7-3 28日後	10-2 28日後		10-2 1年後
六価クロム化合物	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.008	0.05
ふっ素及びその化合物	0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.1	0.8

1) 水/石こう比と1時間後の強度

処理土の1時間後のCBRは、図 - 2 に示すように、水/石こう比が大きくなると小さくなるという良好な相関関係にあることが確認できた。すなわち、1時間後のCBRには MgO の影響力が少ないことを示している。

2) 水/固化材比と7日後の強度

処理土の7日後のCBRは、図 - 3 に示すように、水/固化材比が大きくなると小さくなるという良好な相関関係にあることが確認できた。

3) 水/固化材比と28日後の強度

処理土の28日後のCBRは、図 - 4 に示すように、水/固化材比が大きくなると小さくなるという良好な相関関係にあることが確認できた。7日以降のCBRには MgO も含めた固化材量の影響力が多いことを示している。

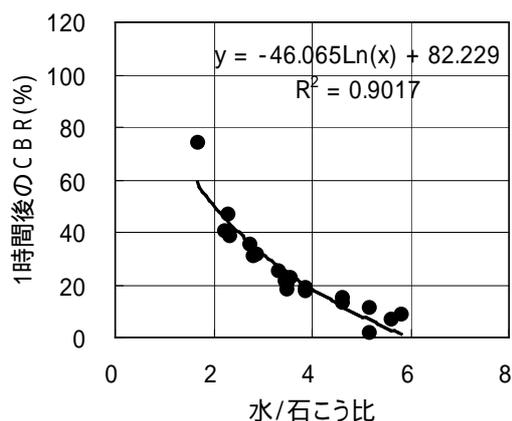


図 - 2 水/石こう比と1時間後のCBR(室内)

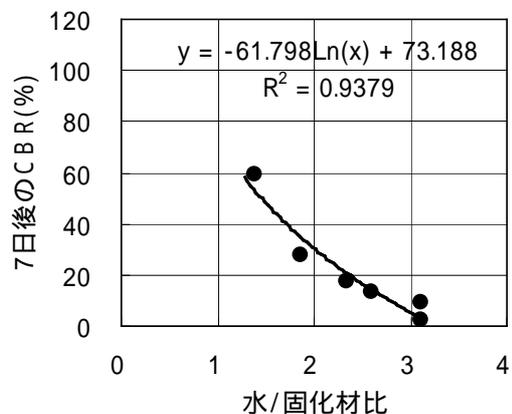


図 - 3 水/固化材比と7日後のCBR(室内)

4) ハンドスコップ掘削性

ハンドスコップ掘削時間は、現場における剣スコップ掘削時間を想定するために検討した。

C B R 試験後に、モールドの試料をハンドスコップで掘削し団塊の径を 40mm 以下に砕くのに要した掘削時間は、図 - 5 に示すように、寄与率が大きく、C B R が大きくなると多くなり、掘削性が劣るといふ傾向を示した。

4. 水締め想定試験結果

(1) 水締めを想定した室内配合試験結果

1) 水と固化材の倍率と供試体作製方法

現場での施工方法としては、水締めを想定しており、水締めの水は付近の地盤に排水されるのが前提である。そのため排水量だけ余分な水量が必要である。H19 年の結果¹⁾では、水のみ増量では強度がでなかった。すなわち、排水とともに固化材も流出すると考えられる。

そこで、最適配合(総水量 465kg/m³、石こう量 140kg/m³、M g O 量 60kg/m³、湿潤土量 1,381kg/m³)に対して、水と固化材を同じ倍率で増やし試験を行った。すなわち、湿潤土量は減少して実験を行った。

供試体の作成方法は、C B R モールドにカラーをつけて、処理土を余分に流し込み、底板のフィルターからの排水を許して養生を行い、試験時期に整形して試験を行った。

2) 水と固化材の倍率と強度

処理土の C B R は、図 - 6 に示すように、水と固化材の倍率が 1.0 ~ 1.4 の場合で 16.2 ~ 38.1% の範囲にあり、水と固化材の倍率を増加させても C B R が小さくなることはなく、1.3 倍の時が最も大きくなっていた。

(2) 水締め実験結果

1) 実験方法

水締めにおける強度等を確認するために実規模での打設実験を行った。

実験は、幅 35cm × 長さ 45cm × 高さ 60cm の掘削溝に高さ 60cm まで水締めした。各実験槽には 15cm × h12.5cm の C B R 用モールドを設置した。

処理土は、石こう等の飛散防止のためにカバーし

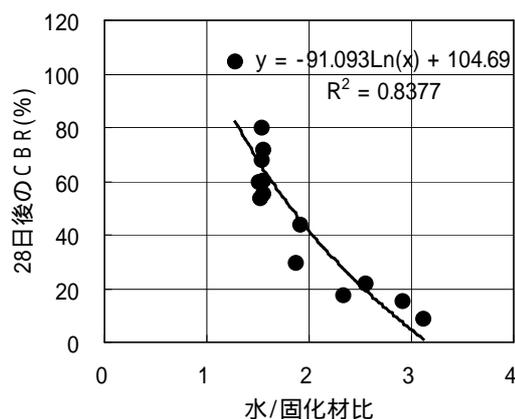


図 - 4 水/固化材比と 28 日後の C B R (室内)

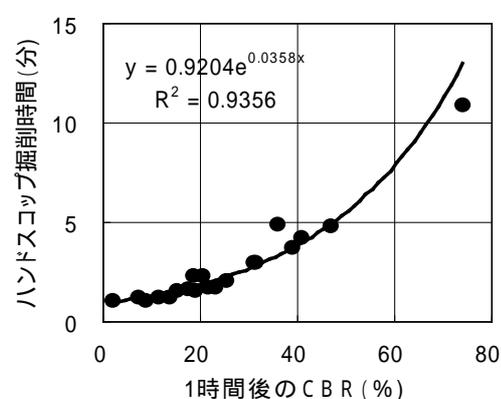


図 - 5 C B R とハンドスコップ掘削性(室内)

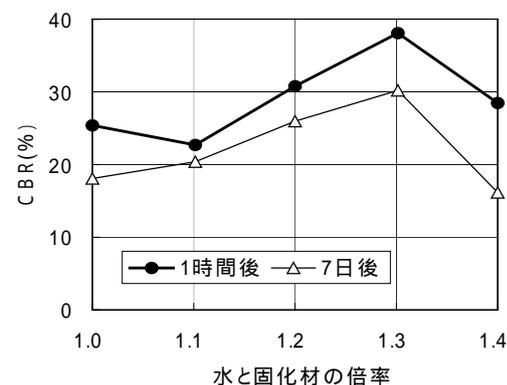


図 - 6 水と固化材の倍率と C B R (室内)

たコンクリートミキサー(容量 160L/台 写真 - 1 参照)で製造して、実験槽に約 70L 敷均しながら水締めを行った。水の散布は、できるだけ処理土と同時に投入し、モールド周辺部では十分な量の水を投入した。なお、水量は計測しておいた。

2) 水と固化材の倍率と密度

処理土の密度は、図 - 7 に示すように、水と固化

材の倍率が増すことにより、配合密度は下がる。

室内試験では、CBRモールド下面のフィルターから排水されて、倍率が1.2までは適正配合の密度になっている。

水締めめの現場における密度は、1.0倍では水が少なく水締めにならず、1.1倍以上ではほぼ一定となっており、水締めめの効果が示されている。

3) 水と固化材の倍率と強度

処理土のCBRは、図-8に示すように、水と固化材の倍率が大きくなると大きくなるが、その勾配は現場から採取した試料によるCBRの方が大きい。

4) 水と固化材の倍率と現場/室内CBR比

7日後の現場/室内CBR比は、図-9に示すように、水と固化材の倍率が大きくなると大きくなり、水と固化材の倍率が1.0倍で0.5程度、1.1倍で0.9程度、1.2倍で1.3程度となっていた。1.0倍では、水締めめという工法としては水が少なく、密度やCBRが小さかった。



写真-1 ミキサーによる混合（飛散防止）

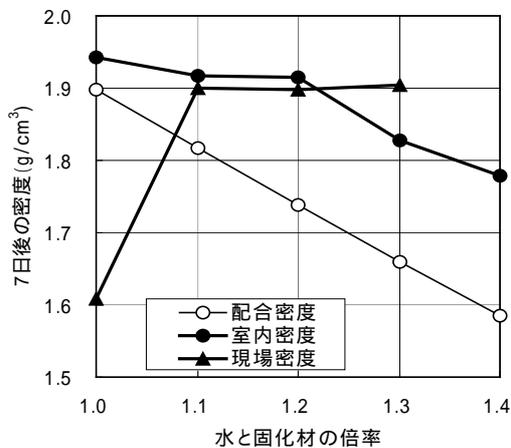


図-7 水と固化材の倍率と密度

5) 剣スコップ掘削性

7日後の剣スコップ掘削時間は、図-10に示すように、CBRが大きいと長くなった。CBR20%に相当する剣スコップ掘削時間は、1分/18L程度であり、砂の0.5分/18L、90%に締固めたC-40の6分/18Lと比較して砂に近い掘削時間であった。

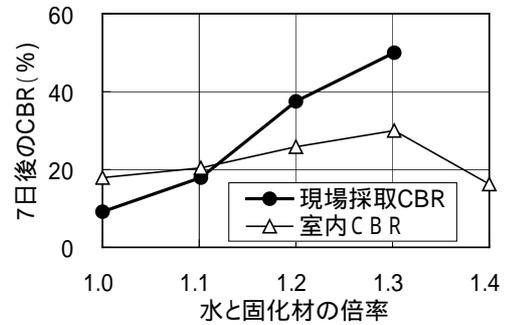


図-8 水と固化材の倍率と7日後のCBR

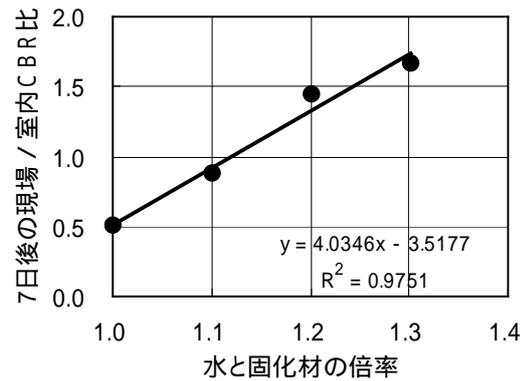


図-9 水と固化材の倍率と現場/室内CBR比

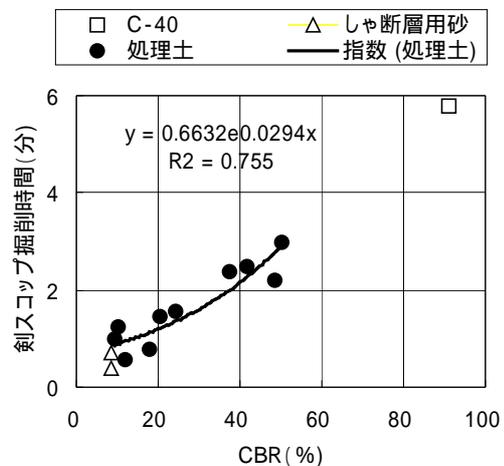


図-10 7日後のCBRと剣スコップ掘削時間

剣スコップ掘削時間は、図 - 11 に示したように、ハンドスコップ掘削時間と相関関係にあり、室内試験でもある程度現場での剣スコップ掘削時間を想定可能と判断できる。

6) 打設 1 時間後～1 日後の間での排水量

処理土作製方法

昨年行った実験²⁾であり、写真 - 2 に示すように、アクリル製の透明な箱に 75mm の管を 2 条 6 段で設置した水槽を使用した。水槽の底には、地盤の透水性を考慮して排水量を変化できるように、内径 16mm の水道用蛇口を取り付けた。また、砂の流出がないように、化繊布（厚さ 3mm，網目 0.1mm 以下）を蛇口の入り口（容器）側内部に充填した。

打設 1 時間後～1 日後の間での排水量

打設 1 時間後～1 日後の排水量は、図 - 12 に示すように、固化材との反応に水が使われたため、処理土の排水量が小さくなっていったと考えられる。

これに対して砂だけの場合は、突き棒を使用したケースでも 5.3L と突き棒を使用した処理土に比べて多く、打設 1 時間後に舗装等を施工した場合に、施工後の排水により空隙ができる可能性が多いことを示している。

5. 遅延剤の効果確認試験結果

(1) 室内配合試験結果

1) 遅延剤の種類および使用方法

遅延剤の種類

昨年の結果²⁾では、図 - 13 に示すように、クエン



写真 - 2 輻輳管の水締め実験状況

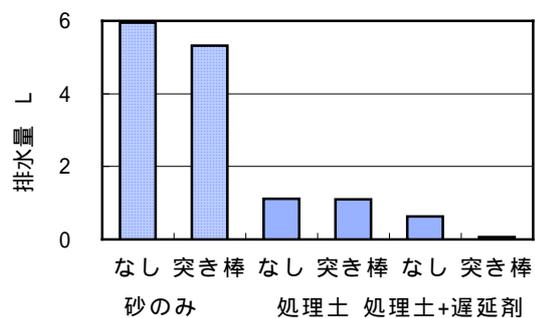


図 - 12 打設 1 時間後～1 日後の排水量

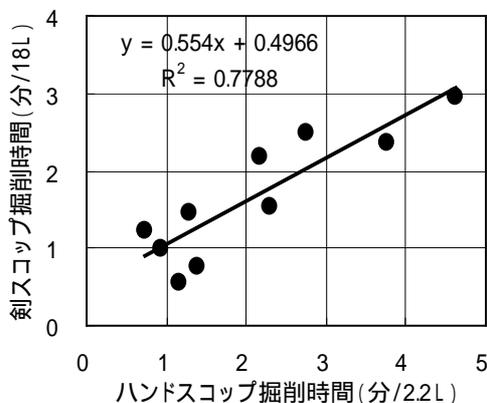


図 - 11 ハンドスコップと剣スコップの掘削時間

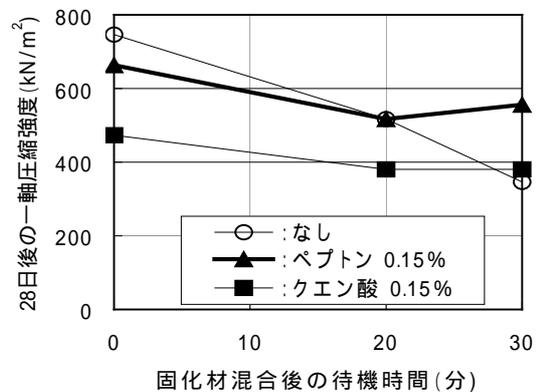


図 - 13 遅延剤別の待機時間と強度 (室内)

酸ナトリウムに比べて待機時間 30 分でも発現強度が大きく遅延効果に優れていたペプトンを用いた。

遅延剤の加工

ペプトンは、粒径が 1~2mm の顆粒状結晶であることから、写真 - 3 に示すように、均一に混ざりやすいように乳鉢ですりつぶして粒径 0.05mm 以下の微粉末にして使用した。

遅延剤の濃度

昨年度の結果から、遅延時間延長に効果があると判断される濃度 100% の粉末を用いた。

遅延剤の量

遅延剤の量は、石こうに対する乾燥重量比として 0.15% を使用した。

2) 固化材混合後の待機時間

プラントで固化材および遅延剤を混合した後に、現場への移動時間や現場での待機時間をとって水締めを行う。適切な遅延効果を知るための基礎実験として、固化材と遅延剤を混合し、20,40,60 分後にハンドミキサで 20 秒間混合して水締め実験を行った。

3) 固化材混合後の待機時間と 1 時間後の強度

遅延剤なしの処理土の 1 時間後の C B R は、図 - 14 に示すように、固化材混合後の待機時間が長くなるにつれて低下し、40 分後では強度がでなかった。

遅延剤を添加した処理土の 1 時間後の C B R は、遅延効果が現れ、固化材混合後の待機時間が長くなるにつれて強度が増加し、40 分と 60 分ではほぼ同値となった。

4) 固化材混合後の待機時間と 7 日後の強度

処理土の 7 日後の C B R は、図 - 15 に示すように、固化材混合後の待機時間が長くなるにつれて直線的に低下した。ただし、遅延剤ペプトンを用いた処理土の 7 日後の C B R の低下傾向は遅延剤なしに比べてゆるかった。

このことは、遅延剤を用いると、固化材混合後の待機時間に多少の余裕があることを示している。

5) 固化材混合後の待機時間とブリージング率

遅延剤を添加した処理土のブリージング率は、図 - 16 に示すように、待機時間 0 分では、3.5% と大きな値を示すが、遅延剤の効果が現れると思われる 40 分後では、水と固化材が反応し、ブリージングが



写真 - 3 ペプトンの微粉末

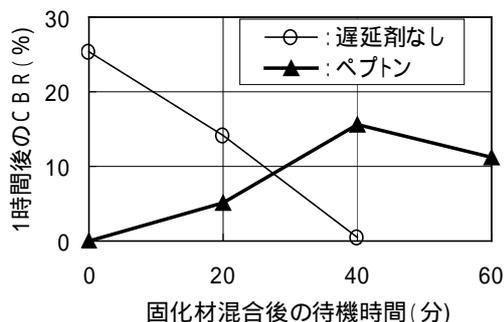


図 - 14 待機時間と 1 時間後の C B R (室内)

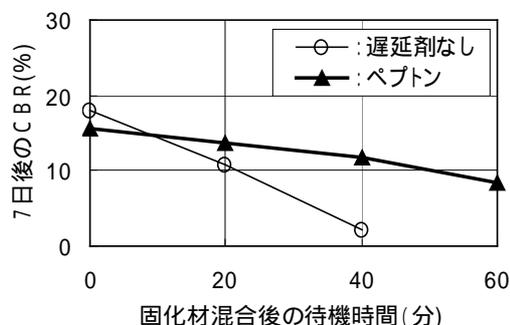


図 - 15 待機時間と 7 日後の C B R (室内)

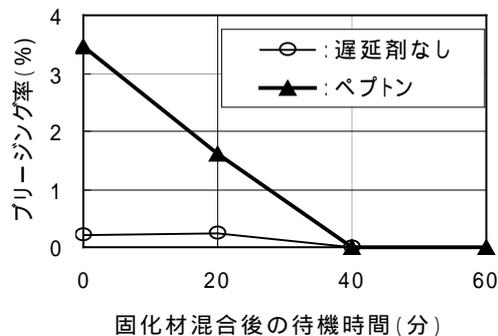


図 - 16 待機時間とブリージング率 (室内)

生じなくなった。

一方、遅延剤なしでは固化材と水が即反応することにより材料分離が生じない。したがって、遅延剤の量に応じて適正な待機時間の場合にはブリージングが生じなくなると考えられる。

(2)現場での水締め実験結果

1) 固化材混合後の待機時間と7日後の強度

遅延剤を添加した処理土の現場採取試料の7日後のCBRは、図-17に示すように、図-15に示した室内試験結果よりも大きくなっていった。また、遅延剤なしではほとんど強度がでなかった。このことから、遅延剤の効果は確認できたが、今後、60分後以降のデータで確認する必要がある。

2) 固化材混合後の待機時間と現場/室内CBR比

遅延剤を添加した処理土の現場採取試料の7日後のCBRは、図-18に示すように、室内試験結果の1.7倍以上という結果になっている。水と固化材の倍率は、遅延剤なしを除いて、1.10~1.20で行っており、図-9の現場/室内CBR比は0.9~1.3倍程度で、1.7倍よりは小さかった。

現場/室内CBR比は、水と固化材の倍率による影響が大きく、遅延剤による影響も期待できるが、データ数も少ないこともあり、安全性を考慮して遅延剤による現場/室内CBR比は1.0として配合案を検討する。今後、60分後以降のデータで確認する予定である。

6. 配合案

(1) 基準値の考え方

指標の選定

流動化処理土は流動性を高めてあるので、直径の小さい一軸圧縮強度試験用のモールドに流し込み固化するのを待って強度を測定することができた。しかし、速硬型の砂質土系安定処理土は水締めが前提であり、流し込むだけでは均質になりにくい。そこで、2~3回振動を与えて落ち着かせてから試験を行うので、直径の大きいCBRモールドを使用したCBRを指標とした。

総水量の設定

処理土の配合密度は、処理土が固体（しゃ断層用

砂の土粒子、固化材）と水からなるとした場合の密度である。しかし、できあがった処理土には、固体と水のほかに空気で充填された間隙が存在する。

したがって、処理土の配合密度と実測密度の差は間隙の量を反映していることになる。

H19年に行った1時間後の処理土の実測密度¹⁾は、図-19に示すように、全水量450kg/m³で最も大きくなっている。

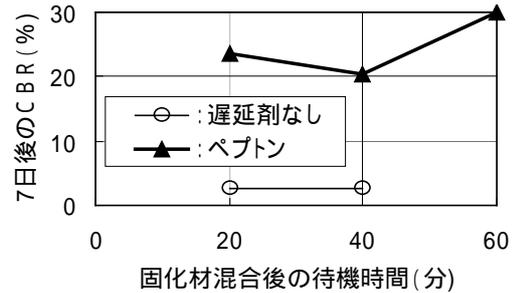


図-17 待機時間と7日後のCBR(現場)

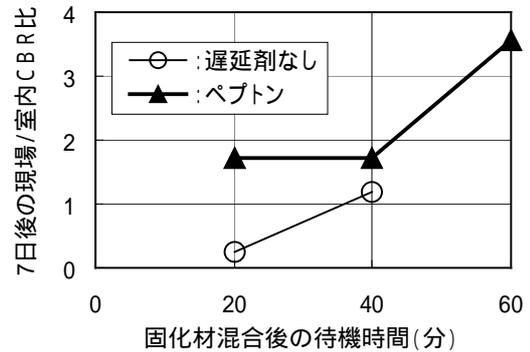


図-18 遅延剤別の待機時間と現場/室内CBR比

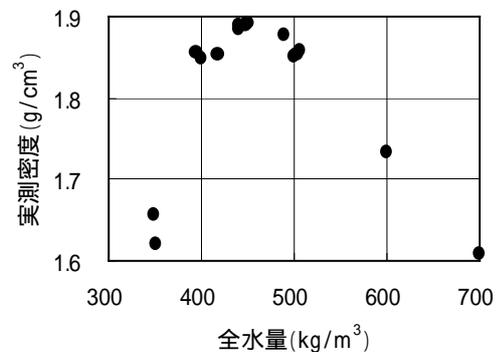


図-19 処理土の全水量と1時間後の実測密度

実測密度が大きくなる理由は、図 - 20 に示すように、全水量が多いほど密度比が大きくなっていることから、過剰水の一部が絞り出されて、固体の量が相対的に多くなるためと考えられる。

実測密度が小さくなる理由は、水量が少なくて流動性が悪くなり、うまく充填されないために空隙が多くなった結果と考えられる。

したがって、しゃ断層用砂を用いた今回の処理土は、全水量が 450 kg/m^3 程度で、密度の最大が 1.9 g/cm^3 前後となり、適正配合と考えられる。

最低基準値の設定

道路占用工事要綱の良質土・改良土の品質基準で定めている C B R 3% 以上を現場で水締めした場合に確保できると想定される基準値とした。

最高基準値の設定

処理土の主な適用箇所は、輻輳した管回りを対象としているので、再掘削は機械施工ではなく、剣スコップによる掘削が現実的である。したがって、最高基準値の設定は、再掘削時の剣スコップによる掘削時間で検討するのが望ましい。しかし、図 - 10 に示すように、現状では境界値を求めるのが難しい。

そこで、道路占用工事要綱の改良土の品質基準で定めている C B R 20% 以下を準用して基準とした。なお、改良土の場合、プラントでの製造を前提にしており、30 日間の品質管理データの平均値が 20% 以下としている。本処理土ではとりあえず個々の値が 20% 以下とし、現場で水締めした場合に確保できると想定される基準値とした。

(2) 現地での水締めを想定した割り増し

7 日後の現場/室内 C B R 比は、図 - 9 に示したように、水と固化材の倍率が大きくなると大きくなり、水と固化材の倍率が 1.12 では 1.0 倍程度となっていたので、1.12 倍で配合案を検討した。

(3) 遅延剤混合による割り増し

5. の検討より、遅延剤の効果はあると期待できるが、今回は安全性を考慮して、遅延剤による現場/室内 C B R 比を 1.0 として検討した。

(4) 現段階における最適配合案

以上の考え方を基に、総水量 500 kg/m^3 の場合(総水量は 1.12 倍してある)の最適配合を示したのが図

- 21 の太線内である。

最低基準値としては C B R 3% 以上、最高基準値としては C B R 20% 以下とし、水締めで施工して、現地で想定される値とした。

(5) 現段階における施工管理方法

1) 舗装施工可能時期の判断

速硬型の砂質土系安定処理土は、基本的には砂の水締めであり、表面から水さえなくなれば、その上で作業することができる。しかし、遅延剤による待機時間の確保と石こうによる早期強度の発現を期待している処理土なので、硬化が開始するのを確認してその上に舗装を施工したいものである。

そのために、現地で簡単に操作できる測定器として、流動化処理土の施工判断にも用いている写真 - 4 に示す山中式土壤硬度計が考えられる。

山中式土壤硬度計による硬度と C B R との関係は、図 - 22 に示すように、硬度が 20mm 程度で C B R が

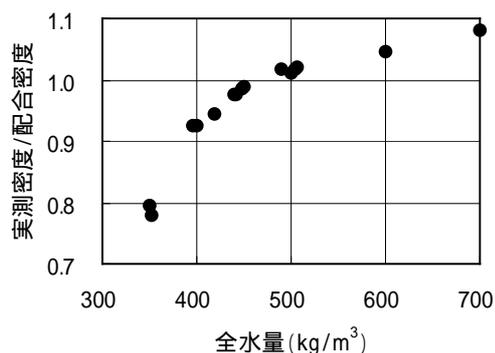


図 - 20 全水量と 1 時間後の実測密度 / 配合密度

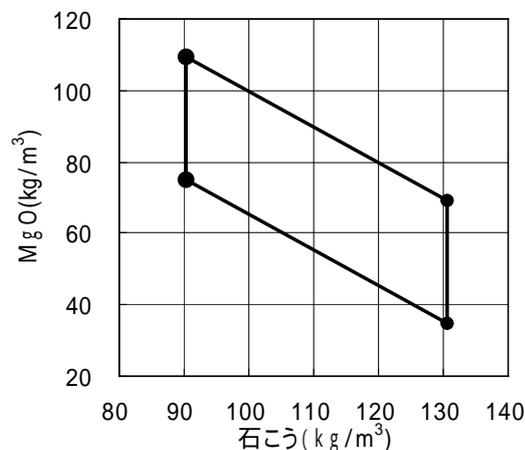


図 - 21 配合案

0%以上の強度が出ていることが分かる。

2) 水締め用水量

実験は、水量を計測した容器を用意しておき、使用量を確認しながら行った。しかし、現場での水締めでは、流量计等の計器を設置しない限り水量の確認ができない。施工箇所に場所的な余裕がある場合はこの方法も考えられるが、目視観測でできるような方法を検討したい。

(6) 高地下水位箇所での適用性

H19年に水浸による質量損失に関する試験を行った。試験²⁾は、5cm h 10cmの供試体に、石こうとMgOと水で作製した試料すなわち砂を混合していない試料(以後ペーストという)を2本ずつ作製し、1週間室内養生後に浸水して、1週間毎に質量と体積の変化を測定した。

その結果は、図-23に示すように、MgOが160kg/m³ではほとんど変化しないが、80kg/m³以下では7日以降の質量変化が大きい。125~144kg/m³では21日以降に急激に質量が変化する。

水浸28日後のペーストの質量損失率は、図-24に示すように、MgO量が86kg/m³の時は5%であり、175kg/m³の時は0%となり、MgO量が増えるとゼロに近づくことが判明した。この値は、総水量448~451kg/m³、石こう量156~200kg/m³、固化材量200~360kg/m³でのペーストでの結果である。

ペーストの質量損失率を0%とするにはMgOの増量が必要であり、処理土のCBRを20%以下とするにはMgOの減量が必要となる。

今後は、ペーストではなく処理土での質量損失率



写真 - 4 山中式土壤硬度計

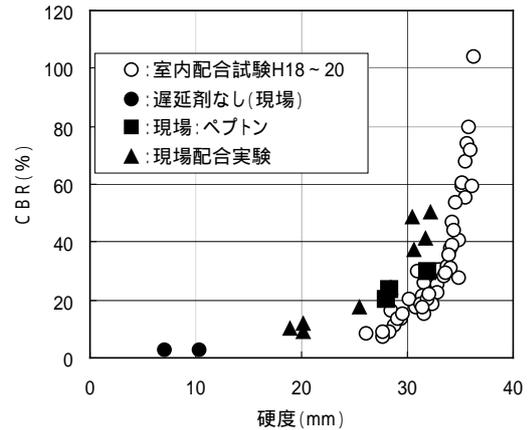


図 - 22 山中式土壤硬度計による硬度とCBR

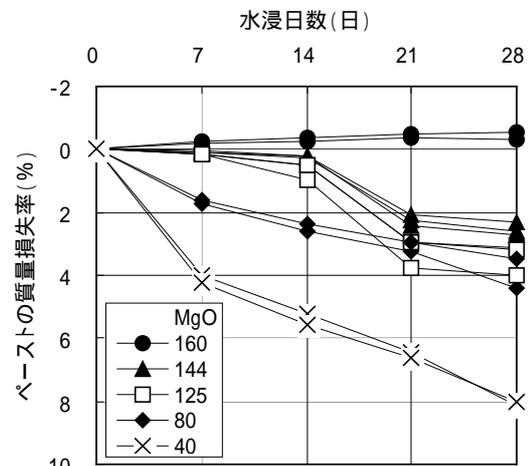


図 - 23 ペーストの水浸後の質量変化

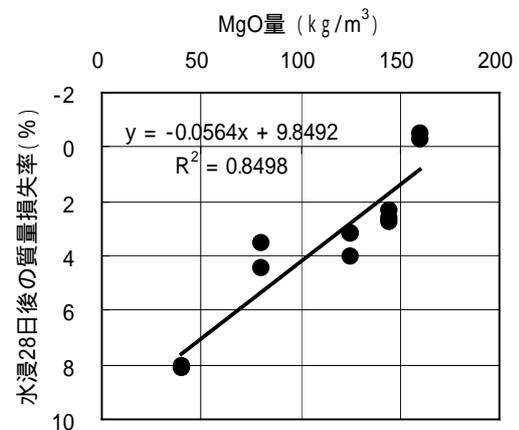


図 - 24 MgO量と水浸28日後の質量損失率

を確認するとともに、室内養生時間を高地下水位箇所での施工にあわせて短時間化することによる検討や長期水浸養生によるC B Rや質量損失を確認して、基準値を検討したい。

7. まとめ

1時間後のC B Rは、水/石こう比で求まる。

7日後および28日後のC B Rは、水/固化材(石こう+MgO)比で求まる。

C B Rが大きくなると剣スコップ掘削時間が長くなり、掘削性が劣る。

水締めを想定すると、最適配合の水と固化材の量を1.1~1.2倍程度にした方が良い。

砂の水締めでは排水量が多いが、砂質土系安定処理土の水締めは固化材との反応に水が使われ排水量が減るので、空洞の発生が減る可能性がある。

水締めの場合の現場/室内のC B R比は、水と固化材の倍率に比例し、1.0倍で0.5程度、1.1倍で0.9程度、1.2倍で1.3程度となっている。

遅延剤ペプトンを使用することにより、固化材混合後1時間までは待機できることを確認した。このことにより、プラントで処理土を製造し、現場での水締めが可能なが分かった。

遅延剤を添加した処理土のブリージング率は、遅延効果が現れる時間に水混合した場合には、水と固化材が反応しほとんど生じなかった。

現場/室内C B R比は、水と固化材の倍率による影響が大きいですが、遅延剤による影響も期待できる。

水締めを想定した総水量500kg/m³の場合の最適配合の範囲を示した。

石こうは、ふっ素およびその化合物が基準値を上回る溶出があったが、処理土では、ふっ素およびその化合物は基準値を下回る溶出であった。

水浸養生したペーストの質量損失率は、MgO量が増えるとゼロに近づく。

8. あとがき

即日復旧を前提にした道路陥没が生じにくい輻輳管回りの急速埋戻し工法としての速硬型の砂質土系安定処理土の実用化の可能性が確認できた。

特に、遅延剤の検討が進んだことにより、プラントで、待機時間を考慮した配合が可能となり、現地では処理土の施工のための専門家を必要とせず、またランマー転圧を行わずに水締めを行える可能性を確認できた。

今後の課題としては次のことが考えられる。

処理土の長期強度・掘削性の再確認

水締めにおける配合の割り増し率の再確認

遅延剤混合による割り増し率の再確認

運搬・待機時間の延伸および余裕時間の確認

水締め水量の目視判断方法の検討

高地下水位箇所での適用方法の検討

コスト縮減を考慮した廃石こうボードの活用と硫化水素の発生抑制対策の検討

本調査を進めるに当たり、道路管理部保全課の方々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(2007): 速硬型の砂質土系安定処理による埋戻し工法、平成19年、東京都土木技術センター年報、121-132
- 2) 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