

論文 繊維補強軽量 PC 床版の押抜きせん断耐力に関する検討

北野 勇一^{*1}・伊藤 始^{*2}・鈴木 聡^{*3}・川口 千大^{*4}

要旨：既往の研究に基づきプレストレス、軽量骨材、短繊維の 3 要因を考慮したコンクリート床版の押抜きせん断耐力評価式を整理した。この評価式の妥当性を検証するため、ビニロン合成短繊維を混入した繊維補強軽量 PC 床版の押抜きせん断試験を実施し、式中の短繊維が負担する押抜きせん断耐力にプレストレスの効果を考慮する必要があることを確認した。また、その要因が短繊維とプレストレスの両方の効果により破壊形態を変化させ、PC 断面方向の引張鉄筋の引張力をシフトさせるためと推察した。

キーワード：床版、押抜きせん断耐力、プレストレス、人工軽量骨材、ビニロン合成短繊維

1. はじめに

鋼橋 RC 床版の更新が各地で行われ、プレストレストコンクリート床版（以下、PC 床版という）のニーズが高まっている。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。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。

そこで筆者らは、軽量かつ高耐力の PC 床版としてビニロン合成短繊維を 0.5%混入した軽量骨材コンクリート製の PC 床版（以下、繊維補強軽量 PC 床版という）を開発した¹⁾。この繊維補強軽量 PC 床版の押抜きせん断試験を実施した結果、軽量骨材コンクリート製 PC 床版よりも押抜きせん断耐力が増加し、普通骨材コンクリート製 PC 床版と同等の耐力を有することを確認した。また、繊維混入による耐力増加メカニズムは押抜きせん断ひび割れが形成されても直ちに破壊に至らずにタイドアーチ的な耐荷機構に移行することで押抜きせん断耐力が増大した可能性があると考えた。しかし前報では、繊維補強軽量 PC 床版の押抜きせん断耐力を定量的に評価するには至らなかった¹⁾。

ところで、コンクリート床版の押抜きせん断耐力は国内外において多くの評価式が提案されているものの、一般的な実務設計に適用されるのは普通骨材コンクリートを用いた RC 床版に限られる^{2), 3)}。また、プレストレス、軽量骨材、短繊維の各要因あるいはいずれか 2 つの要因の組合せが押抜きせん断耐力に与える影響を検討した事例^(例えば 4)~11)が報告されているものの、これら 3 要因すべてを網羅した研究事例は皆無である。

そこで本研究では、既往の研究に基づきプレストレス、軽量骨材、短繊維の 3 要因を考慮したコンクリート床版の押抜きせん断耐力評価式を整理した (2 章)。また、ビ

ニロン合成短繊維を混入した繊維補強軽量 PC 床版の押抜きせん断試験を実施し、整理した評価式の妥当性を検証した (3 章)。さらに、繊維補強軽量 PC 床版の押抜きせん断耐荷機構のメカニズム解明を試みた (4 章)。

2. 押抜きせん断耐力の評価手法の整理

2.1 普通骨材コンクリートを用いた RC 床版

松尾らの研究¹²⁾によると、国内外 297 体の普通骨材コンクリートを用いた RC 床版試験体の押抜きせん断耐力の実験値と代表的な 5 つの式の計算値との耐力比を求めた結果、BS 式と土木学会式^{2), 3)}は圧縮強度 80N/mm²以下の範囲において他の式より精度が良いと報告している。このうち、式(1)に示す土木学会式は、様々な材料の組み合わせに関する研究が先行する RC はりのせん断耐力算定式と同様の形式で定式化されている²⁾。

$$V_{pc} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pc} \cdot u_p \cdot d \quad (1)$$

ここに、 $\beta_d = (1000/d)^{1/4} \leq 1.5$, $\beta_p = (100 \rho)^{1/3} \leq 1.5$, $\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25 u/d)$, $f_{pc} = 0.20 \sqrt{f'_c}$ (N/mm²), f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)で本研究では 80N/mm²以下とする, u : 載荷面の周長(mm), u_p : 載荷面から $d/2$ 離れた位置の周長(mm), d : 有効高さ(mm), ρ : 鉄筋比であり, d と ρ は二方向の引張鉄筋に対する平均値とする。

2.2 繊維補強軽量 PC 床版

本研究では、繊維補強軽量 PC 床版の押抜きせん断耐力 V_p を式(2)のとおりコンクリート負担分に短繊維負担分を重ね合わす形式とし、前者は土木学会式を基本にコンクリートの単位容積質量とプレストレスの効果を考慮した式(3)、後者は田口らの研究¹³⁾を基本にプレストレスの効果を考慮した式(4)として評価することにした。

$$V_p = V_{pcwn} + V_{pfn} \quad (2)$$

$$V_{pcwn} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot \beta_w \cdot \beta_n \cdot f_{pc} \cdot u_p \cdot d \quad (3)$$

*1 川田建設 (株) 技術本部技術部技術開発課 (正会員)

*2 富山県立大学 工学部環境・社会基盤工学科 博士 (工学) (正会員)

*3 川田建設 (株) 技術本部技術部技術開発課

*4 川田建設 (株) 技術本部技術部技術課

$$V_{pfn} = k_n \cdot f_v \cdot u_p \cdot d \quad (4)$$

ここに、 V_{pcwn} ：コンクリートが負担する押抜きせん断耐力、 V_{pfn} ：短繊維が負担する押抜きせん断耐力、 β_w ：コンクリートの単位容積質量に関する係数、 β_n ：プレストレスの効果に関する係数、 k_n ：短繊維負担分に関するプレストレスの影響を表す係数、 f_v ：短繊維混入コンクリートの残存引張強度(N/mm²)。

β_w は、RCはりのせん断耐力に関する舟橋らの研究¹⁴⁾を応用し、式(5)により求めることにした。

$$\beta_w = (\rho/23.0)^{1.5} \quad (5)$$

ここに、 ρ ：コンクリートの単位容積質量(kN/m³)、普通骨材コンクリートの場合は23.0kN/m³とする。

β_n は、コンクリート標準示方書³⁾に示される棒部材のせん断耐力式を応用し、式(6)により求めることにした。

$$\beta_n = (1 + \sigma_p/f_{vt})^{0.5} \quad (6)$$

ここに、 σ_p ：高さ1/2位置における二方向の平均プレストレス、 $f_{vt} = 0.23f'_c \cdot 2^{2/3}(\rho/23.0)^{1.5}$ 。単位はともにN/mm²。

k_n は、 β_n と同じ形式で表すことにした。

$$k_n = (1 + \sigma_p/f_{vt})^\alpha \quad (7)$$

ここに、 α ：実験定数。

f_v については、本研究では式(8)により求めることにした。詳細は3章に示す。

$$f_v = 0.76V_f \quad (8)$$

ここに、 V_f ：短繊維混入率(%)。

図-1に文献2(普通骨材コンクリート製RC床版)および文献4~11(上記以外の床版)について式(2)により

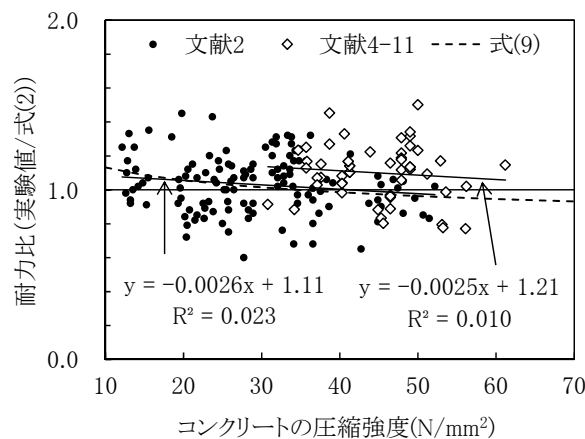


図-1 コンクリートの圧縮強度と耐力比の関係

耐力比を求めた結果を示す。耐力比の平均値±標準偏差は前者が1.03±0.17であるのに対し、後者は1.10±0.16と概ね同等に評価することがわかった。ただし、両者とも僅かではあるが負の関係が認められ、とりわけ強度の高いコンクリートを用いるPC床版では危険側の評価を与えることになる。そこで本研究では、文献2のデータを直線回帰した値に近似する式(9)を f_{pc} の算定に用いることにした。

$$f_{pc} = 0.285f'_c{}^{0.4} \quad (9)$$

3. 载荷実験による押抜きせん断耐力の検討

3.1 実験概要

表-1に実験ケースを示す。試験体N6は普通骨材コンクリートを用い、それ以外の試験体では軽量骨材コンクリートを用いて短繊維混入量を0%、0.25%、0.50%に変化させた。プレストレスは、橋軸直角方向の一方に一律6.0N/mm²を導入した。

表-2にコンクリートの使用材料を示す。本研究に用いた人工軽量粗骨材は、耐凍害性の観点より含水率2%以下のものとした。また、ビニロン合成短繊維は直径0.66mm、長さ30mmのものを用いた。

表-3にコンクリート配合を示す。試験体N6は普通骨材コンクリート、試験体L6は軽量骨材コンクリートを用いた。また、軽量骨材コンクリートに体積比で0.25%および0.50%の短繊維を外割りで混入した繊維補強コンクリートを試験体FL25-6および試験体FL50-6に用いた。

表-1 実験ケース

試験体名	コンクリートの種類	短繊維混入率 V_f (%)	プレストレス (N/mm ²)
N6	普通骨材	0	橋軸直角方向 6.0 橋軸方向 0.0
L6	軽量骨材	0	
FL25-6		0.25	
FL50-6		0.50	

表-2 コンクリートの使用材料

材料	記号	種類
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1.29g/cm ³)
短繊維	F	ビニロン合成短繊維 (密度1.30g/cm ³)

表-3 コンクリート配合および材料試験結果

試験体名	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	配合量 (kg/m ³)						材料試験結果		
				W	C	S	G	LG	F	f'_c (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	ρ (kg/m ³)
N6	18±2.5	4.5±1.5	36.5	165	452	739	994	0	0	70.6	38.1	2380
L6	10±2.5	5.0±1.5	35.0						0	52.6	21.7	1820
FL25-6									3.25	57.6	22.7	1820
FL50-6									6.50	56.7	23.5	1820

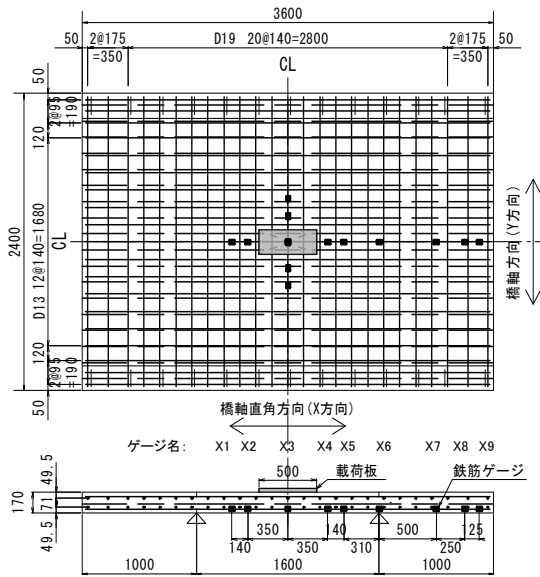


図-2 試験体形状および鋼材配置

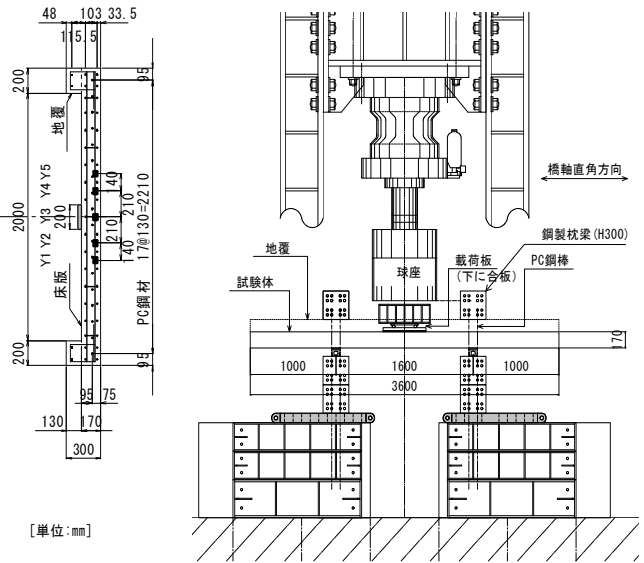


図-3 荷重方法

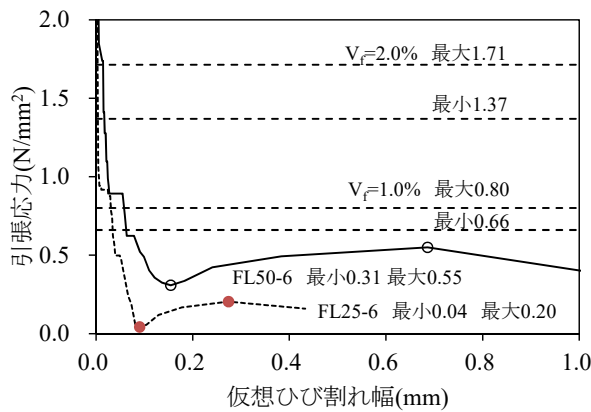


図-4 繊維補強コンクリートの引張軟化曲線

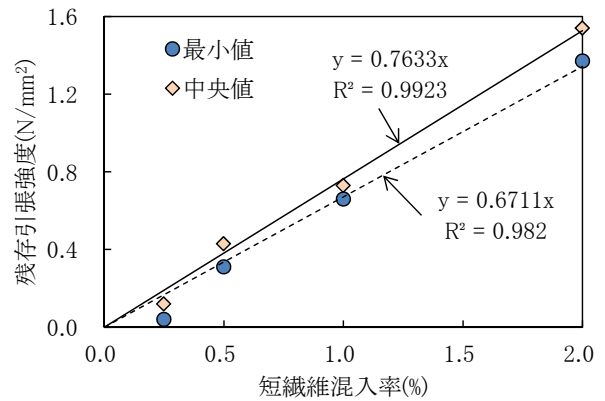


図-5 短繊維混入率と残存引張強度の関係

各配合とも緊張時（材齢 1 日） $35\text{N}/\text{mm}^2$ ，出荷時（材齢 7 日） $50\text{N}/\text{mm}^2$ が確保できるように水セメント比を定めた。材料試験は封かん供試体を用い材齢 28 日で実施した。また，繊維補強コンクリートの引張軟化曲線を求めるための試験を「切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法（JCI-S-001）」に準じて行った。

図-2 に試験体形状および鋼材配置を示す。試験体は厚さ 170mm の床版に地覆を打ち足して一体化させた。地覆の形状は，後述する荷重試験を行った際の断面力を 3 次元弾性 FEM 解析により求め，2 辺単純支持無限版に近似するように決定した。橋軸直角方向は PC 構造とし，PC 鋼材を 130mm 間隔で 1 段，鉄筋 D13 を 140mm 間隔で上下 2 段配置させ，所定のプレストレスが得られるようプレテンション方式により張力を導入した。なお，橋軸直角方向の支点外側に 1000mm 張り出す形状としたのは，プレストレス伝達長 65ϕ を確保するためである。

橋軸方向は RC 構造とし，設計荷重時に引張鉄筋に $120\text{N}/\text{mm}^2$ の引張応力が生じるよう D19 を 140mm 間隔に

上下 2 段配置した。

図-3 に荷重方法を示す。荷重方法は床版支間 1600mm で 2 辺単純支持した試験体の床版上面の中央に輪荷重を想定した $500 \times 200\text{mm}$ の荷重板に鉛直荷重を載荷することにした。試験中は，荷重，変位，鉄筋ひずみおよびコンクリートひずみを計測した。なお，試験は床版コンクリートの材齢 34～36 日の間に実施した。

3.2 残存引張強度に関する実験結果

図-4 に試験体 FL25-6 と試験体 FL50-6 に用いた繊維補強コンクリートの引張軟化曲線を示す。図には田口らが一軸引張試験により得た実験データ¹³⁾を含め，残存引張強度の最小値と最大値を表示した。

図-5 は，図-4 を基に，残存引張強度を短繊維混入率との関係として整理した結果である。田口らの研究では残存引張強度を最小値で取得しているが，短繊維混入率が小さい場合に最小値が極端に小さくなることがわかった。そこで本研究では残存引張強度の中央値を線形回帰した結果（前掲の式(8)）を耐力評価に用いた。

3.3 荷重実験の結果

図-6 に荷重変位関係を示す。いずれの試験体も押抜きせん断破壊し、最大荷重は試験体N6の1037kNに対し、試験体L6で784kN(76%)、試験体FL25-6で838kN(81%)、試験体FL50-6で1062kN(102%)となった。また、試験体N6に比べそれ以外の試験体は剛性が小さくなった。これは、軽量骨材を用いることでコンクリートの弾性係数が小さくなるのが影響したためと考える。

表-4 に載荷試験による実験値と式(4)の k_n に関する実験定数 α を変化させた計算値との比較を示す。 $\alpha=0$ 、すなわち、プレストレスの効果を見込まずに $k_n=1$ となるケースに着目すると、実験値は短繊維混入率の増加に伴い耐力が増大するのに対し、計算値はこれと乖離する傾向が認められた。

図-7 に試験体 FL25-6 および試験体 FL50-6 と試験体 L6 との実験値の差分が短繊維負担力 V_{pfn} に等しいとし、式(4)より $k_n \cdot f_v$ を推定した結果を示す。図には繊維補強コンクリートを用いた RC 床版の推定値(文献11)も併記した。これによると、RC 床版の推定値は $k_n=1$ の計算値と概ね一致するのに対し、PC 床版の推定値は $k_n=2.25$ (本研究の試験体では $\alpha=1$)の計算値に概ね一致した。以上より、 k_n は式(10)として評価できる。

$$k_n = 1 + \sigma_p / f_{vt} \quad (10)$$

4. 繊維混入による耐力増加メカニズムに関する検討

4.1 破壊形態について

図-8 に床版下面のひび割れ状況を示す。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。卓越したひび割れは、橋軸方向の長さに違いがみられ、試験体N6と試験体L6が1250mm程度であるのに対し、試験体FL25-6と試験体FL50-6では1650mmと1.3倍ほど長い。また、後者の試験体は微細なひび割れも橋軸方向の遠方まで進展している。

図-9 に試験体橋軸方向中央の切斷状況を示す。各試

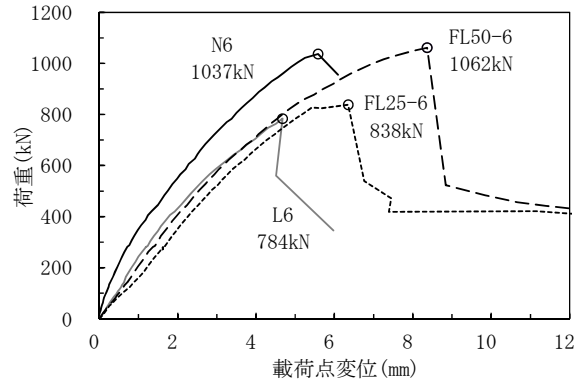


図-6 荷重変位関係

表-4 押抜きせん断耐力の比較

試験体名	実験値 (kN)	計算値(kN)	
		$\alpha=0$	$\alpha=1$
N6	1037	1028 (1.01)	
L6	784	738 (1.06)	
FL25-6	838	781 (1.07)	818 (1.02)
FL50-6	1062	855 (1.24)	988 (1.07)

注) 計算値の括弧内は耐力比を示す。

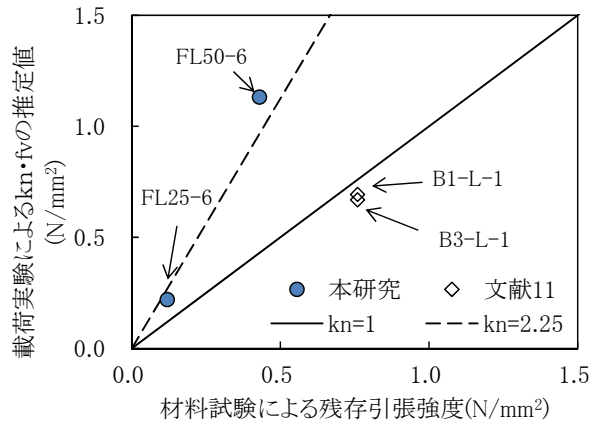


図-7 残存引張強度と $k_n \cdot f_v$ の関係

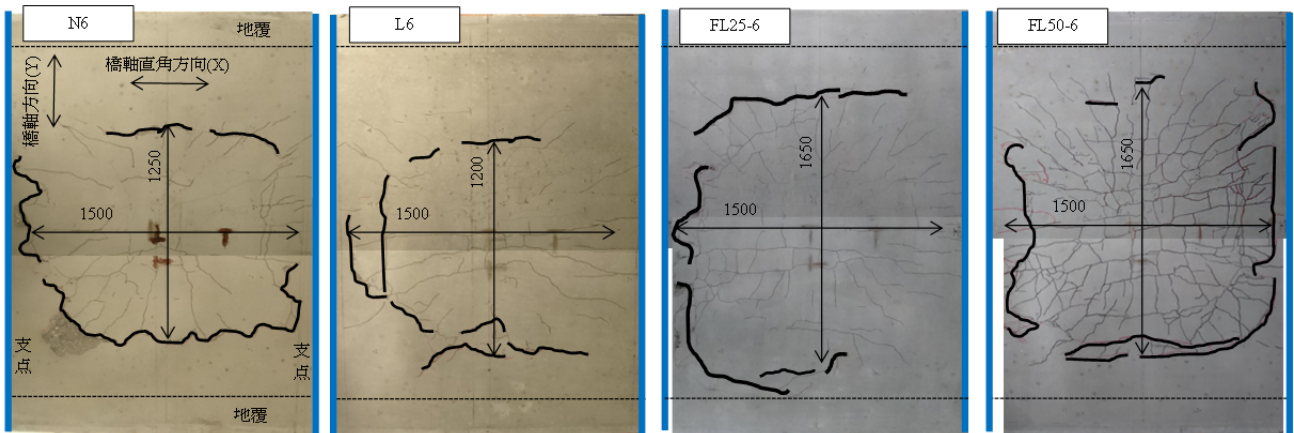


図-8 床版下面のひび割れ状況

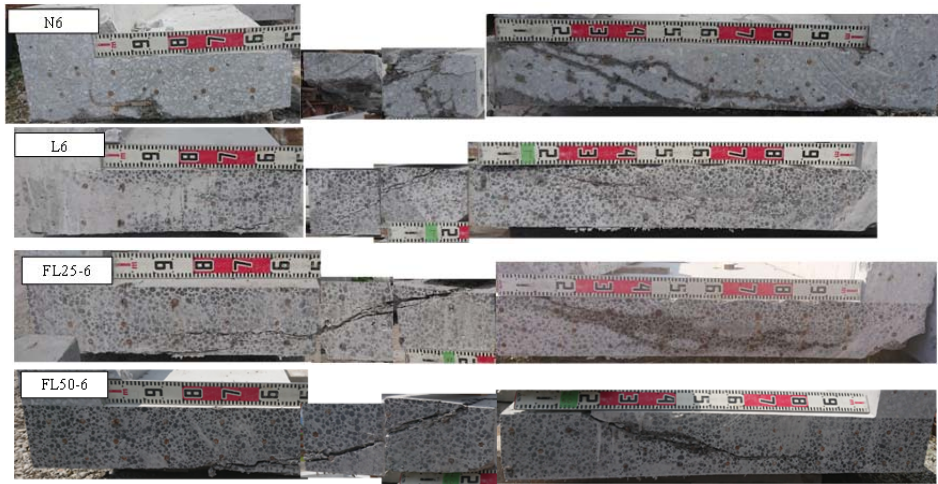


図-9 橋軸方向中央の切断面状況

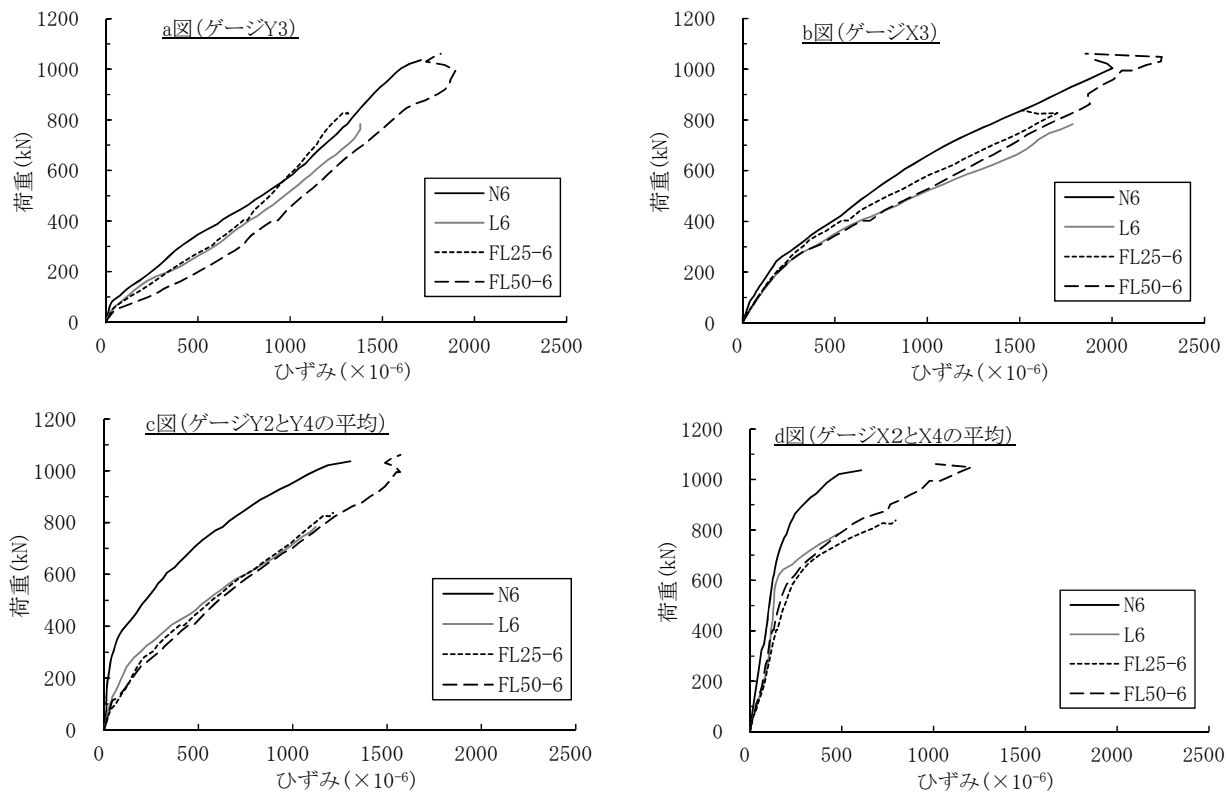


図-10 引張鉄筋のひずみ履歴

験体とも載荷面から引張鉄筋位置までのひび割れ角度は概ね同程度であった。しかし、試験体 N6 と試験体 L6 は試験体中央から 600mm ほどでひび割れが床版下面に達するのに対し、試験体 FL25-6 と試験体 FL50-6 では試験体中央から 800mm 程度以上までせん断ひび割れが水平方向に延伸している。

RC 床版を対象とした研究¹¹⁾によると、部材厚が大きく斜めひび割れのみが卓越して発生した試験体では、短繊維を混入しない場合(試験体 B3-L-0)に発生した斜めひび割れにより押抜きせん断破壊に至る。それに対し、短繊維を混入した場合(試験体 B3-L-1)は斜めひび割れの外側に新たなひび割れを発生させ破壊荷重を増大させ

たことを確認している。一方、本研究の繊維補強軽量 PC 床版では、斜めひび割れが床版下面まで達せずに床版内部で新たなひび割れを発生させ破壊荷重を増大させたと考えられる。つまり、繊維混入によるひび割れ分散については短繊維がひび割れ面で応力を負担するためであるが、斜めひび割れを床版内部で延伸させたのはプレストレスの効果であると推察される。

4.2 耐荷機構について

図-10 に引張鉄筋ひずみの履歴を示す。a~c 図に着目すると、試験体 N6 に比べそれ以外の試験体ではひずみはやや大きい、前出図-6 と同様に軽量骨材コンクリートの弾性係数が小さいことが影響したと考えられる。

一方、d 図に着目すると、試験体 N6 とそれ以外の試験体ではひずみの乖離が大きい。とくに、試験体 FL50-6 については破壊寸前のひずみが a～c 図で試験体 N6 と同程度であるのに対し、d 図では両者のひずみ差が 2 倍程度に拡大している。

図-11 に繊維補強軽量 PC 床版の押抜きせん断耐力増大の予想機構を示す。前出図-10 の d 図より、橋軸直角 (PC) 方向の引張鉄筋の引張力がシフトし、中立軸が上昇するあるいはアーム長が増大することで耐力が増加したと推察される。また、PC 断面方向で耐力が増加する際にも RC 断面方向でせん断ひび割れが床版を貫通した時点で押抜きせん断破壊に至るが、4.1 節にて述べた通り、橋軸(RC)方向についても繊維架橋によるひび割れ分散とプレストレスによる床版内部ひび割れの延伸効果により耐力が増加する機構に変化したものと考えられる。

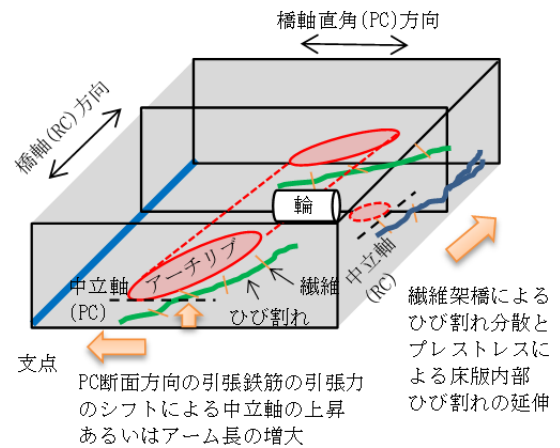


図-11 繊維補強軽量 PC 床版の押抜きせん断耐力増大の予想機構

5. まとめ

- (1) 既往の研究に基づきプレストレス、軽量骨材、短繊維の 3 要因を考慮したコンクリート床版の押抜きせん断耐力評価式を整理し、既往の実験値との耐力比を求めた結果、平均値 1.10±標準偏差 0.16 で評価することを確認した。
- (2) ビニロン合成短繊維を混入した繊維補強軽量 PC 床版の押抜きせん断試験を実施した結果、評価式中の短繊維が負担する押抜きせん断耐力にプレストレスの効果を考慮する必要があることを確認した。
- (3) 上記(2)の要因は、短繊維とプレストレスの両方の効果により破壊形態を変化させ、PC 断面方向の引張鉄筋の引張力をシフトさせるためと推察した。

参考文献

- 1) 北野勇一、鈴木聡、川口千大、伊藤始：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、第 27 回プレ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.189-194、2018.11
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書（昭和 61 年制定）改訂資料、コンクリートライブラリー61 号、pp.170-172、1986.10
- 3) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編]、2018.3
- 4) 末弘保、石橋忠良、佐藤春雄、大庭光商：PC スラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.11-2、pp.149-154、1989.
- 5) 東山浩士、松井繁之：橋軸方向プレストレスしたコンクリート床版の走行荷重に対する疲労耐久性に関する研究、土木学会論文集、No.605、I -45、pp.79-90、1998.10

- 6) 奥村征史、浜田純夫、松尾栄治、野村貞広：PC 床版の押抜きせん断耐力評価式に関する一考察、コンクリート工学年次論文集 Vol.21、No.3、pp.559-564、1999.
- 7) 原田良紀、浜田純夫、松尾栄治、津田久嗣：軽量床版の押抜きせん断耐力に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.22、No.3、pp.715-720、2000.
- 8) 浜田純夫、毛明傑、田中浩、松尾栄治：軽量 PC 床版の押抜きせん断耐力に関する研究、土木学会第 57 回年次学術講演会、I -799、2002.9
- 9) 東山浩士、水越睦視、松井繁之、小田憲司：軽量コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.2、pp.649-654、2003.
- 10) 小田憲司、東山浩士、松井繁之、内田美生：軽量 RC 床版の押抜きせん断耐荷力に基づいたパラメータ計算、土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集、I -38、2004.
- 11) 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、構造工学論文集、vol.51A、pp.1321-1331、2005.
- 12) 松尾栄治、毛明傑、楊秋寧、浜田純夫：RC 床版の押抜きせん断耐力算定式における各要因の影響について、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.2、pp.649-654、2003.
- 13) 田口史雄、岸徳光、三上浩、栗橋祐介：PVA 短繊維の架橋効果による RC 梁のせん断耐力向上効果、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、pp.283-288、2005.
- 14) 舟橋政司、原夏生、横田弘、二羽淳一郎：高性能軽量コンクリートを用いた RC はりのせん断耐力、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.3、pp.919-924、2001.