

短繊維補強コンクリートを用いた軌道スラブの開発

川又 篤^{*1}・松岡 茂^{*2}・益田 彰久^{*3}

概 要

RC 軌道スラブは、敷設から 30 年以上経過しているものもあり、自然環境条件に起因する海底トンネルでの塩害や寒冷地での凍害による変状が報告されている。短繊維補強コンクリート (FRC: Fiber Reinforced Concrete) の特長として、高い靱性能を有すること、ひび割れの分散性能が高いこと、鉄筋を使用しないため RC と比較して耐久性の向上を望めることが挙げられる。そこで、FRC を軌道スラブに適用した高耐久性軌道スラブの開発を目的に各種検討を行った。その結果、軌道スラブの物性として設計値を満足しており、耐久性に関して補強繊維が入っていないプレーンコンクリートと同程度であることが確認できたため、無筋として構築できる FRC 軌道スラブの優位性を確認することができた。

キーワード：軌道スラブ，短繊維補強コンクリート

DEVELOPMENT OF TRACK SLAB USING SHORT-FIBER REINFORCED CONCRETE

Atsushi KAWAMATA^{*1}, Shigeru MATSUOKA^{*2}, Akihisa MASUDA^{*3}

Abstract

Some concrete track slabs reinforced by bar have aged, since more than thirty years have elapsed since their construction. There are reports describing damage to this type of slab due to the natural environment, such as salt attack in submarine tunnels and change due to freezing in cold districts. Short-fiber reinforced concrete (FRC) features a high level of toughness, excellent crack dispersion capability, and higher durability than reinforced concrete because it is free of reinforcing bars. Various tests were conducted in view of developing a highly durable track slab using FRC. The series of tests demonstrated that the FRC track slab satisfies the property requirements for the track slab, and its durability is as good as plain concrete without reinforcing fibers. These results verify the superiority of FRC track slab free of reinforcing bars.

Keywords: track slab, short-fiber reinforced concrete

*1 Material / Structure Group, Construction Technology Center, Engineering Division

*2 General Manager, Technology Planning Department, Engineering Division

*3 Manger, Material / Structure Group, Construction Technology Center, Engineering Division

短繊維補強コンクリートを用いた軌道スラブの開発

川又 篤*1・松岡 茂*2・益田 彰久*3

1. はじめに

レール，まくらぎ，道床（バラスト）から成るバラスト軌道は鉄道創業以来，一般的な軌道構造として広く普及してきた。バラスト軌道は，定常的な人力による軌道保守作業を伴うため，1970年代の高度成長期には省力化軌道構造の開発が強く求められた。

スラブ軌道は，**図-1**に示すように道床をコンクリートスラブに置き換えることにより開発された新しい軌道構造である。軌道保守の省力化を目的とした軌道構造で，新設される新幹線軌道の約9割がスラブ軌道である。このスラブ軌道は，敷設から30年以上経過しているものもあり，自然環境条件に起因する海底トンネルでの塩害や寒冷地での凍害による変状が報告されている。

一方，近年，短繊維補強コンクリート（FRC：Fiber Reinforced Concrete）が一部の土木構造物に使用されている。FRCの特徴として，高い靱性能を有すること，ひび割れの分散性能が高いこと，鉄筋を使用しないためRCと比較して耐久性の向上を望めることが挙げられ

る。これらの特徴は，前述の軌道スラブの問題点を解決する可能性を有していると考えられる。また，無筋にすることで絶縁効果も得られる優位点もある。

そこで，（財）鉄道総合技術研究所，（株）クラレ，鉄建建設（株）の共同で，FRCを軌道スラブに適用した高耐久性軌道スラブの開発を目的に各種検討を行った。

2. 概要

FRCでは，コンクリートマトリックスに発生したひび割れを短繊維が補強することによって，ひび割れの進展を抑制するため高い靱性を示す。FRCの材料物性については既に報告^{1)・2)・3)・4)}している。そのため，本報告では，**表-1**の検討項目に示す構造物性および耐久性の一部を報告する。

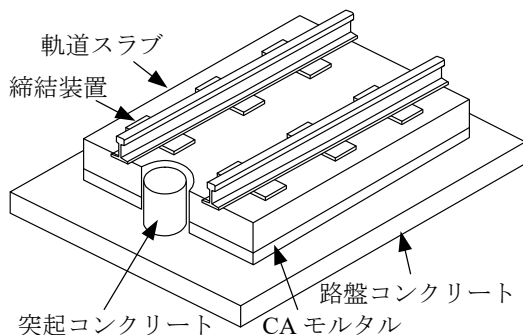


図-1 軌道スラブ

表-1 検討項目

種類	項目
材料物性	(1) 短繊維の種類・混入率が，スランプ・空気量に及ぼす影響 (2) 短繊維の種類・混入率が，圧縮・引張・曲げ特性に及ぼす影響
構造物性	(1) 軌道スラブの曲げ寸法効果・曲げ疲労特性 (2) レール締結部周辺の各種せん断耐力 (3) 道床コンクリートに短繊維コンクリートを使用した場合のまくらぎの横圧によるせん断耐力
耐久性	(1) 短繊維補強コンクリートの凍結融解抵抗性 (2) 短繊維補強コンクリートの塩化物イオン浸透性

*1 エンジニアリング本部 建設技術総合センター 研究開発部 材料・構造グループ

*2 エンジニアリング本部 技術企画部長

*3 エンジニアリング本部 建設技術総合センター 研究開発部 材料・構造グループリーダー

3. 軌道スラブの曲げ疲労特性

3.1 概要

FRC を軌道スラブに適用することを目的に、列車による繰返し載荷を想定して疲労試験を検討した。試験では、軌道スラブを模擬した実物大供試体を使用して3等分点曲げによる繰返し載荷試験を行った。また、繰返し載荷試験前には静的載荷試験を行って、試験結果からひび割れ発生荷重を特定して、繰返し載荷試験における上限荷重値を決定した。

3.2 使用材料および配合

表-2 に使用材料を、表-3 に配合を示す。レディーミクストコンクリート工場での供給およびコストダウンを念頭に置いて、骨材には陸砂や人工骨材の使用を避けた。ここで、繊維混入前のスランプフローは 55cm を目標とした。使用した繊維の物性を表-2 に示す。短繊維には、既往の実験 1)、2) を踏まえて PVA(Polyvinyl Alcohol) 繊維を選択した。短繊維混入率は体積当たり 2.0% とし、短繊維混入前のスランプフローは 60.0×57.0cm, 短繊維混入後はスランプ 15.0cm となり、大幅なスランプロスを示したが打設に問題はなかった。

3.3 実験方法

実物大軌道スラブ供試体の形状は、長さ 4930×幅 2340×厚さ 190mm の鉄筋コンクリート (RC) 軌道スラブ規格品を模擬して、レール方向で2分割、厚さ 200mm とした 4930×1170×200mm の形状とした。また、配筋は施さず無筋とした。供試体数は静的載荷試験で1体、繰返し載荷試験で4体とした。

表-2 使用材料

材料	種類	略号	物性
セメント	普通ポルトランド	C	密度3.16g/cm ³
細骨材	陸砂	S1	表乾密度2.58g/cm ³ , 吸水率1.19%
	砕砂	S2	表乾密度2.65g/cm ³ , 吸水率0.93%
粗骨材	碎石	G	表乾密度2.65g/cm ³ , 粗粒率6.63, 実績率60.2%
混和剤	高性能AE減水剤	SP	主成分: ポリカルボン酸エーテル系
	AE剤	AE	主成分: 変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤
	増粘剤	VA	主成分: 水溶性セルロースエーテル
短繊維	PVA	PVA	密度1.302.58g/cm ³ , 長さ30mm, 直径0.66mm

表-3 配合

W/C (%)	単位量(kg/m ³)								
	水 W	セメント C	陸砂	砕砂	碎石	高性能 AE減水剤	AE剤	増粘剤	PVA 繊維
47	190	404	477	477	653	8.09	0.038	0.42	26

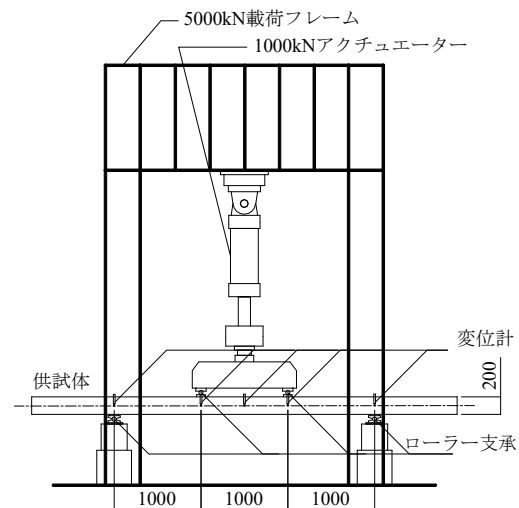


図-2 載荷試験方法

載荷は、図-2 に示すような3等分点曲げ載荷として、支承点、載荷点、中央の変位を計測した。繰返し載荷試験における下限荷重値は、軌道において列車の通過がない場合には外力は作用しないことから 0kN が望ましいが、載荷治具が常時接する程度として 0.1~0.2kN とした。上限荷重値については後述する。また、繰返し載荷速度は周波数 1~3Hz とした。

3.4 実験結果

(1) 静的載荷試験結果

静的載荷試験により得られた曲げ荷重-中

中央変位曲線を図-3に示す。曲げ荷重が 0kN から開始していないのは、供試体の自重による荷重も加算しているためである。曲げ荷重 70kN 程度から短繊維補強により荷重を保持する挙動を示して、最大荷重は 83.3kN となった。また、ひび割れ発生までは弾性変形すると考えて、曲線の勾配が変化する変曲点をひび割れ発生とすると、ひび割れ発生荷重は約 41kN となった。

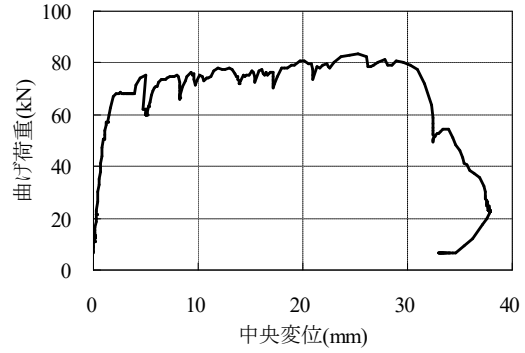


図-3 曲げ荷重-中央変位曲線

ここで、本実験における FRC 軌道スラブのひび割れ発生モーメントは 41kN・m であり、解析⁵⁾から求めた軌道スラブの疲労検討時の設計曲げモーメント 10.6kN・m 以上であることから、疲労検討時の設計曲げモーメントではひび割れは発生せず疲労破壊は生じないことが確認できた。また、FRC 軌道スラブの最大曲げモーメント 83.3kN・m は、設計輪重時の設計曲げモーメント 21.8kN・m 以上あることから安全であることが確認できた。

表-4 繰返し载荷試験結果

供試体 No.	繰返し荷重の上限値 (kN)	繰返し回数	ひび割れ本数
静的	83.3	1	14
1	74.5	89,387	10
2	63.0	106,593	6
3	60.2	12,573	4
4	55.0	3,340,892	1

(2) 繰返し载荷試験結果

A形軌道スラブの疲労検討時の設計曲げモーメントではひび割れが発生しないため、繰返し载荷試験における上限荷重値は、静的载荷試験におけるひび割れ発生荷重 41kN 以上とした。表-4に繰返し荷重の上限値、繰返し载荷試験により疲労破壊したときの繰返し回数、供試体底面の幅方向中央線上におけるひび割れ本数を示す。本実験においては、繰返し荷重の上限値が規定の荷重に到達しなくなった時を疲労破壊とした。ここで、繰返し荷重の上限値を低下させるにつれて、疲労破壊時の繰返し回数が増加する傾向が見られたが、No.3については傾向から外れて少ない繰返し回数となった。図-4に中央変位-繰返し回数曲線を示す。いずれの供試体でも、破壊直前において徐々に変位が増加する結果となり、短繊維の補強効果により脆性的な破壊性状は示さなかった。また、比較的緩やかに変位が増加している No.1 および No.2 では、供試体に発生したひび割れの本数が多い傾向

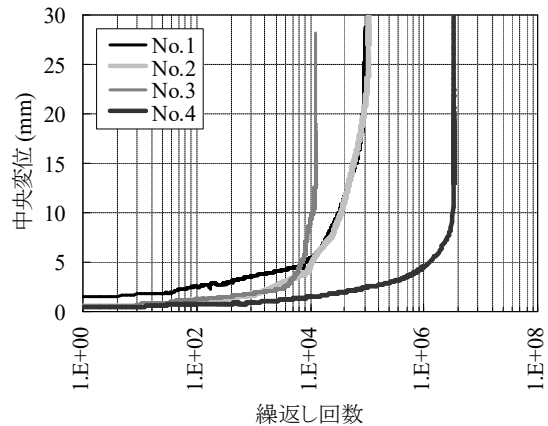


図-4 中央変位-繰返し回数曲線

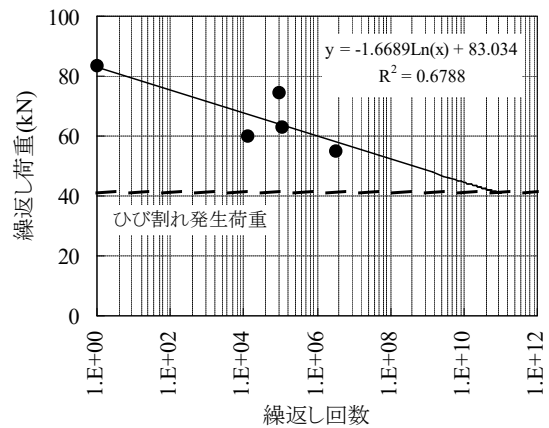


図-5 繰返し荷重と繰返し回数の関係

を示した。繰返し荷重と繰返し回数との関係 (S-N 線図) を図-5 に示す。本実験の結果、FRC による軌道スラブの疲労特性は、ばらつきはあるものの対数関係にあることが確認できた。

4. レール締結部の各種せん断耐力

4.1 概要

FRC を軌道スラブに適用することを目的に、レール締結部に作用する外力を想定して各種せん断試験を行った。レール頭部に列車荷重による横圧が作用した場合、レール転倒に伴う締結装置用埋込栓の引抜きと、埋込栓周辺の外軌方向への横圧によるせん断を検討する必要があるため、FRC 軌道スラブにおける埋込栓の引抜きせん断耐力と横圧せん断耐力について実験的検討を行った。軌道スラブ供試体の使用材料および配合は表-2 および表-3 と同様である。また、RC 軌道スラブ規格品を使用して比較を行った。FRC と RC の圧縮強度はそれぞれ 44.6N/mm^2 と 69.6N/mm^2 であった。

4.2 実験方法

(1) 引抜きせん断試験

引抜きせん断試験は、図-6 に示すように締結装置用埋込栓を中心とする円周上の4点に 500mm 間隔で配置したユニバーサルヘッドを反力点として、500kN センターホールジャッキにより埋込栓にねじ込んだボルトを引っ張って行った。試験では、ボルトの引抜き荷重および鉛直変位量を測定した。鉛直変位の計測については、ボルトの偏心や伸びの影響を緩和するために、埋込栓に近い高さで左右対称の2点で行った。

(2) 横圧せん断試験

横圧せん断試験では、軌道スラブ外縁側の締結部に横圧が作用したときを想定して、図-7 に示すように埋込栓に固定されたボルトをスラブの外側方向へ荷重した。軌道スラブ外縁から埋込栓までの距離は 275mm である。

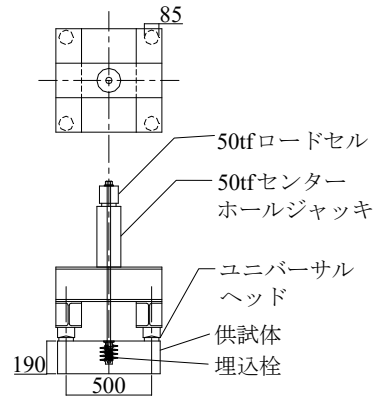


図-6 引抜きせん断試験方法

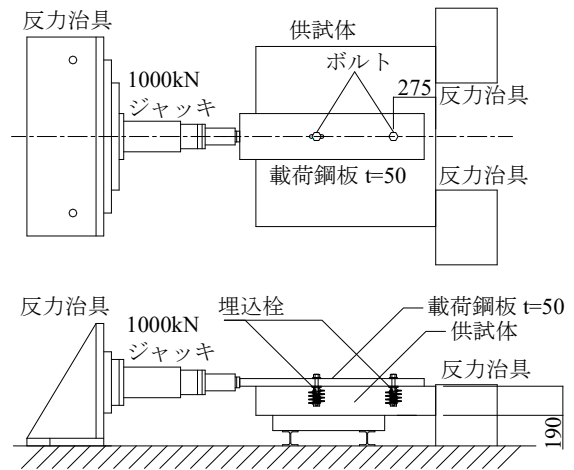


図-7 横圧せん断試験方法

荷重は、図に示すように2箇所の埋込栓を用いてボルトにより固定された荷重鋼板を 1000kN ジャッキにより水平方向へ加力して行った。荷重鋼板は、ジャッキ側のボルト孔は長孔、軌道スラブ外縁側は丸孔となっているため、軌道スラブ外縁側のボルトにのみ横圧が作用する。試験では、荷重荷重、荷重鋼板および供試体の水平変位量を測定して、荷重鋼板の変位量から供試体の変位量を差し引いたものを試験での水平変位とした。

4.3 実験結果

(1) 引抜きせん断試験

引抜きせん断試験により得られた結果を図-8 に示す。FRC の場合では、100kN 程度で最大荷重に達した後は比較的緩やかに荷重が低下した。一方、RC の場合では、最大荷重は

150kN 程度と FRC と比較して 5 割程度大きい値を示したものの最大荷重到達後は急激に荷重が低下した。PC まくらぎで規定されている埋込栓の引抜き破壊荷重は 70kN である。この値を軌道スラブに準用すると、FRC では 1.4 倍の引抜きせん断耐力を有しており安全であることがわかった。いずれのケースでも、図-9 に示すような埋込栓の周囲にはコーン状の破壊面が観察された。RC の場合と比較して FRC の場合ではコーン状破壊の直径は小さくなった。これは、RC では埋込栓周りのスパイラル筋が周辺の鉄筋に力を伝達したためと考えられる。

(2) 横圧せん断試験

横圧せん断試験により得られた結果を図-10 に示す。FRC の場合では、荷重が増加して 200kN 程度をピークに荷重を保持する挙動を示した。その後、埋込栓から軌道スラブ外縁側に図-11 に示すような斜め方向のひび割れを形成して荷重が低下した。RC の場合でも、同様のひび割れを形成したが、最終的には軌道スラブ外縁側のボルトが破断しており、荷重は FRC よりも高い結果となった。軌道スラブの設計において、1 本の埋込栓に作用する横圧は 34.0kN となる。FRC の横圧せん断耐力は横圧に対して 5.8 倍の耐力を有しており安全であることがわかった。

5. 耐久性

5. 1 概要

耐久性に関する試験としてここでは、凍結融解試験と塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験を行い、FRC の凍害と塩害に対する性能を調査した。

5. 2 実験方法

(1) 使用材料および配合

使用材料および配合を表-5 および表-6 に示す。調査対象は、これまで本研究で使用してきた 30mm の PVA 繊維を 2.0% 混入した FRC と、一般的な軌道スラブで使用されてい

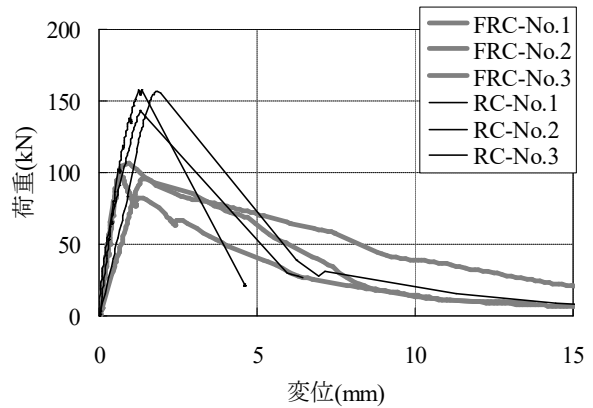


図-8 引抜きせん断試験結果



図-9 引抜きせん断破壊状況 (FRC)

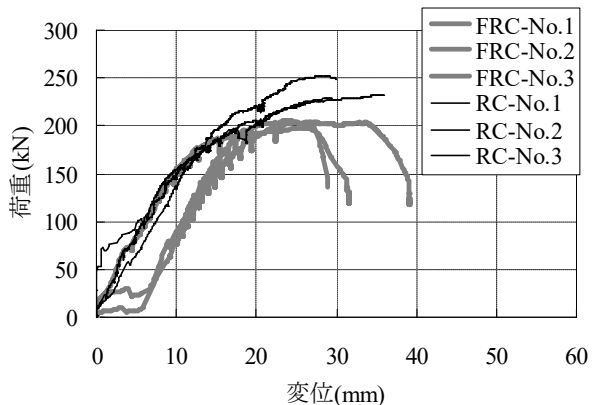


図-10 横圧せん断試験結果



図-11 横圧せん断試験破壊状況 (FRC)

る水セメント比 42%の短繊維の混入されていないコンクリートとした。また、凍結融解試験においてはFRCにひび割れがある場合についても検討を行った。

(2) 凍結融解試験

凍結融解試験は、JIS A 1148 : 2001「コンクリートの凍結融解試験方法」のA法により100×100×400mmの供試体を使用して行い、相対動弾性係数および質量減少率を算出した。

(3) 塩化物イオン拡散係数試験

塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験は、JSCE-G572-2003「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)」に準じて、濃度10%の塩化ナトリウム水溶液中に6ヶ月間浸せきした試験体中の塩分濃度を測定し、コンクリート表面の全塩化物イオン並びに塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出した。塩化物イオンの浸透予測に使用した式を式(1)に示す。ここで、予測で想定した環境状況は飛沫帯および海岸から0.25kmの距離の2ケースとして、表面における塩化物イオン濃度はコンクリート標準示方書[施工編]に示される13.0kg/m³および3.0kg/m³とした。供用年数は20年とした。また、見掛けの拡散係数の試験値に試験誤差があるため予測にそのまま適用することはできないと考えられるが、材料間の相対的な比は変わらないものと考えた。そこで、プレーンコンクリートについては、コンクリート標準示方書[施工編]に示される普通ポルトランドセメントを使用する場合の拡散係数を式(2)を用いて、水セメント42%と47%について算出して、FRCの拡散係数については、プレーンコンクリートとFRCの拡散係数の実験値の

表-5 使用材料

材料	種類	略号	物性
セメント	普通ポルトランド	C	密度3.16g/cm ³
細骨材	陸砂	S1	表乾密度2.60g/cm ³ 吸水率2.24%, 粗粒率2.47
	砕砂	S2	表乾密度2.60g/cm ³ 吸水率1.75%, 粗粒率3.23
粗骨材	碎石	G	表乾密度2.67g/cm ³ 粗粒率6.48, 実績率61.5%
混和剤	高性能AE減水剤	SP1	主成分: ポリカルボン酸エーテル系
	AE減水剤	SP2	リグニンスルホン酸系
	AE剤	AE	主成分: 変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤
増粘剤	VA	主成分: 水溶性セルロースエーテル	
短繊維	PVA	PVA	密度1.302.58g/cm ³ , 長さ30mm, 直径0.66mm

表-6 配合

種類	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)									
		W	C	S1	S2	G	SP1	SP2	AE	VA	PVA
FRC	47	190	404	477	477	653	6.87	-	0.0202	0.42	26
プレーン	42	171	407	375	375	978	-	1.02	0.0366	-	-

比から推定した。

$$C_d = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right) \quad (1)$$

ここに、 C_d : 鋼材位置における塩化物イオン濃度 (kg/m³)

C_0 : コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³)

c : コンクリート表面からの深さ (mm)

t : 塩化物イオンの侵入に対する供用年数 (年)

D_d : 塩化物イオンに対する拡散係数 (cm²/年)

なお、 $\operatorname{erf}(s)$ は、誤差関数であり、

$$\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta \text{ で表される。}$$

$$\log D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (2)$$

ここに、 D_p : 塩化物イオンに対する拡散係数の予測値 (kg/m³)

W/C : 水セメント比

5. 3 実験結果

(1) 凍結融解試験

凍結融解試験結果を図-12に示す。FRCの相対動弾性係数は若干、プレーンコンクリートと比較して低い結果となった。相対動弾性係数が低下したことの主な原因として、水セメント比が高いこと、単位水量が多いことが考えられる。ひび割れが有る場合では、ひび割れが無い場合と比較して若干低い相対動弾性係数を示したが、いずれもコンクリート標準示方書で示されている最も厳しい相対動弾性係数 85%を上回る結果となった。

図-13に質量減少率の結果を示す。質量減少率ではケースによる大きな差が見られなかった。相対動弾性係数ではFRCの方が低下していたため内部劣化は進行したものと考えられるが、質量減少率がプレーンコンクリートと同等であることからポップアウトなどの表面劣化は短繊維補強効果によって緩和されたものと考えられる。

(2) 塩化物イオン拡散係数試験

表-7に予測に使用した拡散係数を示す。

図-14に予測した塩化物イオン濃度を示す。ここで、コンクリート標準示方書[施工編]によると、鋼材位置における塩化物イオンの鋼材腐食発生限界濃度は、コンクリートの場合、単位容積あたりの量として 1.2 kg/m³ として

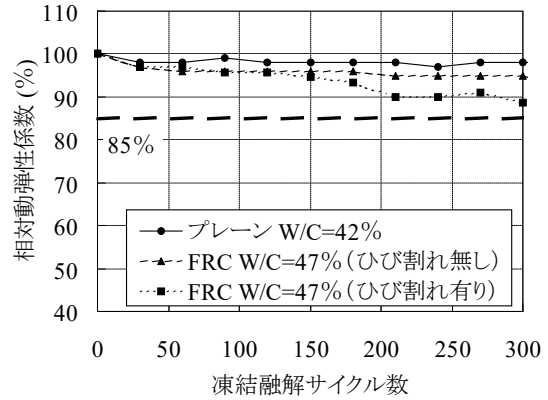


図-12 相対動弾性係数

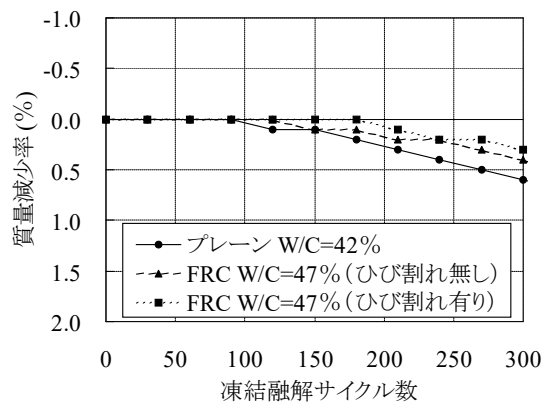


図-13 質量減少率

表-7 拡散係数

項目	拡散係数 (cm ² /年)
プレーンコンクリート (W/C=42%)	0.69
プレーンコンクリート (W/C=47%)	1.05
短繊維補強コンクリート (W/C=47%)	0.93

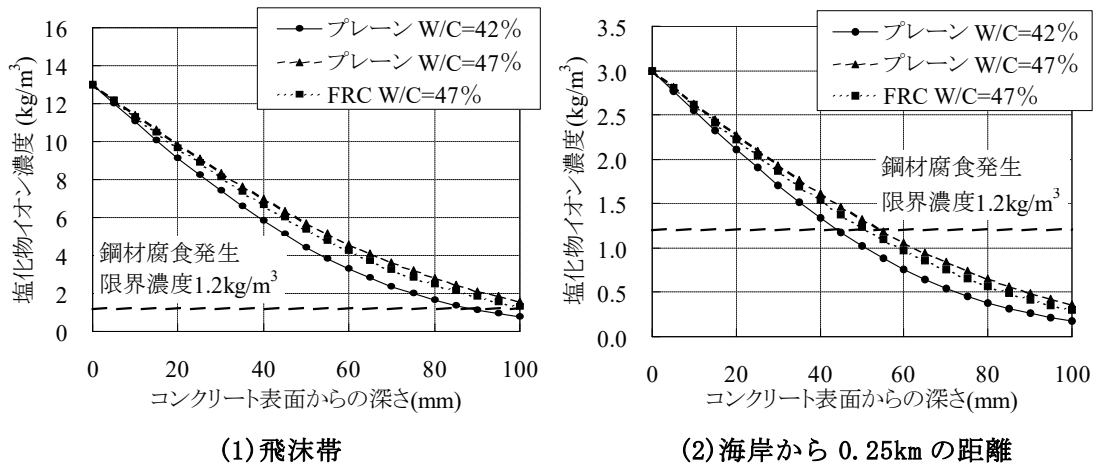


図-14 塩化物イオン濃度

いる。このことから、飛沫帯の場合では、W/C=42%では供用年数 20 年で約 90mm の深さまで塩化物が浸透し、W/C=47%では約 100mm であった。海岸からの距離 0.25km の場合では、W/C=42%では供用年数 20 年で約 45mm の深さまで塩化物が浸透し、W/C=47%では約 50mm であった。

FRC では、一般的な軌道スラブに使用される水セメント比 42%のプレーンコンクリートと比較して塩化物イオン濃度が高い結果となったが、同水セメント比 47%のプレーンコンクリートと比較すると同等以下の結果となった。このことから、FRC の塩化物イオンに対する耐浸透性はプレーンコンクリートと同等以上であることが確認できた。更に、FRC を使用した軌道スラブでは鋼材量の低減が期待できるため鋼材腐食に対して有利な結果となった。

6. まとめ

FRC を用いた軌道スラブの開発における各種検討において本報告で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) FRC を用いた軌道スラブの静的載荷試験では、A形軌道スラブの設計輪重時および疲労検討時の設計曲げモーメントを満足していることが確認できた。繰返し載荷試験の結果では、ばらつきはあるものの S-N 線図は対数関係にあることが確認できた。ひび割れ本数が比較的多い場合には疲労破壊時に緩やかに変位が増加することが確認できた。
- (2) レール締結部に作用する各種せん断耐力の検討を行った。その結果、FRC を軌道スラブに使用した場合でも引抜きせん断耐力、横圧せん断耐力ともに十分な耐力を

有していることが確認できた。

- (3) 凍結融解試験からは、FRC にひび割れがある場合でも大きな性状低下は見られなかった。
- (4) 塩化物イオンの拡散係数に関する検討では、FRC の塩化物イオンに対する耐浸透性はプレーンコンクリートと同等以上であることが確認できた。
- (5) 今後は本共同研究の成果を踏まえて、「短繊維補強コンクリートを用いた軌道スラブの設計・製作の手引き（案）」を作成して、実用化に向けて貢献する。

参考文献

- 1) 川又篤，高橋貴蔵，掘越哲郎，松岡茂：繊維種及び混入量が繊維補強セメント系複合材料の靱性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 27, No. 1, pp. 295-300，2005
- 2) 掘越哲郎，保城秀樹，関根悦夫，桃谷尚嗣，松尾庄二，川又篤：繊維補強セメント系複合材料の基礎性状に関する定量評価，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集，V-5，pp. 705-706，2006.9
- 3) 高橋貴蔵，関根悦夫，益田彰久，川又篤，小川敦久，掘越哲郎：繊維補強コンクリートの曲げ寸法効果に関する実験的研究，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集，V-5，pp. 651-652，2006.9
- 4) 川又篤，松岡茂，保城秀樹，小川敦久，堀池高広，高橋貴蔵：繊維補強コンクリートの曲げ寸法効果に関する数値解析的研究，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集，V-5，pp. 657-658，2006.9
- 5) 財団法人鉄道総合技術研究所：A形軌道スラブ設計要領，1989.2