

軌道路盤補修用材料の強度特性に及ぼす乾湿繰返しの影響

日大生産工（院）○川口 令 鉄道総研 村本 勝己
日大生産工 三田地 利之 鉄道総研 中村 貴久

1 はじめに

鉄道のバラスト軌道においては、道床バラストの突き固めによる定期的なメンテナンスが軌道補修方法として古くから採用されている。しかし、長期間交換されていないバラストは、列車の繰返し荷重による路盤の圧密沈下およびバラストの粒子破碎からまくらぎ下に隙間ができ、土砂混入状態（基準粒度よりも細粒分含有率が高い状態）にある。これをタイタンパーで締固めようとする、新しく投入したバラストは締固まるが、もともと粗粒分と細粒分がかみ合っ

て密な状態にある粒子間のかみ合わせを緩めてしまうことになり、軌道狂いや噴泥が発生してしまう。

そこで、筆者らのグループは、既設のバラストを緩めずに軌道路盤補修を行う方法として、軌道路盤補修材をまくらぎ下に充填して軌道を

扛上する工法の開発を進めている。

2 軌道路盤補修材の概要と本研究の目的

本研究の対象とする軌道路盤補修材は珪砂、粒状珪酸ソーダおよび有機酸粉末からなる粒状充填材とポリビニールアルコール水溶液（以下、ポリマーと呼ぶ）から構成されている（表-1）。図-1は補修材充填工法の概要を示したものである。ジャッキアップしたまくらぎ下に空圧で粒状充填材を噴射充填したのち、ポリマーをまくらぎ周囲に散布して両者の反応による複合ゲルを形成させ、まくらぎを支持する。

粒状充填材とポリマーによる複合ゲルの形成メカニズムは以下のように考えられる。珪酸ソーダと有機酸が一旦、ポリマーに溶解する。このとき、有機酸により珪酸ソーダのpHが下げられ珪酸ソーダがゲル化する。これにポリマーが刺激されゲル化が促進され、ゲル同士が骨材（珪砂）を巻き込んで物理的に絡み合い、繊維状の複合ゲルが形成される。

筆者らはこれまでに一面せん断試験による強度特性から材料の最適配合を求める¹⁾とともに、実物大の模型を用いた繰返し載荷試験および実現場での試験施工²⁾を行ってきた。さらに、現場での施工性の観点から、粒状充填材の粒度が強度特性に及ぼす影響に関する検討³⁾も行っている。

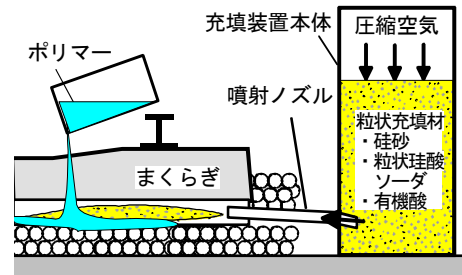


図-1 補修材充填工法

表-1 複合充填材の基本構成

材料	諸元	備考
ポリマー水溶液	ポリビニールアルコール (PVA) 1.2%水溶液	地盤改良材
粒状珪酸ソーダ	3号珪酸ソーダ造粒体	地盤改良材
有機酸粉末	スルファミン酸粉末	食品添加物
珪砂	3号人工珪砂	



写真-1 供試体作製手順



写真-2 軽量型枠内養生

表-2 試験ケース（一軸圧縮試験）

ケース	養生条件	養生日数	記号
1	空中養生	1, 4, 7, 14, 21, 28	D1, D4, D7, D14, D21, D28
2	水浸養生	7, 14, 21, 28	W7, W14, W21, W28
3	乾湿繰返し	7日空中→1日水浸	D7W1
4		7日空中→1日水浸→1日空中	D7W1D1
5		7日空中→1日水浸→7日空中	D7W1D7
6		7日空中→1日水浸→21日空中	D7W1D21

本工法を実用化するためには、現場で起こりうる様々な条件下での力学特性の把握が必要となる。これまでの室内実験は、軌道補修後列車運行までの時間を考慮して、養生期間を最長1

Influence of repeated drying and wetting on the strength properties of plugging material for repairing ballasted track, R. Kawaguchi and T. Mitachi (College of Industrial Technology, Nihon University), and K. Muramoto and T. Nakamura (Railway Technical Research Institute)

日に限定して行っている。また、現場で想定される乾湿繰返しの影響については未検討である。

そこで本研究では、現場条件に近似させる意味で、軌道荷重を支持した状況下での降雨による影響を調べるために、複合充填材の強度特性に及ぼす養生条件（養生日数と乾湿繰返し）の影響を一軸圧縮試験および一面せん断試験により把握することを目的とする。

3 実験方法

3.1 供試体作製

複合充填材の基本構成は表-1に示す通りで、ここで用いる造粒珪酸ソーダとは、現場での充填作業時に珪酸ソーダ粉末が飛散しないように、少量の粘土鉱物を用いて粒状化したものである。複合充填材の固形分の約7割を珪砂が占めている。

供試体作製手順は写真-1に示すようであり、実験手順は以下のようである。

① 3号珪砂、珪酸ソーダ、有機酸の分量を計量し、一つの容器に集約する。

② 所定の分量を入れたポリマーの容器に①の粒状材料を投入し、締固めることのないように注意しながら攪拌棒で攪拌し、ポリマーと粒状材料とを混合する。なお攪拌時間は、供試体の体積に応じて一軸圧縮試験で60秒、一面せん断試験で30秒とした。

3.2 一軸圧縮試験

攪拌混合後の試料を、写真-2に示す軽量型枠（内径50mm、高さ100mm）に投入し、すべての供試体について1時間経過後、軽量型枠から脱型した後に、養生期間へ入る。

所定の条件で養生後の供試体について、基本的にJIS A 1216に従って一軸圧縮試験を行った。ただし、圧縮速度は1.25mm/minで行い、応力ひずみ曲線にピークを生じない場合は、ひずみ15%に達した時点で試験終了とした。

試験ケースとして表-2に示す6ケースの実験を行った。すべての試験ケースで、型枠内で1時間経過後、脱型し、所定の条件で養生後一軸圧縮試験を行う。なお、データの再現性を確認するためにすべてのケースについて原則として2回の実験を行った（一面せん断の場合も同様）。以下、養生条件の違いによって表-2に示すように例えばD7W1D1（空中で7日間養生後1日水浸し、その後空中で1日養生）のように記号で表すこととする。脱型後および試験中の供試体の状態を写真-3に示す。

3.3 一面せん断試験

攪拌混合後の試料を、写真-4に示すようにせん断箱内（内径60mm、高さ40mm）に投入し、すべての供試体について5kN/m²（軌道荷重相当）の重りを載荷した状態で養生期間へ入る。これ



写真-3 脱型後および試験中の供試体

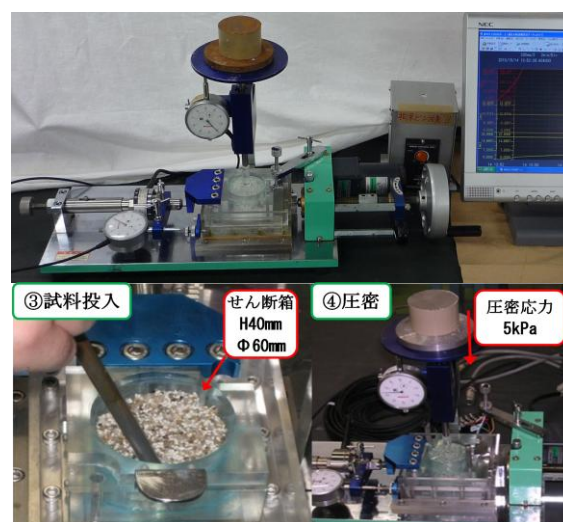


写真-4 一面せん断試験装置と実験手順

表-3 試験ケース（一面せん断試験）

養生条件	養生日数	記号
空中養生	1, 4, 7	D1, D4, D7
水浸養生	1日空中→1日水浸	D1W1
	4日空中→1日水浸	D4W1
	7日空中→1日水浸	D7W1

は、後述のように水浸によって一軸圧縮強度（載荷重ゼロでかつ非拘束条件で養生後の強度）が大きく低下することが判明したことから、載荷状態で養生することとしたものである。

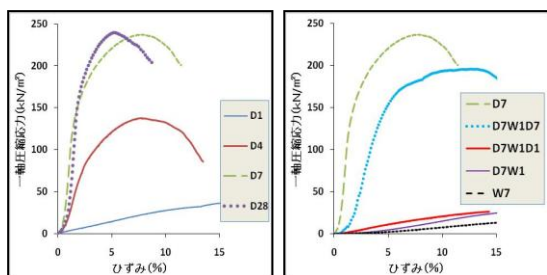
所定の条件で養生後の供試体について、一面せん断試験を行った。応力-水平変位曲線にピークを生じない場合は、水平変位7mmにおける応力を一面せん断強度とした。

試験ケースとして表-3に示す4ケースの実験を行った。空中養生の場合、所定の期間せん断箱内で養生後、一面せん断試験を行う。水浸させる場合、せん断箱内に水を張り、所定の期間せん断箱内で養生後、一面せん断試験を行う。

4 実験結果

4.1 一軸圧縮試験結果

表-2の養生条件の下で実施した一軸圧縮試験結果による代表的な応力-ひずみ曲線を示し



(a) 養生期間の影響 (b) 乾湿繰返しの影響
図-2 応力-ひずみ曲線

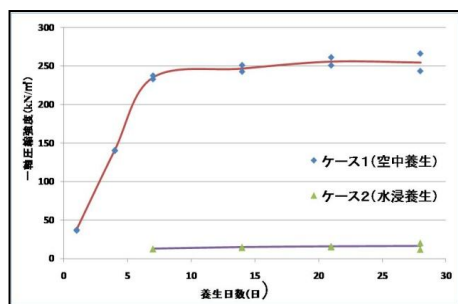


図-3 養生日数と一軸圧縮強度

たものが図-2である。図-2 (a) から分るように養生期間とともに圧縮強度が増大し、応力ひずみ曲線に明瞭なピークが生じる。しかし、D7以降の強度の増大はわずかで、D28とD7の強度の差は5%程度である。他の養生期間の実験値も含めて養生期間による強度の変化を示したのが図-3であり、強度の増加はD7でほぼ頭打ちになっている。このことから、7日間でゲル化の進行がほぼ収束すると考えてよいと思われる。

一方、図-2 (b) は7日間水浸後の供試体W7と空中養生後に乾湿繰返しを行った供試体の応力-ひずみ曲線を示したもので、図中にはD7の応力-ひずみ曲線も併せて示している。この図から明らかなように、型枠内で1時間養生後に7日間の水浸を行ったW7に比べれば2倍程度の強度を示すものの、D7W1は7日間空中養生後の1日の水浸で強度が激減していることが分る。しかし、その後乾燥状態を保つことにより徐々に強度が回復し、D7W1D7ではD7の80%程度にまで回復する。なお、W7以降水浸状態を続けてもその後の強度低下はみられない(図-3)。

図-4は養生日数と乾湿繰返しによる一軸圧縮強度の変化を示したもので、水浸による強度の大幅な減少とその後の空中養生による回復の様子が明らかである。

4.2 一面せん断試験結果

上記の一軸圧縮試験では、1日水浸で大きな強度低下が生じた。この試験の場合、養生中の供試体には荷重が載荷されていないこと、また非拘束状態にあるという点で現場の条件との違いがあった。そこで、軌道自重相当の鉛直応力

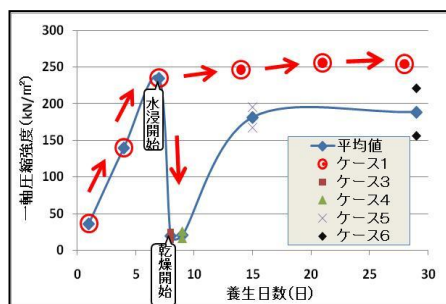


図-4 養生条件と一軸圧縮強度の関係

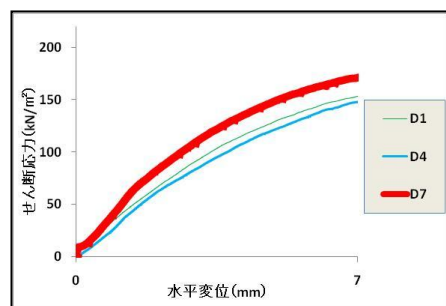


図-5 初期空中養生期間の影響
(せん断箱内養生)

(5 kN/m²) を載荷した状態で一連の養生条件(表-3)でせん断箱内で養生後の供試体について一面せん断試験を行った。

図-5は空中養生期間を変えて実施した一面せん断試験によるせん断応力-水平変位関係を示したものである。養生期間とともに強度が増大する傾向にはあるが、一軸圧縮試験ほど明確な養生効果はみられない。図-6はせん断中の垂直変位-水平変位関係であるが、ダイレイタンスー特性においても明確な差はみられない。

空中養生中の一軸圧縮および一面せん断の環境条件の違いは、空気に触れる供試体表面積の違いにある。すなわち、せん断箱内にある供試体は空気に触れる面積が少なく、ゲル化の進行が妨げられている可能性がある。そこで、攪拌混合後にせん断箱に投入して1時間せん断箱内で養生した供試体を、せん断箱から取り出して軌道荷重載荷状態で空中養生あるいは乾湿繰返し養生を行った。以下、この条件の下での試験を「せん断箱外養生一面せん断試験」と呼ぶ。

4.3 せん断箱外養生一面せん断試験結果

所定の養生期間(表-3)の養生後、試験開始前に供試体をせん断箱内に戻して一面せん断試験を行う。なお、その他の実験手順は3.3と同様である。

図-7はせん断箱外で初期空中養生した場合と、その後の乾湿繰返しの影響を一面せん断試験による応力-水平変位曲線で示したものである。D1~D7の実験結果から、養生日数とともに顕著なせん断応力の増加傾向がみえる。また、

一日の水浸で強度が激減する (D7W1～D7W1) もの、初期空中養生期間が一定の期間 (D4) を越えれば、ゲル化が進行する結果、水浸による減少後の強度が 100kN/m^2 程度にとどまると言える。これは、せん断強度と養生日数の関係を示した図-9からも明らかである。

せん断中の垂直変位の挙動を示したのが図-8である。乾湿繰返し後の各供試体のダイレイタンシー特性に明確な差は現れないが、D1～D7の試験から空中養生期間が長いほど大きな正のダイレイタンシー（膨張）の発生がみられる。これは、養生期間とともにゲル化が進行し、粒子間の固結度が高まる結果、せん断面じょうでの粒子の相互移動による鉛直変位が大きくなると解釈される。図-7と図-5の比較から明らかなように、せん断強度の発現には乾燥によるゲル化の進行が最も大きな要因であることが分る。

5 まとめ

本研究における一連の一軸および一面せん断試験の結果から、以下の知見が得られた。

《一軸圧縮試験》

1) 養生日数とともに強度の増加がみられるが、7日間でゲル化の進行がほぼ収束する結果、その後の養生は強度増加につながらない。

2) 水浸によって大きく強度が減少するが、その後の空中養生で、水浸前の強度の80%程度まで回復する。

《一面せん断試験》

1) せん断箱の内と外で養生した結果の比較から、せん断強度の発現には乾燥によるゲル化の進行が支配的要因となっていることが確認された。

2) 水浸によってせん断強度が大きく低下するが、初期空中養生期間が4日程度を越えれば 5kN/m^2 の垂直応力の下で 100kN/m^2 以上の強度を発揮できる。から、せん断強度の発現には乾燥によるゲル化の進行が支配的要因となっていることが確認された。

参考文献

- 1) 村本勝己, 中村貴久, 三田地利之, 大木茂貴, 菅沼辰彦: ポパールを用いた軌道補修材料の一面せん断試験, 第44回地盤工学研究発表会, pp. 883-884, 2009.
- 2) 中村貴久, 村本勝己, 三田地利之: 水ガラス・ポリマーゲル充填による有道床軌道の補修法の開発, 鉄道総研報告, 第23巻, 第10号, pp. 23-28, 2009年10月.
- 3) 中村貴久, 三田地利之, 川口令, 村本勝己: ポパールと粒状珪酸ソーダを用いた軌道補修材料の粒度と強度特性の関係, 第45回地盤工学研究発表会, pp. 661-662, 2010.

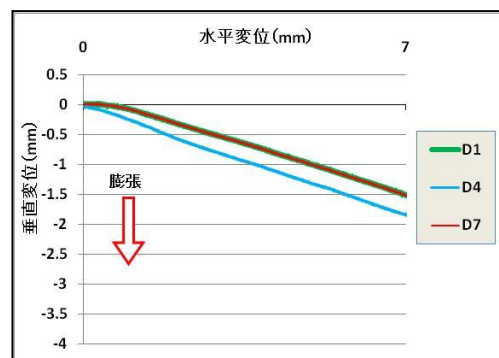


図-6 垂直変位-水平変位関係 (せん断箱内養生)

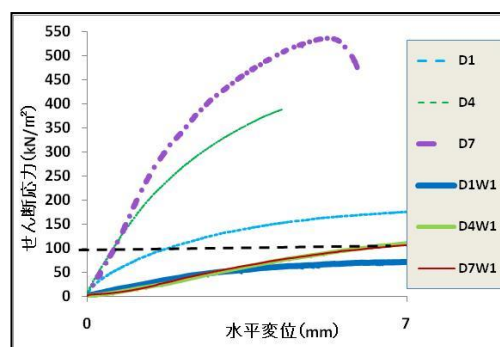


図-7 初期空中養生と乾湿繰返しの影響 (せん断箱外養生)

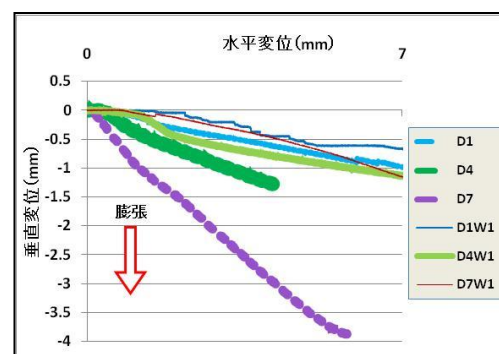


図-8 垂直変位-水平変位関係 (せん断箱内養生)

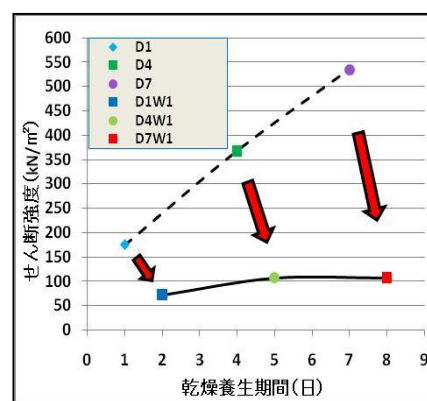


図-9 せん断強度と養生日数の関係 (せん断箱外養生)