

論文 凍結融解作用を受けた繊維補強コンクリートの引張特性

内藤 英樹*1・山洞 晃一*2・古賀 秀幸*3・鈴木 基行*4

要旨：初期ひび割れを導入した繊維補強コンクリートの凍結融解試験を行った。ひび割れ部に浸入した水の凍結膨張圧によって、ひび割れが大きく進展することが示された。しかし、繊維長が長いポリプロピレン繊維を使用した場合には、ひび割れが供試体を貫通した後も繊維の架橋が保たれており、ひび割れ面には引張抵抗力が存在した。さらに、このような繊維補強コンクリートの静的曲げ載荷試験を行った結果、凍結融解作用によって貫通したひび割れ面の引張抵抗力は、コンクリート片の落下に対して十分な安全性を有することを確認した。

キーワード：凍結融解試験, ポリプロピレン繊維, 曲げ載荷試験, 初期ひび割れ, 引張特性

1. はじめに

近年、高架橋と道路の跨道部やトンネル坑口部など、コンクリート片の落下を防止すべき箇所に対して、ポリプロピレン繊維を混入する施工例が報告されている。ポリプロピレン繊維の適用は長期耐久性や施工性の観点から、今後の増加が予想される。一方、著者ら^{1),2)}は、寒冷地のコンクリート構造物のより経済的な設計、配合および施工による長期耐久性の確保を目的とした一連の研究を行っており、繰り返し凍結融解作用下においてコンクリートのひび割れ部に水が浸入すると、凍結融解抵抗性に優れるコンクリートであっても、ひび割れ内部の水の凍結膨張圧によってひび割れが進展し、コンクリート片の落下が引き起こされる可能性があることを示した。ポリプロピレン繊維は、ハンマーの打撃に対するコンクリート片の落下防止効果が確認されており、すでに寒冷地においても多くの施工例が報告されているが、繰り返し凍結融解作用に伴うひび割れやコンクリート片の落下に対する有用性を検討した例は著者らが知る限りない。繰り返し凍結融解に伴うコンクリート片の落下に対するポリプロピレン繊維の有用性が確認できれば、耐衝撃性能と併せて、寒冷地におけるコンクリート片の落下防止対策に貢献できると考えられる。

そこで、本研究は、3種類のポリプロピレン繊維を用いた繊維補強コンクリートの凍結融解試験により、凍結融解作用に伴うひび割れ進展性状を把握し、コンクリート片の落下防止効果を検討する。具体的には、初期ひび割れを導入した繊維補強コンクリート供試体の水中凍結融解試験を行い、ひび割れ内部の水の凍結膨張圧によるひび割れ進展状況を確認するとともに、凍結融解試験後のひび割れ面の残存引張抵抗力を確認する。

2. 凍結融解試験

2.1 実験概要

供試体諸元および供試体の概略図をそれぞれ表-1 および図-1 に示す。供試体形状はいずれも 10cm×10cm×40cm の角柱供試体とする。本研究では、表-2 に示す

表-1 供試体諸元の一覧

供試体	本数	繊維種別	繊維の体積混入率 (%)	ひび割れの有無
Base1 ¹⁾	3	なし	---	なし
Base1_crack ¹⁾	6			あり
A ²⁾	3	繊維 A	0.05	なし
A_crack ²⁾	3			あり
B ²⁾	3	繊維 B	0.10	なし
B_crack ²⁾	3			あり
Base2	2	なし	---	なし
Base2_crack	3			あり
C	3	繊維 C	0.50	なし
C_crack	3			あり

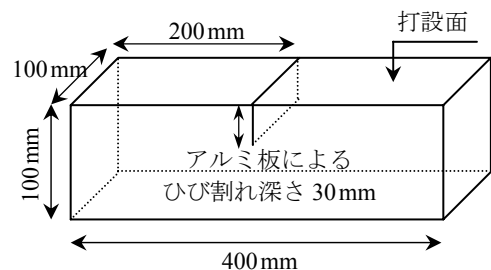


図-1 ひび割れ供試体の概略図

*1 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)

*2 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 東北新幹線建設局

*3 (株)オリエンタルコンサルタンツ 東北支店

*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表-2 ポリプロピレン繊維の特性

	標準体積 混入率 (%)	長さ (mm)	直径 (μm)	密度 (g/cm^3)	ヤング係数 (MPa)	引張強度 (MPa)	繊維形状
繊維 A	0.05	12	64.8	0.91	5000	530	単繊維
繊維 B	0.10	12	300	0.91	4000	670	網目状繊維
繊維 C	0.50	48	680	0.91	---	500	単繊維 (X 断面)

表-3 コンクリートの示方配合

	W/C (%)	s/a (%)	G_{max} (mm)	単位量 (kg/m^3)				AE 減水剤 (ml)	スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G			
Baes1	53	40.6	25	148	279	755	1143	2.79	10.0	6.3
Base2	51	50.7	25	173	339	875	889	2.38	21.5	5.5

※ Base1 の配合に繊維 A と繊維 B を混入する。また、Base2 の配合に繊維 C を混入する。

表-4 コンクリートの物性・強度

	スランプ値 (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	静弾性係数 (MPa)	動弾性係数 (MPa)
Base1	10.0	6.3	33.5	2.03	21800	36600
A	8.0	6.0	31.8	2.25	21600	35000
B	9.5	8.2	29.1	1.89	20000	34300
Base2	21.5	5.5	41.1	3.17	23600	35300
C	15.5	6.2	40.4	3.20	22700	34200

3 種類のポリプロピレン繊維 (A,B,C) を検討する。このうち、繊維 A と繊維 B を用いた検討は、参考文献 2) でも報告した。繊維 A と繊維 B は多くの施工例が報告されており、繊維形状 (単繊維、網目状繊維) とアスペクト比が異なる 2 種類を選定した。また、ひび割れの開口に対して繊維が追従することを期待し、繊維長の長い繊維 C を選定した。このような繊維長の長いポリプロピレン繊維を使用した場合には、スランプ値が低下するため、繊維 C では単位水量が大きいコンクリート配合が使用される。なお、表-1 の繊維の体積混入量は、施工性やハンマーによる打撃試験 (耐衝撃性) に基づいて定められたそれぞれの標準体積混入量である。コンクリート配合は鉄道構造物の施工において実績のある値を使用した。表-3 のコンクリートはいずれも普通ポルトランドセメントを使用した。

本研究は、凍結融解作用に伴うコンクリートのひび割れ進展に対して、ポリプロピレン繊維の架橋によるひび割れ抑制効果を検討するため、初期ひび割れを導入した供試体 (以下、ひび割れ供試体) を作製した。模擬ひび割れの導入は、実験条件としてひび割れ深さ 30mm とひび割れ幅 0.3mm を統一するものであり¹⁾³⁾、実構造物を模擬したひび割れ性状の検討は今度の課題である。初期ひび割れの導入は、コンクリートを打設する際にグリースを塗布したアルミ板 (幅 10cm, 厚さ 0.3 mm) を図-1 に

示すように供試体打設面の中央位置に垂直に埋め込み、打設の 4 時間後にアルミ板を引き抜いた。ひび割れ供試体の作製では、ひび割れ部や打設面の処理は特に行っていない。

打設後は、5 日間型枠を設置し、その後の材齢 28 日まで実験室内 (室温: 10~15°C) に気中静置した。なお、試験開始前の 3 日間は供試体を水中に静置して水を含ませ、その状態を基準として質量減少率を計測した。

水中凍結融解試験では、供試体中心部の温度変化が -18~+5°C になるように、300 サイクルの温度履歴を与えた⁴⁾。質量と動弾性係数は 20 サイクル毎に測定した。

2.2 繊維補強コンクリートの材料特性

フレッシュコンクリートのスランプ値と空気量を表-4 に示す。Base2 と比較して、繊維 C の混入によってスランプ値が大きく低下した。また、Base1 に対しても繊維 A の混入によりスランプ値が若干低下した。一方、繊維 B の混入によるスランプ値の変化はなく、Base1 と同程度のスランプ値を示した。

繊維 B (網目状繊維) は空気が付着しやすく、繊維混入量の増加とともにコンクリート中のエントラップドエアが増加したと推察される。これに対して、繊維 A と繊維 C はいずれも単繊維であり、これらの繊維混入量による空気量の変化は小さい。

材齢 28 日の強度試験結果を表-4 に併せて示す。圧縮



(a) 割裂状況 (側面) (C_crack : 300 サイクル)



(b) 割裂状況 (側面) (B_crack : 198 サイクル)

写真-1 ひび割れ供試体の損傷状況

強度と静弾性係数は $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ の円柱供試体、引張強度(引張割裂試験)は $\phi 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の円柱供試体を用いて、それぞれ3体の平均値を示した。いずれの繊維補強コンクリートでも、繊維の混入によって圧縮強度、引張強度、静弾性係数および動弾性係数に大きな変化はなかった。

2.3 凍結融解作用による損傷状況

初期ひび割れを有する供試体ではあるが、繊維Bおよび繊維Cを用いた供試体の側面におけるスケーリング状況を写真-1(a)(b)に示す。3つの繊維補強コンクリートの供試体表面の損傷状況に大きな違いはなく、いずれも軽微なスケーリングが生じる程度の損傷であった。

初期ひび割れを導入した供試体では、写真-1に示すように、供試体の側面からでも凍結融解作用に伴うひび割れの進展が目視によって確認できた。これは、ひび割れ部に浸入した水の凍結膨張圧によってひび割れ部が開いたものと推察される^{1),2)}。

なお、繊維Aおよび繊維Bを使用したA_crackおよびB_crack供試体では、ひび割れが供試体を貫通することによって、写真-1(b)に示すように供試体が2つに分断した。一方、繊維長が長い繊維Cを使用したC_crackでは、ひび割れが供試体を貫通した後も繊維がひび割れ部を跨いで架橋しており、写真-2のように、ひび割れが大きく開口した状態であっても、供試体のコンクリート片が落下することはなかった。



写真-2 C_crack 供試体 (300 サイクル)

2.4 質量減少率

3種類のポリプロピレン繊維の混入が質量減少率に及ぼす影響は小さく、300サイクル時の質量減少率は、Base1が1.8%、Base2が2.7%、A供試体が2.4%、B供試体が2.0%、C供試体が2.2%であった。

2.5 相対動弾性係数

凍結融解サイクル数と相対動弾性係数との関係を図-2に示す。図-2の相対動弾性係数は、通常の凍結融解試験と同様に、JIS A1127に準拠した試験方法⁴⁾によって得られる縦振動の1次共鳴振動数 f を式(1)にそのまま代入した値である。

$$E_d = \frac{4L}{tb} m f^2 \quad (1)$$

ここで、 E_d は動弾性係数、 L は供試体長さ、 b は断面幅、 t は断面高さ、 m は供試体質量である。

図-2より、Base1およびBase2供試体は300サイクルまで相対動弾性係数が低下しないことから、表-3のBase1およびBase2は凍結融解抵抗性に優れたAEコンクリートであることが確認された。また、これらのコンクリート配合に繊維を混入したA、B、C供試体でも、300サイクルまで動弾性係数の低下はなかった。なお、林ら⁵⁾は、ポリプロピレン繊維の混入によってコンクリートの凍結融解抵抗性が向上することを報告している。

しかし、凍結融解抵抗性に優れたコンクリートを使用しても、初期ひび割れを導入した供試体(Base1_crack, Base2_crack, A_crack, B_crack, C_crack)では、動弾性係数が大きく低下した。これらの実験結果は、同じ条件で作製した3体の供試体であっても、相対動弾性係数の低下が大きくばらついた。写真-1の損傷状況を見る限り、図-2のひび割れ供試体の相対動弾性係数の急激な低下はコンクリート材料の組織劣化に起因するものではなく、繰り返し凍結融解作用によるひび割れの進展に起因することは明らかである。

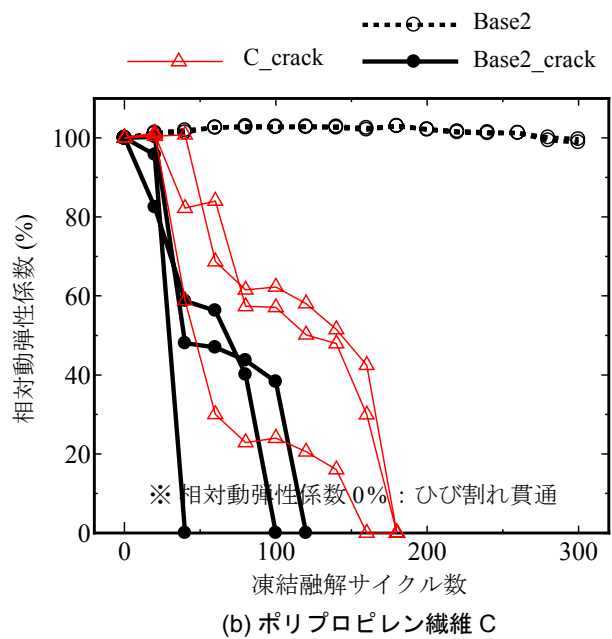
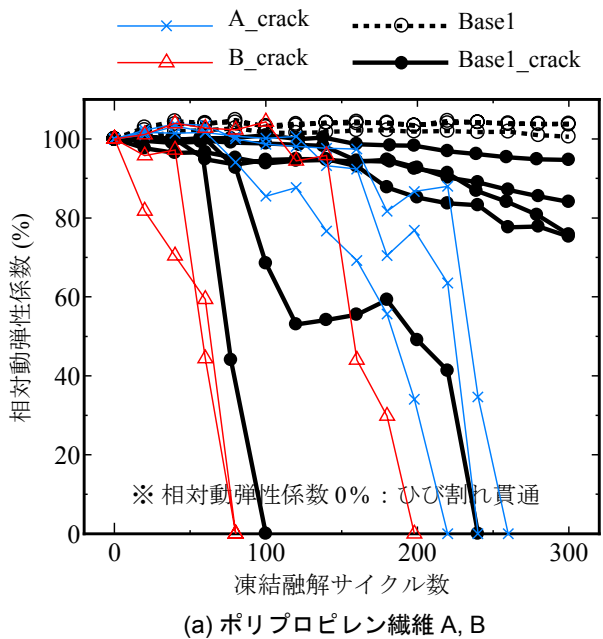


図-2 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係

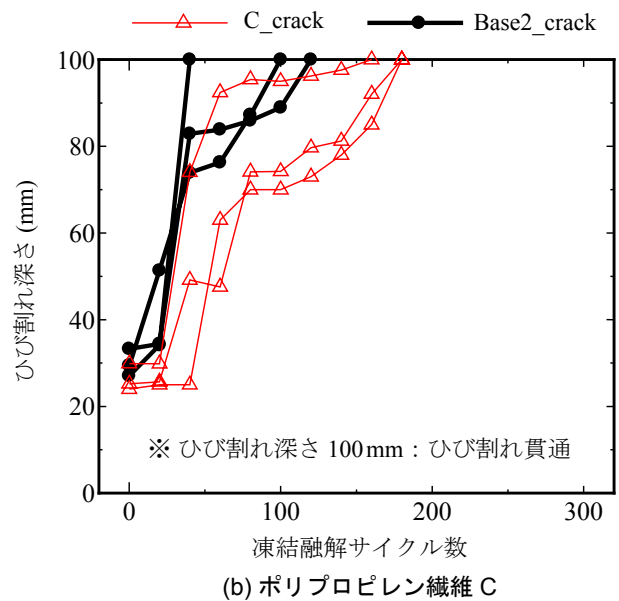
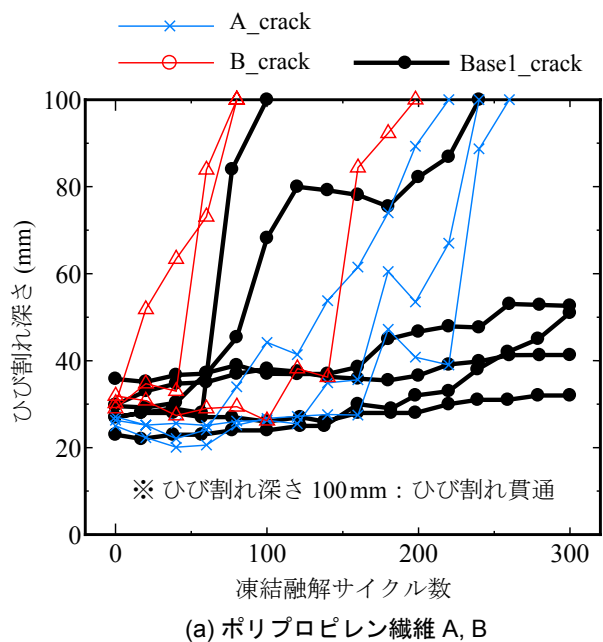


図-3 凍結融解サイクル数とひび割れ深さの関係

2.6 ひび割れ深さ

著者ら²⁾は、10cm×10cm×40cmの角柱供試体を対象として、実験およびFEM解析による検討から、共鳴振動数を指標としたひび割れ深さの推定式を提示している。参考文献2)に示した手法より、縦振動の共鳴振動数 f とひび割れ深さには、次式の関係が見出せる。

$$d = 100 - 97.161 \left(\frac{f}{f_0} \right)^{3.633} \quad (2)$$

ここで、 d はひび割れ深さ(mm)、 f_0 はひび割れがない健全供試体の1次共鳴振動数(Hz)である。

式(2)から推定されるひび割れ深さと凍結融解サイク

ル数との関係を図-3に示す。ひび割れ深さが100mmのときに、ひび割れが供試体を貫通している。同じ実験条件でも供試体ごとのばらつきが大きく、Base1_crackでは6体のうち2体はひび割れが貫通したが、その他の4体では顕著なひび割れの進展は見られなかった。本実験では、ひび割れ先端におけるコンクリートの破壊挙動などを検討していないため、供試体ごとにひび割れ進展性状が異なる理由を明らかにできなかった。

繊維A～Cは、打撃試験などによってコンクリート片の剥落に対する抵抗性を確認したものであるが、凍結融解作用に着目した本検討に関しては、繊維Bおよび繊維

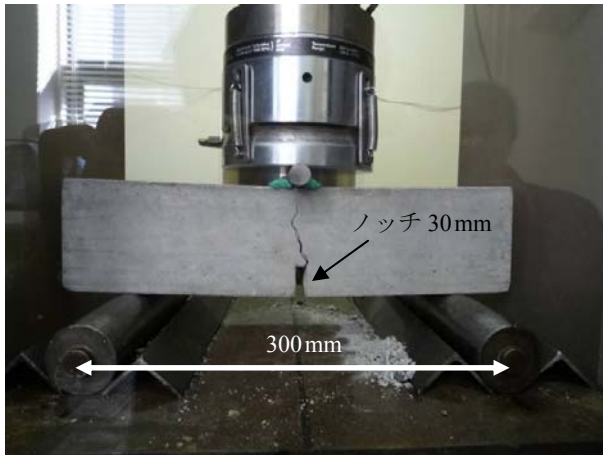


写真-3 曲げ載荷試験 (健全供試体 C0)

Cの架橋効果によるひび割れ抑制効果はほとんど見られなかった。一方、繊維Aについては、わずかにひび割れ抑制効果が得られる可能性もあるが、220~260サイクルには全ての供試体が割裂した。

以上より、本実験で検討した3種類のポリプロピレン繊維では、凍結融解作用に伴うひび割れ進展に対して抑制効果が小さいことを確認した。しかし、写真-1(a)や写真-2に示すように、繊維長が長い繊維Cを使用した場合には、ひび割れが供試体を貫通した後も、ひび割れ部を跨いで繊維の架橋が保たれており、試験片が落下することはなかった。このことから、繊維Cは300サイクルの凍結融解作用によるひび割れ貫通後においても、コンクリート片の落下防止には有用であると考えられる。そこで、以降では、凍結融解作用を受けた3体のC_crack供試体の曲げ載荷試験を行い、繊維の架橋によるひび割れ面の引張特性を検討する。

3. 繊維補強コンクリートの引張特性

3体のC_crack供試体の曲げ載荷試験により、ひび割れ面の引張抵抗力を評価する。図-3に示すように、C_crack供試体はいずれも160~180サイクルにひび割れが供試体を貫通したが、その後も300サイクルまで凍結融解作用を与え続けた。また、健全状態との比較を示すため、凍結融解作用を与えずに保管していた健全供試体(以下、C0供試体)の曲げ載荷試験も行った。

曲げ載荷試験は、写真-3に示すように3点曲げ載荷とし、支点間の距離は300mmとした。変位制御によって鉛直荷重を与え、スパン中央の載荷位置における荷重-変位関係を測定した。なお、C0供試体(健全)の載荷試験では、ひび割れをスパン中央に誘発するとともに繊維が架橋する断面積を統一するため、グラインダーによって供試体中央に深さ30mmのノッチを導入した。すなわち、曲げ載荷試験において、いずれの供試体も供試体

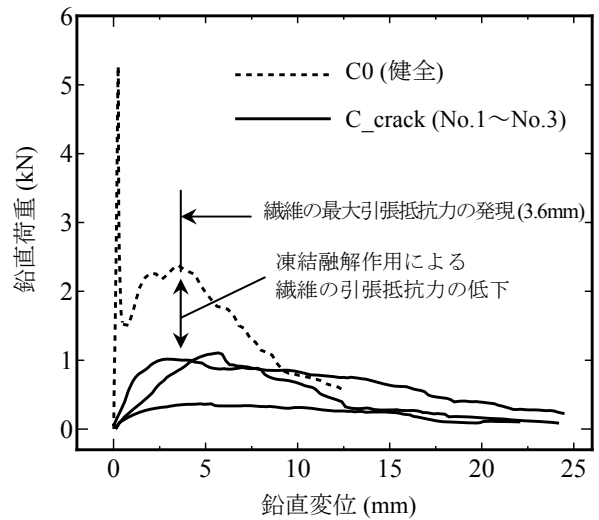


図-4 曲げ載荷試験による荷重-変位関係

表-5 C_crack 供試体の残存引張応力

	最大荷重 (kN)	最大荷重時の載荷点変位 δ (mm)	ひび割れ面中央の開口変位 Δ (mm)	ひび割れ面の残存引張応力 (MPa)
C0 (健全)	5.27	0.3	---	---
No.1	1.02	3.0	1.4	0.31
No.2	0.37	5.3	2.5	0.11
No.3	1.11	5.7	2.7	0.34

※ 供試体の剛体変形を仮定し、 $\Delta=4\delta/3 \cdot (h-d_0)/(2h)$ とした。

下面から30mmの範囲には繊維が架橋していない。

これらの供試体の荷重-変位関係を図-4に示す。また、4体の実験結果より得られた最大荷重時の荷重と変位を表-5に示す。健全供試体C0では、鉛直変位0.3mmまで荷重が増加し、スパン中央のひび割れ発生と同時に急激な引張軟化が生じた。しかし、その後も鉛直変位3.6mmにて荷重が2.39kNまで増加し、再び引張軟化に転じた。宮崎ら⁶⁾は、ポリプロピレン繊維単体の引抜試験を行っており、引抜変位が1.5~3.0mm程度においてポリプロピレン繊維の引抜抵抗力が最大なることを報告している。C0供試体の荷重の増加が見られた3.6mmの鉛直変位に対して、計算から求まるひび割れ面中央の開口変位は1.7mmである。このことから、C0供試体では、鉛直変位3.6mmにてひび割れ面のポリプロピレン繊維の引抜抵抗力が最大になったと推定される。

これに対して、300サイクルの凍結融解作用を与えたC_crack供試体(No.1~No.3)では、曲げ試験の前にひび割れが貫通しているため、コンクリートの曲げ引張力は得られず、鉛直変位3~6mmで最大荷重となった。計算より求まるひび割れ開口変位を表-5に併記する。これ

らのひび割れ開口変位 (1.4~2.7mm) は、宮崎ら⁶⁾の引抜試験の結果(引抜変位が 1.5~3.0mm 程度で引抜抵抗力が最大となる)とも概ね整合している。しかし、C0 供試体との比較から、C_crack 供試体では、300 サイクルの凍結融解作用によってひび割れ面の引抜抵抗力が低下している。実験後に供試体のひび割れ面を確認したところ、C0 供試体では繊維の破断が多く見られたが、C_crack 供試体では繊維の引抜けが多く観察された。既往の研究⁷⁾より、繊維補強コンクリートの曲げ特性は、ひび割れ面における繊維の本数、繊維の埋め込み深さ、および繊維の角度などが大きく影響することが報告されている。今後、これらの供試体のひび割れ面を詳細に調査し、繊維の引抜き特性を考慮した解析的検討を行う予定である。

ここでは、簡便なモーメントの釣合計算によって、ひび割れ面の引張抵抗力を評価し、コンクリート片の落下に対する安全性を検討する。最大荷重時の供試体の概略図を図-5 に示す。載荷点 A における断面の圧縮域が十分に小さいと仮定すれば、モーメントの釣合より、ひび割れ面の等価引張力 F は次式で得られる。

$$F = \frac{P}{2} \frac{l}{h - d_0} \quad (3)$$

ここで、 P は最大鉛直荷重、 l は支点間の距離、 h は断面高さ、 d_0 は初期ひび割れ深さ(ノッチ深さ)である。なお、等価引張力 F の作用点は、繊維が架橋している断面積の中心であり、下面から d_0 (30mm) の範囲は考慮しない。

C_crack 供試体 (No.1~No.3) に対して、表-5 の最大荷重と式 (3) から等価引張力 F を得た。さらに、等価引張力 F を繊維が架橋している断面積で除すことにより、残存引張応力に換算した。表-5 より、曲げ耐力が最も小さい No.2 供試体でも 0.11MPa の残存引張応力を有している。例えば、コンクリート密度 2.3g/cm³ を仮定すると、この残存引張応力はかぶり 48cm までのコンクリート片の落下を防ぐことに相当する。

以上より、標準体積混入量の繊維 C を混入した場合には、ひび割れ貫通後もコンクリート片の落下防止に対しては十分な効果が期待できる。なお、宮崎ら⁶⁾の実験結果に示されるように、ポリプロピレン繊維は大きなひび割れ開口変位に対しても引張抵抗力が得られる。このようなポリプロピレン繊維の特徴によって、凍結融解作用に伴うひび割れ開口に対しても繊維の架橋が追従できたと考えられる。

4. まとめ

本研究では、3 種類のポリプロピレン繊維を混入した繊維補強コンクリートの凍結融解試験を行った。初期ひび割れを有する供試体では、凍結融解作用に伴ってひび

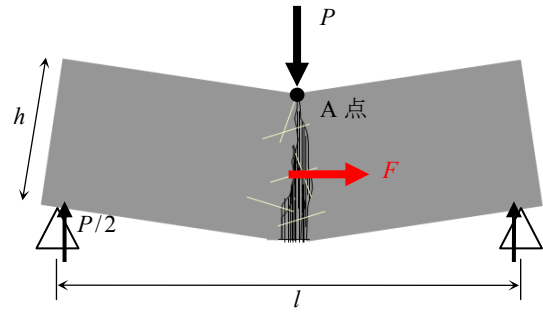


図-5 モーメントの釣合い

割れが大きく進展した。これに対して、本研究で検討した 3 種類のポリプロピレン繊維では、いずれも凍結融解作用に伴うひび割れの進展に対して大きな抑制効果は得られなかった。

しかし、繊維長が長いポリプロピレン繊維を使用した場合には、ひび割れが供試体を貫通した後もひび割れを跨いで繊維が架橋しており、コンクリート片の落下防止に対して有用であることを確認した。

参考文献

- 1) 内藤英樹, 山洞晃一, 古賀秀幸, 鈴木基行: 初期ひび割れを有するコンクリートの凍結融解抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.915-920, 2008.7
- 2) 内藤英樹, 山洞晃一, 古賀秀幸, 鈴木基行: 初期ひび割れを有する繊維補強コンクリートの凍結融解試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1135-1140, 2009.7
- 3) 橋口大輔, 添田政司, 大和竹史: 初期に導入したひび割れがコンクリートの耐久性へ及ぼす影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.729-734, 2004.7
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書 規準編, 2005.
- 5) 林大介, 芦澤良一, 横関康祐, 坂田昇: 有機繊維補強セメント複合材料の耐久性評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1585-1590, 2005.7
- 6) 宮崎晋行, 大久保誠介, 福井勝則: コンクリート繊維用 PET 繊維とポリプロピレン繊維の引抜き特性, 資源と素材, Vol.121, pp.363-369, 2005.6
- 7) Hugo S.Armelin and Nemkumar Banthia: Predicting the Flexural Postcracking Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete from Pullout of Single Fibers, *Materials Journal*, ACI, Vol.94, No.1, pp18-31, 1997.1