

経年軌道スラブ埋込カラー部の機能評価

本野 貴志* 若月 修**
 飯島 亨*** 山根 寛史#

Functional Evaluation of Collar Part of Fastening of Aged Slab Track

Takashi MOTONO Osamu WAKATSUKI
 Toru IJIMA Hiroshi YAMANE

Slab track has been developed to reduce the maintenance cost related to track, and it has passed 40 years since the first slab track was installed in a revenue line. Recently, it has been feared that there is a possibility that the function of the rail fastening system cannot be demonstrated because of the concrete deterioration by acid attack around the collar part of the fastening of slab track. In this study, a harmful alteration of concrete was estimated by a constructed forecasting model. Moreover, various examinations with focus on the deterioration of slab concrete were carried out to evaluate the function of the rail fastening system. As a result, the progress of the acid deterioration was identified in the concrete near the collar part of the fastening of slab track. However the function of the rail fastening system was confirmed to be operational at the time of examinations.

キーワード：軌道スラブ，埋込カラー，アンカーボルト，酸劣化，直結8形レール締結装置

1. はじめに

軌道スラブは保守省力化軌道として開発・使用され、本格的な採用から約40年が経過している。近年、A55形軌道スラブに使用されている直結8形レール締結装置のタイプレート固定用アンカーボルトを取付ける埋込カラー部周辺で、コンクリートの酸劣化が確認されている。コンクリートの酸劣化は図1に示すように埋込カラー部でカラーの割れが発生し、その周辺で止水油の漏れが影響して発生している。そもそも止水油は、アンカーボルトおよびアンカープレートの防錆目的で使用されているが、水が混入した止水油の一部が加水分解により酸性化し、アルカリ性のコンクリートに接すると酸劣化を進行させる¹⁾。そこで、埋込カラー部周辺の酸劣化が進行した場合、レール締結装置としての性能が発揮できない恐れがあることから、本研究ではコンクリート酸劣化の要因となっている止水油の分析、埋込カラー周辺コンクリートの劣化状態調査および劣化状態における各種の埋込カラー部性能評価試験を行い、経年使用された軌道スラブ埋込カラー部の機能評価を行った。

2. 軌道スラブの試験概要

各種調査・試験に供したA55形軌道スラブは、西日本旅客鉄道株式会社の協力を得て撤去したもの（以下、「経年スラブ」という）である。また、絶縁抵抗試験では、未使用の軌道スラブ（以下、「未使用スラブ」という）と比較を行った。表1に軌道スラブの調査および試験の内訳を示す。

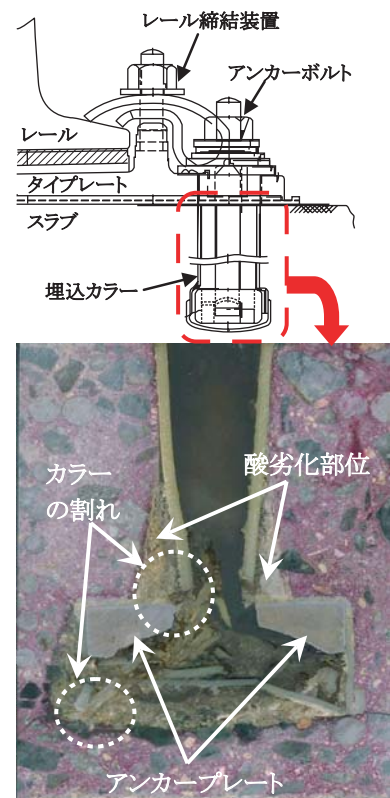


図1 埋込カラー部切断面

* 軌道技術研究部（軌道構造）
 ** 総務部（前 軌道構造）
 *** 材料技術研究部（コンクリート材料）
 # 前 軌道技術研究部（現 西日本旅客鉄道株式会社）

特集：軌道技術

表1 軌道スラブの調査・試験内訳

敷設環境		明かり	トンネル	未使用
経年		約32年	約34年	—
調査・試験	止水油の採取および分析	○	○	×
	埋込カラー周辺の劣化調査	○	○	×
	埋込カラーの引抜破壊試験	○	○	×
	レール締結装置横圧強度試験	○	×	×
	アンカーボルト引張破壊試験	○	×	×
	アンカーボルトクリープ試験	○	×	○
絶縁抵抗試験		○	×	○

3. 止水油の分析

3.1 止水油の採取

止水油の分析には、明かり区間およびトンネル区間で使用されている軌道スラブより採取したものをを用いた。また、西日本旅客鉄道株式会社では、止水油の酸性化を防止する目的で平成16年9月から試験的に錠剤状のpH調整剤を埋込カラー部に投入しており、このpH調整剤の効果を確認する目的で、pH調整剤を投入した箇所についても止水油を採取した。pH調整剤とは、主成分がケイ酸ナトリウム (Na₂SiO₃: 水に可溶であり、水溶液は加水分解されアルカリ性を示す) の固形物である (図2)。



図2 pH調整剤

酸性化を防止する目的で平成16年9月から試験的に錠剤状のpH調整剤を埋込カラー部に投入しており、このpH調整剤の効果を確認する目的で、pH調整剤を投入した箇所についても止水油を採取した。pH調整剤とは、主成分がケイ酸ナトリウム (Na₂SiO₃: 水に可溶であり、水溶液は加水分解されアルカリ性を示す) の固形物である (図2)。

3.2 止水油の分析方法

採取した止水油は、遠心分離により液体と固体に分け、それぞれの試料について赤外線吸収スペクトル分析を行った。また、水が混入して水溶液となっている箇所についてはpH測定を行った。

3.3 止水油の赤外線吸収スペクトル分析結果

採取した止水油の赤外線吸収スペクトル分析結果を表2に示す。表より、トンネル区間の湿潤状態にある箇所および明かり区間では、水の混入が確認されたが、トンネル区間の乾燥状態にある箇所では、水の混入がないことを確認した。

表2 赤外線吸収スペクトル分析結果

No.	敷設環境	pH調整剤の有無	水の混入の有無
1	明かり	無し	有り
2	明かり	無し	無し
3	明かり	無し	有り
4	明かり	無し	有り
5	トンネル (湿潤)	無し	有り
6	トンネル (湿潤)	無し	有り
7	トンネル (乾燥)	有り	無し
8	トンネル (乾燥)	有り	無し

3.4 止水油のpH測定結果

採取した水溶液のpH測定結果を表3に示す。表より、

pH調整剤を投入して

いない箇所については明かり区間でpH値が5.8~6.6、トンネル区間でpH値が4.4~6.0であり、pH値が7

より小さく酸性となっていた。pH調整剤を投入した箇所についてはpH値が7より大きくアルカリ性であることを確認した。また、トンネル湿潤箇所の軌道スラブから採取した止水油には、水が混入していたため、止水油が加水分解により酸性を示していた。このことから、トンネル内では湿潤箇所に比べ、乾燥箇所では止水油の酸性化による埋込カラー周辺コンクリートの酸劣化の進行が遅いと考えられる。

以上より、止水油に水が混入することで加水分解により酸性化するが、pH調整剤の投入により止水油の酸性化を防止し、コンクリートの酸劣化を抑制するとともにアンカーボルトおよびアンカープレートの防錆効果も期待できるものとする。

表3 水溶液のpH測定結果

敷設環境	pH調整剤の有無	pH値
明かり	無し	5.8~6.6
	有り	7.6~7.8
トンネル	無し	4.4~6.0

4. 埋込カラー部周辺の劣化調査

4.1 調査内容

3章の調査で確認したように、埋込カラー部周辺のコンクリートに酸性化した止水油が漏れることによりコンクリートが酸劣化することに加え、埋込カラー下部周辺にある鉄筋の腐食も懸念される。そこで、経年スラブの埋込カラー部をコンクリートカッターを用いて細断し、図3に示すように、埋込カラー部周辺の酸劣化深さおよび埋込カラーから鉄筋までの距離を測定して、劣化の状態を把握した。また、供用年数により酸劣化進行速度を予測

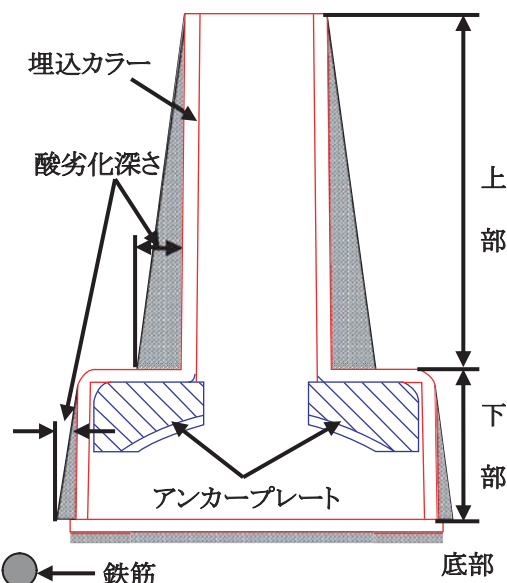


図3 酸劣化深さ測定位置

し、埋込カラー部周辺コンクリートの変状予測を行った。

4.2 埋込カラー部の劣化調査結果

酸劣化深さの測定結果を図4に示す。図より、明かり区間およびトンネル区間のいずれも、上部側面、下部側面、底面の順に酸劣化が進行しており、底面は各側面に比べて進行が遅かった。また、今回採取したトンネル区間の経年スラブは、乾燥状態にあったが酸劣化の進行が確認された。その原因として、埋込カラーが損傷して止水油が漏れ、コンクリート中に含んでいる水分により加水分解をおこし酸劣化を進行させたことが考えられる。

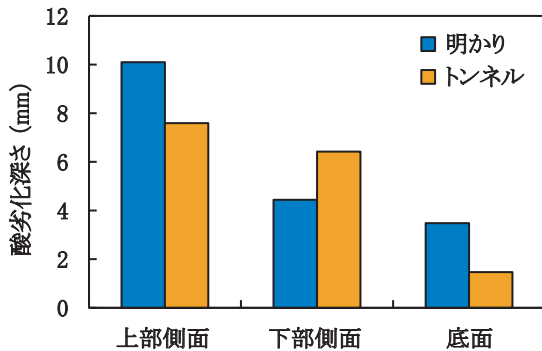


図4 酸劣化深さ最大値 (平均)

4.3 埋込カラー部周辺コンクリートの変状予測

測定した酸劣化深さと埋込カラーから鉄筋までの距離を用いて、埋込カラー部周辺コンクリートの変状予測を行った。表4に変状過程の予測モデル²⁾を示す。表中にある中性化残りとは、図5に示すように鋼材の純かぶりから中性化深さを引いた残りの深さである。ただし、ここでは中性化深さを酸劣化深さと仮定して変状予測を行っている。また、変状の予測で用いる中性化速度係数は、下部側面の酸劣化深さの経年変化から算出し、明かり区間では0.78mm/√年、トンネル区間では1.10mm/√年とした。

表4 変状過程の予測モデル

変状過程	定義	各期終了の指標としきい値	鉄筋の腐食速度 (mm/年)
潜伏期	中性化深さが鉄筋の腐食発生限界に到達するまでの期間	中性化残り $\leq 10\text{mm}$	0.0
進展期	鉄筋の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間	鉄筋の腐食深さ $\geq \Delta r_r$	3.0×10^{-3}
加速期	腐食ひび割れ発生からはく離、はく落発生までの期間	鉄筋の腐食深さ $\geq \Delta r_p$	
劣化期	鉄筋の腐食速度が増大する期間	性能項目の照査により判定	8.0×10^{-3}

Δr_r : ひび割れ発生時の鉄筋の腐食深さ, $13 (C/\phi) \times 10^3$ (mm/年)
 Δr_p : はく離, はく落発生時の鉄筋の腐食深さ, $56 (C/\phi) \times 10^3$
 ここに, C はかぶり (mm), ϕ は鉄筋径 (mm)

「鉄道構造物等維持管理標準 (コンクリート構造物)」に基づいて行った、調査した経年スラブの推定変状予測結果を図6に、試算結果を表5に示す。図に示す推定変状予測より、明かり区間の経年スラブでは調査時においてすでに加速期後期であり、トンネル区間の経年スラブでは敷設後100年目までは進展期に至らず、設計値平均では調査時において加速期後期と予測した。明かり区間に比べ、トンネル区間の経年スラブの方が中性化速度係数は大きいものの変状の開始時期が遅いのは、埋込カラーから鉄筋までの距離の違いによるものである。また、本調査で使用した経年スラブは明かり区間、トンネル区間でそれぞれ1枚ずつであり、設計値における推定変状予測を見ても分かるように、軌道スラブは埋込カラー部からの鉄筋までの距離に個体差があるため、さらにサンプル数を増やし予測精度を上げることが必要である。



図5 中性化残りイメージ

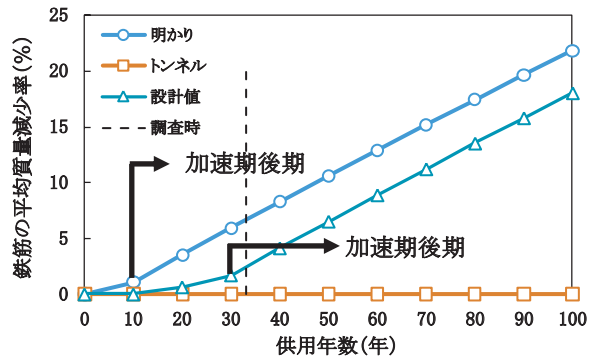


図6 調査経年スラブの推定変状予測

表5 推定変状予測の試算結果

条件	トンネル区間	明かり区間	設計値
埋込カラーから鉄筋までの距離 (mm)	20.2	6.7	11.7
中性化速度係数 (mm/√年)	1.10	0.78	0.94
変状過程 (年)	進展期開始	到達せず	0
	加速期前期開始	到達せず	3
	加速期後期開始	到達せず	10

※ 鉄筋はD13とした。
 ※ 調査数量は明かり区間12箇所、トンネル区間8箇所

特集：軌道技術

5. 劣化した埋込カラー部の機能評価

5.1 埋込カラー引抜破壊試験

4章の調査で示したように、アンカーボルトおよびアンカープレートの防錆目的で使用されていた止水油が加水分解により酸性化したため、埋込カラー部周辺コンクリートで酸劣化が進行するという事象が確認された。そこで、経年スラブを用いて、周辺コンクリートが酸劣化したと想定される埋込カラーの引抜破壊強度を確認するとともに、酸劣化を模擬した供試体により酸劣化深さの違いによる引抜破壊強度を確認した。

5.1.1 試験方法

引抜破壊試験は、プレテンション式PCまくらぎの埋込カラー引抜破壊試験（JIS E 1201）に準拠して実施した。引抜保証荷重 50kN はコンクリート表面にひび割れが生じてはならない荷重であり、引抜破壊荷重 69kN は埋込カラーが浮き上がってはならない荷重である。試験では油圧ジャッキの能力の制約から200kNを上限に、埋込カラー部の破壊が生じるまで载荷を行った。

また、酸劣化を模擬した供試体は、図7に示す方法で10mm および 15mm の酸劣化深さを模擬した供試体と、健全供試体（酸劣化深さ0mm）を用いて、同様に引抜破壊試験を行った。

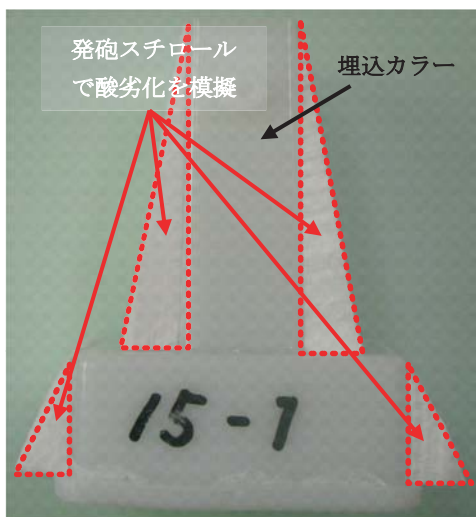


図7 酸劣化を模擬した供試体の例

5.1.2 試験結果

経年スラブの埋込カラー引抜破壊試験の結果が、埋込カラー部は上部コンクリートのコーン破壊を生じる場合と、アンカープレートの曲げ破壊が生じる場合の2種類の破壊形態であった。破壊形態は異なるものの、引抜破壊強度は明かり区間で112kN～179kN（平均154kN）、トンネル区間で117kN～186kN（平均154kN）となり、敷設環境による差異はほとんどなかった。また、いずれの条件下においても引抜保証荷重 50kN の約3倍程度の引

抜強度を有していることを確認した。なお、所定の緊締トルクで締結した場合、アンカーボルトには70kN程度の軸力が導入されるが、その軸力と比較しても2倍強の引抜強度を有していた。

アンカープレートが破壊した経年スラブ供試体のアンカープレートを取り出し、止水油の酸性化による腐食の影響について確認した。その結果、図8に示すように、一部に錆を確認できるが、強度低下につながるような腐食孔は見られず、破壊状況よりアンカープレートに過大な引抜せん断力が作用したことによる脆性破壊であると考えられる。

酸劣化を模擬した供試体の埋込カラー引抜破壊試験の結果を図9に示す。その結果、10mm 酸劣化と15mm 酸劣化ではほぼ同等の引抜き強度を有していた。15mm 酸劣化では平均150kNの引抜強度を有しているため、酸劣化深さが15mm程度まで進行しても、埋込カラー部の引抜破壊強度は十分に確保されている。なお、破壊形態は、経年スラブのアンカープレートの曲げ破壊と同様に破壊しており、全てアンカープレートのアンカーボルトはめあい部が破壊した。



図8 引抜破壊試験で破壊したアンカープレート

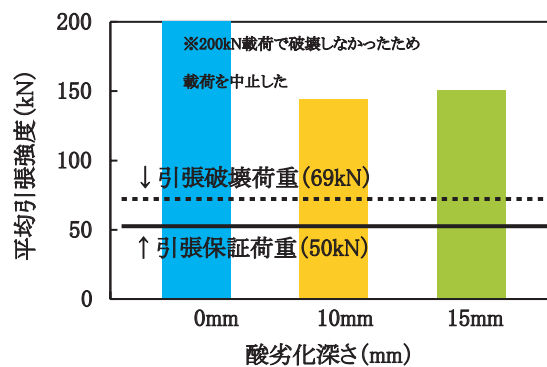


図9 酸劣化深さと引張強度の関係

5.2 レール締結装置横圧抵抗試験

これまでに行った埋込カラー部の調査¹⁾から、埋込カラーの損傷割合が高いため、コンクリートの酸劣化によるレール締結装置の保持機能の低下が懸念される。そこで、アンカーボルトの緊締トルクを低減して初期応力を減少することで損傷した埋込カラーとその周辺のコンクリートの延命化を検討するため、緊締トルクと横圧抵抗の関係について確認した。

5.2.1 試験方法

試験は、経年スラブに対して同時に撤去したレール締結装置と、比較として新品のレール締結装置を使用して行った。試験供試体に緊縮トルク 120N・m～350N・m でアンカーボルトを緊縮し、軌間内側から外側に向かってタイプレートに横圧荷重を載荷した。

5.2.2 試験結果

横圧強度試験の結果、図10に示すように、レール締結装置の横圧抵抗力49kN³⁾を確保するための最低緊縮トルクは、平均値として回帰直線から撤去品の場合で259N・m、新品の場合で220N・mが得られた。この結果より、損傷している埋込カラー部の延命化を図るためには、緊縮トルクを現在の標準緊縮トルクである350N・mからある程度低減できる可能性が得られたが、実施にあたってはレール締結装置整備等に合わせ、段階的に緊縮トルクの低減を行い軌道状態の推移を確認することが必要である。

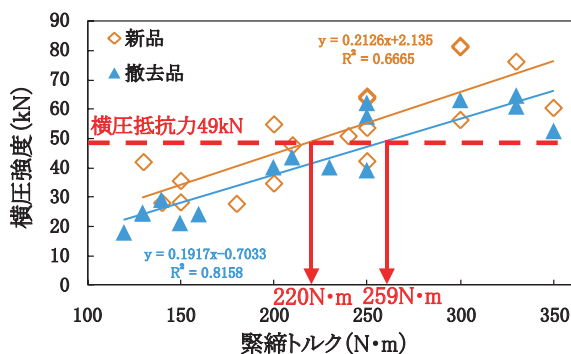


図10 緊縮トルクと横圧強度の関係

5.3 経年アンカーボルトの引張破壊試験

止水油が酸性化することにより、アンカーボルトの腐食が進行し、アンカーボルト自体の強度低下が懸念される。このため、経年アンカーボルトを使用して引張強度の確認を行った。

5.3.1 試験方法

試験で用いるアンカーボルトは10本とし、pH調整剤を投入していない箇所から選定した。そのため、止水油は加水分解により酸性化していた可能性が高いと考えられる。引張強度試験は、アンカーボルトに引張荷重を載荷し、破断時の最大引張荷重を確認した。なお、アンカーボルト母材(SCr440)の引張強さはクロム鉄鋼材(旧JIS G 4104)を参考にすると、930N/mm²以上であるためアンカーボルト軸部の引張破壊荷重は292kN以上である。また、ねじ部の引張破壊荷重は、ねじ部における有効断面積から算出すると227kNとなる。

5.3.2 試験結果

引張破壊試験後の供試体例を図11に、引張破壊試験の結果を図12に示す。試験を行った供試体10本のうち、破断したものは6本で、残りの4本は試験機の供試体装着部との滑りにより未破断であった。破断した供試体は、



図11 引張破壊試験後の供試体 (供試体番号2)

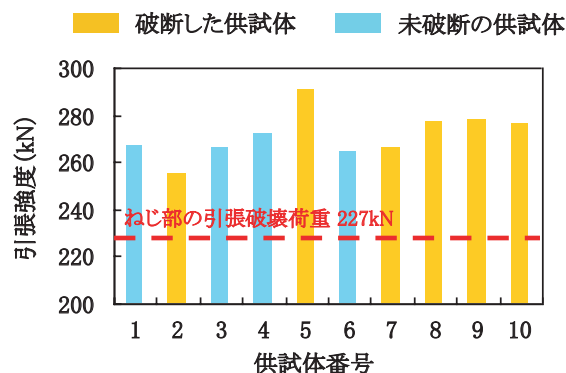


図12 アンカーボルトの引張破壊試験結果

全てねじ部での破断であった。試験結果より、最小引張強度は255kNであり、ねじ部の引張破壊荷重227kNを上回っていた。このことより、止水油が酸性化したと考えられる箇所のアンカーボルトの強度低下はほとんどないと考えられる。

5.4 アンカーボルトの軸力確認試験

埋込カラー部周辺のコングリートが劣化している場合、アンカーボルト軸力の低下が懸念される。そこで、アンカーボルトのクリープ試験を行い、アンカーボルト軸力の保持性能を確認した。

5.4.1 試験方法

表6に示す試験供試体を用いて連続的にアンカーボルト軸力を測定し、経時変化を確認した。

表6 試験供試体の条件

供試体	軌道スラブ	タイプレート	緊縮トルク
1	経年スラブ	撤去品	350N・m
2	経年スラブ	撤去品	250N・m
3	経年スラブ	撤去品	150N・m
4	未使用スラブ	新品	350N・m

5.4.2 試験結果

クリープ試験の結果を図13に示す。その結果、緊縮トルクや供試スラブの種別を問わず、緊縮直後に約5%程度の軸力の低下が認められた。その後、緊縮トルク350N・mと250N・mの場合、アンカーボルト軸力が微減していく傾向であったが、緊縮トルク150N・mの場合にはほぼ一定で推移していた。また、経年スラブと未使用スラブを比較すると、クリープ傾向の差は見られないため、調査時の埋込カラー部周辺コンクリートの酸劣化程度であれば、アンカーボルト軸力の保持性能が低下しな

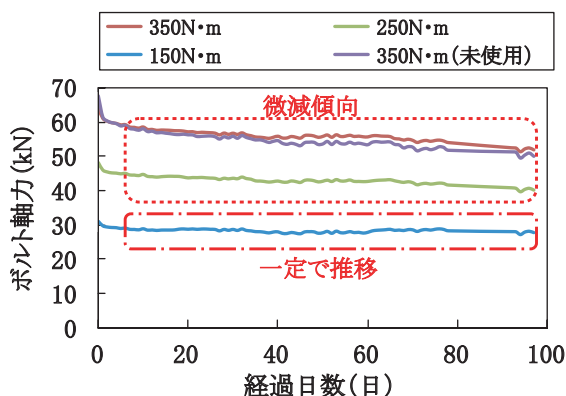


図13 アンカーボルト軸力と経過日数の関係

いことを確認した。

5.5 軌道スラブの絶縁抵抗試験

埋込カラー部周辺のコンクリートが劣化していること、止水油が酸性化しコンクリート中に浸み入っていることから、軌道スラブの電気絶縁性能の低下が懸念される。そこで、経年スラブと未使用スラブの電気絶縁性能の比較を行った。

5.5.1 試験方法

電気絶縁性能を把握するため、左レール～右レール間およびレール～軌道スラブ間の絶縁抵抗値の測定を行う。試験では、520Hz、1kHz、2kHzの交流10Vを印加し、この時の絶縁抵抗値を測定する。なお、試験時の環境条件は、乾燥状態、時雨量100mm相当の降雨状態および散水停止1分経過後の降雨後状態とする。試験で使用した供試体種別を表7に示す。

表7 試験供試体の条件

供試体	軌道スラブ	タイプレート	絶縁板
1	経年スラブ	撤去品	撤去品
2	経年スラブ	撤去品	新品
3	未使用スラブ	新品	新品

5.5.2 試験結果

絶縁抵抗試験結果を図14に示す。

図より、表7に示す試験を行った3供試体で目標値である0.57kΩ⁴⁾を上回っており、埋込カラー部周辺コン

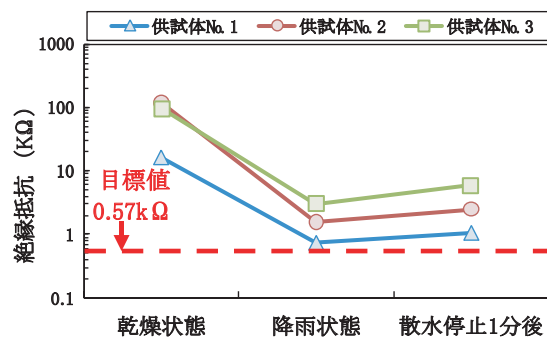


図14 絶縁抵抗試験結果

クリートの酸劣化が電気絶縁性能に与える影響は少ないものと考えられる。また、図14に示すように、絶縁板を交換することにより、電気絶縁性能が向上することを確認した。

6. 結論

埋込カラー部の止水油の分析および埋込カラー周辺コンクリートの劣化状態調査、劣化状態における各種の埋込カラー部の性能評価試験の結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 採取した止水油を調査した結果、トンネル区間の湿潤箇所および明かり区間において、止水油が加水分解により、酸性となっていた。また、pH調整剤を投入することで、止水油の酸性化を防止でき、コンクリートの酸劣化を抑制するとともに埋込カラー内部の防錆効果も期待できる。
- (2) 経年スラブについて酸劣化深さ測定を行った結果、敷設環境の条件によらず酸劣化が進行しており、側面に比べ底面の酸劣化の進行が遅い。また、調査した軌道スラブの推定変状予測を行った結果、潜伏期または加速期後期にあることが分かったが、個体差が大きいためさらにサンプルを取得することが必要である。
- (3) レール締結装置としての性能確認試験の結果、埋込カラー部の引抜強度、横圧抵抗、アンカーボルトの引張強度、アンカーボルトの保持性能および絶縁抵抗のいずれも基準値を満足していた。

以上より、経年スラブの埋込カラー部周辺のコンクリートに酸劣化の進行が認められるが、調査時の状態ではレール締結装置の装着機能は確保されている。

謝辞

現地調査ならびに各種調査・試験用の供試体の提供等、多大なる協力をいただいた、西日本旅客鉄道株式会社には、ここに記して謝意を表す。

文献

- 1) 山根寛史, 溝口敦司, 黒田昌生, 飯島亨: 経年軌道スラブの埋込カラーの健全性評価について, 土木学会第62回年次学術講演会, 2007.9
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編) コンクリート構造物, p.222~224, 2007.1
- 3) 梅田静也, 熊崎弘: 弾性まくらぎ直結軌道用(B形) 締結装置の設計試験, 鉄道技術研究所速報 No.A-85-38, 1985.3
- 4) 東海道新幹線ATC設備更新検討委員会報告書, 東京システム開発工事局, 1979.3