

寒冷地における軌道スラブの劣化原因の評価

高橋 貴蔵* 関根 悦夫*

Evaluation of Deterioration Cause of Track-Slab in Cold Districts

Takatada TAKAHASHI Etsuo SEKINE

Deteriorated track-slabs have been so far found in some districts under cold weather. It is very important to the maintenance of track-slabs that we understand cause of deterioration. Therefore we performed the investigation of external appearances and materials of the track-slabs. It has been understood by the appearance investigation that the deterioration frequently happens at the south sides of the track-slabs where the exposure time to sunshine is long. Also, the material investigation has shown that the deterioration of track-slabs is caused by an alkali-silica reaction and a frost-damage.

キーワード：軌道スラブ，凍害，アルカリ骨材反応，寒冷地

1. はじめに

スラブ軌道は山陽新幹線新岡山 - 博多間以降に建設された新幹線の8割以上で採用されている軌道であり、在来線の一部でも用いられている。スラブ軌道を構成する部材の一つである軌道スラブは、設計耐用年数を50年として設計されており、供用年数は長いものですでに約40年となる。今後、多くの軌道スラブが設計耐用年数を迎えることとなるが、軌道スラブに劣化が生じた場合には、その原因を特定して適切な補修を行う必要がある。現在、列車荷重の作用によって軌道スラブに損傷が生じたという報告は無いが、寒冷地において自然環境条件に起因すると考えられる劣化（図1参照）が報告されている。

そこで、寒冷地における軌道スラブの維持管理に寄与することを目的に、外観調査と材料調査により軌道スラブの劣化原因の検討を行った。



図1 寒冷地での軌道スラブの劣化状況例

2. 調査概要

調査対象は北海道千歳市に位置する千歳線千歳駅を中心とした延長約3.3kmの高架橋上の軌道スラブである。千歳市は寒冷地であり、2月の日最低気温の平均値は約-15℃である。調査する軌道スラブはPRC構造であり、その外形寸法は、長さ4.93mあるいは3.93m、幅2.0m、厚さ0.19mである。

調査項目は軌道スラブの外観調査および軌道スラブから採取したコンクリートのコアに対する材料調査である。外観調査では、コンクリートのひび割れ、かぶりコンクリートのはく落について軌道スラブ全数を調べ、劣化の発生傾向について検討を行った。材料調査では、コンクリートコアに対する試験を実施し、劣化原因の検討を行った。

3. 外観調査

3.1 外観調査の概略

軌道スラブに生じている劣化の発生状況を確認するため外観調査を行った。外観調査の対象となる軌道スラブの枚数は図2に示すとおりであり、合計1409枚である。なお、図中の「中間部」は駅を挟む分岐器間のことである。調査の対象となるのは一般部に敷設されている軌道

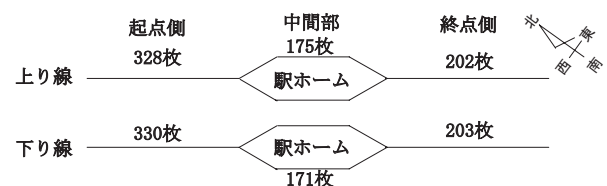


図2 軌道スラブの枚数と設置方位

* 軌道技術研究部（軌道・路盤）

特集：軌道技術

表1 劣化分類

劣化状態	分類
健全	A
ひび割れ	B
隅角部はくり (1 締結分)	C
隅角部はくり (2 締結以上)	D
側面線路方向ひび割れ	E

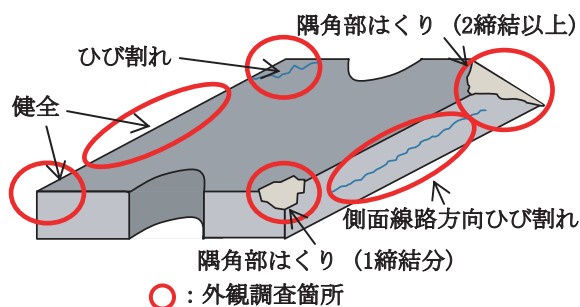


図3 外観調査箇所と劣化状態

スラブであり、分岐器部は軌道スラブの形状が本線と異なるため外観調査の対象外とした。

外観調査では表1に示す劣化が軌道スラブに生じているか、図3に示す6箇所の外観調査箇所を対象として行った。軌道スラブの中には、図4に示すように水分の侵入を遮断する表面被覆が行われているものと、樹脂モルタル等によって断面修復が行われているもの（以下、これらを補修箇所とする）があるが、補修個所で再劣化が認められない場合は健全な軌道スラブとして集計した。

3.2 軌道スラブの劣化状況

劣化が生じている軌道スラブの割合を図5に示す。外観調査の結果、調査対象の軌道スラブの半数近くに劣化が確認された。劣化は軌道スラブの側面もしくは隅角部に多数発生しており、補修個所での再劣化も確認された。劣化の発生割合を上下線で比較すると下り線の方が



図4 軌道スラブの補修状況

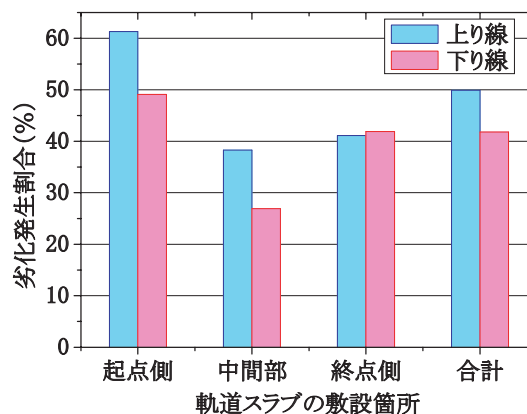


図5 軌道スラブの劣化状態

少なく、敷設されている場所で比較すると起点側で多いことがわかった。

軌道スラブの敷設場所を6ブロックに分け、表1の劣化分類ごとの発生割合について整理した結果を図6～図9に示す。ひび割れ（分類B）は、下り線中間部を除く各ブロックで30～40%程度の軌道スラブに生じていた。1締結分（60cm未満）および2締結以上（60cm以上）の隅各部はくり（分類C, D）は、上り線起点側が最も多く、それぞれ約30%および約8%であった。側面線路方向ひび割れ（分類E）は、上下線ともに同程度の発生割合であった。

次に、劣化の発生に対する方位の影響を確認するため、軌道スラブの隅各部に発生している劣化（分類B, C, D）

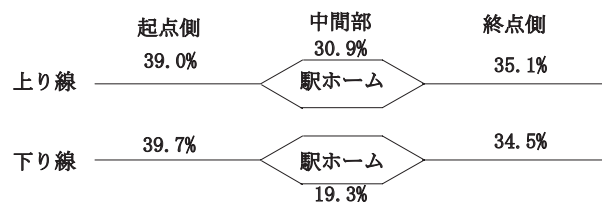


図6 ひび割れの発生割合

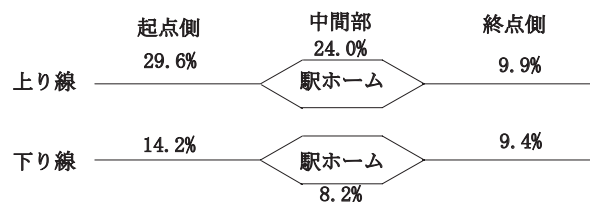


図7 隅角部はくり (1 締結分) の発生割合

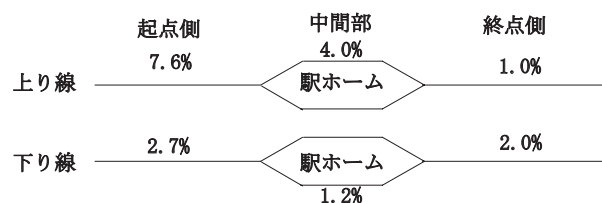


図8 隅角部はくり (2 締結分) の発生割合

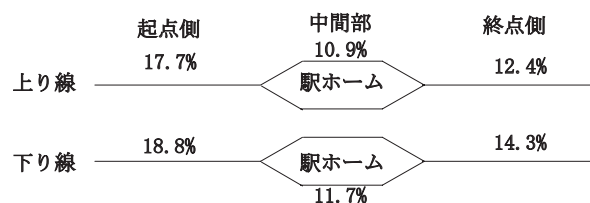


図9 かぶりレール方向ひび割れの発生割合

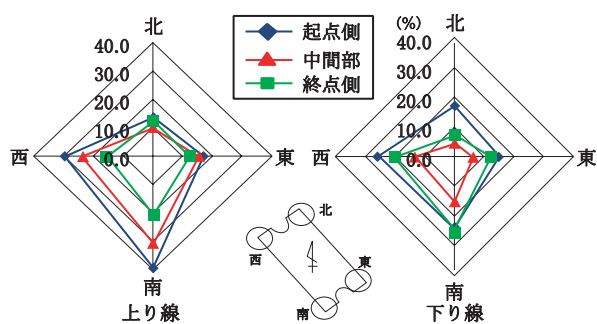


図10 方位別劣化割合

の発生割合を各ブロックごとに算出した。方位別の劣化の発生割合を図10に示す。劣化は南側で最も多く発生しており、次いで西側であった。また、側面線路方向ひび割れ(分類E)に対して南北での発生割合を比較すると、図11に示すように南側で多いことがわかった。

3.3 外観調査の考察

外観調査の結果、①起点側、終点側、中間部の順で劣化が多い、②下り線より上り線で劣化が多い、③南側で劣化が多いということがわかった。

南側で劣化が多いことから軌道スラブの劣化は凍害によるものと考えられる。凍害とは、コンクリート中の水が凍結することで体積膨張を起し、コンクリート表面に高い引張応力が発生することでひび割れが生じる現象である。ただし、凍結しているだけではひび割れは進展せず、日中、コンクリートの表面温度が上昇して内部の水が融け、夜間温度が低下して水が再度凍結することでひび割れが進展する。すなわち、凍害の進展には水の融解が重要であり、南側で劣化が多く確認されたのは、軌道スラブの日照時間が長いためであると考えられる。一方、軌道スラブの北側で劣化が少ないのは日中の日照時間が短いためであり、軌道スラブの南側でも下り線や中間部で劣化が少ないのは、高架橋の防音壁や駅の陰になって軌道スラブの日照時間が短くなったためであると考えられる。

4. 材料調査

4.1 材料調査の概略

外観調査の結果、凍害が劣化の一要因として考えられた。凍害による劣化であれば、環境条件が同じ場所に敷設されている軌道スラブに同様な劣化が生じるものと思われる。しかし、隣り合う軌道スラブで劣化状況が異なるケースが確認され、軌道スラブの劣化には凍害以外の要因も影響していると考えられた。そこで、軌道スラブに発生している劣化の原因をより深く検討するため、JIS A 1107-1993「コンクリートからのコア及びはりの切取り方法並びに強度試験方法」に準拠してコンクリートコ

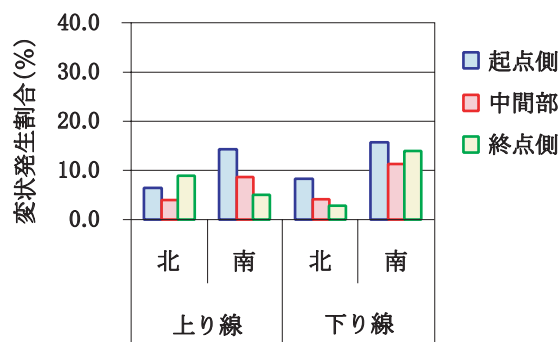


図11 線路方向ひび割れの方位別劣化割合

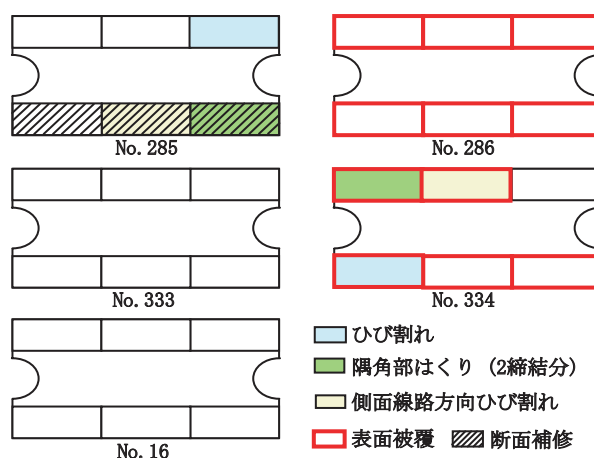


図12 変状状況

アを採取し、材料調査を実施した。

コアを採取する軌道スラブとして、起点側から隣接する2枚(No.285, No.286)、終点側から隣接する2枚(No.333, No.334)および中間部から1枚(No.16)を選択した。コアを採取した軌道スラブの劣化状況を図12に示す。軌道スラブのコアの採取位置は、配筋状況およびPC鋼棒の位置を考慮して軌道スラブの中央とした。コアの寸法は直径が粗骨材の最大寸法の3倍以上となるφ75mm、長さは190mm(軌道スラブ厚さ)とした。

コアに対する材料調査の項目を表2に示す。各調査項目の内容と試験方法について以下に示す。

①強度・変形特性

軌道スラブのコンクリートの基本物性を検討するために軌道スラブから採取したコアに対して圧縮強度および静弾性係数の測定を行った。圧縮強度試験はJIS A 1108-1999「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して実施し、静弾性係数試験はJIS A 1149-2001「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠して実施した。

②耐凍害性

凍害によって劣化が発生した可能性があることから、凍結によって生じる水圧を緩和させることが可能な空気量と気泡間隔をコンクリートが有していたか検討するた

表2 コアに対する調査項目

調査項目	試験方法	検討内容
① 強度・変形特性	圧縮試験，静弾性係数試験	圧縮強度，弾性係数
② 耐凍害性	リニアトラバース法	気泡間隔係数，空気量
③ 中性化	フェノールフタレイン法	中性化深さ
	配合推定試験	中性化深さの推定
④ アルカリ・シリカ反応	骨材のアルカリ・シリカ反応性試験（化学法）	骨材の反応性
⑤ エトリンタイトの遅れ生成	X線回折	エトリンタイトのピーク強度

め，気泡組織の分析を行った。気泡組織の分析はASTM-C457「顕微鏡による硬化コンクリートの気泡システムのパラメータと空気量の測定（リニアトラバース法）」に準拠して実施した。

③アルカリ・シリカ反応

骨材の異常膨張によってコンクリートに劣化が発生した可能性があることから，骨材のアルカリ・シリカ反応性試験を行った。アルカリ・シリカ反応はセメントから供出される水酸化アルカリを主成分とする水溶液と反応性鉱物を含む骨材（反応性骨材）が反応してアルカリ・シリカゲルを生成し，これが給水膨張することで，コンクリートに異常膨張を生じさせ，ひび割れを発生させるものである。

アルカリ・シリカ反応性試験はJIS A 1145「骨材のアルカリ・シリカ反応性試験方法（化学法）」に準拠して実施し，軌道スラブに使用された骨材が反応性骨材か検討を行った。

④中性化

コンクリートの中性化による補強鉄筋の腐食によって劣化が発生した可能性があることから，中性化深さの測定を行った。アルカリ性の高いコンクリート中では鋼材表面に不動態被膜が形成され，外部から供給される水分や酸素が存在しても腐食しにくい状態になっているが，補強鉄筋の位置まで中性化が進行すると不動態被膜が失われ補強鉄筋が腐食・膨張し，コンクリートにひび割れ等を生じさせることがある。

中性化深さはコアに対する実測値と，実測のみでは局所的な検討となることから鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物¹⁾（以下，コンクリート標準と称す）に示されている式から求めた推定値とし，中性化が鉄筋位置まで進行しているかについて検討を行った。中性化深さの実測はJIS A 1152-2002「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠し，採取したコアを割裂し，その割裂面の付着物を除去した後，フェノールフタレイン法によって測定した。中性化深さの推定には配合推定試験から求めた水セメント比を用いた。配合推定試験はセメント協会が定める「硬化コンクリートの配合推定のための化学分析方法」により実施し，試料は圧縮強度試験に供したコアを粉砕したものを使用した。ただし，硬化コンクリートの配合推定において軌道スラブの作成時

に使用された材料の中に不明なものがあったため，工業材料規格便覧²⁾をもとに骨材のinsol（不溶残分）を95.2%，セメントのCaOを64.5%，骨材のCaOを0.4%とした。なお，骨材のinsolおよびCaOは砂と砂利の平均値としてある。また，骨材の吸水率およびコンクリートの空気量は，一般的な値としてそれぞれ1.0%および5.0%と仮定した。

⑤エトリンタイトの遅れ生成

軌道スラブは蒸気養生によって製作されるため，セメントの水和生成物である膨張性を有するエトリンタイトが遅れて生成³⁾されることで劣化が発生した可能性があることから，X線回折による定性分析を実施し，エトリンタイトのピーク強度から遅れ生成が生じているか検討した。試料はコンクリートに含まれる細・粗骨材を分離し，窒素雰囲気中で24時間乾燥させたものに内部標準物質としてMgOを10%添加し，振動ミルで1分間粉碎したものとした。粉末X線回折試験には「RINT-2000」（理学電気㈱製）を用いて行った（ターゲット：Cu，フィルター：Ni，管電圧：40kV，管電流：40mA，走査ステップ：0.02°，走査時間：1秒）。

4.2 材料調査の結果

軌道スラブから採取したコンクリートのコアに対する調査の結果を以下に示す。

①強度・変形特性

圧縮強度および静弾性係数の試験結果を表3に示す。本試験において，各軌道スラブから採取したコアの圧縮強度は45.8N/mm²～67.9N/mm²であり，静弾性係数は13.0kN/mm²～25.1kN/mm²であった。圧縮強度は軌道スラブの設計基準強度40.0N/mm²を満足していたが，健全なものに比べて劣化が生じていたものと補修が行われていたものの強度は低い傾向にあった。

コンクリートの静弾性係数は圧縮強度によって異なるため，コンクリート標準⁴⁾に示されている値に対して線形補間を適用し，各圧縮強度に対する静弾性係数の標準値を求め，実験値との比較を行った。静弾性係数の実験値は，表3に示すとおり標準値の40～69%といった低い値を示し，静弾性係数の低下が確認された。

②耐凍害性

気泡組織の分析結果を表4に示す。劣化が生じている

表3 圧縮強度および静弾性係数の試験結果

採取箇所	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)		静弾性係数 実験値/標準値	備考
		実験値	標準値		
No.285	54.7	17.2	33.9	0.51	劣化あり
No.286	54.4	15.6	33.9	0.46	補修箇所
No.333	67.9	25.1	36.6	0.69	健全
No.334	45.8	13.0	32.2	0.40	劣化あり
No.16	57.7	18.1	34.5	0.52	健全

表4 気泡組織の分析結果

採取箇所	空気量 (%)	気泡間隔係数 (mm)	備考
No.285	5.6	0.254	劣化あり
No.286	5.1	0.260	塗装箇所
No.333	6.9	0.217	健全
No.334	5.6	0.224	劣化あり
No.16	6.3	0.161	健全

表5 中性化深さの測定結果

採取箇所	中性化深さ (mm)		計算値	備考
	平均値	最大値		
No.285	0.0	0.0	0.0	劣化あり
No.286	0.0	0.0	0.0	塗装箇所
No.333	0.0	4.5	0.0	健全
No.334	0.0	3.0	3.0	劣化あり
No.16	0.0	0.0	0.0	健全

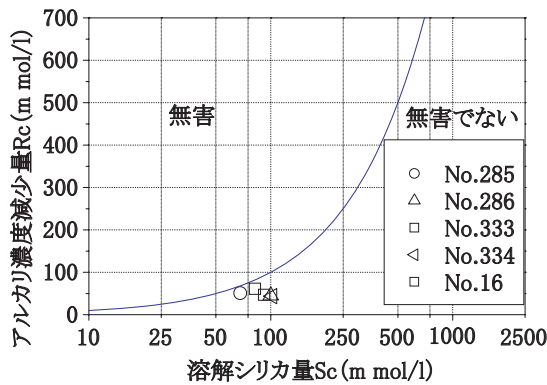


図13 骨材のアルカリ・シリカ反応性試験結果

軌道スラブと表面被覆による補修が行われている軌道スラブに用いられていたコンクリートの空気量は6%以下で、気泡間隔係数が0.220mm以上であった。健全な軌道スラブの場合、劣化が生じている軌道スラブよりも空気量が多く、気泡間隔係数が小さいとわかった。

③アルカリ・シリカ反応

骨材のアルカリ・シリカ反応性試験の結果を図13に示す。軌道スラブのコンクリートに使用された骨材は、全ての試料で「無害でない」と判定され、アルカリ・シリカ反応が生じる可能性を有していることがわかった。

④中性化

中性化深さの測定結果を表5に示す。調査時点で軌道スラブの供用年数は25年であり、この間に進行する中性化深さの推定値は、乾燥しやすい状況で0.0mm～3.0mmとなる。実測値では中性化深さが平均で0.0mm、最大で0.0mm～4.5mmであり、部分的に計算値よりも深い箇所があるものの、中性化深さの計算値および実測値は鉄筋位置(かぶり30mm)まで進行していないことがわかった。なお、中性化深さの推定に用いた水セメント比は、表6に示す配合推定試験の結果から求めた。各軌道スラブ

表6 配合推定試験結果

採取箇所	骨材量 (kg/m ³)	セメント量C (kg/m ³)	水量W (kg/m ³)	W/C (%)	備考
No.285	1790	429	144	33.5	劣化あり
No.286	1792	430	157	36.6	塗装箇所
No.333	1756	411	144	35.2	健全
No.334	1787	419	178	42.5	劣化あり
No.16	1731	470	156	33.2	健全

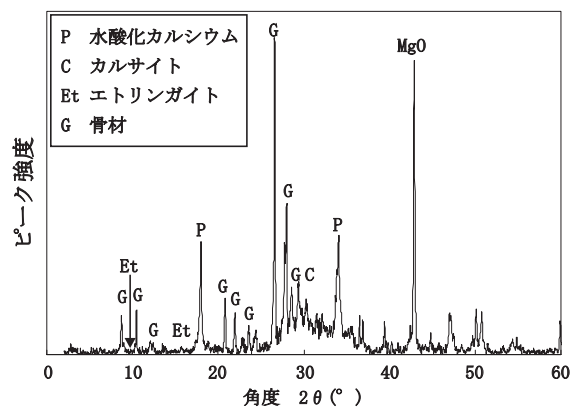


図14 No.334のX線回折結果

のコンクリートの水セメント比は33.2%～42.5%であり、軌道スラブの耐久性から定まる水セメント比の最大値45%より小さな値となった。なお、劣化の顕著な軌道スラブNo.334は、調査した軌道スラブの中で水セメント比が42.5%と高いため、コンクリートの品質が他と比較して良くない可能性がある。

⑤エトリンガイトの遅れ生成

X線回折による同定の結果の一例として、劣化が生じているNo.334の結果を図14示す。全てのコアで水酸化カルシウム、カルサイト、エトリンガイト、骨材が同定された。しかし、エトリンガイトのピーク強度は全ての

特集：軌道技術

コアとも微少であり、エトリンタイトの遅れ生成が劣化の原因である可能性は小さいことがわかった。

4.3 軌道スラブの劣化原因

強度・変形特性の調査で、圧縮強度は設計基準強度以上にもかかわらず、静弾性係数の低下が確認された。これは、アルカリ・シリカ反応が生じたコンクリートで現れる特徴的な現象であり、アルカリ・シリカゲルの生成によって結晶質成分に対する非晶質成分の割合が大きくなったためと考えられる⁵⁾。骨材のアルカリ・シリカ反応性試験の結果からも、骨材が無害でないと判断され、アルカリ・シリカ反応が生じた可能性が高いことがわかった。

外観調査の結果、軌道スラブの劣化の要因として凍害が挙げられた。コンクリートの耐凍害性は空気量と気泡間隔係数の影響を受け、空気量が5%程度になると耐凍害性に優れるという知見が得られている⁶⁾。また、同一の空気量であっても個々の気泡が小さく、気泡間の距離が短いほど、凍結による水圧の緩和や移動水の吸収の作用が強いため、耐凍害性に優れ、特に気泡間隔係数が0.25 mm程度以下の場合にその効果が強いとされている⁶⁾。

気泡組織を観察した結果、千歳駅より終点側の軌道スラブは耐凍害性に優れた気泡組織を有していることがわかった。しかし、これらの軌道スラブの中にも劣化が生じている軌道スラブ (No.334) があり、結果として空気量が6%以下で気泡間隔係数が0.220mmを超えている場合に劣化が生じていることがわかった。特に、軌道スラブの隅角部や側面は日照の影響を受けやすく、またアルカリ・シリカ反応によって微細なひび割れが先行して生じていたとすれば、一般に耐凍害性を満足すると言われている品質のコンクリートであっても凍害が生じた可能性がある。

なお、軌道スラブ中央部では劣化が確認されなかった。これは、鉄筋やプレストレスによるコンクリートの拘束効果が高く、水の侵入が少なかったためアルカリ・シリカ反応による微細なひび割れが発生しなかったこと、コンクリートが耐凍害性に対する品質を有していたこと、日照の影響を受けにくかったことによるものと考えられる。

また、劣化の発生原因として、中性化に伴う鉄筋の腐食とエトリンタイトの遅れ生成も考えられたが、これらは劣化の要因にならないことがわかった。

5. まとめ

今回の調査により得られた結果を以下に示す。

- (1) 軌道スラブの半数近くに劣化が発生していた。
- (2) 軌道スラブの劣化は日照時間の長い南側に多かった。
- (3) 軌道スラブのコンクリートの圧縮強度は設計値を満足していたが、静弾性係数は低下していた。
- (4) 劣化した軌道スラブのコンクリートの圧縮強度は健

全なものに比べて低かった。

- (5) 全ての軌道スラブのコンクリートでアルカリ・シリカ反応性の骨材が使用されていた。
- (6) 空気量が6%以下、気泡間隔係数が0.220mm以上のコンクリートの軌道スラブが劣化していた。
- (7) 中性化による鉄筋の腐食は生じていない。
- (8) エトリンタイトの遅れ生成は生じていない

以上を整理すると、軌道スラブの劣化は、比較的品質の良くないコンクリートが用いられた軌道スラブにアルカリ・シリカ反応による微細なひび割れが生じ、さらに冬季の日照時間の長い個所で凍害が複合して発生したことによるものと考えられる。したがって、アルカリ骨材反応による微細なひび割れが発生しなければ、凍害による損傷は生じなかったものと考えられる。

6. おわりに

本研究により、寒冷地に発生している劣化はアルカリ・シリカ反応による微細なひび割れの発生を起因とし、その後の凍害によって進行したものであることがわかった。現在、スラブ軌道各部補修の手引きに示されている方法によって補修が行われているものの、一部で再劣化が確認されていることから、補修方法の改良が必要と思われる。なお、現在の軌道スラブの製作では、アルカリ・シリカ反応に対する対策が実施されていることから、今後このような劣化が発生する可能性は極めて少ないと考えられる。

謝辞

寒冷地における軌道スラブの調査を実施するに当たり、現地調査に際してご協力をいただいた北海道旅客鉄道株式会社工務部保線課の関係者に感謝の意を表す。

文献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物，丸善，pp.204-206，2004
- 2) 日本材料学会編：工業材料規格便覧 セメント・コンクリート，朝倉書店，pp186-188，1977
- 3) 羽原，福田，小山田，藤原：コンクリートのDEFによる硫酸塩膨張の生起条件の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No1，pp.743-748，2006
- 4) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物，丸善，pp.79，2004
- 5) 小林，森，野村：圧縮荷試験によるアルカリ骨材反応の診断方法，土木学会論文集，No.460/Vol-18，pp.151-154，1993
- 6) 長谷川寿夫，藤原忠司：コンクリート構造物の耐久性シリーズ凍害，技報堂，pp.62-68，1988