

ポリマーセメントモルタルを用いた トンネル区間用軌道スラブの断面修復

高橋 貴蔵* 北条 優* 高橋 成汰*

Cross-Section Repair of Track Slab for Tunnel Section Using Polymer Cement Mortar

Takatada TAKAHASHI Masaru HOJO Narita TAKAHASHI

Direct seat fastening systems are used for slab tracks laid in straight sections in tunnels. A shoulder of a track slab supports the curved part of a plate-spring used in the fastening system. However, it is reported that shoulders of some track slabs are damaged due to ASR or rebar corrosion. To repair the damages, resin mortars with high material costs are generally used for cross-section repair of track slabs. Therefore, from the viewpoint of cost, we investigated the application of Polymer Cement Mortar (PCM) with lower material costs than Resin Mortar, to the cross-section repair of track slabs in tunnel sections. As the results of various tests, we confirmed that the shoulder repaired with PCM has sufficient shear capacity and trains can be passed after 2 hours of material age.

キーワード：ポリマーセメントモルタル，断面修復，軌道スラブ，トンネル区間

1. はじめに

スラブ軌道は山陽新幹線（岡山 - 博多間）以降，新幹線の主要な軌道構造として用いられており，高速で走行する列車を安全に支持している。スラブ軌道を構成する軌道部材の一つである軌道スラブは，鉄筋コンクリート製あるいはプレストレスト鉄筋コンクリート製の版であり，レールの間隔を保持するとともに，列車荷重を構造物に伝達する役割等を有している。軌道スラブで用いられているレール締結装置の種類は，敷設される区間で異なる。一般に，トンネル区間の曲線や明かり区間では軌道変位に対する調整量が大きい直結8形レール締結装置等といったタイププレート式のレール締結装置が用いられている。タイププレートは軌道スラブに摩擦接合されるため，横圧等の軌道スラブ面に対して平行方向の荷重は，摩擦力としてタイププレートから軌道スラブに伝達される。一方，トンネル区間の直線では明かり区間用のタイププレート式と比べて軌道変位の調整量が少ない図1に示す座面式の直結4形レール締結装置が用いられている。直結4形レール締結装置は軌道スラブ上面の連続する窪みの中に設置され，板ばねの曲面部を軌道スラブの肩部（図2参照）で受けることによって，横圧を支える構造になっている。そのため，肩部はレールの軌間を保持するための重要な箇所と言える。しかし，アルカリに対して反応性を有する骨材あるいは海砂を含んだコンクリートが使用された一部の軌道スラブでは，アルカリ骨材反応¹⁾（以下，「ASR」とする。）や鉄筋の腐食²⁾によ

て肩部のコンクリートで図3に示すような欠損が生じている。

このような欠損等が生じた軌道スラブに対しては，スラブ軌道各部補修の手引き³⁾（以下，「手引き」とする。）に基づき，図4に示すように樹脂モルタル（樹脂と細骨材等による補修材。以下，「RM」とする。）を用いた断面修復が行われる。トンネル区間ではRMによる断面修復によって高い補修効果が得られているものの，材料費が高いという課題があった。

RMと比較して材料費が安い断面修復材としてポリ



図1 直結4形レール締結装置

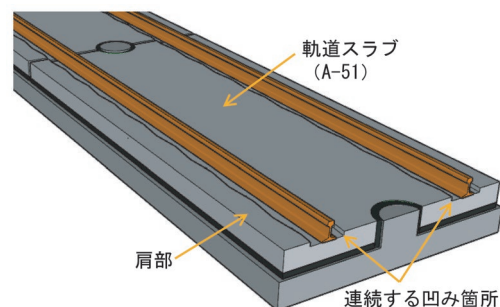


図2 トンネル用軌道スラブの外観

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

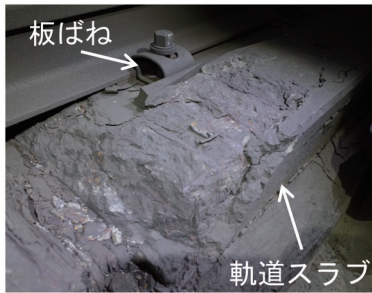


図3 軌道スラブ肩部の欠損状況の例



図4 軌道スラブ肩部に対する断面修復の状況

マーセメントモルタル（セメント，細骨材およびポリマー混和剤等による補修材。以下，「PCM」とする。）がある。PCMはASRや鉄筋腐食等の劣化が生じたコンクリート構造物の断面修復に広く活用されており，補修方法がマニュアル等としてまとめられている^{例え4)}。ただし，養生時間が短く，振動の影響を受け，断面修復部で直接荷重を支える軌道スラブのような構造物に対する断面修復にPCMを用いることについては十分な検討が行われていなかった。そこで，PCMをトンネル区間の軌道スラブに対する断面修復材として使用することを目的に，PCMの付着強度，PCMで断面修復した肩部の耐力および若材齢時におけるPCMのせん断付着強度に関する検討を行った。なお，本研究で用いたRMには手引きに示されている補修材を，またPCMには急硬性と無収縮性を有するとともに，断面修復部のひび割れが再劣化の要因とならないように，ひび割れ抵抗性に優れた短繊維がプレミックスされている補修材を用いた。

2. PCMの付着強度

2.1 付着強度試験用の供試体

PCMと軌道スラブの界面における付着強度を確認することを目的に，断面修復した軌道スラブの一部を模擬した付着試験用供試体（以下，「付着供試体」とする。）のコアを引き上げる試験（以下，「付着強度試験」とする）を実施した。付着供試体の外観を図5に示す。付着供試体の寸法は100×100×200mmとした。付着供試体のコンクリートには，軌道スラブの配合を参考にして決定した表1に示す配合を用いた。コンクリートの骨材の一部には，アルカリに対して反応性を有する粗骨材および細骨材を用い，さらにASRを促すためにアルカリ分としてNaClを添加した⁵⁾。コンクリートの空気量は，東北新幹線（大宮・雀宮間）および上越新幹線（大宮・水上間）建設時に軌道スラブに対して定められた管理値の下限値である2%とした^{6) 7)}。コンクリートの目標圧縮強度は軌道スラブと同じ40N/mm²とし，試験時におけるコンクリートの圧縮強度は，44.8N/mm²であった。

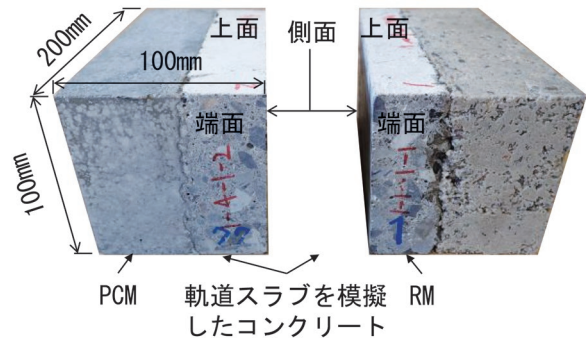


図5 付着供試体の外観

表1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	NaCl (kg/m ³)	空気量 (%)
45.0	45.0	10.0	2.0



図6 PCMの打込み状況

付着供試体の作製では，はじめに高さ100mm×幅50mm×長さ200mmのコンクリート供試体の片方の側面を電動ハンマではつり取った。はつり深さは5~10mm程度とした。次に，はつり面に表面処理剤を塗布し，図6に示すように1つの鋼製型枠に2体のコンクリート供試体を設置した。2体のコンクリート供試体の間には縁切り材を設置した。最後に，鋼製型枠の空間に断面修復

材を注入した。なお、付着供試体のコンクリート上面からの吸水を防止する目的で、RMのコンクリート上面に対してはエポキシ樹脂、PCMのコンクリート上面に対してはシラン・シロキサン系表面含浸材を保護材として塗布した。RMに対する保護材は、RMに用いられているエポキシ樹脂であり、手引きに基づいて選定した。また、同じ目的で全ての付着供試体のコンクリート側面・端面に対してエポキシ樹脂を塗布した。

2.2 付着強度試験の方法

図7にコアの削孔断面および付着強度試験の状況を示す。付着供試体のコンクリート側から直径50mmのコアを削孔し、コア上面に接着した治具（直径50mm）を建研式接着力試験器で引き上げ、測定された最大荷重をコアの面積で除算することで付着強度を算出した。なお、付着供試体1体に対して3本のコアを削孔した。

付着供試体の条件を表2に示す。断面修復材はRMとPCMの2種類とした。夜間に施工した直後に列車を通過させる必要があることから、PCMに対して振動を与えるCASEも設定した。断面修復材が硬化する過程での列車通過の影響を想定し、材齢1時間から1時間間隔で1分間の振動（方向：鉛直、振動数：25Hz、振幅：0.8mm、回数：1500回）を8回与えた（17両編成に対して176本分相当）。PCMとコンクリートの界面に対して、せん断方向の振動が作用すると界面の付着強度が低下する可能性がある⁸⁾。そこで、図8に示すような軌道スラブ側面を断面修復した場合を想定し、PCMとコンクリートの界面にせん断方向の振動を与えた。断面修復された軌道スラブの底面はてん充層で支持されること、および材齢1時間で振動を与える必要があることから、ここでは、付着供試体を鋼製型枠に入れたままの状態とし、鋼製型枠を振動台に固定して振動を与えた。

付着強度試験は、各CASEにおけるASR前およびASR後に実施した。各ケースにおける試験数は付着供試体1体に対して3回とした。ASRによるコンクリートの膨張を模擬するため、付着供試体の底面10mmを浸水させた状態で、「コンクリート構造物のコア試料による膨張率の測定方法（JCI-S-011-2017）」を参考に温度40℃かつ相対湿度95%以上の環境下に保管することでASRを促進させ（図9参照）、付着供試体のコンクリート部分の膨張量を0.05%とした。ここで、ASRが原因で別途現地より撤去した軌道スラブから採取した直径50mmのコアに対して促進膨張試験を実施した結果、測定材齢91日における膨張率は0.040~0.055%であったことから、付着供試体のコンクリート部分の膨張量を0.05%に設定した。

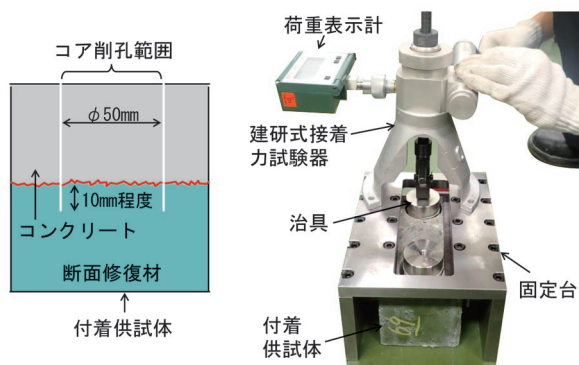


図7 コアの削孔断面および付着強度試験の状況

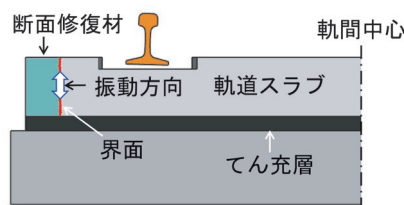


図8 振動方向

表2 付着供試体の条件

CASE	断面修復材	振動
1	RM	なし
2	PCM	なし
3	PCM	あり

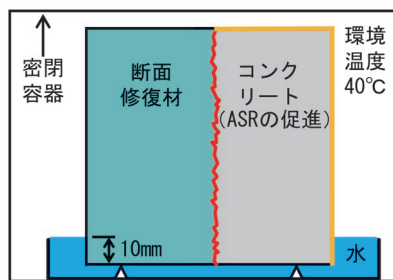


図9 促進膨張時の状況

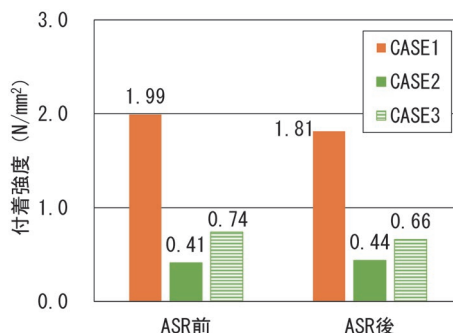


図10 付着強度試験の結果（平均値）

2.3 付着強度試験の結果

付着強度試験の結果を図10に示す。なお、図10に示す付着強度は平均値である。

CASE1とCASE2を比較すると、ASRの前後共にPCMの付着強度がRMの25%程度となった。本研究で用いたRMは付着強度が高いエポキシ樹脂と細骨材で構成されているためと考えられる。

ASR前のCASE2とCASE3を比較すると、振動を与えた後のPCMの付着強度は 0.41N/mm^2 から 0.74N/mm^2 に増加した。材齢1時間から8時間かけて1日相当分の列車本数に対する繰返し載荷を実施することで、PCMが密実になったためと考えられる。

ASR後の付着強度はCASE1で 1.81N/mm^2 、CASE2で 0.44N/mm^2 、CASE3で 0.66N/mm^2 となり、ASR前と比較して付着強度の低下率は10%程度以内であった。CASE2ではわずかながら増加したが、付着強度試験のばらつきの範囲内であると考えている。

以上より、本試験においてPCMの付着強度はRMの25%程度であり、材齢1時間における振動では低下せず、ASRによる0.05%のコンクリートの膨張によって10%程度低下することを確認した。したがって、PCMを軌道スラブの断面修復に用いるためには、PCMで断面修復した軌道スラブの耐力に関する検討が必要である。

3. 修復した軌道スラブ肩部の水平載荷試験

3.1 水平載荷試験用の軌道スラブ試験体

トンネル区間用の軌道スラブにおいて、肩部のコンクリートに欠損が生じている場合は断面修復を行う必要がある。そこで、トンネル区間用の軌道スラブの断面修復におけるPCMの適用性を検討するため、PCMで断面修復した軌道スラブの肩部に対する水平載荷試験を行った。水平載荷試験には、現地から撤去したトンネル区間用の軌道スラブA-51(図11参照。以下、「軌道スラブ試験体」とする。)を用いた。なお、軌道スラブ試験体の表面にはASRによるものと考えられる微細なひび割れが生じていた。

図12に軌道スラブ試験体に対する断面修復箇所および水平載荷試験の位置を示す。軌道スラブ試験体に対する断面修復の範囲は、片側の肩部全面とした。断面修復に用いるPCMの付着強度は、軌道スラブの断面修復に用いられているRMよりも低いことが確認されたことから、図13に示すように通常のはつり面の他に、25mm間隔のクロス状の溝(深さ2mm程度)を設けたはつり面の条件も加えた。クロス状の溝は水平載荷に対するせん断方向の付着強度の増加を期待したものである。なお、片側の肩部(2.5m)に対するクロス状の溝の加工に要する時間は、作業員1名で5分程度であった。

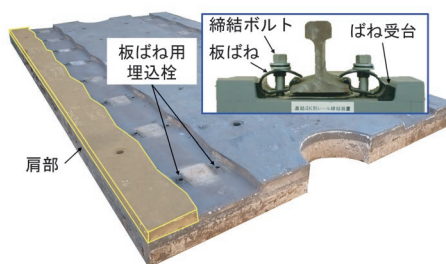


図11 水平載荷試験に用いた軌道スラブ

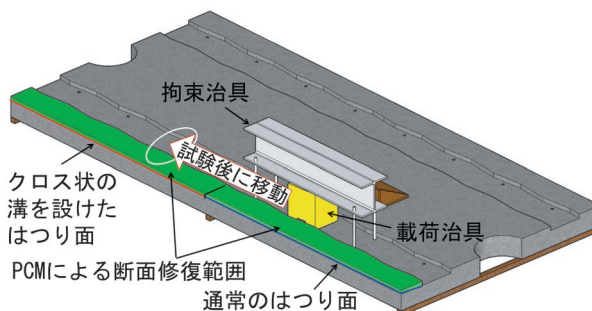


図12 断面修復箇所および水平載荷試験の位置



(a) 通常のはつり面 (b) 溝を設けたはつり面

図13 はつり面の状況

コンクリートのはつり面を高圧エアで清掃した後、PCM用の表面処理剤を刷毛で塗布し、PCMを施工した。PCMの施工時に許容される温度の下限は 5°C であり、本試験における断面修復作業は気温 7.8°C で行った。

3.2 水平載荷試験の載荷方法

図14に水平載荷試験の平面図、図15に水平載荷試験の状況を示す。水平載荷試験はPCMの強度が十分に発現されたと考えられる材齢31日目に実施した。水平載荷試験では、載荷治具を用いて肩部に荷重を与えることとし、加力には油圧シリンダを用いた。油圧シリンダの底部については、軌道スラブ上面に固定した反力治具で支持した。載荷治具に対する油圧シリンダの載荷点と肩部の加力点の高さが異なるため、試験中に載荷治具が転倒しないように、拘束治具で載荷治具の上面を抑えた。なお、拘束治具と載荷治具の間には2枚重ねたテフロンシートを挿入し、摩擦力が生じないようにした。幅90mmの板ばねから断面修復した肩部に荷重が加わることを想定し、断面修復した肩部と載荷治具の間には、図

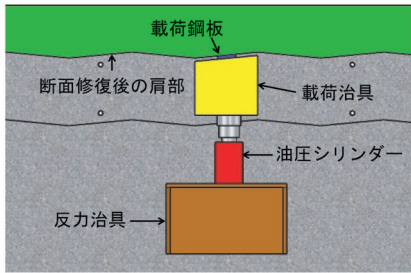


図 14 水平载荷試験の平面図

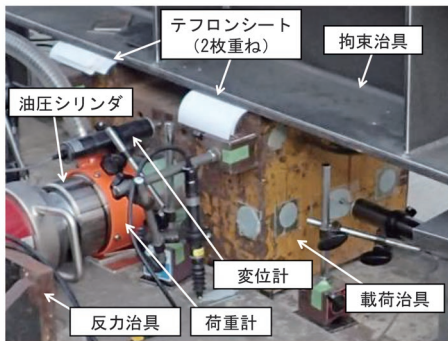


図 15 水平载荷試験の試験状況



図 16 载荷鋼板の挿入状況

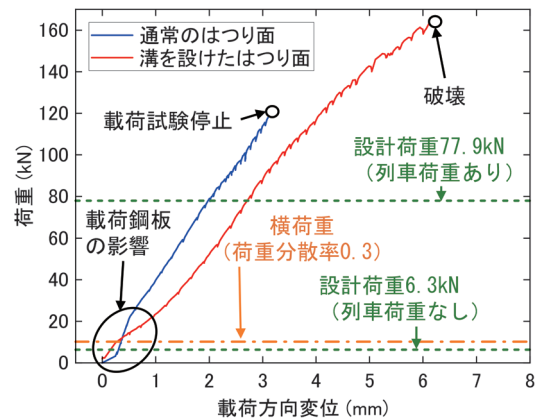


図 17 荷重－载荷方向変位関係

16に示すように幅90mmの载荷鋼板を挿入した。

水平载荷試験は、図12に示した通り、はつり面の状態が異なる2箇所を実施した。通常のはつり面に対する水平载荷試験の最大荷重の上限は、軌道スラブ上に固定した反力治具を固定する部分の耐力を考慮して120kNとした。ただし、2ケース目となる溝を設けたはつり面に対する水平载荷試験では、十分な安全を確保した後、破壊が生じるまで载荷を行った。

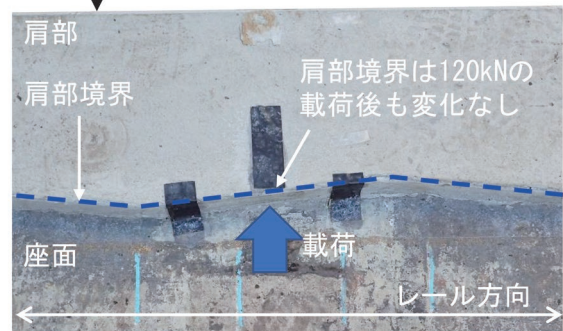
水平载荷試験では、荷重および载荷治具の変位を測定した。

3.3 水平载荷試験の結果

図17に水平载荷試験で得られた荷重と载荷治具の载荷方向変位の関係を示す。軌道スラブの締結部に対する破壊に関する照査では、静止輪重を85kNとした条件において、列車荷重が作用していない場合の設計荷重を6.3kN（ロングレール横荷重）、列車荷重が作用している場合の設計荷重を77.9kN（横圧+ロングレール横荷重）としている⁹⁾。また、曲げモーメントに対する軌道スラブの疲労破壊に関する照査では、輪重の他に、常時生じる横圧として34kNが用いられており、軌道横断方向の荷重分担率を0.3とした場合における1締結装置あたりに作用する横荷重として10.2kNが用いられている⁹⁾。照査に用いられる設計荷重および横荷重は、図17中にも示している。

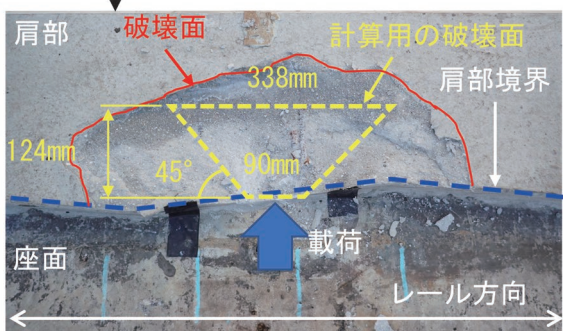
図17より、通常のはつり面および溝を設けたはつり

軌道スラブ側面



(a) 通常のはつり面

軌道スラブ側面



(b) 溝を設けたはつり面

図 18 水平载荷試験後の断面修復部（上面図）

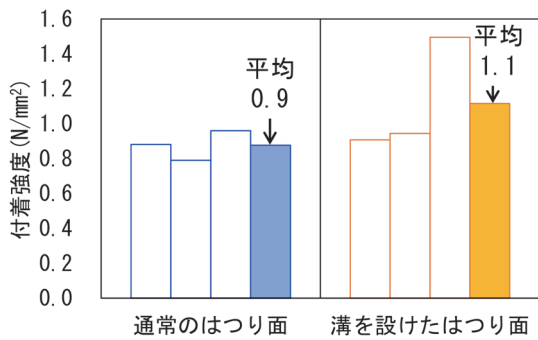


図 19 断面修復部の付着強度

面ともに、荷重荷重は設計荷重 77.9kN 以上となり、十分な耐力を有していることを確認した。荷重試験後の肩部の状況を図 18 に示す。通常のはつり面を断面修復した肩部では、120kN の水平荷重試験で変形している様子は確認されなかった。また、破壊するまで荷重を継続した溝を設けたはつり面では、肩部の PCM 内部に破壊面が形成された。PCM とはつり面の界面で必要とされるせん断付着強度を検討するためには破壊面の面積が必要である。ここでは、安全側の評価となるように実際よりも破壊面の面積が小さくなるように、幅 90mm の荷重鋼板から 45 度方向に、肩部の幅 248mm の半分まで破壊したと仮定し、 $(90+338) \times 124/2 = 26536\text{mm}^2$ とした。なお、破壊面の面積は 4 章で使用する。

1 締結装置あたりに作用する横荷重 10.2kN によって生じる荷重治具の荷重方向変位は 0.3mm と微小であった。なお、荷重初期において溝を設けたはつり面側の荷重方向変位の方が大きい傾向にあったのは、図 16 に示した荷重治具と肩部の間に挿入した荷重鋼板の接触状態が荷重初期 (20kN 程度まで) の変位に影響を与えたためと考えられる。

水平荷重試験後に荷重箇所付近 (各 3 箇所) で建研式接着力試験器を用いた付着強度試験を行った。その結果、図 19 に示すように通常のはつり面の付着強度が 0.9N/mm^2 、溝を設けたはつり面の付着強度が 1.1N/mm^2 となった。溝を設けたはつり面の付着強度が通常のはつり面と同程度以上になった要因として、溝によって付着面積が増加したことが考えられる。

以上より、水平荷重試験の結果、変位量および耐力上の問題が無いことから、座面式のレール締結装置が用いられているトンネル区間用の軌道スラブに対して、肩部の断面修復に PCM を用いることが可能と判断できる。

4. 若材齢時における PCM のせん断付着強度

4.1 2面せん断試験の供試体

PCM による断面修復後に列車を通過させることが可

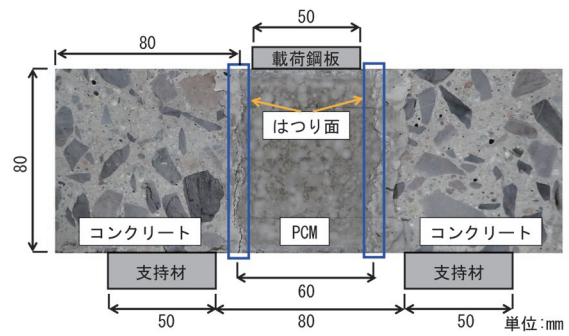


図 20 2面せん断試験における供試体の設置状況

能な養生時間について検討するため、若材齢時における 2面せん断試験を実施した。2面せん断試験に用いた供試体について以下に示す。

軌道スラブから切り出したコンクリート角柱の側面をはつり、その後 $80 \times 80 \times 80\text{mm}$ に成型し、12体のコンクリートブロックを作製した。ここで、6面のうち1面のみが通常のはつり面となる。この内、6体に対しては、図 13 (b) と同様に 25mm 間隔のクロス状の溝 (深さ 2mm 程度) を加工したはつり面とした。はつり面を高圧エアで清掃した後、PCM 用の表面処理剤を刷毛で塗布した。

次に、はつり面の状態が同じ 2体のコンクリートブロックを 1組とし、はつり面が向かい合うよう固定した。コンクリートブロックの間隔は 60mm とした。2体のコンクリートブロックを囲むように型枠を設けた後、PCM を打込み、2面せん断試験用の供試体を作製した。作製した 2面せん断試験用の供試体の数は、通常のはつり面用が 3体、溝を加工したはつり面用が 3体である。なお、PCM 打込み時の気温は、 12.1°C であった。

4.2 2面せん断試験の方法

2面せん断試験における供試体の設置状況を図 20 に示す。供試体の支持材同士の間隔を 80mm、荷重鋼板の幅を 50mm とすることで、凹凸があるはつり面のせん断付着強度に支持材や荷重鋼板が影響しないようにした。

試験では荷重鋼板上で測定した荷重をせん断面の面積 (2面分) で除算して、せん断付着強度を算出した。なお、PCM の圧縮強度試験を実施するため、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体も作製した。

4.3 2面せん断試験の結果

材齢 2 時間、1 日、7 日で実施した圧縮強度試験の結果を図 21 に、2面せん断試験で得られたせん断付着強度を図 22 に示す。図 21 より、材齢 2 時間における圧縮強度は 8.0N/mm^2 であり、その後、材齢 1 日で 18.8N/mm^2 、材齢 7 日で 44.0N/mm^2 となった。

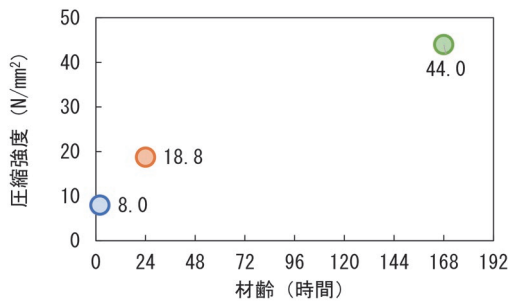


図 21 PCM の圧縮強度

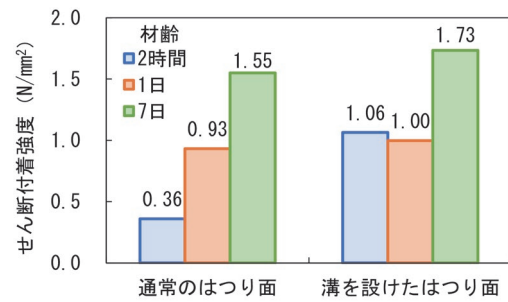


図 22 2面せん断試験によるせん断付着強度

図 22 より、材齢 1 日および 7 日におけるせん断付着強度は、クロス状の溝加工を行ったはつり面の方が 10% 程度大きくなった。材齢 2 時間のせん断付着強度については、クロス状の溝加工を行ったはつり面において 1.06N/mm²、通常のはつり面において 0.36N/mm² となり、大きく異なった。クロス状の溝加工を行うことで材齢 2 時間のせん断付着強度が大幅に増加した理由として、溝に PCM が入り込むことで付着面積が増加したこと、および溝に入り込んだ PCM のせん断強度が影響したことが考えられる。なお、材齢 1 日以降で溝を設けたはつり面のせん断付着強度の増加分が小さくなった要因として、PCM のせん断強度が増加することで PCM 自体の影響は小さくなり、付着面積の増加分のみが影響を与えたためと考えられる。

2.3 節で示した通り、建研式接着力試験器で得られた付着強度は、「振動の影響」では低下せず、「促進膨張の影響（膨張量 0.05% 程度以内）」により 10% 程度低下した。建研式接着力試験器で得られた付着強度とせん断付着強度の低下割合が等しいと仮定した場合、材齢 2 時間でのせん断付着強度は、溝を設けたはつり面において 0.95N/mm²(=1.06N/mm²×0.9)、通常のはつり面において 0.32N/mm²(=0.36N/mm²×0.9) となる。また、材齢 2 時間における破壊面が図 18 に示した破壊面と等しいと仮定した場合、3.3 項に示した 1 締結装置あたりに作用する横荷重 10.2kN と破壊面の面積からせん断付着応力を算出すると 0.38N/mm²(=10.2kN×1000/26536mm²) となる。したがって、溝を設けたはつり面のせん断付着強度（繰返し荷重と促進膨張の影響を考慮）0.95N/mm²のみがせん断付着応力 0.38N/mm²を満足する結果となった。

以上より、25mm 間隔のクロス状の溝（深さ 2mm 程度）を加工したはつり面であれば、PCM で断面修復した場合であっても材齢 2 時間で列車を通させることが可能と考えられる。なお、養生時間を長くする、あるいは養生温度を高くする等の若材齢時のせん断付着強度を増加させる対策を行うことで、通常のはつり面でもせん断付着応力 0.38N/mm²を満たす可能性がある。

5. まとめ

トンネル区間用の軌道スラブの断面修復にポリマーセメントモルタル（PCM）を用いるための検討を実施して得られた結果を以下にまとめる。

- ・本試験において PCM の付着強度は RM の 25% 程度と小さいことを確認した。また、PCM の付着強度は材齢 1 時間後に開始した繰返し荷重による振動では低下せず、ASR による 0.05% のコンクリートの膨張で低下する付着強度は 10% 程度以内に収まることを確認した。
- ・PCM の付着強度が RM よりも小さいことから、PCM で肩部を断面修復したトンネル区間用の軌道スラブに対して水平荷重試験を行った結果、変位量および耐力について問題が無いことを確認した。また、ASR によって付着強度が 10% 低下しても、十分な耐力を有することを確認した。
- ・2面せん断試験を行った結果、25mm 間隔のクロス状の溝（深さ 2mm 程度）を設けたはつり面とすることで、PCM を用いる場合であっても材齢 2 時間で列車を通すことが可能であることを確認した。

文 献

- 1) 山根寛史, 森山陽介: 山陽新幹線における軌道スラブの変状実態調査結果, 新線路, (株) 鉄道現業社, pp.12-14, 2011.12
- 2) 高橋貴蔵, 淵上翔太, 関根悦男, 飯島亨: 経年軌道スラブの劣化原因と耐力の評価, 日本鉄道施設協会誌, (社) 日本鉄道施設協会, pp.28-31, 2011.04
- 3) 公益財団法人鉄道総合技術研究所: スラブ軌道各部補修の手引き, 2021
- 4) 国立研究開発法人土木研究所: コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル (案), 2016
- 5) 濱崎仁, 山田義智, 福山智子, 須藤裕司: 亜硝酸リチウム含浸による経年構造物の補修工法に関する屋外暴露試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1519-

- 1524, 2015
- 6) 日本国有鉄道東京第三工事局：東北新幹線総合試験線工事誌, pp.623, 1979
- 7) 日本鉄道建設公団東京新幹線建設局：上越新幹線工事誌大宮・水上間, pp.989, 1983
- 8) 椿龍哉, 中澤正典：振動作用下で硬化する断面修復材の付着強度の簡易試験方法, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.162-168, 2010
- 9) 公益財団法人鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説－軌道構造, 丸善出版, 2012