

トンネル覆工用コンクリートの爆裂およびはく落抵抗性に関する研究

川西 貴士 近松 竜一
 屋代 勉 富井 孝喜
 (本社土木本部) (本社土木本部)

Study on Concrete for Tunnel Lining with Resistance of Explosion and Spalling

Takashi Kawanishi Ryuichi Chikamatsu
 Tsutomu Yashiro Takayoshi Tomii

Abstract

Concrete tunnel linings needs to be fire resistant and sufficiently resilient to prevent a concrete piece from falling away. Resistance of explosion and spalling can be improved by using thin polypropylene short fibers that prevent explosions and increase concrete resilience. Resistance of explosion and spalling were experimentally verified to determine the practical applicability of concrete containing thin polypropylene short fibers. We demonstrated that the post-addition of polypropylene short fibers and compaction with an inner vibrator had little effect on the decentralization of the fiber. Adequate construction performance was achieved. Thus, resistance of explosion and spalling were improved by adding polypropylene short fibers with each fiber measuring 0.02 mm to 0.05 mm in diameter and 10 mm to 20 mm in length, where the mixing volume ratio ranged between 0.1% and 0.05%.

概要

近年、トンネルの覆工用コンクリートには、火災時の安全性を確保するための爆裂抵抗性と、コンクリート片の落下を防止するためのはく落抵抗性が求められている。爆裂の防止に効果的である繊維径の小さいポリプロピレン短繊維を用いることで、爆裂とはく落の抵抗性の両者の性能を満足できれば、効率的にコンクリートの機能を向上させることができる。そこで、繊維径の小さいポリプロピレン短繊維を用いたコンクリートの現場適用に向けた施工性と、爆裂およびはく落の抵抗性について、実験的に検証した。その結果、繊維径0.02mm～0.05mmで長さ10mm～20mmのポリプロピレン短繊維を容積比で0.05～0.10%添加したコンクリートについて、短繊維の後添加および振動締固めが繊維の分散性に与える影響は小さく、施工性に問題はないこと、爆裂およびはく落の抵抗性の両者を付与できること、などを明らかにした。

1. はじめに

ポリプロピレン短繊維(以下、PP繊維と呼称)は、素材が柔らかく、分散性や作業性に優れており、比較的安価であることから、幅広い用途で使用されている。特に、トンネルの覆工用コンクリートにおいては、曲げじん性の改善、はく落の防止、爆裂の防止の3つの用途で用いられている。

トンネル周辺の地盤が比較的軟弱な場合や偏土圧が作用する場合には、変形性能を向上するために曲げじん性の改善が求められる。また、コンクリート片の落下を防止するためのはく落抵抗性が求められている。一方で、都市部のシールドトンネルには、火災時の安全性を確保するための爆裂抵抗性が求められている。

曲げじん性を改善するためには、繊維径が0.3mm以上で長さ40mm以上と太くて長い“針”のようなPP繊維を容積比で0.3%～0.4%混入するのに対し、はく落防止に用いるPP繊維は、繊維径が0.06mm以上と細くて“綿”のようなPP繊維を容積比で0.05%～0.10%と少量用いる場合があ

る。一方で、爆裂防止を目的とする場合、繊維径が0.02mm～0.05mmとさらに細いPP繊維が容積比で0.2%程度混入されており、各種性能に応じてPP繊維の形状や混入率を適宜変えて使用しているのが現状である。

これらの性能のうち、爆裂およびはく落の抵抗性に着目し、両者の性能を効率的に確保するためのPP繊維の種類および添加量を把握することを目的として、本稿では、繊維径の小さいPP繊維を添加したコンクリートの両者の性能について、実験的に検証した結果を報告する。

実験は3つのシリーズに大別して行った。所要の性能を確保するには、繊維の分散性の確保が前提となるため、シリーズIでは、場所打ち施工を想定して、トラックアジテータへのPP繊維の後添加や内部振動機による振動締固めが繊維の分散性に及ぼす影響について検討した。シリーズIIでは、PP繊維を少量添加したコンクリートの爆裂抵抗性を確認した。シリーズIIIでは、爆裂防止に効果的な繊維径の小さいPP繊維を添加したコンクリートのはく落抵抗性を確認した。なお、各シリーズでは、対象とする構造物に併せて、結合材の種類を選定した。

2. PP繊維の分散性の検討(シリーズI)

2.1 実験概要

PP繊維の分散性は、JSCE-F 554に定められている繊維混入率試験で評価した。実験は、製造時(シリーズI-1)と締固め時(シリーズI-2)に分けて実施した。

シリーズI-1, I-2で実施した実験ケースをそれぞれTable 1, 2に示す。シリーズI-1では、高流動コンクリートとスランブ15cmのコンクリートを用いた。PP繊維には、爆裂の防止に効果的である¹⁾ 繊維径0.02mm(織度2.2dtex)×長さ10mm(PP①)および繊維径0.05mm(織度17dtex)×長さ20mm(PP②)の2種類を使用した。PP繊維の混入率は、いずれも容積比で0.11%(1kg/m³)とした。コンクリートの配合をTable 3, PP繊維の外観をPhoto 1に示す。コンクリートを実機ミキサにて製造した後、トラックアジテータに投入した。現場までの運搬を想定し、Photo 2に示すとおり、30分後にPP繊維を投入し、120秒間高速攪拌した。コンクリートの積載量は4m³とした。トラックアジテータにPP繊維を後添加した場合の繊維の分散性を確認するために、PP繊維の添加後、コンクリートを2m³と4m³排出した時点(ドラム内の前, 中, 後の3か所)で2試料ずつ採取し、繊維混入率試験を実施した。また、フレッシュコンクリートの品質と圧縮強度を併せて確認した。

シリーズI-2では、締固めを行う前の状態(練混ぜ後)と、内部振動機の振動時間を2種類変化させた3ケースについて、繊維の分散性を確認した。練り混ぜたコンクリート(50L)の全量を、Fig. 1に示す容器に投入し、内部振動機を容器の中央部に挿入して締め固めた。締固め後、試験体の上部と下部からコンクリートを採取し、繊維混入率試験を実施した。

Case-I-2-1については、ミキサより排出したコンクリートから直接試料を採取し、試験を行った。実験に用いたコンクリートの配合をTable 3に示す。セメントの種類は、高炉セメントB種とし、目標スランブは15cmとした。PP繊維には、繊維径0.02mm×長さ10mmを使用し、PP繊維の混入率は容積比で0.10%とした。

2.2 実験結果および考察

コンクリートの品質試験結果をTable 4に示す。スランブフローおよびスランブの例をPhoto 3に、その試験結果をFig. 2に示す。また、空気量の試験結果をFig. 3に示す。

繊維径0.02mm×長さ10mmのPP①を添加することにより、スランブフローで15cm程度、スランブで10cm程度低下した。繊維径0.05mm×長さ20mmのPP②を用いたCase-I-1-3では、スランブが4cm程度の低下であった。繊維径の小さいPP繊維を用いる場合、添加前後の変化を想定して、PP繊維添加前のスランブを増加しておく必要がある。

ドラム内のコンクリートの品質のばらつきは、スランブフローで5cm以内、スランブで1cm以内、空気量で1%

Table 1 実験ケース(シリーズI-1)
Test Case(Series I-1)

ケースNo.	コンクリートの種類	セメントの種類	PP繊維の種類
Case-I-1-1	高流動コンクリート ・目標スランブフロー:60cm	低発熱型 高炉セメントB種	繊維径0.02mm ×長さ10mm
Case-I-1-2	スランブタイプ ・目標スランブ:15cm	低熱ポルトランド セメント	繊維径0.05mm ×長さ20mm
Case-I-1-3			

Table 2 実験ケース(シリーズI-2)
Test Case(Series I-2)

ケースNo.	内部振動機の振動時間(秒)	試料の採取方法	採取試料数
Case-I-2-1	振動なし	ミキサより排出した コンクリートから直接採取	6試料
Case-I-2-2	5	試験体を高さ方向に2分割し、 上部、下部からそれぞれ採取	上部から3試料 下部から3試料
Case-I-2-3	15		

Table 3 コンクリートの配合
Mix Proportion of Concrete

シリーズ	実験ケース	水結合材比(%) W/C	細骨材率(%) s/a	単体量(kg/m ³)			粗骨材 G	混和剤添加率*(C×%) WR
				水 W	セメント C	細骨材 S		
シリーズI-1	Case-I-1-1	31.8	50.8	175	550	809	789	1.40
	Case-I-1-2	45.1	46.4	175	388	799	927	1.70
	Case-I-1-3	45.1	46.8	172	382	812	927	1.35
シリーズI-2	Case-I-2-1 ~I-2-3	40.0	46.0	165	413	789	935	1.00

※ Case-I-1-1, I-2: 高性能AE減水剤, Case-I-1-2, I-1-3: AE減水剤

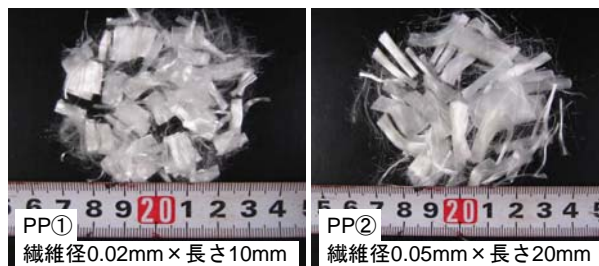


Photo 1 PP繊維
Polypropylene Short Fiber



Photo 2 実験の状況
Situation of Experiment

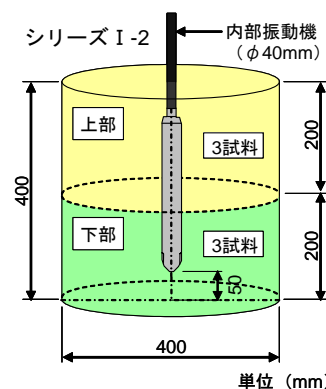


Fig. 1 試験容器の概要
Outline of examination container

以内であった。また、U型充てん高さはいずれも300mm以上であった。これらの結果は、トラックアジテータを用いた場合でも、コンクリートとPP繊維が均質に練り混ぜられていることを示すものといえる。

Table 4 コンクリートの品質試験結果
Result of Quality examination of Concrete

ケース No.	試験時期	スランプおよびスランプフロー (cm)	空気量 (%)	U型充てん高さ (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)		
					材齢 7日	材齢 28日	材齢 56日
Case-I-1-1	荷卸し直後	55.0	1.8	320	47.2	66.5	75.2
	2m ³ 排出時	59.5	1.8	346	48.9	68.6	76.5
	4m ³ 排出時	60.0	1.9	344	47.9	67.6	75.9
Case-I-1-2	荷卸し直後	14.0	4.0	—	13.9	45.3	57.0
	2m ³ 排出時	14.0	3.1	—	12.9	44.4	58.1
	4m ³ 排出時	13.5	3.1	—	14.0	45.9	57.5
Case-I-1-3	荷卸し直後	13.5	4.9	—	11.2	43.1	55.3
	2m ³ 排出時	13.0	5.0	—	12.3	45.3	56.2
	4m ³ 排出時	12.5	5.1	—	11.9	45.5	56.7

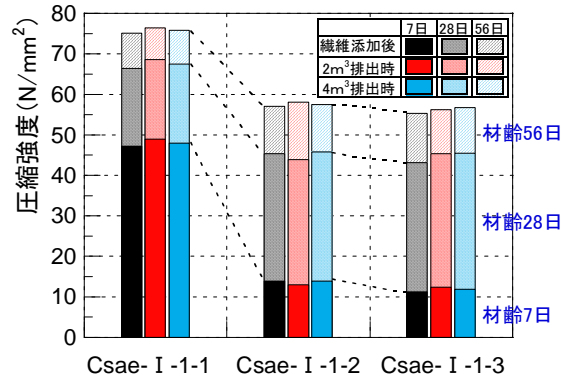


Fig. 4 圧縮強度試験結果
Result of Compressive Strength Test



Photo 3 スランプフローおよびスランプの例
Example of Slump Flow and Slump

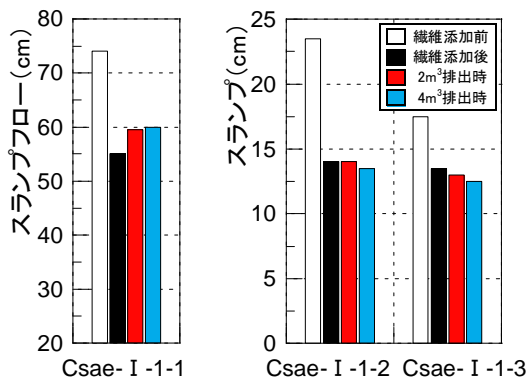


Fig. 2 スランプフローおよびスランプの測定結果
Result of Slump Flow and Slump Test

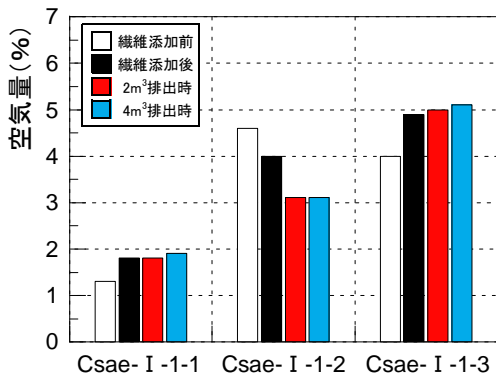


Fig. 3 空気量の測定結果
Result of Air Test

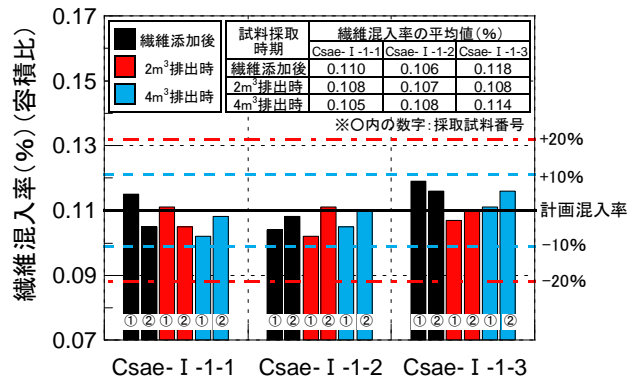


Fig. 5 繊維混入率試験結果(シリーズI-1)
Result of Mixing Rate Test for Short Fiber(Series I-1)

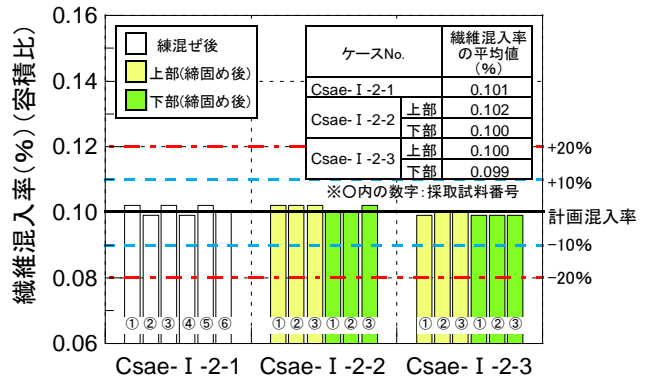


Fig. 6 繊維混入率試験結果(シリーズI-2)
Result of Mixing Rate Test for Short Fiber(Series I-2)

圧縮強度試験結果をFig. 4に示す。圧縮強度についても、ドラム内で顕著な差は認められず、品質のばらつきは小さいことが確認できた。

シリーズI-Iで得られた繊維混入率試験結果をFig. 5に示す。各段階で採取した2試料のばらつきは5%以内であった。トラックアジテータにPP繊維を後添加しても、PP繊維の添加後、2m³排出時および4m³排出時で、繊維混入率に顕著な差異は認められなかった。繊維混入率のばらつきは、最大で7%程度で、ドラム内でのPP繊維の偏りは小さかった。なお、ファイバーボールの発生は認められなかった。

繊維混入率のばらつきは、NEXCOの施工管理要領²⁾に記載されている管理基準(計画混入率の±20%)の1/3程度で、繊維の分散性は良好と判断できる。

シリーズI-2で得られた繊維混入率試験結果をFig. 6に示す。締固めを行う前の状態(練混ぜ後)で採取した試料と、締固め後に採取した試料で有意な差は認められなかった。また、振動時間による繊維混入率の違いも認められなかった。いずれのケースもばらつきは少なく、繊維量は計画混入率にほぼ一致し、繊維混入率の変動は、最大で2%程度であった。通常の施工の範囲内では、振動締固めが繊維の分散性に与える影響は小さいことが確認できた。

3. 爆裂抵抗性の検討(シリーズII)

3.1 実験概要

高強度コンクリートは爆裂を生じやすいことは一般に知られているが、比較的水結合材比が高い範囲の爆裂性状については、知見が少ない。水結合材比の増加に伴いPP繊維の混入率を低減できれば、効率的に爆裂を抑制することが可能となる。そこで、試験パラメータとして、水結合材比を、55%、45%、40%、30.8%および28.8%の5水準とした。PP繊維は、2章と同様に、繊維径0.02mm×長さ10mm(PP①)と繊維径0.05mm×長さ20mm(PP②)の2種類とし、混入率は容積比で0.00%(無混入)~0.20vol%まで変化させた。試験ケースをTable 5に示す。

結合材は、高炉セメントB種相当(高炉スラグ微粉末の置換割合40%~60%)とした。同一の水結合材比のケースにおいては、PP繊維の混入率に関わらず配合は同一とし、PP繊維は外割りで添加した。各水結合材比ごとのコンクリートの配合をTable 6に示す。加熱前の試験体の含水率は、4~7%の範囲であった。

3.2 耐火試験概要

耐火試験の概要をFig. 7に示す。耐火試験は一面加熱とし、耐火炉に設置する炉蓋に、幅500mm×長さ1,000mm×厚さ200mmの試験体を2体並行に設置して加熱を行った。水結合材比28.8%の配合⑤を用いた3ケースについては、幅1,700mm×長さ1,900mm×厚さ500mmの試験体とし、圧縮応力14.4N/mm²を作用させた状態で加熱を行った^{1)・3)}。加熱曲線には、トンネル火災を想定したRABT曲線(5分で1200℃まで昇温、その後60分後まで1200℃を継続し、170分後に常温に戻る曲線)を採用した。温度管理は、炉内に設置した熱電対により行った。

加熱時の測定項目として、炉内温度、爆裂の発生する時間および耐火炉内に設置した小型CCDカメラによる試験体表面の目視観察を行った。また、耐火試験後は、外観調査と爆裂深さの測定を行った。爆裂深さは、50mm間隔に分割し、ノギスを用いて測定した。測定値の最大値を最大爆裂深さ、各測点の測定値を平均した値を平均爆裂深さとした。

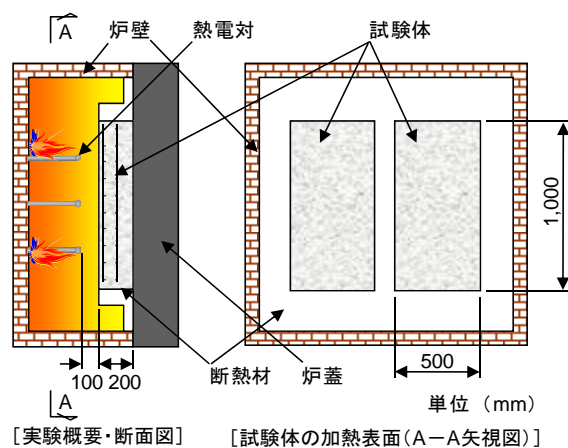
Table 5 耐火試験ケース
Test Case

配合ケース	水結合材比 (%)	PP繊維の混入率(容積比)(%)									
		PP①					PP②				
		0.00	0.03	0.05	0.08	0.10	0.15	0.20	0.05	0.10	0.20
配合①	55.0	○	—	○	—	○	—	—	—	—	—
配合②	45.0	○	○	○	—	○	—	—	○	○	—
配合③	40.0	○	—	○	—	○	—	—	—	—	—
配合④	31.8	—	—	—	○	○	—	—	—	—	—
配合⑤	28.8	—	—	—	—	—	○ ³⁾	○ ¹⁾	—	—	○ ^{1)・3)}

Table 6 コンクリートの配合
Mix Proportion

配合ケース	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単用量 (kg/m ³)			
			水	結合材	細骨材	粗骨材
			W	B	S	G
配合①	55.0	49.0	175	318	867	913
配合②	45.0	47.0	175	389	803	916
配合③	40.0	46.0	165	413	789	936
配合④	31.8	50.8	175	550	809	789

※配合⑤については、参考文献2)、3)参照



[実験概要・断面図] [試験体の加熱表面(A-A矢視図)]

Fig. 7 耐火試験の概要
Outline of Fire Resistance Test

3.3 実験結果および考察

爆裂深さの測定結果をTable 7に示す。PP繊維を混入しないケースについて、耐火試験後の爆裂深さの分布図をTable 8に示す。PP繊維を混入しない場合、水結合材比が55%のケースは、爆裂は発生せず、コンクリート表面の軽微な表面はく離程度に留まった。それに対し、水結合材比45%および40%のケースは、爆裂が発生した。また、爆裂深さは、水結合材比が低下するほど、爆裂深さが増大した。加熱開始後2分~2分30秒経過した時点(炉内温度で500~600℃位)からコンクリート片が表層から広範囲にはく離したが、概ね5~10分位までではく離は収まり、その後は進行しなかった。

最大爆裂深さを、10mm以下、11mm以上20mm以下および21mm以上の3段階に分割し、水結合材比とPP繊維の混入率との関係で整理したものをFig. 8およびFig. 9に示す。水結合材比が増加するほど、PP繊維の混入率を低減しても爆裂を抑制できることが確認できた。

Table 7 爆裂深さ測定結果
Result of Explosive Spalling Depth

配合 ケース	水結合 材比 (%)	爆裂 深さ (mm)	PP繊維の混入率(容積比)(%)									
			PP①							PP②		
			0.00	0.03	0.05	0.08	0.10	0.15	0.20	0.05	0.10	0.20
配合①	55.0	最大	3	-	3	-	3	-	-	-	-	-
		平均	0	-	0	-	0	-	-	-	-	-
配合②	45.0	最大	16	0	3	-	3	-	-	3	3	-
		平均	3	0	0	-	0	-	-	0	0	-
配合③	40.0	最大	25	-	3	-	0	-	-	-	-	-
		平均	6	-	0	-	0	-	-	-	-	-
配合④	31.8	最大	-	-	-	0	6	-	-	-	-	-
		平均	-	-	-	0	0	-	-	-	-	-
配合⑤	28.8	最大	-	-	-	-	16	5	-	-	20	-
		平均	-	-	-	-	1	0	-	-	3	-

Table 8 爆裂深さの分布図
Distribution of Explosive Spalling Depth

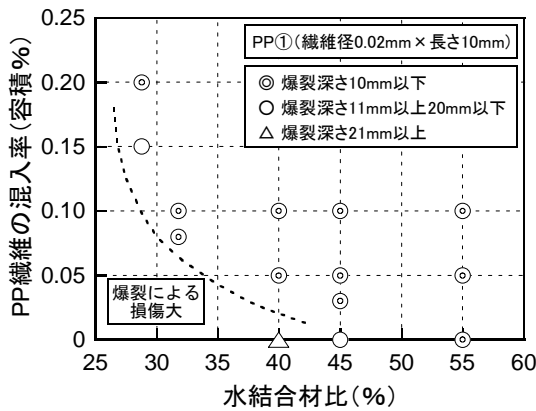
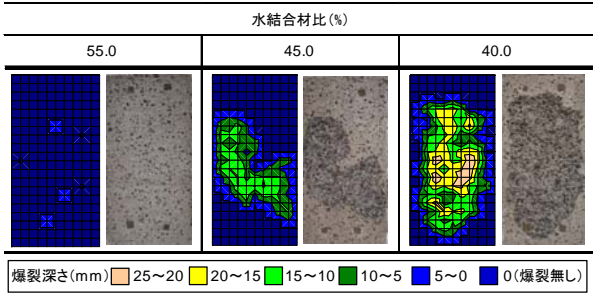


Fig. 8 爆裂深さの比較(PP①)
Comparison of Explosive Spalling Depth(PP①)

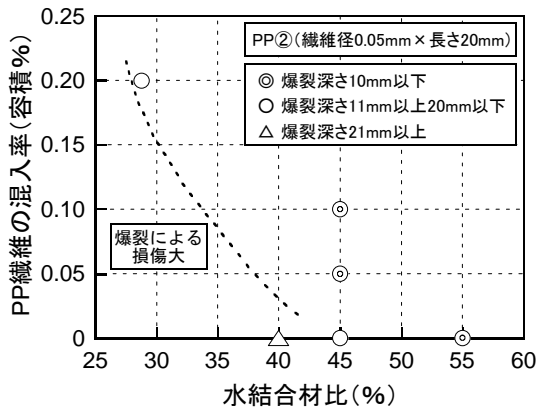


Fig. 9 爆裂深さの比較(PP②)
Comparison of Explosive Spalling Depth(PP②)

Table 9 実験ケース
Test Case

記号	PP繊維の種類				PP繊維の混入率 (容積比)	
	繊維径 (mm)	繊維度 ^{*1} (dtex)	長さ (mm)	アスペ クト比 ^{*2}	0.05	0.10
PP①	0.02	2.2	10	570	-	○
PP②	0.05	17	20	410	○	○
			30	615	○	-

*1 繊維の太さを表す単位(1dtex:長さ10000mの繊維の重さ(g))
*2 長さとの直径の比率(長さ/換算径)

Table 10 コンクリートの配合
Mix Proportion

配合 ケース	PP繊維 の種類	水結合 材比 (%) W/C	細骨材 率 (%) s/a	単位量 (kg/m ³)				
				水	セメ ント	高炉 スラグ 微粉末	細骨材	粗骨材
				W	C	BS	S	G
配合①	PP①	31.8	49.2	175	388	162	796	825
配合②	PP②	48.3	40.0	145	150	150	744	1144
	PP③							

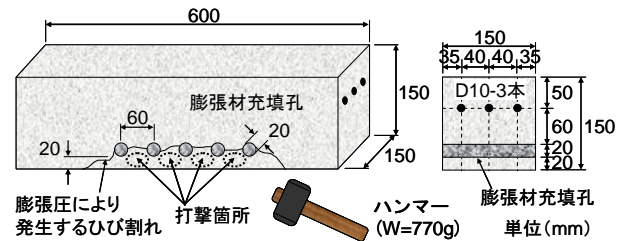


Fig. 10 打撃試験の概要²⁾
Outline of Shock Test²⁾

4. はく落抵抗性の検討(シリーズIII)

4.1 実験概要

実験ケースをTable 9に示す。実験には、3章で用いた2種類のPP繊維の他に、繊維径0.05mm×長さ30mm(PP③)も使用した。PP繊維の混入率は、容積比で0.05%および0.10%の2水準とした。

コンクリートの配合をTable 10に示す。コンクリートは、高流動コンクリート(配合①)およびスランプタイプ(配合②)の2種類とした。セメントは、低熱ポルトランドセメント(配合①)および中庸熱ポルトランドセメント(配合②)の2種類とし、混和材に高炉スラグ微粉末を使用した。

はく落抵抗性は、日本鉄道施設協会仕様書に記載されているはく落防止効果の確認方法(打撃試験)⁴⁾に基づいて評価した。試験の概要をFig. 10に示す。PP繊維を混入しないプレーンに対する打撃回数比により評価した。

4.2 実験結果および考察

打撃試験結果の一覧をTable 11に示す。各PP繊維における打撃回数比の比較をFig. 11に示す。また、打撃試験後のはく落状況の一例をPhoto 4に示す。

いずれも打撃回数比が、はく落防止効果の目安となる8倍を超える結果となった。繊維径0.02mm以上、長さ10mm以上の範囲では、PP繊維を容積比で0.10%混入することで、はく落に対する改善効果が期待できる。

既往の知見によると、外径300×10⁻⁶m×長さ12mmのPP繊維を容積比で0.10%混入することではく落抵抗性が大きく向上するとの報告⁵⁾がある。また、コンクリート標準示方書によると、はく落を防止するための合成繊維の混入率の目安として、容積比で0.04~0.10%の範囲が示されている。今回の実験結果は、既往の知見と同様な傾向を示した。

繊維径0.05mmで長さ20mm以上のPP繊維(PP②およびPP③)を用いた場合は、容積比で0.05%混入することで、はく落抵抗性を付与できた。特に、長さ30mmのPP③は、基準値である8倍の3倍以上の打撃回数比となった。

5. まとめ

繊維径の小さいポリプロピレン短繊維を用いたコンクリートの爆裂およびはく落抵抗性について、実験的に検証した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) 通常の施工の範囲内では、短繊維の後添加や振動締固めがポリプロピレン短繊維の分散性に与える影響は小さい。
- 2) 水結合材比が増加するほど、爆裂を抑制するためのポリプロピレン短繊維の混入率を低減できる。特に、水結合材比55%以上のコンクリートは、繊維を混入しなくても十分な爆裂抵抗性を有する。
- 3) 繊維径0.02mm×長さ10mmのポリプロピレン短繊維を使用する場合、水結合材比が32%以上の範囲では、容積比で0.1%以上混入することで、爆裂およびはく落の抵抗性を確保できる。
- 4) 繊維径0.05mm×長さ20mmのポリプロピレン短繊維を使用する場合、水結合材比が45%以上の範囲では、容積比で0.05%以上混入することで、爆裂およびはく落の抵抗性を確保できる。
- 5) ポリプロピレン短繊維の長さが増加するほど、はく落抵抗性が向上する。

コンクリートの機能性を向上する技術として、本開発の成果を基に、トンネルの覆工用コンクリートに展開していく予定である。

参考文献

- 1) 川西貴士, 他: 耐火型高機能SFRCセグメントの開発, 大林組研究所報, No.74, (2010)
- 2) 東日本, 中日本, 西日本高速道路(株): トンネル施工管理要領, 繊維補強覆工コンクリート編, (2006)
- 3) 川西貴士, 他: ポリプロピレン短繊維の形状と混入率を変化させた高繊維補強高流動コンクリートの耐火性, 土木学会第64回年次学術講演会講演概要集,

Table 11 打撃試験結果
Result of Shock Test

PP繊維の種類	PP繊維の混入率(%) (容積比)								打撃回数比
	0.05				0.10				
	短繊維無し		短繊維有り		短繊維無し		短繊維有り		
	個別	平均	個別	平均	個別	平均	個別	平均	
PP①	-	-	-	-	11	118	-	-	8.3
	-	-	-	-	15	14.0	113	115.5	
	-	-	-	-	16	-	-	-	
PP②	34	-	388	-	34	288	-	-	8.6
	29	34.3	430	341.3	29	34.3	216	294.0	
	40	-	206	-	40	-	378	-	
PP③	6	-	69	-	-	-	-	-	-
	5	5.3	185	148.7	27.9	-	-	-	
	5	-	192	-	-	-	-	-	

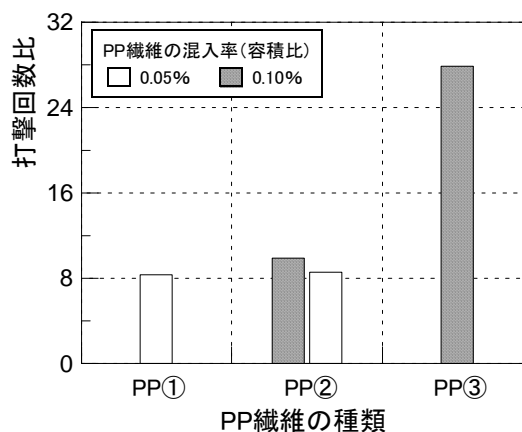


Fig. 11 打撃回数比の比較
Comparison of Shock Frequency Ratios



Photo 4 打撃試験後のはく落状況の例
Example of Coming off Situation after Shock Test

V-391, pp.779-780, (2009)

- 4) (社)日本鉄道施設協会: 合成短繊維の添加による剥落防止効果(打撃試験)および分散性確認方法, 土木工事標準仕様書, 東日本旅客鉄道株式会社編, 付属書 8-10, (2010)
- 5) 細田暁, 他: 合成短繊維添加によるコンクリート片の剥落対策, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.275-280, (2003)