

繊維補強軽量コンクリート製PC床版の押抜きせん断試験

川田建設(株) 正会員 ○北野 勇一
 川田建設(株) 正会員 修士(工学) 鈴木 聡
 川田建設(株) 正会員 修士(工学) 川口 千大
 富山県立大学 正会員 博士(工学) 伊藤 始

Abstract : In this study, focusing on fiber reinforced lightweight concrete mixed with vinylon polymer short fibers at 0.5%, punching shear test of various PC slabs was carried out. As a result, PC slab using the fiber reinforced lightweight concrete significantly increased the punching shear strength as compared with PC slab using the lightweight aggregate concrete, to ensure the same strength as PC slab using an ordinary aggregate concrete was confirmed.

Key words : PC slab, Punching shear strength, Fiber reinforced lightweight concrete

1. はじめに

鋼橋のコンクリート床版の更新が各地の高速道路で行われ、プレキャスト製のプレストレストコンクリート床版(PC床版)のニーズが高まっている(写真-1)。そのPC床版の軽量化は、床版厚の増加に対して、鋼主桁や下部構造の負担を軽減できるメリットがある¹⁾。しかし、軽量骨材コンクリートは、一般的にせん断耐力が低下するため、その改善が課題である²⁾。そこで筆者らはビニロン合成短繊維を混入した軽量骨材コンクリート(以下、繊維補強軽量コンクリート)に着目し、その材料物性について実験的に検討した。その結果、繊維混入率0.5%の繊維補強軽量コンクリートであればPC床版として要求される強度および単位重量 $1900\text{kg}/\text{m}^3$ 以下を確保し、破壊エネルギーが軽量骨材 $89\text{N}/\text{m}$ に対して $273\text{N}/\text{m}$ と改善されることを確認した³⁾。この結果を踏まえ、PC床版の押抜きせん断挙動について解析的に検討し、繊維補強軽量コンクリートを用いることでPC床版の押抜きせん断耐力を大きく増加させることが確認された⁴⁾。引き続き本研究では、ビニロン合成短繊維を0.5%混入した繊維補強軽量コンクリートに着目し、普通骨材コンクリート、軽量骨材コンクリートおよび繊維補強軽量コンクリートを用いたPC床版試験体を作製し、押抜きせん断試験を実施した結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 実験ケース

実験ケースを表-1に示す。実験は普通骨材コンクリート、軽量骨材コンクリートおよび繊維補強軽量コンクリートの3ケースとし、橋軸直角方向一方向にプレストレスを一律 $6.0\text{N}/\text{mm}^2$ 導入した。

2.2 使用材料およびコンクリート配合

コンクリート用材料を表-2~表-3に示す。セメント、普通骨材、混和剤はPC工場の通常使用品とし、人工軽量粗骨材は耐凍害性の観点より含水率2%以下のものを用いた⁵⁾。ビニロン合成短繊維は直径 0.66mm 、長さ 30mm のものを用いた。鉄筋はSD345(降伏点はD13で $408\text{N}/\text{mm}^2$ 、D19で $392\text{N}/\text{mm}^2$)、PC鋼材はSWPR7BL15.2mm(0.2%耐力 $1802\text{N}/\text{mm}^2$)を用いた。



写真-1 床版更新状況

表-1 実験ケース

名称	コンクリート	備考
N6	普通骨材	プレストレス $6.0\text{N}/\text{mm}^2$
L6	軽量骨材	
FL6	繊維補強軽量	

表-2 コンクリート用材料

材料	記号	仕様
セメント	C	早強ポルトランドセメント 密度3.14g/cm ³
細骨材	S	砕砂 表乾密度2.67g/cm ³
粗骨材	L	砕石 表乾密度2.70g/cm ³
	LG	人工軽量骨材 絶乾密度1.2g/cm ³ , 含水率0.5%
繊維	F	ビニロン合成短繊維 (表-3)
混和剤	-	高性能AE減水剤 (I種), AE剤

表-3 合成短繊維の物性値

項目	単位	標準物性値
繊維径	mm	0.66
繊維長	mm	30
引張強度	N/mm ²	900
引張弾性率	kN/mm ²	23.0
引張伸び度	%	9.0
密度	g/cm ³	1.3

表-4 コンクリート配合および物性試験結果

配合	スラン プ(cm)	空気量 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)						単位容積質 量 (kg/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係 数 (kN/mm ²)
				W	C	S	G	LG	F			
N	18±2.5	4.5±1.5	36.5	165	452	739	994	0	0	2350	70.6	38.1
L	10±2.5	5.0±1.5	35.0		457	711	0	493	6.5*	1822	52.6	21.7
FL												

*繊維はコンクリート体積の0.5%を外割りで混入した。物性試験は材齢28日に実施。

コンクリート配合および材齢28日に行った物性試験結果を表-4に示す。配合Nは、PC工場で通常製造されるPC床版に用いられる普通骨材コンクリートである。配合Lは配合Nの粗骨材を人工軽量骨材に置き換えた軽量コンクリート1種である。配合FLは配合Lに対し体積比0.5%のビニロン合成短繊維を外割りで混入した繊維補強軽量コンクリートである。いずれの配合も、プレキャストPC床版の製造を念頭に、緊張時(材齢1日) 35N/mm², 出荷時(材齢7日) 50N/mm²を確保するように水セメント比(W/C)を設定した。また、混和剤の使用量は所定のスランプ、空気量が得られるように調整した。

2.3 試験体

試験体は厚さ170mm (KK合理化継手⁶⁾を用いた場合にかぶり確保可能な最小寸法), 幅2400mm (輸送が容易な寸法), 長さ3600mm (載荷試験の支間1600mm+プレストレス伝達長988mm×2を確保する寸法)の床版に、地覆を打ち足して一体化させた(図-1)。これは、有限幅の試験体において地覆を付けることにより載荷板直下の曲げモーメントを2辺単純支持無限版に近似させるためであり、3次元FEM解析より地覆形状を高さ130mm, 幅200mmに決定した。

PC鋼材と鉄筋の配置は、床版支間を2.5mとした場合に、一方向PC床版として現在の設計基準を満足するよう取り決めた。具体的には、橋軸直角方向はPC構造とし、PC鋼材15.2mmを130mm間隔で1段配置させコンクリートに引張応力が生じないように有効応力1000N/mm²になるように張力を導入した。また、橋軸方向はRC構造とし、設計荷重時に鉄筋に120N/mm²の引張応力が生じるようD19を140mm間隔に配置させた。

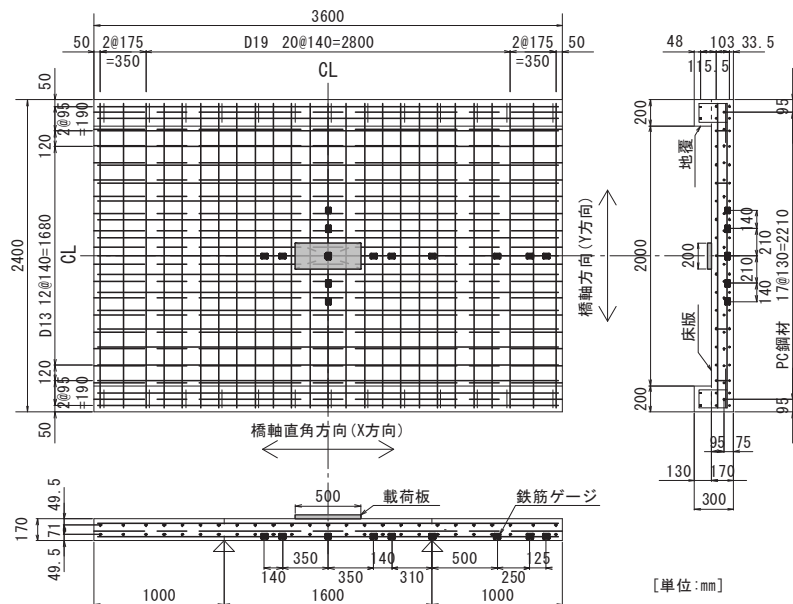


図-1 試験体寸法およびPC鋼材と鉄筋の配置

2. 4 荷重方法および計測方法

荷重概要を図-2に示す。支点は幅100mmの鋼板で2辺単純支持とした。支間は鋼主桁を想定し、せん断抵抗面(30°)が支点内になり、せん断破壊先行型となるように1600mmとした。試験は、輪荷重を想定して200×500mmの荷重板を設置し、5000kNアクチュエータを用いて鉛直荷重を荷重した。荷重板は橋軸直角方向に2分割し、荷重板と試験体上面の間に厚さ12mmの合板を挟むことで荷重板の剛性や荷重板エッジの影響を極力排除した。また、地覆上に鋼製枕梁を設置し、試験体に曲げが作用しないようPC鋼棒で締め付け、支点の浮上りを防止した。

荷重ステップを図-3に示す。荷重は更新床版の支間をL=2.5mと想定した場合の設計輪荷重Pd=138kN(衝撃係数i=20/(50+L)を考慮)に対し1, 2, 3倍の単調荷重と除荷を各1回行ったのち、押抜きせん断破壊が生じるまで荷重した。試験中は、荷重、鉛直変位、鉄筋ひずみおよびコンクリートひずみを計測した。鉛直変位は図-4に示す位置に高感度変位計(容量25mm)を設置し、荷重板直下のみ容量100mmの変位計を併設した。鉄筋ひずみは床版の中心軸上の鉄筋で計測した。なお、荷重試験は地覆コンクリートの材齢28日を待ち、床版コンクリート材齢34~36日の間で実施した。

3. 実験結果および考察

3. 1 ひび割れ発生荷重および破壊荷重

実験結果を表-5に示す。ひび割れ荷重に着目すると、軽量骨材を用いたL6試験体とFL6試験体のひび割れ荷重は同値であり、繊維混入の影響は認められない。しかし、普通骨材を用いたN6試験体に比べ軽量骨材を用いた試験体は約8割の荷重でひび割れが発生した。前者はビニロン合成短繊維を混入してもコンクリートの割裂引張強度が改善されないこと³⁾、後者は軽量骨材コンクリートの割裂引張強度が繊維混入量によらず普通骨材コンクリートの約8割であることに起因すると推察された。

また、最大荷重に着目すると、N6試験体で1037kNとなったのに対し、L6試験体で784kN(76%)、FL6試験体で1062kN(102%)となった。この理由は次節以降に考察する。

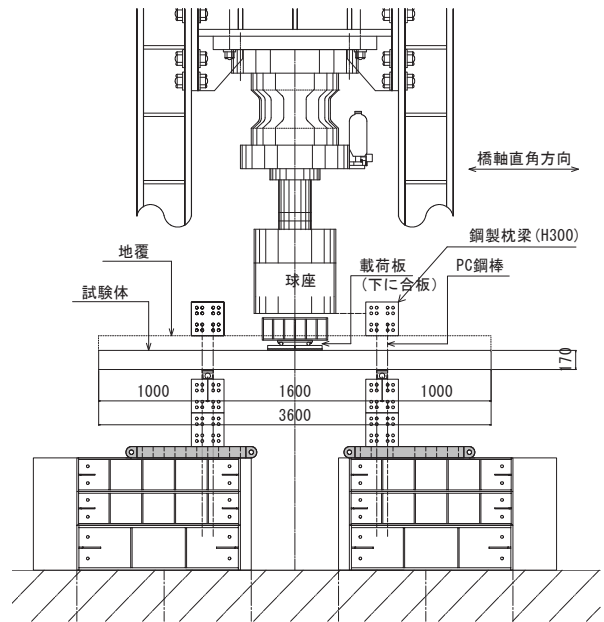


図-2 荷重概要

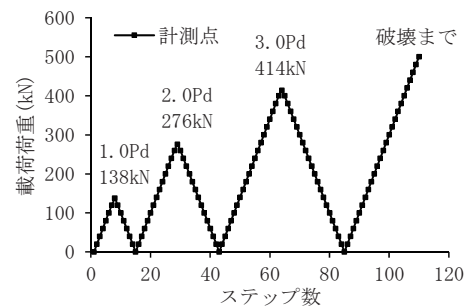


図-3 荷重ステップ

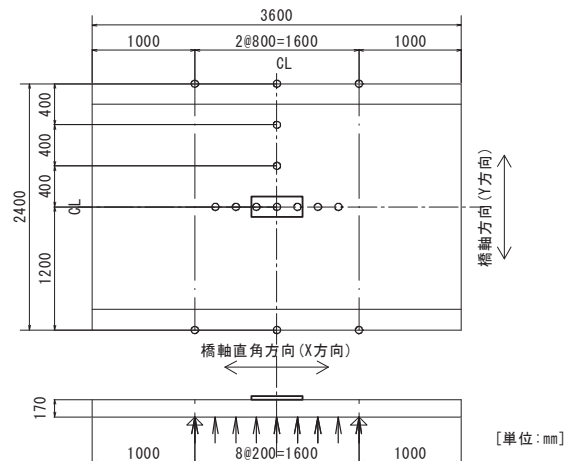


図-4 変位計設置

表-5 実験結果

名称	ひび割れ荷重(kN)		最大荷重(kN)	破壊形態
	X方向	Y方向		
N6	320	80	1037	押抜きせん断破壊
L6	260	60	784	
FL6	260	60	1062	

3. 2 荷重変位関係

載荷点の荷重変位関係を図-5に示す。FL6試験体とL6試験体は設計荷重 (138kN) の3倍以上まで荷重変位関係が一致し、繊維混入による床版剛性への影響は認められなかった。また、普通骨材を用いたN6試験体に比べ、L6試験体およびFL6試験体の荷重に対する変位は1.3倍程度であった。これは、普通骨材コンクリートに比べ軽量骨材コンクリートの静弾性係数が小さいこと (前出表-4) が影響したと考える。一方、設計荷重の3倍を超え、N6試験体およびL6試験体は最大荷重に達した時点で、突如、押抜きせん断破壊に至った。FL6試験体については最大荷重後に荷重が約50%に低下したものの、完全な押抜きせん断破壊には至らず、載荷点変位が20mmを超えた時点で実験を終了した。

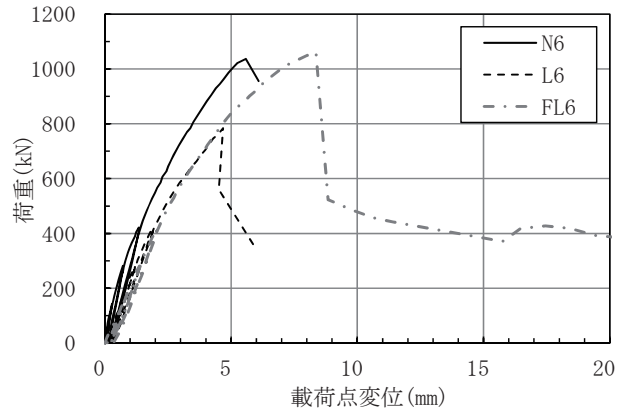


図-5 荷重変位関係

試験終了後に確認した床版下面のひび割れ状況を写真-2に示す。太線が押抜きにより卓越したひび割れであり、細線はそれ以外のひび割れである。これによると、N6試験体とL6試験体で見られる卓越ひび割れはX方向 (橋軸直角方向) に長いのに対し、FL6試験体はY方向 (橋軸方向) に長く、かつ、卓越以外のひび割れもより多く発生している。これは、ビニロン合成短繊維の架橋効果により、ひび割れが1本に局所化されず荷重の増加に伴い新たなひび割れが発生したと考察した既往の研究⁷⁾と同様な現象が生じたものと推察する。

3. 3 押抜きひび割れ性状

試験終了後に確認した床版下面のひび割れ状況を写真-2に示す。太線が押抜きにより卓越したひび割れであり、細線はそれ以外のひび割れである。これによると、N6試験体とL6試験体で見られる卓越ひび割れはX方向 (橋軸直角方向) に長いのに対し、FL6試験体はY方向 (橋軸方向) に長く、かつ、卓越以外のひび割れもより多く発生している。これは、ビニロン合成短繊維の架橋効果により、ひび割れが1本に局所化されず荷重の増加に伴い新たなひび割れが発生したと考察した既往の研究⁷⁾と同様な現象が生じたものと推察する。

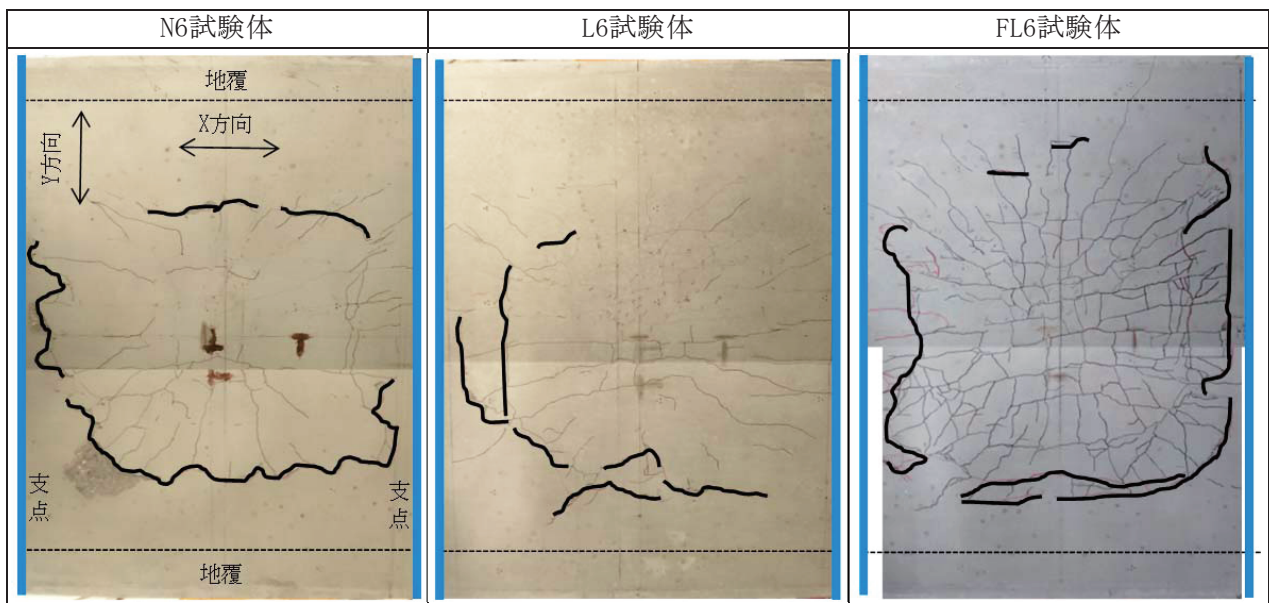


写真-2 床版下面のひび割れ状況

3. 4 鉄筋ひずみ挙動

引張ひずみが最大となる載荷板直下の鉄筋ひずみ履歴を図-6に示す。今回実験した試験体の種類および方向の違いによらず、鉄筋ひずみは急増することがなく、引張鉄筋が降伏する前に押抜きせん断破壊に至った。なお、いずれの試験体も、最大荷重付近で鉄筋ひずみが減少する挙動が確認されたが、この時点で載荷板周囲の押抜きが床版上面側より始まったこと (写真-3a) が影響したと考える。

鉄筋ひずみ分布を図-7に示す。載荷板直下の引張鉄筋ひずみ 1000×10^{-6} 時（載荷荷重はN6試験体で600kN程度、L6試験体およびFL6試験体で500kN程度）に着目すると、鉄筋ひずみ分布は各試験体のX方向およびY方向とも概ね同様であることがわかる。一方、最大荷重前になると、各試験体ともY方向のひずみ分布は相似形であるのに対し、FL6試験体のX方向では中心軸から遠い位置の引張鉄筋ひずみが増大した。この要因として、FL6試験体については卓越したひび割れ部で20mm以上の押抜きが生じながらも破壊に至らなかったことに関連する可能性がある（写真-3b）。

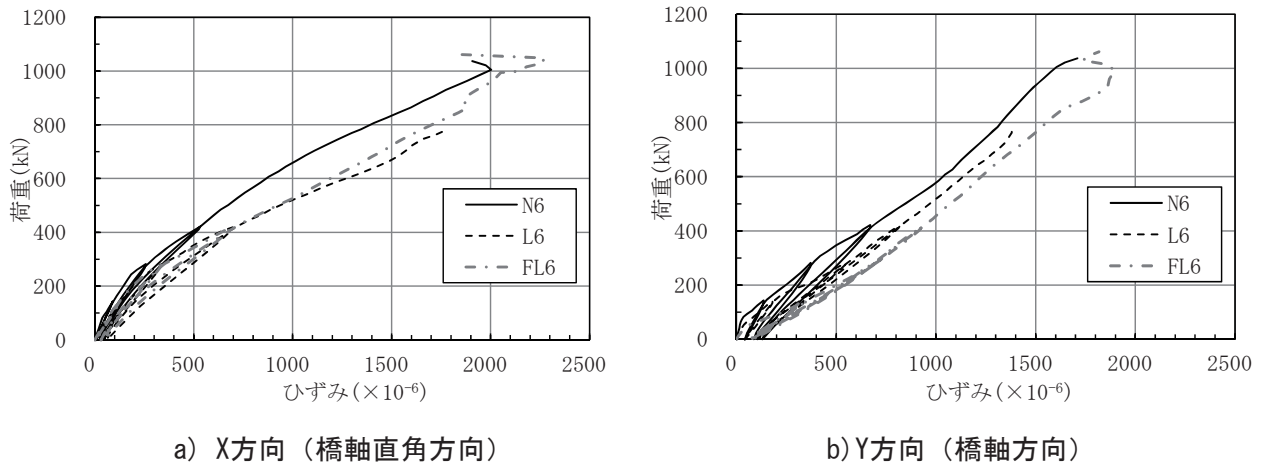


図-6 載荷板直下の鉄筋ひずみ履歴

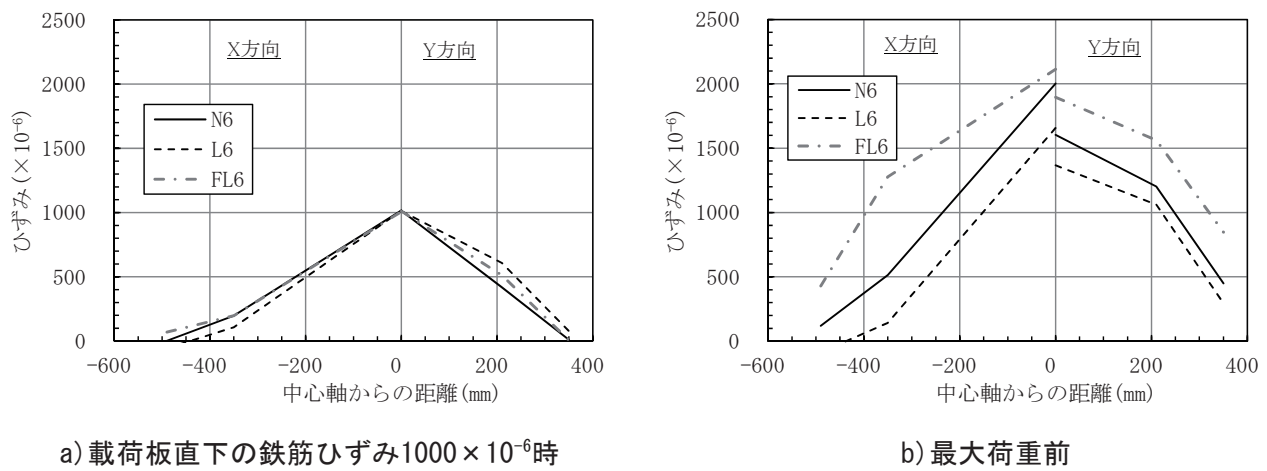


図-7 鉄筋ひずみ分布



a) 載荷板付近（床版上面）



b) 床版下面

写真-3 最大変位時の試験体の様子（FL6試験体）

3. 5 繊維補強軽量コンクリートが押抜きせん断挙動に与える影響

前出の表-5および図-5に示した通り、繊維補強軽量コンクリート製PC床版は軽量骨材コンクリート製PC床版の押抜きせん断耐力を増加させ、普通骨材コンクリート製PC床版と同等の耐力を確保することが確認された。繊維補強軽量コンクリート製PC床版は、押抜きせん断ひび割れが形成されても直ちに破壊には至らず(写真-3)、タイドアーチ的な耐荷機構に移行することで骨材の脆弱性によらず押抜きせん断耐力が増大した可能性がある。とりわけ、繊維架橋によるひび割れ分散(写真-2)とタイドアーチ形成の効果が高いのはPC断面方向(図-7)であると考えられ、繊維混入による押抜きせん断耐力の増進もPC断面方向の寄与が大きいものと推察される(図-8)。なお、これら考察の究明は今回得られた実験データや事前に実施した数値解析⁴⁾の精査あるいは試験体の解体調査を含め多角的に検討する必要がある、今後の課題とする。

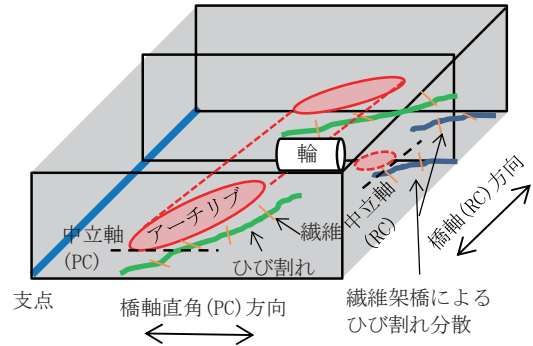


図-8 繊維混入によるPC床版の押抜きせん断耐力増大の予想機構

4. まとめ

本研究では、ビニロン合成短繊維を0.5%混入した繊維補強軽量コンクリートに着目し、各種PC床版の押抜きせん断試験を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 軽量骨材コンクリートを用いたPC床版において、繊維混入によるひび割れ荷重、床版剛性への影響は認められなかった。
- (2) 繊維補強軽量コンクリート製PC床版は軽量骨材コンクリート製PC床版の押抜きせん断耐力を増加させ、普通骨材コンクリート製PC床版と同等の耐力を確保することが確認された。

参考文献

- 1) 小野聖久, 稲葉尚文, 紫桃幸一郎, 庄中憲: 軽量コンクリートを用いたプレキャストPC床版の疲労耐久性に関する検討, 第四回道路橋床版シンポジウム, 土木学会, pp. 43-48, 2004.
- 2) 土木学会: 人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル, 1985. 6
- 3) 鈴木聡, 北野勇一, 水戸健介, 伊藤始: PVA繊維を混入した軽量コンクリートの取替えPC床版への適用について, 第26回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 559-562, 2017. 10
- 4) 伊藤始, 鈴木聡, 北野勇一, 三輪健治: 軽量骨材と短繊維を用いたPC床版の押抜きせん断挙動に関する解析的検討, 第26回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 135-140, 2017. 10
- 5) 土木研究センター: 道路橋床版取換用高強度軽量プレキャストPC床版「HSLスラブ」, 建設技術審査証明報告書第0313号, pp.29, 2013.11
- 6) 福田健作, 村田耕二, 堀口和宏, 野上朋和, 賤川智一, 吉松秀和: 合理化継手を使用したプレキャストPC床版取替工事について, 川田技報Vol. 35, pp. 32-37, 2016.
- 7) 伊藤始, 岩波光保, 横田弘: 軽量コンクリートスラブの押抜きせん断特性に及ぼすPVA短繊維の影響, 土木学会, 構造工学論文集, vol. 51A, pp. 1321-1331, 2005.