

論文 直接引張繰返し载荷試験による短繊維補強コンクリートのひび割れ進展に関する基礎的検討

高橋 貴蔵*1・谷川 光*2・桃谷 尚嗣*3

要旨：短繊維補強コンクリートのひび割れ発生後における荷重条件がひび割れの進展に与える影響を確認するため、直接引張繰返し载荷試験を実施した。試験では鉄道軌道のコンクリート道床に発生した収縮ひび割れと同程度である 0.17mm の開口幅を導入した供試体に対して、4 段階の荷重でそれぞれ 1000 回の繰返し荷重を与えた。その結果、開口幅 0.17mm 時に対する荷重比が 0.5 以下であれば、開口幅が拡大しない可能性が高いことを確認した。この結果を踏まえると、列車通過時に測定したコンクリート道床のひび割れ幅の変化量は微小であったことから、収縮ひび割れは拡大しない可能性が高いものと考えられる。

キーワード：短繊維補強コンクリート、直接引張繰返し载荷試験、ひび割れ進展、コンクリート道床

1. はじめに

都市部の連続立体交差化事業により都市鉄道の高架橋化あるいは地下化が各地で進められている。都市鉄道では、振動・騒音といった周辺環境への配慮や省メンテナンスが求められるため、軌道に弾性まくらぎ直結軌道が用いられることが多い。弾性まくらぎ直結軌道は、後述する図-2 のようにレール、レール締結装置およびまくらぎで構成される軌きょうを弾性材を介してコンクリート道床で支持する構造である。コンクリート道床は一般的に鉄筋コンクリート製であり、仮受けした軌きょうの周囲に鉄筋を配筋し、コンクリートを打込むことで構築する。軌道は一連の工事の最終段階で施工されることから、施工速度の増加や施工性の向上が求められている。

このような背景のもと、鉄筋による補強を行わない構造として短繊維補強コンクリートをコンクリート道床に適用するための検討を行い^{1),2)}、試験線での試験施工³⁾を実施した。短繊維補強コンクリート道床の設計では使用性の照査においてひび割れの発生を許容しないこととし、収縮ひび割れの発生を抑制するため、膨張材と収縮低減剤を配合した⁴⁾。

一方で、収縮ひび割れの発生を完全に防ぐことは困難であり、試験施工の3年目にして収縮ひび割れが主要因と考えられるひび割れがコンクリート道床に発生していることを確認した。ひび割れの発生位置は試験により確認した破壊面²⁾と異なり、耐力に関する影響は少ないと考えられるものの、ひび割れの発生位置が破壊面と一致した場合、列車の繰返し通過によりひび割れが進展することも懸念される。

これまでに、短繊維補強コンクリートの疲労寿命に関

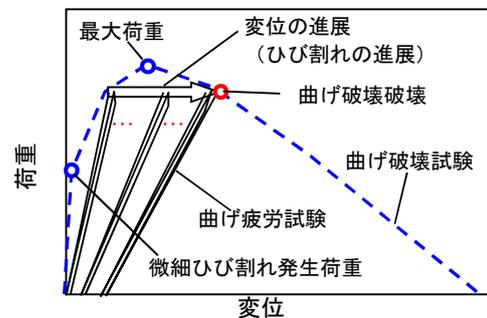


図-1 曲げ疲労試験における荷重-変位関係の模式図

する検討が行われてきているが、これらの多くは梁供試体に対する曲げ疲労試験によって行われており、繰返し荷重は、概ね最大荷重の60~90%とし、図-1に示すように微細ひび割れ発生荷重よりも大きな荷重で実施している(例えば5),6),7)。そのため、荷重の履歴における最大荷重よりも小さな荷重でひび割れの進展に関する研究はほとんど行われていない。また、梁供試体の繰返し曲げ载荷試験では高さによって応力振幅が異なり、さらにひび割れの進展に伴い議論すべき引張軟化曲線の対象範囲が変化する。

以上を踏まえ、本研究では、まず始めに試験施工したコンクリート道床に発生した収縮ひび割れ幅の経時変化および列車通過時の動的なひび割れ幅の変化量について報告する。そして、コンクリート道床で測定されたひび割れ幅と同程度の開口幅を発生させた短繊維補強コンクリート供試体に対する直接引張繰返し载荷試験を実施し、ひび割れ発生荷重よりも小さな荷重が繰り返された際のひび割れの進展について報告する。

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 副主任研究員 工修 (正会員)

*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 研究員 工修 (正会員)

*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 研究室長 工博 (正会員)

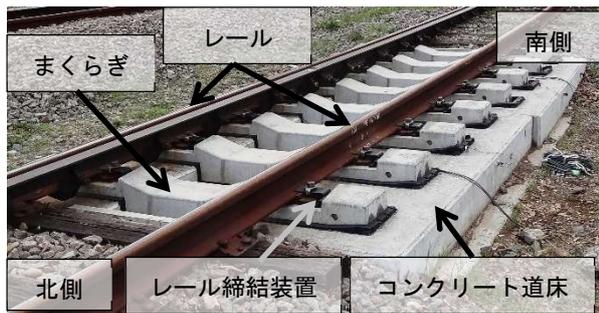


図-2 試験施工した弾性まくらぎ直結軌道

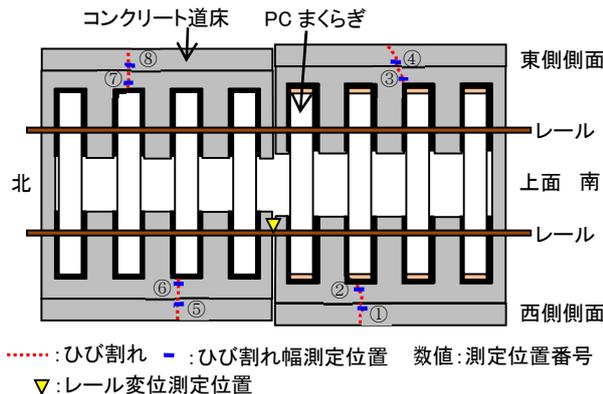


図-3 収縮ひび割れの発生位置および測定位置

2. コンクリート道床の収縮ひび割れの状況

2012年8月中旬に試験施工した短繊維補強コンクリートをコンクリート道床に用いた弾性まくらぎ直結軌道の外観を図-2に示す。通常、弾性まくらぎ直結軌道は高架橋や地下トンネルで用いられるが、試験線は土構造物上に敷設されていることから、コンクリート製の路盤を構築し、その上に弾性まくらぎ直結軌道を敷設した³⁾。コンクリート道床はまくらぎ4本で1ブロックとし、2ブロック分を現場打込みにより作製した。コンクリート道床はコンクリート製の路盤と付着させた状態でずれ止め筋で連結しており、ブロック間には施工目地を設けた。また、曲線の内方への傾きであるカントは路盤に設けてあり、その厚さは内側で300mm、外側で577mmとした。

コンクリート道床の外観調査を継続して実施していたところ、2015年3月に図-3に示す位置でひび割れの発生を確認した。ひび割れはブロックの中央寄りのまくらぎの端部の位置で軌道直角方向に発生しており、1ブロック当たり2箇所を確認された。表面と側面のひび割れは連結しており、側面のひび割れは非常に微細であるものの、底部まで達している。図-3に示す①～⑧の8箇所ではひび割れ幅をクラックスケールで測定した結果を表-1に示す。なお、2015年10月5日以降はコンクリート道床側面の4箇所のひび割れ幅をCMゲージ(ケツト化学研究所製TZ-1000)で継続的に測定している。クラックスケールで測定したひび割れ幅は、表-1に示す

表-1 コンクリート道床のひび割れ幅

	ひび割れ幅測定位置番号(図-3参照)							
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
2015/03/24	0.15	0.10	0.10	0.15	0.10	0.10	0.10	0.10
2015/09/05	0.20	0.15	0.10	0.15	0.15	0.10	0.15	0.20
2015/10/05	0.20	-	0.10	-	0.15	-	0.15	-
2015/11/28	0.20	-	0.10	-	0.15	-	0.15	-
2016/01/10	0.20	-	0.10	-	0.15	-	0.15	-

※2015/10/05以降はコンクリート道床側面のみ測定

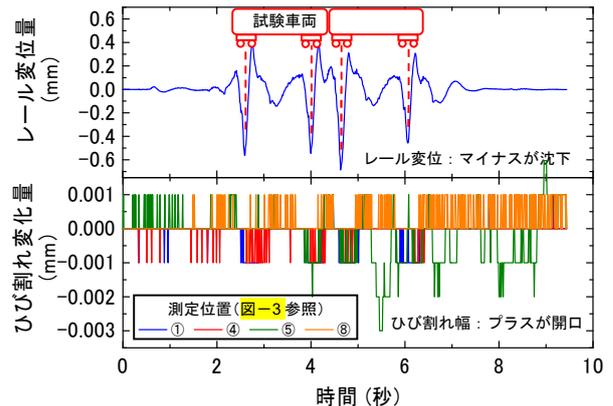


図-4 列車通過時のひび割れ変化量およびレール変位の時系列データ

通り 0.10～0.20mm であり、ひび割れ幅の拡大は確認されなかった。

次に、列車通過時のひび割れの動的な挙動を確認するため、図-3に示す①、④、⑤、⑧の4箇所では車両通過時のひび割れ幅を測定した。測定にはゲージ長50mmのバイ型変位計(東京測器研究所製PI-2-50)を用いた。なお、コンクリート道床目地部の西側のレール底部に圧電式加速度計(リオン製PV-85)を設置し、チャージアンプ(リオン製UV-16)で加速度を2回積分したレール上下変位も測定した。ひび割れの測定は試験車両R291(空車質量29.2t)の走行時に行った。図-4にひび割れ幅とレール上下変位の時系列データを示す。なお、図-4の上側がレール変位であり、下側がひび割れ幅変化量である。レール変位が下に凸の時を台車の中央と仮定して車両の速度を求めると、35.2km/hとなった。当該箇所のカントは105mm、曲線半径は105mであり、均衡速度は38km/hとなる。したがって、測定時の車両の速度は、概ね均衡速度となる。

列車通過時のレール横方向の作用である横圧によって生じるひび割れ幅の変化量は極めて微小であり、ひび割れ変化量は0.001mm(閉口量は-0.003mm)となった。列車通過後(8秒以降)においても同様な値が測定されたことから、測定によって得られた値にはノイズによる計測誤差が含まれているものと考えられる。なお、本測定で用いたバイ型変位計の分解能は0.0005mm/μεであ

表-2 使用材料

材料	記号	種類	備考
セメント	C	高炉セメントB種	密度 3.04g/cm ³ 、三菱マテリアル製
細骨材	S1	砕砂	表乾密度 2.58g/cm ³ 、吸水率 2.15%、粗粒率 2.53、兵庫県赤穂産
	S2	山砂	表乾密度 2.63g/cm ³ 、吸水率 1.55%、粗粒率 2.57、千葉県君津産
粗骨材	G	石灰砕石 2005	表乾密度 2.71g/cm ³ 、吸水率 0.29%、実績率 61.8%
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤	マスターグレニウム SP8SV、BASF ジャパン製
	101	空気量調整剤	マスターエア 101、BASF ジャパン製
短繊維	F	PVA 繊維	密度 1.30g/cm ³ 、長さ 30mm、直径 0.66mm、クラレ製 (RF4000×30)
練混ぜ水	W	上水道水	横瀬町上水道

表-3 コンクリートの配合

W/C (%)	単位量(kg/m ³)						SP (C×%)	101 (C×%)
	W	C	S1	S2	G	F*		
31.5	170	540	392	1197	474	16.25	1.60	0.002

*外割り、体積比で 1.25%

表-4 コンクリートの試験方法と規格値

必要性能				試験方法	規格値
短繊維混入前	流動性	スランプフロー	cm	JIS A 1150	65.0±5.0
	材料分離抵抗性	50cm フロー到達時間	秒	JIS A 1150	3~15
	空気量		%	JSCE-F 513	4.5±1.5
短繊維混入後	流動性	スランプ	cm	JIS A 1101	18.0 以上
	空気量		%	JIS A 1118	8.0 以下
硬化後	圧縮強度 (材齢 28 日)		N/mm ²	JIS A 1108	40.0 以上

るが、動ひずみ計の設定により 0.001mm 間隔で測定した。

以上より、ひび割れがブロックの中央付近で軌道直角方向に発生し、ひび割れ幅の経時変化が少なく、さらに列車通過時のひび割れ幅変化量もほとんどないことから、当該ひび割れの主たる要因はコンクリートの収縮によるものと考えられる。

3. 試験方法

3.1 試験概要

短繊維補強コンクリート道床で確認した収縮ひび割れ幅が、今後拡大する可能性があるかを検討することを目的に、直接引張荷試験を実施した。ひび割れ幅の拡大に対する評価は、事前に収縮ひび割れと同程度の開口幅を設けた供試体に対して、ひび割れ発生荷重以下の繰返し荷重を与えることで行った。

3.2 短繊維補強コンクリートの配合

直接引張荷試験に用いた短繊維補強コンクリートの使用材料と配合をそれぞれ表-2 と表-3 に示す。試験施工で用いた短繊維補強コンクリートには膨張材と収

表-5 コンクリートのフレッシュ性状

名称	スランプフロー (cm)	スランプ (cm)	50cm フロー到達時間 (秒)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
短繊維混入前	66.5	—	8.5	4.0	20
短繊維混入後	57.5	25cm 以上	—	2.5	21

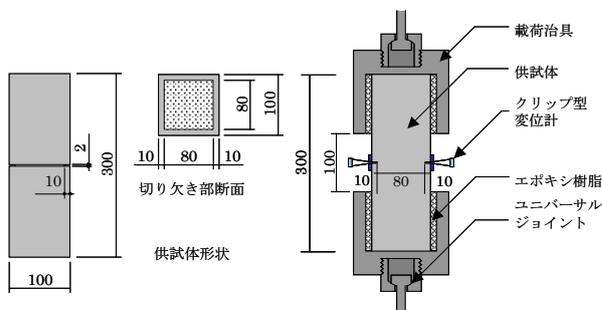


図-5 供試体形状 図-6 荷荷治具取付け状況

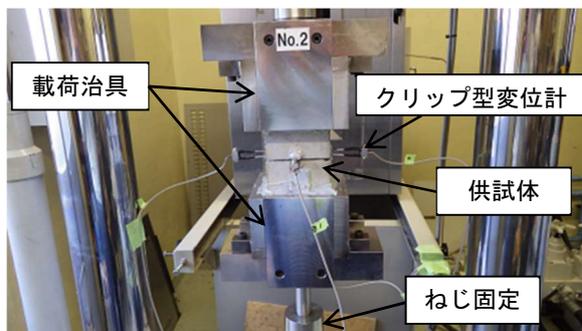


図-7 直接引張荷試験状況

縮低減剤を配合したが、本試験ではこれらを用いず、膨張材についてはセメントに置換した。

短繊維補強コンクリートの練混ぜには強制二軸練りミキサを使用し、表-4 に示す試験施工と同じ規格値を満足するものとした。規格値に対する試験結果を表-5 に示す。PVA 繊維混入後のスランプは、規格値を満たしていたが、スランプ尺の測定上限値 (スランプ 25cm) 以上であったため、スランプフローを測定した。

3.3 供試体概要

供試体の形状と荷荷治具は既往の研究 8) を参考とした。供試体の形状寸法は図-5 に示す通り 100mm×100mm×300mm とし、JIS A 1132 に準拠して作製した 100×100×400mm の角柱の両端 50mm を切断して作製した。また、供試体は長手方向中央部に深さ 10mm で幅 2mm の溝をコンクリートカッタにより全周に設けた。短繊維補強コンクリートの打込み後は湿潤養生を行い、材齢 3 日で脱型し、切断および溝の加工を行う材齢 26 日までには 20°C の恒温槽の中で養生を行った。

供試体の荷荷治具への取り付け状況を図-6 に示す。供試体は材齢 28 日に両端 100mm をエポキシ樹脂 (コニ

表-6 直接引張り繰返し载荷試験の試験条件

パターン	開口幅 0.15mm 時に対する荷重比	荷重 (kN)		応力 (N/mm ²)	
		最大	最小	最大	最小
1	0.25	1.5	0.5	0.23	0.08
2	0.5	3.0		0.47	
3	0.75	4.5		0.70	
4	1.0	6.0		0.94	

シ製ボンドクイックメンダー5 およびボンドクイックメンダー30) で载荷治具に固定した。

3.4 载荷方法

本研究では直接引張静的载荷試験(以下、「静的载荷試験」とする)と直接引張繰返し载荷試験(以下、「繰返し载荷試験」とする)を実施した。試験状況を図-7 に示す。なお、载荷治具の試験装置への取付け部はねじ固定とし、繰返し载荷試験によって緩まないようにした。

静的载荷試験および繰返し载荷試験は材齢 36 日で行った。静的载荷試験に用いる供試体は2体とし、繰返し载荷試験に用いる供試体は1体とした。供試体には切り欠きを設けていることから、ひび割れ発生位置の影響による試験結果のばらつきは少ないものと考えている。

試験では荷重と4側面中央の開口幅を測定した。荷重は試験機のロードセルで測定し、開口幅は切り欠き部の両側に取付コマ(東京測器研究所製 RAF-11)を貼付け、これに挟み込んで設置したクリップ型変位計(東京測器研究所製 UB-5)で測定した。

载荷速度については、次の通りとした。

・静的载荷試験

1 体目：試験開始から最大荷重を超え、短繊維の架橋効果が確認されるまでは、载荷速度 0.0001 mm/s の変位制御で载荷した。その後は、载荷速度 0.001mm/s の変位制御で载荷した。

2 体目：ひび割れが発生するまでは载荷速度 0.001 mm/s の変位制御で载荷した。次に、最大荷重を超え、短繊維の架橋効果が確認されるまでは、载荷速度 0.0001 mm/s の変位制御で载荷した。その後は、载荷速度 0.001 mm/s の変位制御で载荷した。

・繰返し载荷試験

試験開始から最大荷重を超え、引張軟化曲線のひび割れ開口幅が表-1 に示したコンクリート道床に発生したひび割れ幅の平均値である 0.15mm 程度まで、手動による変位制御により静的载荷を実施した。その後、荷重制御による繰返し载荷を開始した。繰返し载荷の载荷パターンを表-6 に示す。繰返し载荷の最大荷重は、開口幅が 0.15mm 程度時の荷重 6kN に対する荷重比を 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 倍とし、最小荷重は 0.5kN とした。载荷は周波数を 1Hz とするサイン波とした。繰返し载荷試験は表-6 に示す荷重比が小さい方から順次実施した。また、

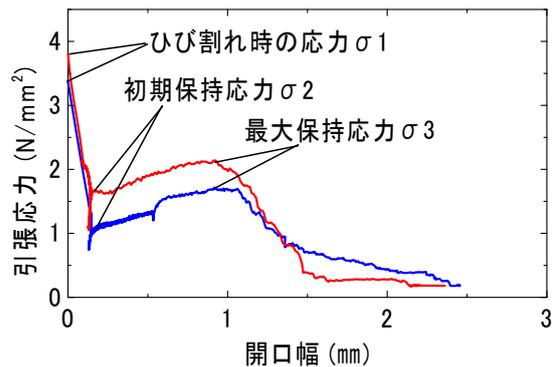


図-8 静的载荷試験による引張軟化曲線

表-7 引張軟化曲線の代表値

	ひび割れ時応力 σ_1 (N/mm ²)	保持応力		開口幅		σ_2/σ_1	σ_3/σ_1
		初期 σ_2 (N/mm ²)	最大 σ_3 (N/mm ²)	初期 (mm)	最大 (mm)		
1 体目	3.37	1.10	1.72	0.18	0.93	0.33	0.51
2 体目	3.95	1.74	2.14	0.16	0.92	0.44	0.54
平均	3.66	1.42	1.93	0.17	0.93	0.39	0.53

本検討では疲労寿命の算定ではなく、ひび割れの進展に着目することから各パターンにおける繰返し回数は 1000 回とした。

4. 試験結果

4.1 引張軟化曲線

静的载荷試験によって得られた引張軟化曲線を図-8 に示す。また、ひび割れ時の応力 σ_1 、ひび割れ発生後の初期に保持される応力 σ_2 (以下、「初期保持応力」とする) およびひび割れ発生後に保持される最大応力 σ_3 (以下、「最大保持応力」とする) と各保持応力時の開口幅についてまとめたものを表-7 に示す。

静的载荷試験の結果、ひび割れ発生による脆性的な破壊は発生せず、応力が保持される結果となった。 σ_2/σ_1 は 1 体目が 33%、2 体目が 44% となった。その後、2 体の供試体ともに開口幅が 0.93mm 程度になるまで応力が増加し、 σ_3/σ_1 は 5 割程度となった後、応力が低下する

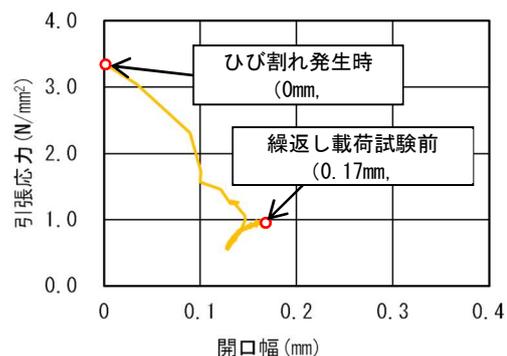


図-9 繰返し载荷試験前の静的载荷結果

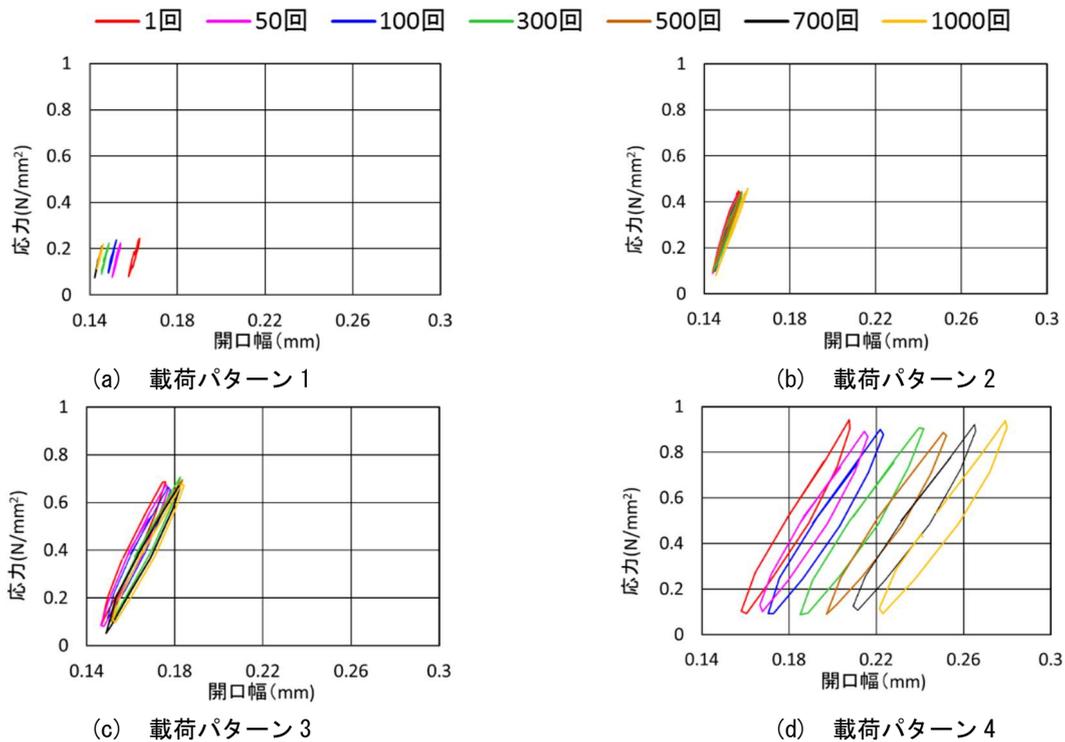


図-10 繰返し载荷試験による応力と開口幅の関係

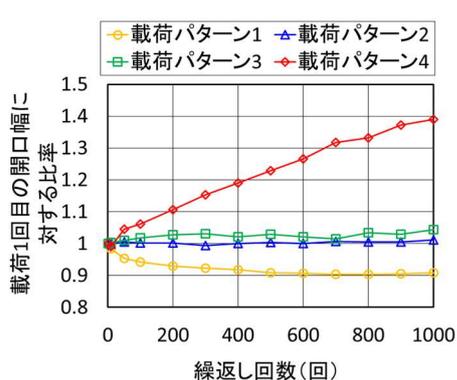


図-11 载荷1回目の開口幅に対する比率と繰返し回数との関係

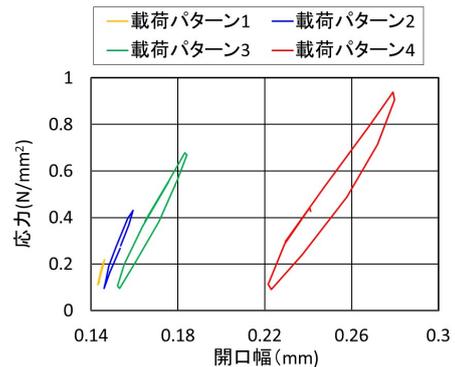


図-12 各载荷パターンにおける繰返し回数1000回目の応力と開口幅の関係

傾向を示した。なお、ひび割れ発生直後の一定開口幅における応力の低下と増加は急激な荷重の低下に対する試験機の能力の影響によるものと考えられるが、 σ_2 以降の応力については安定していることから、他の試験機でも同様な結果が得られるものと考えられる。

以上より、初期保持応力 σ_2 はひび割れ時の応力が小さいほど低くなる結果となったが、初期保持応力 σ_2 および最大保持応力 σ_3 に対する開口幅、さらに σ_3/σ_1 は2体の供試体でほぼ等しい結果となった。

4.2 繰返し载荷試験前の静的载荷

繰返し载荷試験前に、短繊維補強コンクリート道床に発生した収縮ひび割れの平均値である0.15mm程度の開口幅を供試体に導入するため静的载荷を行った結果を図-9に示す。静的载荷の結果、ひび割れ時の応力は

3.37 N/mm^2 となり、繰返し载荷試験開始前の開口幅は0.17mm、応力は0.94 N/mm^2 となった。したがって、荷重費の計算には0.94 $N/mm^2 \times 80mm \times 80mm = 6kN$ を用いた。

4.3 繰返し载荷試験による応力と開口幅の関係

繰返し载荷試験による応力と開口幅の関係を図-10に示す。载荷パターン1の場合、繰返し回数の増加に反し、開口幅が減少する傾向を確認した。载荷パターン2では開口幅は拡大せず、ほぼ一定となった。载荷パターン3では僅かな拡大、载荷パターン4では明確な拡大を確認した。

そこで、図-11に示すように繰返し回数の増加に伴う開口幅の拡大状況を確認するため、繰返し载荷試験における载荷1回目の開口幅に対する各繰返し回数における開口幅の比率と繰返し回数との関係を整理した。図-11よ

り、荷重パターン1は繰返し回数600回まで開口幅が減少し、それ以降は比率0.9に漸近した。荷重パターン2では、最大保持応力時の開口幅は荷重1回目が0.156mmで荷重1000回目が0.159mmであり、開口幅の拡大はほぼ生じなかった。荷重パターン3では、僅かではあるが1000回の繰返し回数で最大荷重時の開口幅が0.176mmから0.184mmへ0.008mm拡大した。荷重パターン4では上記と同じ条件において開口幅が0.208mmから0.280mmへ0.072mm拡大した。

次に、応力と開口幅によって描かれる曲線に着目するため、各荷重パターンにおける繰返し回数1000回目の結果を図-12に示す。図-12より、繰返し荷重試験の最大荷重が荷重パターン1の1.5kNから荷重パターン4の6.0kNへ増加するに従い、応力-開口幅関係は直線形状からループ形状に変化することを確認した。

5. 考察

コンクリートが破壊に至る過程において供試体に加えられる外力仕事は、ポテンシャルエネルギーとして供試体に蓄えられる回復性の弾性ひずみエネルギーと、ひび割れの進展などに消費される非回復性の損失エネルギーに変換されると考えられる⁹⁾。ここで、非回復性の損失エネルギーとは繰返し荷重試験において応力-ひずみ曲線で描かれるヒステリシスループの面積に供試体の体積を乗じた値と言え¹⁰⁾。本研究で得られた繰返し荷重試験による図-12に示す応力-開口幅関係は、供試体の溝の幅を基準長さとするとき、応力-ひずみ関係と考えることが可能であり、応力-開口幅関係のヒステリシスループが大きいほど損失エネルギーが大きいといえる。

したがって、開口幅0.17mmのひび割れ発生後に実施した直接引張繰返し荷重試験の範囲内において、開口幅の拡大が生じなかった荷重パターン1および2は弾性ひずみエネルギーが主体的であり、荷重パターン3と同程度の損失エネルギーが繰返し消費されると開口幅が増加するものと考えられる。

以上を踏まえると、短繊維補強コンクリート道床に発生した収縮ひび割れの列車通過時のひび割れ変化量は、ノイズの影響を考慮すると限りなく0mmに近く、荷重パターン1と同程度であると考えられる。したがって、短繊維補強コンクリート道床に生じた収縮ひび割れ幅は、列車荷重の繰返しによって拡大しない可能性が高いものと考えられる。

なお、荷重パターン1で開口幅が繰返し回数の増加に反して減少する原因については、ひび割れ発生直後に初期の0.25倍の荷重で繰返し荷重試験を行ったことから、クリープの影響により開口幅が徐々に小さくなった可能性があるが、この件については今後の課題としたい。

6. まとめ

本研究における試験の範囲において、短繊維補強コンクリートの開口幅0.15mm時に対する荷重比を0.25および0.5倍として繰返し荷重試験を行った結果、1000回の繰返し荷重ではひび割れ幅がほとんど増加しないことを確認した。また、荷重比を0.75倍にするとひび割れ幅が増加する可能性があり、1.0倍にすると明らかに増加することを確認した。

以上より、試験線に試験施工した短繊維補強コンクリート道床に発生した収縮ひび割れ幅は、列車荷重の繰返しによって増加しない可能性が高いと考えられる。

参考文献

- 1) 川又篤, 高橋貴蔵, 堀越哲郎, 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集, Vol.27, No.1, pp.295-300, 2005.7
- 2) 堀池高広ほか: 短繊維補強コンクリートによる弾性まくらぎ直結軌道用道床コンクリートの水平抵抗試験, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.62, No.4-233, 2007.9
- 3) 川又篤ほか: 短繊維補強コンクリートによるまくらぎ直結軌道の試験施工, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68, No.5-535, 2013.9
- 4) 鉄道総合技術研究所編: 短繊維補強コンクリートを用いたまくらぎ直結軌道用コンクリート道床の設計・施工の手引, 2015.1
- 5) 益田彰久, 小澤一雅, 松岡茂: コンクリート部材の曲げ疲労破壊に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.955-960, 2002
- 6) 高橋貴蔵ほか: 短繊維補強コンクリートの軌道スラブへの適用に関する検討, 鉄道総研報告, Vol.21, No.6, pp.23-28, 2007.6
- 7) 水越睦視, 松井繁之, 東山浩士, 内田美生: SFRCの曲げ疲労ひび割れ進展寿命の評価, 土木学会年次学術講演会, Vol.66, No.5-204, 2011.9
- 8) 松尾庄二, 松岡茂, 益田彰久, 柳博文: SFRCの引張軟化曲線の推定法に関する一研究, コンクリート年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.457-462, 1995
- 9) 岡田清, 小柳治, 六郷恵哲: 含水量の異なるコンクリートの圧縮破壊過程に関するエネルギー的考察, 土木学会論文報告集, Vol.248, pp.129-136, 1976.4
- 10) 若林幹夫, 鶴田浩章, 尾上幸造: 水中圧縮疲労を受けるコンクリートの損失エネルギーに関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.59, No.5-305, pp.607-608, 2004.9