

論文 合成短繊維添加によるコンクリート片の剥落対策

細田 暁^{*1}・菅野 貴浩^{*2}・石橋 忠良^{*3}

要旨:主として中性化による鉄筋腐食が引き起こすコンクリート片の剥落を防止する目的で、JR 東日本では剥落が危害を及ぼす恐れのある鉄筋コンクリート構造物のコンクリートを対象に合成短繊維を少量添加することとした。繊維の添加はコンクリート片剥落を防止する総合施策の一部であるという考え方にに基づき、必要最小限の合成短繊維添加量について検討した。膨張材による膨張圧で鉄筋の腐食膨張を模擬し、打撃による損傷を加えることでかぶりコンクリートを剥落させる実験を行い、3種類の繊維について、比較的少量の繊維を添加することで剥落防止の効果が十分に発揮されることを示した。

キーワード:コンクリート片の剥落, 合成短繊維, 少量添加, 膨張圧, 打撃試験

1. はじめに

平成 11 年 6 月に発生した新幹線福岡トンネルにおける覆工コンクリート落下事故以降、コンクリート片の剥落が社会的に注目され、コンクリート構造物に対する信頼性が揺るぎかねない状況となった。JR 東日本において、平成 11 年 7 月から約 1 年半の間に報告された約 100 件のコンクリート構造物からの落下物のうち、高架橋等からの落下物が約 7 割を占め、その落下物の内訳はコンクリート片が約 7 割であった¹⁾。コンクリート構造物への信頼を回復するために、高架橋等からのコンクリート片の剥落を防止することは喫緊の課題となった。

高架橋等からの剥落事象に対する調査分析¹⁾の結果、コンクリート片の落下原因は半数程度はかぶり不足箇所における鉄筋の腐食膨張圧によるものであった。鉄筋の腐食は、かぶり不足(ほとんどが 20mm 未満)、中性化の進行に加えて、雨水・漏水の影響により発生しやすくなることが明らかとなった。また、雨水・漏水の影響に関わらず、中性化残りが 10mm 以上確保されていれば、コンクリート片剥落に至る鉄筋腐食はほとんど見られないことも明らかとなった。

これらの調査結果に基づき、新設コンクリート構造物の品質改善のための各種施策がとられた。設計面では水セメント比とかぶりが見直され、水切り形状も見直された。また、品質管理、工事監督面では、コンクリートの単位水量の上限値を設定し、コンクリート受け入れ時に単位水量試験を行うことなどがルール化された。これらに加えて、非破壊検査などの検査面での取り組み、契約面での取り組みを含めた総合施策が JR 東日本社内の技術基準類に反映され、実際の工事に適用されてきている²⁾。

これらの施策が確実に実施されれば新設コンクリート構造物における剥落はほぼ確実に回避されると思われる。しかし、これらの施策は効率化の面から抜き取りによる試験、検査を基本としている部分もあり、100%完全とは言い切れないのも実情である。そこで、近年実用化されてきている合成短繊維に着目し、総合施策の信頼性をさらに高める目的で、剥落の懸念される部位に繊維補強コンクリートを適用することにした。合成短繊維を生コンクリートに後添加し、剥落事象が多く、かつ剥落が危害をおよぼす恐れのあるコンクリート高架橋の上層・中層のスラブ・梁、桁、場所打ちで施工する地覆・高欄

*1 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事部 構造技術センター 博士(工) (正会員)

*2 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事部 構造技術センター 工修 (正会員)

*3 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事部 構造技術センター所長 工博 (正会員)

等に適用した。コンクリートのフレッシュ性状に大きな影響を与えない程度の少ない添加量で鉄筋腐食を想定した剥落に対して十分効果を発揮することを実験により確認した。本研究ではその実験方法、結果について報告する。

2. 繊維の効果を確認する実験の方法

2.1 実験方法・条件の選定

平石らは、膨張性のある静的破碎材を用いて鉄筋の腐食膨張を模擬した実験を行った³⁾。繊維には波形ポリプロピレン繊維と直線形ビニロン繊維を使用している。鉄筋を模擬した静的破碎材注入用の穴の径が40mm、かぶりが45mm、穴の中心間隔が150mmで、穴を6個並べた供試体となっている。この実験から、上記の繊維をコンクリート体積比で0.2%添加することで剥落を防止する性能を付与できることを示した。

この実験の条件は、冒頭に述べた事項を勘案すると、中性化による鉄筋の腐食膨張が実際にはほとんど発生しないかぶり厚さであるといえる。また、かぶりコンクリートが剥落した写真から、静的破碎材の膨張量が実構造物の鉄筋の腐食膨張量よりも相当に大きいようと考えた。前述のとおり、剥落に対する総合施策の信頼性向上を目的としているため、繊維には必要最低限の性能を期待すればよいことから、この実験方法を参考にして修正を加え、新しい実験方法を策定した。

図-1に本報告で行った実験に用いた供試体の諸元を示す。静的破碎材よりも膨張量の小さい、通常の膨張材（構造物用）を膨張材充填穴に充填し、鉄筋の腐食を模擬した。膨張材は水を加えてよく練り混ぜて（水粉体重量比で30%）ペースト状にし、すぐに充填した。実構造物において剥落が生じる条件に近いものとするため、膨張材充填穴の直径を20mm、かぶりを20mmとした。予備実験により、穴の中心間隔を大きくすると、穴と穴を結ぶひび割れにならず、穴に沿ったひび割れが発生し、膨張量が大きい場合にもそのひび割れが大きく開くだけで剥落に

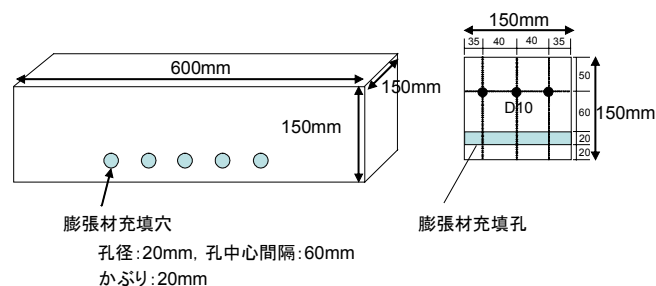


図-1 剥落に対する繊維の効果を確認する試験体

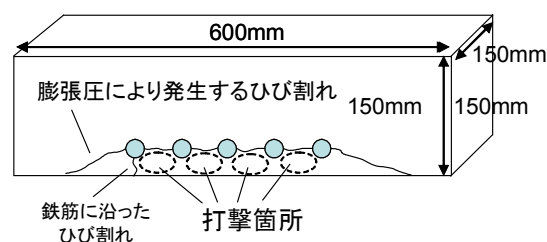


図-2 膨張圧により発生するひび割れの状況



図-3 打撃試験の様子

至らない場合が多いことがわかった。そこで、穴の中心間隔は60mmとした。また、膨張量が大きい場合の供試体の崩壊を防ぐため、中心よりやや上部にD10の鉄筋を3本配置した。コンクリートの打設方法は、スラブなどを想定して、模擬鉄筋が供試体底面になるように型枠を設置し、上面から打設を行った。供試体は作成後に膨張材充填穴が開いている状態とし、所定の材齢が経過してから穴に膨張材を練り混ぜたペーストを充填した。この実験方法によると膨張材を充填して数日後には図-2に示すようなひび割れ（場合によっては鉄筋に沿ったひび割れも1~2本）がほぼ安定して発生することが分かった。

本報告の実験では、膨張圧だけではコンクリートが剥落しなかったため、浮いたかぶりコン

表-1 各繊維の諸物性値

材質	比重	長さ	直径	ヤング係数	引張強度	引張破断時の伸び	吸水性	熱分解開始温度	発火点	備考
ナイロン6.6	1.17	12mm	19 μ m	4200MPa	550MPa	40%	4.5～8.0 %	250℃超え	650℃	単繊維
ポリプロピレン	0.91	12mm	300 μ m	4000MPa	670MPa	—	なし	160～170℃	590℃	網目状繊維
ポリビニルアルコール (PVA)	1.30	12mm	100 μ m	25000MPa	1100MPa	10%	5.0～11.5%	245℃以上	440℃	単繊維

表-2 各繊維の実験条件

繊維種類	繊維添加量 (コンクリートに対する体積比)	設計基準強度	圧縮強度 (繊維無混入のもの)	コンクリート配合									膨張材充填材齢	打撃開始材齢	コンクリート練り混ぜ方法	
				W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)										
						W	C	S1	S2	G1	G2	減水剤				
ナイロン6.6	0%, 0.02%, 0.03%, 0.04%, 0.06% 各添加量につき供試体1体 (0.02%, 0.03%, 0.06%は2体)	27MPa	26.3MPa (28日)	50.8	43.4	171	337	764		713	306	3.37	7日	23日	生コン車で購入後、二軸強制練りミキサーで繊維を加えて練り混ぜ	
										大分市片島産山砂(表乾密度2.6, 吸水率1.88%, 粗粒率2.65)	大分市片島産山砂(表乾密度2.66, 吸水率0.86%, 実績率58.0)	大分市上戸次砕石(表乾密度2.66, 吸水率1.02%, 実績率58.0)	AE減水剤(標準型I種)			
						普通ポルトランドセメント										
ポリプロピレン	0%, 0.03%, 0.05%, 0.075%, 0.10%, 0.15%, 0.20% 各添加量につき供試体1体	27MPa	32.7MPa (21日)	53.4	47.2	155	290	898		1002		0.55	21日	28日	二軸強制練りミキサーでコンクリート練り混ぜ	
										埼玉県秩父郡横瀬産砕砂(表乾密度2.68, 吸水率1.48%, 粗粒率2.69)	埼玉県秩父郡横瀬産砕石(表乾密度2.7, 吸水率0.45%, 粗粒率6.6)	AE剤(C×%)				
						普通ポルトランドセメント										
PVA	0%, 0.05%, 0.075%, 0.10% 各添加量につき供試体1体	27MPa	41.3MPa (28日)	51.5	44.3	177	348	528	229	612	409	0.696	7日	16日	二軸強制練りミキサーでコンクリート練り混ぜ	
								香川県坂出市室木島産海砂(表乾密度2.55, 吸水率1.96, 粗粒率2.60)	兵庫県飾磨郡家島町産砕砂(表乾密度2.57, 吸水率1.66, 粗粒率2.90)	岡山県御津郡御津町矢原産砕石2015(表乾密度2.74, 吸水率0.42%)	岡山県御津郡御津町矢原産砕石1505(表乾密度2.74, 吸水率0.45%)	ポソリス製レオビルドSP-8N				
						普通ポルトランドセメント										

クリートに何らかの損傷を与えないと剥落が生じない。そこで、**図-3**のように供試体を90度回転させて支持し、重さ770g程度のハンマーで打撃を加えることにした。打撃箇所は**図-2**に示すように、浮いたかぶりコンクリートと本体とにせん断ずれが生じる箇所である。膨張材の膨張圧による損傷と、打撃による損傷を合わせることで、実構造物における鉄筋の腐食膨張によるコンクリートの剥落を模擬し、繊維が効果を発揮するか観察した。この試験においては表面のコンクリートの圧壊などが生じない限り、**図-2**に示す4箇所を左側から順番に叩き、それを繰り返した。打撃試験は著者の一人が共通して行った。ハンマーによる打撃はひじをほとんど固定した状態で、ハンマーの自重以外に特別大きな力を加えることはせずに行った。

2.2 使用した繊維の物性等について

繊維は3種類のものをを用いた。各繊維の物

性を**表-1**にまとめた。3種類の繊維は、ナイロン繊維、ポリプロピレン繊維、ポリビニルアルコール(PVA、通称ビニロン)繊維を使用することにした。これらの繊維は、それぞれ材質が違うが、共通点は、繊維長さに対して繊維の直径が小さく、いわゆるアスペクト比が大きいことである。また、特にコンクリートとの付着をとるための物理的な加工はされていない。

実験は各繊維ごとに行ったため、使用したコンクリートの配合、材料、製造方法、また打撃試験時の材齢等が異なる。表-2に実験条件を整理した。膨張材の充填材齢は基本的に7日としたが、ポリプロピレン繊維については21日で充填した。ポリプロピレン繊維の実験での材齢7日での強度は27.7MPaであり、材齢が異なることの影響はほとんどないものと考えている。

3. 実験結果と考察

3.1 膨張圧により発生したひび割れ

ひび割れ幅の大小はあるが、基本的には、図-2 に示すように、穴と穴を結ぶひび割れが発生し、両端の穴からは八の字に広がるひび割れが供試体下端へ向かって発生した。膨張量が小さい場合は、特に両端の穴からの八の字のひび割れがほとんど見えないものもあったが、打撃試験によって八の字のひび割れが顕在化し、最終的な剥落状況は同様なものとなった。

繊維を添加した場合、いわゆる繊維の架橋効果によってひび割れ幅が抑制される可能性も考えられたが図-4 に一例を示したように、各繊維の添加量とひび割れ幅には明確な関係は得られなかった。合成短繊維を本報告における添加量の程度使用する場合、ひび割れ幅を抑制する効果を期待することはできないと言える。

3.2 打撃試験結果

打撃試験の結果を表-3 にまとめた。すべての繊維について、繊維を添加することで剥落に対する抵抗性が向上する結果となった。3種類の繊維の実験で、繊維を添加しない場合に剥落に要した打撃回数が異なっているが、これは主としてコンクリートの強度および供試体の製作条件が異なることによると考えられる。表-2 および表-3 に示したように、圧縮強度の低い方が剥落に要する打撃回数が少なくなっており、膨張材の膨張圧によりコンクリートがより大きな損傷を受けたものと考えられる。

3種類の実験で、繊維を添加しない場合の剥落までの打撃回数に大きな違いが出たため、各添加量における打撃回数を単純に比較するだけでは繊維の性能を評価できない。ここでは、各添加量における剥落に要した打撃回数を、繊維を添加しない場合の打撃回数で除した値を算出し、合わせて表-3 に示した。打撃回数比という指標により、各繊維において添加量を変化させたときの効果を相対的に把握することとした。図-5 には、各繊維の剥落に要する打撃回数比と繊維添加率の関係を示した。

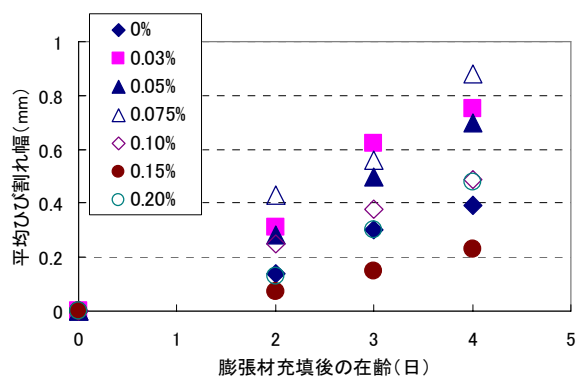


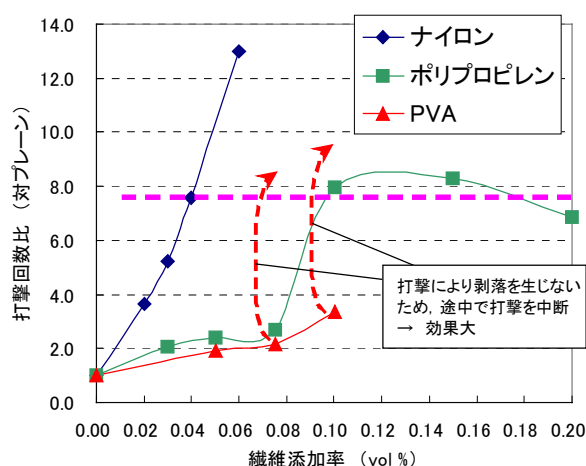
図-4 繊維添加量とひび割れ幅の経時変化
(ポリプロピレン繊維)

ナイロン繊維では、繊維の添加量とともに打撃回数比が増加する結果となった。0.02%の添加量では2体の供試体の結果が大きく異なり、繊維が剥落に対して効果的である場合もあったが、あまり効果を発揮していないように見られる場合もあり、繊維の量が少ないために効果にもばらつきが大きいと考えられる。0.03%の場合は2体ともに繊維が効果を発揮している様子が認められ、0.04%、0.06%と添加量が増えるごとに打撃回数比も大きくなった。添加量が0.04%の場合は打撃回数が40回くらい以降から明らかに打撃の際に反発力が小さくなり、繊維が効いている様子が伺えた。図-6は、さらに20回打撃を追加して60回に至った状況である。打撃により損傷が進展し、ひび割れ幅も大きくなったが依然として剥落には至っていない。この後、68回打撃した時点で図-7に示すように、コンクリート塊が剥落した。このように、従来の繊維補強コンクリートの添加量よりは随分と少ない添加量ではあるが、ナイロン繊維を適量添加することでコンクリートの剥落に対する抵抗性が大きく向上することが分かった。ポリプロピレン繊維では、繊維を添加することで打撃回数比は増加したが、その効果は0.10%を境に大きく変化した。0.03%~0.075%ではプレーンコンクリートに比べると繊維の効果で打撃回数は増加したが、その性状は0.10%以上と比べると明らかに異なっていた。0.10%以上の場合、打撃を加えてもひび割れがなかなか進展せ

表－3 打撃試験結果一覧

繊維名称	添加量	剥落に要した打撃回数	剥落に要した打撃回数／各繊維の0%添加量のときの打撃回数	剥落の状況・繊維の効き方
ナイロン6.6	0%	9	1.0	脆性的な剥落
	0.02%	35.5	3.7	2体の剥落回数は、26回と45回で、26回の方は繊維の効果が少なく脆性的に剥落した。45回の方は繊維が効いて剥落に対する抵抗性が大きく向上した。
	0.03%	47	5.2	2体の剥落回数は、41回と53回で、両方とも繊維が効いて剥落に対する抵抗性が大きく向上した。
	0.04%	68	7.6	40回くらい以降、明らかに繊維が効いている
	0.06%	87	9.7	0.04%に比べると、繊維の効果が大きい
ポリプロピレン	0%	24	1.0	脆性的な剥落
	0.03%	50	2.1	繊維が効いているが、その効果はあまり大きくない。
	0.05%	57	2.4	繊維が効いているが、その効果はあまり大きくない。
	0.075%	64	2.7	繊維が効いているが、その効果はあまり大きくない。
	0.10%	191	8.0	打撃面がかなり圧壊したが、繊維の効果が大きく剥落に対する抵抗性が大きく向上した。
	0.15%	199	8.3	打撃面がかなり圧壊したが、繊維の効果が大きく剥落に対する抵抗性が大きく向上した。
	0.20%	164	6.8	打撃面がかなり圧壊したが、繊維の効果が大きく剥落に対する抵抗性が大きく向上した。
PVA	0%	108	1.0	他の繊維の実験より打撃回数が多くなったが、脆性的な剥落
	0.05%	208	1.9	打撃による損傷の進展がプレーンコンクリートに比べて緩慢で打撃面が圧壊した。208回で一部が剥落した。
	0.075%	231 *	2.1	200回打撃した時点で圧壊が進行したが、繊維の効果でひび割れの進展が食い止められていた。216回以降、圧壊の程度が小さい一箇所のみを集中的に打撃したところ、231回でその部分のみが剥落した。
	0.10%	360 *	3.3	300回打撃して圧壊が進行し、両端の穴から発生するひび割れは開いたが、全体の剥落にはまだまだ抵抗性があった。300回以降、圧壊していない部分を通常よりも相当激しく集中的に打撃することで、その部分を剥落させることができた。

*の印は、通常の打撃方法では剥落しなかったため、参考値である。



図－5 各繊維の添加率と打撃回数比

ず、打撃面が圧壊を始めた。120 回くらい以降からは打撃の反発力が小さくなり、繊維により剥落が食い止められている様子であった。さらに 60 回打撃を加えた 180 回においても、コンクリート塊が繊維によって繋ぎ止められている状態であった。しかし、0.10%以上添加しても打撃回数比に大きな増加はなく、0.10%の繊維で十分効果があると考えられる。

PVA 繊維の場合は、プレーンコンクリートの剥落打撃回数が 108 回と非常に多くなった。コ



図－6 打撃回数 60 回後の様子
(ナイロン繊維 0.04%)



図－7 打撃回数 68 回後の様子
(ナイロン繊維 0.04%)

ンクリートの強度が高かったためと思われる。しかし、剥落は脆性的に発生した。これに対し、繊維を添加した場合は明らかに性状が異なった。0.05～0.10%の添加量において、打撃による損傷の進展が繊維により抑制されているのが明らかで、コンクリート塊の剥落にいたる前に、打撃面が圧壊を始めた。0.05%の場合は、208回の打撃で、コンクリート塊全体ではなく一部が剥落した。これに対して、0.075%の場合は、200回の打撃を加えても剥落に至るひび割れが大きく進展せず、打撃面の圧壊が大きく進行した。200回以降は、圧壊のしていない箇所を集中的に強く叩くことでその部分を剥落させることができたが、0.075%の添加量で十分に剥落に対する抵抗性があることが伺えた。0.10%に添加量が増えた場合はその傾向がさらに強くなり、300回の打撃でも剥落に至るひび割れはほとんど進展せず、また打撃面の圧壊も抑制される結果となった。

このように、PVA 繊維は他の繊維に比べると打撃による損傷を抑制する効果が大きいように観察されたが、これは繊維とセメント水和物の付着強度が強いことによるとと思われる。既往の研究により、PVA 繊維は、ナイロンやポリプロピレンに比べて非常に大きい摩擦付着強度が得られることが明らかになっている⁴⁾。この付着力によって、本研究の PVA 繊維の場合も打撃による損傷が抑制されたものと考えられる。

3.3 剥落防止対策における繊維添加量

図-5を見ると、ポリプロピレン繊維で効果が大きく出るのは0.10%以上の添加量である。0.10%以下でも剥落を防止する効果はあると考えるが、0.10%を適正量と設定した。ナイロン繊維については、打撃回数比でポリプロピレンと同程度の効果を確保するために、0.04%の添加量が必要であると判断した。PVA 繊維については、打撃回数比では他の繊維よりも小さくなったが、剥落に対する効果は十分に認められた。0.05%でも効果は見られたが、余裕を見ることと、打撃試験の破壊状況から0.075%を適正量

と設定した。

4. まとめ

3種類の合成短繊維を少量コンクリートに添加することで、鉄筋腐食を想定したコンクリートの剥落に対する抵抗性が大幅に向上することを実験結果で示した。また、剥落防止対策としてのそれぞれの繊維の適正添加量を決定した。

この適正添加量は、鉄筋腐食によるコンクリートの剥落に対するものである。想定される外力等が異なるトンネルの覆工の無筋コンクリートなどは対象としておらず、今回の実験だけでは効果が判断できない。

これらの繊維は、生コン車に投入した後の高速攪拌回転で十分に分散することを確認している。また、繊維を必要量添加することによる普通コンクリートのフレッシュ性状への影響も軽微である。

なお、JR 東日本では、中性化に起因する鉄筋の腐食膨張によるコンクリート片の剥落に対して、それぞれの繊維についての適正添加量を添加したコンクリートを使用した剥落対策を行っている。

参考文献

- 1) 石橋忠良, 古谷時春, 浜崎直行, 鈴木博人: 高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究, 土木学会論文集, No.711/V-56, pp.125-134, 2002.8
- 2) 菅野貴浩: JR 東日本におけるコンクリート構造物の長寿命化への取り組み, コンクリート工学, vol.40, No.5, pp.74-81, 2002.5
- 3) 平石剛紀, 坂田 昇, 林 大介, 山村正人: 剥落防止を目的とした有機系繊維補強コンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.23, No.1, pp.469-474, 2001
- 4) 日本コンクリート工学協会: 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書, 2002.1