

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

富山県立大学	正会員	博士(工学)	○伊藤	始
川田建設(株)	正会員	修士(工学)	鈴木	聡
川田建設(株)	正会員		北野	勇一
(株)計算力学研究センター		修士(工学)	三輪	健治

Abstract : This paper reports the analytical results of the punching shear behavior of lightweight PC slab reinforced by PVA short fibers. In this study, analytical models were PC slabs that had three types of PC steel numbers and five types of concrete. As a result, it was confirmed that the punching shear capacity were increased by increasing of prestressing level and by mixing PVA short fibers. Then, these capacity increase mechanisms were explained by the influence of expansion of the diagonal crack width.

Key words : PC slab, Punching shear behavior, Lightweight concrete, PVA short fiber

1. はじめに

鋼橋のコンクリート床版の取り替えが各地の高速道路で行われ、プレキャスト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(図-1)。そのPC床版の軽量化は、床版部材厚の増加に対して、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⁾。しかしながら、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⁾。本研究では、実大のPC床版の押抜きせん断実験を模擬した3次元構造解析を実施し、軽量骨材の使用と補強のための短繊維添加やPC鋼材本数増加が押抜きせん断挙動やその耐力に与える影響を明らかにすることを目的とした^{3), 4)}。

研究では、軽量骨材の品質が押抜きせん断耐力に与える影響を検討するため、24時間吸水率が9%程度の市販されている標準タイプと、同2%以下の低吸水性の膨張性頁岩や造粒堆積粘土の高性能タイプの2種類を用いた単位体積質量1800kg/m³程度の軽量骨材コンクリート1種を想定した^{5), 6), 7)}。短繊維補強コンクリートには直径0.66mm、長さ30mmのポリビニルアルコール繊維(PVA繊維)を、施工性と経済性を考慮して体積割合0.5%で混入したコンクリートを想定した。

2. 押抜きせん断実験を模擬した解析の方法

2. 1 PC床版の概要

PC床版の解析モデルを図-2に示す。対象床版の載荷条件、支持条件、形状寸法に对称性が見られることから1/4モデルとした。PC床版は図-2および図-3に示すように橋軸直角方向(X方向)3.6m、橋軸方向(Y方向)4.8m、高さ0.17mの矩形断面を有する部材である。PC鋼材は橋軸方向の断面に36本(解析18本)または48本(解析24本)を配置した。PC鋼材には、1S15.2mmのPC鋼より線を用い、その緊張応力(有効張力)は1000N/mm²とした。橋軸方向鉄筋はD19を140mmピッチで配置し、橋軸直角方向鉄筋はD13を140mmピッチで配置した。

2. 2 パラメータ設定と解析ケース

解析では表-1に示すようにPC鋼材条件(プレストレス導入レベル)としてプレストレス力の導入の有無とPC鋼材本数



図-1 PC床版の取り替え状況

およびコンクリートの種類をパラメータとした15ケースを実施した。PC鋼材条件は、なし(RC)、36本(PA)、48本(PB)の3水準とした。コンクリートの種類は、普通コンクリート(N)、高性能の人工軽量骨材を用いたコンクリート(LH)、標準的な人工軽量骨材を用いたコンクリート(LL)、LHにPVA繊維を混入したコンクリート(LHF)、LLにPVA繊維を混入したコンクリート(LLF)の5水準とした。ケース名は、「PA-LHF」のように、PC鋼材条件、コンクリートの種類の順に表示した。

2. 3 解析方法

PC床版、載荷板、および支持板は、8節点アイソパラメトリック要素を用いてモデル化した。ひび割れモデルには、既往のRC床版の押抜きせん断解析において良い結果が得られている回転ひび割れモデルを用いた⁸⁾。PC鋼材と鉄筋は埋込み式離散鉄筋でモデル化し、鋼材とコンクリートの付着は完全付着とした。プレストレスの導入は、PC鋼材に体積ひずみを与えることで表した。支点は鋼主桁を想定し、せん断抵抗面(30°)が支間内になり、せん断破壊先行型となるように、橋軸直角方向に1600mm間隔に配置した。支点種類はピン支点とし、支持板の幅は100mmとして、2辺単純支持とした。載荷は輪荷重を想定して200×500mm(解析100×250mm)の載荷板を設定し、鉛直方向に強制変位を作用させた。なお、支持板とコンクリートの間にはインターフェイス要素を設けた。

2. 4 コンクリートと鋼材の材料物性

コンクリートの種類ごとの材料物性を表-2に示す。高性能の軽量骨材コンクリートでは、ヤング係数と圧縮側の応力-ひずみモデルを変更した。標準的な軽量骨材コンクリートでは、それらに加えて引張側の強度と破壊エネルギーを変更した。短繊維を混入したケースでは、残存引張強度を考慮した。軽量骨材と短繊維の感度解析の目的から、圧縮強度とポアソン比、ひび割れによる圧縮強度の低減係数は、それぞれ50N/mm²、0.2、0.8の一定値とした。引張軟化モデルには、図-4のような指数曲線モデルを

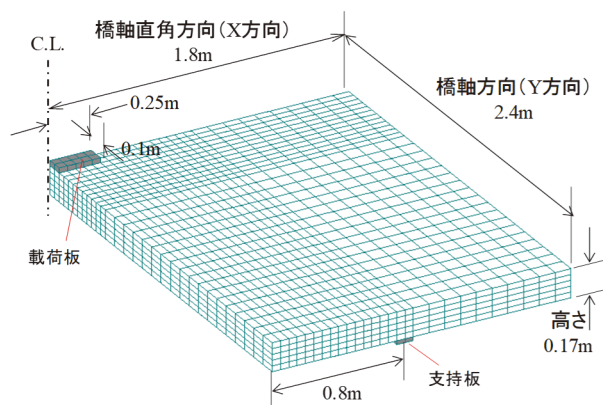


図-2 PC床版寸法と載荷方法（解析モデル）

表-1 解析ケース

	骨材	短繊維	PC鋼材条件		
			RC	PA	PB
N	普通	-	RC-N	PA-N	PB-N
LH	高性能	-	RC-LH	PA-LH	PB-LH
LHF	軽量	0.5%	RC-LHF	PA-LHF	PB-LHF
LL	標準	-	RC-LL	PA-LL	PB-LL
LLF	軽量	0.5%	RC-LLF	PA-LLF	PB-LLF

表-2 コンクリートの材料物性

共通	ヤング係数	E	kN/mm ²	N	LH	LHF	LL	LLF
				33.0	23.0	23.0	23.0	23.0
引張	引張強度	f_t	N/mm ²	3.12	3.12	3.12	2.50	2.50
	破壊エネルギー	G_{FI}	N/m	100	100	100	40	40
	引張強度の残存率	c_{ts}	-	0	0	0.17	0	0.17
圧縮	最大応力時のひずみ	ϵ_{cp}	$\times 10^{-6}$	2337	3262	3262	3262	3262
	圧縮軟化域の応力ゼロ時の塑性変位	W_d	mm	0.34	0.47	0.67	0.47	0.67

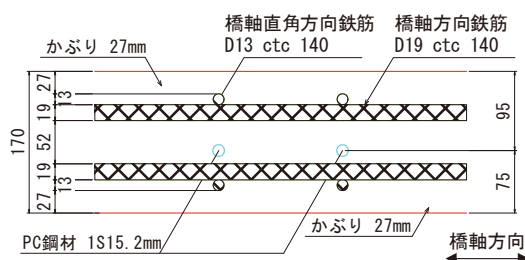


図-3 PC床版の断面と鉄筋配置の概略

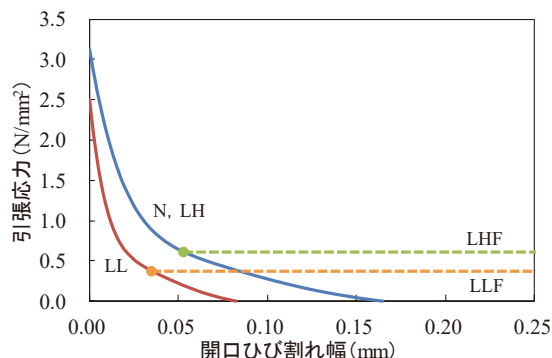


図-4 引張軟化モデル

用い、短繊維では曲線に残存引張強度を重ね、限界ひび割れ幅を設定しないモデルを用いた^{4),9)}。ここでの残存引張強度は、実績から引張強度の0.17倍と設定した¹⁰⁾。鉄筋とPC鋼材にはバイリニアモデルを用いた。鉄筋とPC鋼材の降伏強度は 345N/mm^2 と 1600N/mm^2 と設定し、ヤング係数はいずれも 200kN/mm^2 と設定した。

3. 解析結果

3. 1 プレストレス導入と曲げによる応力の変化

図-5に普通骨材のPA-Nの有効張力導入時（荷重 0.0kN ）と荷重 123.5kN （ $30.87\text{kN} \times 4$ ）のコンクリート応力分布を示す。これ以降の荷重は、解析での荷重を4倍にした全荷重を表す。横軸は中心から橋軸方向（Y方向）への距離を示す。いずれの結果も載荷板の拘束の影響を受けて、その付近の上縁応力が小さくなった。有効張力導入時に上縁応力が圧縮側に $3 \sim 4\text{N/mm}^2$ 、下縁応力が $7 \sim 8\text{N/mm}^2$ となった。荷重 123.5kN を作用させることで、上縁応力が圧縮側に、下縁応力が引張側に推移した。この曲げによる応力変化量は、載荷点の中心から離れることで約 $1/6$ に小さくなった。

3. 2 荷重－変位関係

図-6～図-8に全ケースの荷重－変位関係を示す。コンクリートの種類を比較すると、初期の傾きは、ヤング係数と引張強度の違いからN, LH, LLの順で小さくなった。短繊維混入の有無の異なるLHとLHF, LLとLLFを比較すると、初期の傾きはほぼ同じになり、最大荷重やその時の変位が短繊維混入で大きくなった。一方、プレストレス導入レベルを比較すると、RCシリーズでは荷重 90kN 付近でX方向断面の曲げひび割れが発生したため、それ以降の傾きが小さくなった。それに対してPAシリーズでは荷重 180kN 付近でY方向断面、 300kN 付近でX方向断面の曲げひび割れが発生したため、それ以降の傾きが小さくなった。

3. 3 破壊形態

プレストレスありのPA-LL（図-7）では、まず荷重 182kN でY方向応力によりY方向断面に曲げひび割れが発生し、 259kN でX方向断面のコンクリートひずみが圧縮から引張に転じて、 306kN でX方向断面の曲げひび割れが発生した。次に、 500kN 付近で斜めひび割れが進展するとともに、その幅が拡大し、最後に 610kN で斜めひび割れの拡大に伴い圧縮縁のコンクリートひずみが限界に達することで荷重が低下した。最大荷重時の鉄筋ひずみは 718×10^{-6} であり、鉄筋は降伏しなかった。一方、短繊維を混入したPA-LLFでは、PA-LLの 610kN 以降も斜めひび割れ幅が拡大し、荷重が増加した。荷重 1064kN で鉄筋が降伏し、最後に 1109kN で圧縮縁のコンクリートひずみが限界に

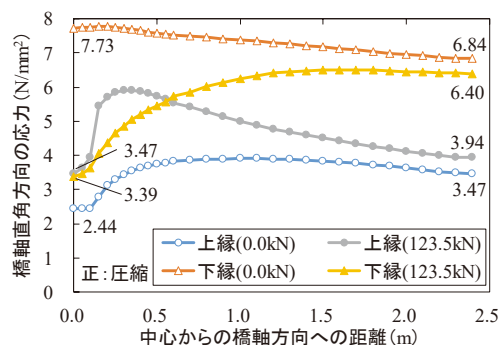


図-5 橋軸方向への応力分布 (PA-N)

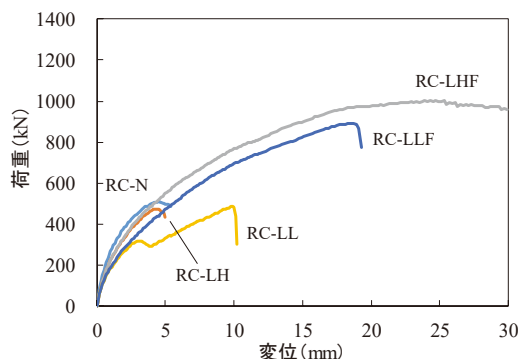


図-6 荷重－変位関係 (RC シリーズ)

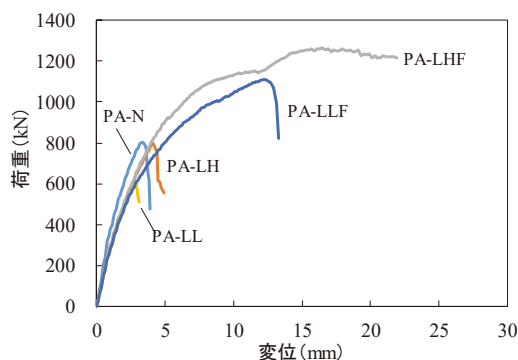


図-7 荷重－変位関係 (PA シリーズ)

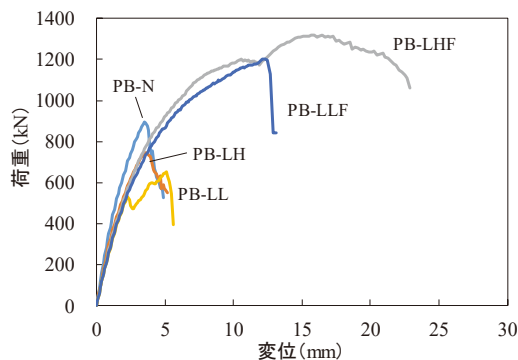


図-8 荷重－変位関係 (PB シリーズ)

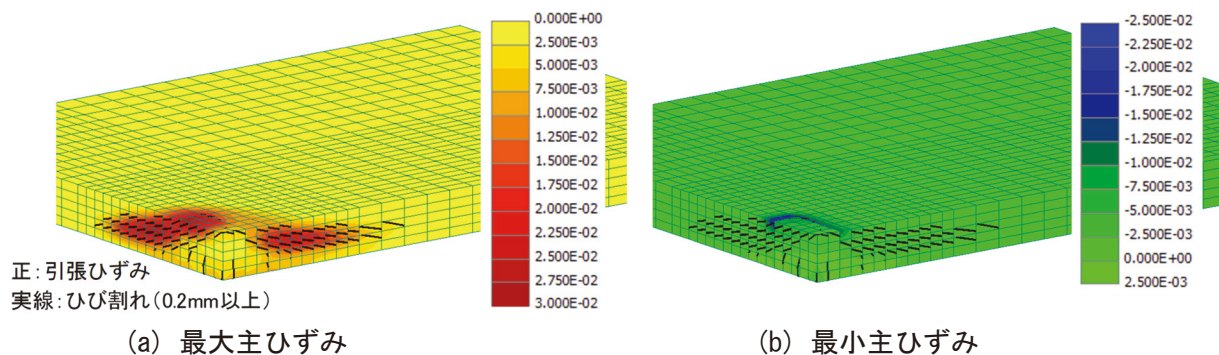


図-9 主ひずみ分布とひび割れ分布 (PA-LLF, 1109 kN)

達することで荷重が低下した。図-9にPA-LLFの1109kNの主ひずみ分布とひび割れ分布を示す。図-9(a)の最大値では載荷点から斜め方向に値が大きく、最大で 30000×10^{-6} 近くに達しており、斜めひび割れ領域が形成された。図-9(b)の最小値では載荷板周囲の値が負側に大きく局所的に -25000×10^{-6} 近くに達した。

4. 各種要因の影響に関する検討

4. 1 プレストレス導入レベルの影響

図-10にプレストレス導入レベルとしてPC鋼材本数と最大荷重の関係を示す。図には「LLF_Cr」としてLLFケースのひび割れ発生荷重もあわせて示した。LHケースを除き、鋼材本数が多くなることに伴い最大荷重が大きくなることが確認できた。LHF, LLF, LLF_Crの傾きはおおむね一致した。Nの傾きは他のケースに比べて大きく、LLの傾きは小さくなった。コンクリート標準示方書の棒部材の設計せん断耐力における軸方向力を考慮する係数 β_n は、PC鋼材36本で1.40、48本で1.51と計算された²⁾。図-10にPC鋼材本数0本の最大荷重を500kNとしたときの β_n で換算したグラフを示す。グラフはNケースとLLケースの間にあり、LHF・LLFケースの傾きとおおむね一致した。

図-11に最大主ひずみと荷重の関係、図-12に最大主ひずみと変位の関係を示す。ここでの最大主ひずみは、全要素における最大値であり、斜めひび割れ発生後の最大値は斜めひび割れ位置で得られた。図-11のプレストレスを導入したPA-LLFとPB-LLFの荷重は、同一最大主ひずみにおけるRC-LLFの値に比べ大きく、 10000×10^{-6} (0.60mm)を超えると約200kNの差となった。ここでカッコ内の数字は、主ひずみに要素対角距離 (60.465mm) を乗じ、ひび割れ幅に換算した値を参考として表示したものである。プレストレス導入によりX方向断面の曲げひび割れ発生が抑制され、図-10の「LLF_Cr」のようにひび割れ発生荷重が大きくなったことが要因であった。その荷重増分がおおむね最大荷重の差になることが確認された。

図-12のプレストレスを導入したPA-LLFとPB-LLFの同一変位に対する最大主ひずみがRC-LLFに比べ大

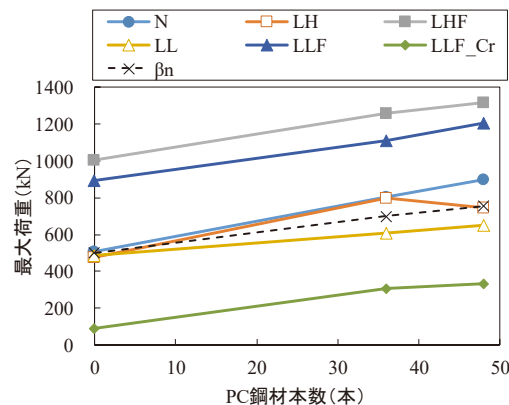


図-10 PC 鋼材本数と最大荷重の関係

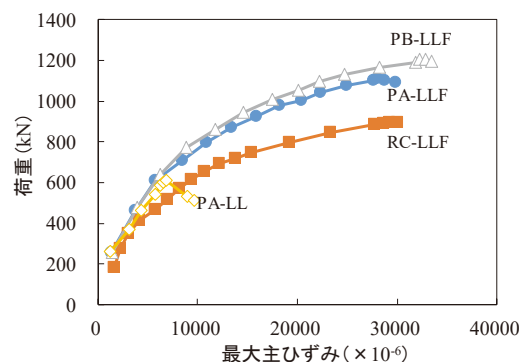


図-11 最大主ひずみと荷重の関係

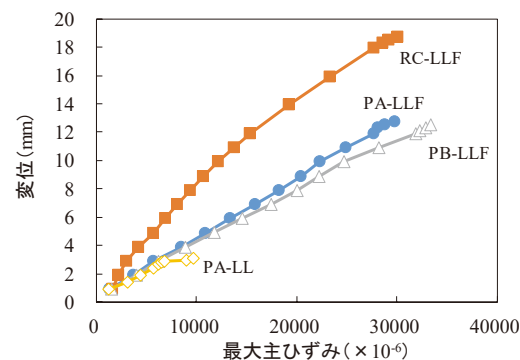


図-12 最大主ひずみと変位の関係

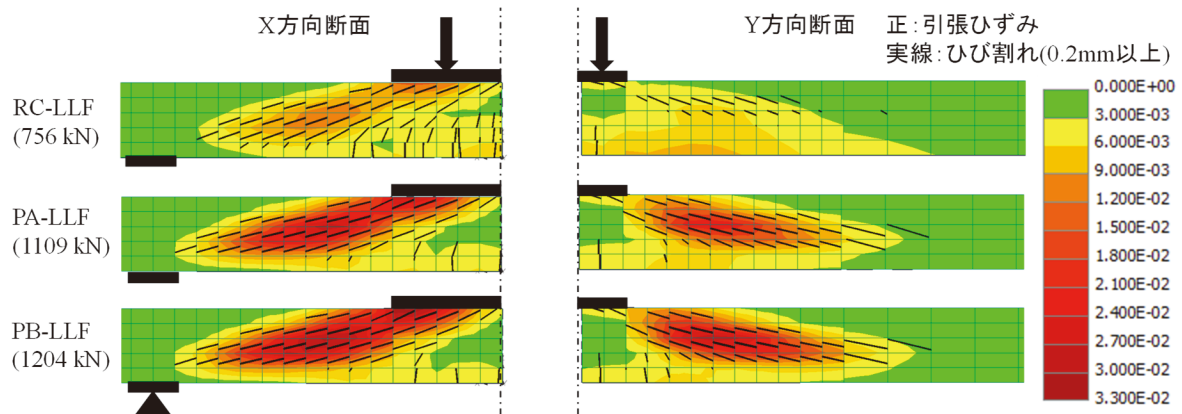


図-13 最大主ひずみ分布とひび割れ分布 (変位 12.3mm 時点)

きくなった。図-13にはLLFの3ケースの同一変位12.3mm時点 (PB-LLFの最大荷重時) における最大主ひずみ分布とひび割れ分布を示す。PA-LLFとPB-LLFでは、RC-LLFに比べX方向の曲げひび割れの本数や進展が少なく、斜めひび割れ部分の最大主ひずみが大きいことが分かる。これはPC導入で曲げひび割れの発生が抑制され、中立軸位置が十分に圧縮縁に近づかない状態で、斜めひび割れが進展して、押抜きせん断破壊に至ることが要因と推察された。また、部材軸と斜めひび割れのなす角度が若干小さくなっており、既往の知見と一致した^{2), 11)}。

4. 2 コンクリートの種類の影響

図-6と図-10に示すように、今回の解析条件では、プレストレスを導入しなかったRCケース (PC鋼材本数0本) では、N, LH, LLの最大荷重が同程度となった。図-8と図-10に示すように、プレストレスを導入したPBケース (同48本) では、N, LH, LLの順に最大荷重が大きくなった。この要因として、RCケースでは一般的なせん断力の3つの抵抗機構¹¹⁾のうち、ひび割れ面での力の伝達による影響が小さく、圧縮部コンクリートの抵抗と鉄筋のダウエル作用の抵抗が支配的であり、引張強度や破壊エネルギーの影響が小さかったと推察された。これに対して、プレストレスを導入したケースでは曲げひび割れが少ないことで鉄筋のダウエル作用の影響が小さくなり、ひび割れ面での力の伝達による影響が大きいため、引張強度や破壊エネルギーの違いが主要因となり、加えて圧縮部コンクリートの限界ひずみの違いが最大荷重の差に現れたと推察された。

4. 3 短繊維の有無の影響

図-11と図-12の短繊維を混入していないPA-LLでは、最大主ひずみが 6818×10^{-6} (0.41mm) を超えることで、最大主ひずみが大きく増加するとともに荷重が低下した。一方、短繊維を混入したPA-LLFでは、荷重と変位の増加とともに最大主ひずみが緩やかに増加し、変位と最大主ひずみがおおむね直線関係であった。これは載荷による鉛直変位が斜めひび割れ幅の増加に直接寄与することを表している。

図-11と図-12において、PA-LLの荷重は最大主ひずみが 6818×10^{-6} (0.41mm) で低下し、PA-LLFの荷重は同 28080×10^{-6} (1.70mm) で低下しはじめた。本研究のLLケースの引張軟化モデルでは、斜めひび割れ面の最大主ひずみが開口ひび割れ幅の限界値 (図-4) に相当する 1356×10^{-6} (0.082mm) に達することで、コンクリートが引張応力を分担しなくなるモデルとした。しかしながら、この最大主ひずみでは載荷板周囲の斜めひび割れの連続には至らず、圧縮側コンクリートの限界値には達しなかったため、 6818×10^{-6} (0.41mm) で荷重が低下したと考えられた。一方、本研究の短繊維混入ケースの引張軟化モデルでは、ひび割れ面で残存引張強度相当の引張応力を分担し続けるモデルとした。ここでPA-LLFの限界ひび割れ幅の換算値を0.52mm, 0.96mm, 1.35mmとしたときに最大荷重と変位の変化を図-14に示す。最大荷重はそれぞれ708kN, 926kN, 1042kNとなった。短繊維補強コンクリートの引張軟化モデルを用いた押抜きせん断破壊の解析では、残存引張強度が同じ場合でも限界ひび割れ幅が小さくなることで、耐力や変位の計算値が小さくなり、限界ひび割れ幅の設定が重要であることを確認した⁴⁾。

5. まとめ

本研究で行った押抜きせん断実験を模擬した解析の結果から以下の知見が得られた。なお、本論文では、概略の材料物性条件を用い、制約のある解析条件に基づく結果を示しており、今後、押抜きせん断実験や要素試験を行い、結果を検証することで、解析条件や解析方法を見直すことを課題としている。

- 1) 多くの解析ケースの押抜きせん断耐力は、プレストレス導入レベルに比例して増加した。この耐力増加は、PC鋼材の配置方向の曲げひび割れ発生が抑制され、ひび割れ発生荷重が大きくなり、その効果が持続することが要因であった。
- 2) 本解析条件において、プレストレスの導入がないケースの押抜きせん断耐力は、軽量骨材の使用の影響が小さかった。プレストレスを導入したケースの押抜きせん断耐力は、軽量骨材の使用で小さくなった。これは斜めひび割れ面の引張強度と破壊エネルギーの違いが影響したと推察された。
- 3) 押抜きせん断耐力は、短繊維を混入することで大きく増加した。この耐力増加は、斜めひび割れ面で残存引張強度相当の引張応力を分担し続けることにより、载荷による鉛直変位に応じて斜めひび割れ幅が緩やかに増加することで、圧縮縁コンクリートの圧壊を遅らせたことが要因であった。
- 4) 短繊維補強コンクリートを用いた床版の押抜きせん断耐力の計算値は、引張軟化モデルの限界ひび割れ幅に影響を受けることが確認できた。

参考文献

- 1) 小野聖久，稲葉尚文，紫桃孝一郎，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：コンクリート標準示方書・設計編，2012.
- 3) 寒地土木研究所：有機系短繊維を混入したコンクリート設計施工の手引きー，2014.
- 4) 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. 50A，pp. 1321-1331，2005.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書・施工編，2012.
- 6) 金久保利之，大谷真生，石川寛範：ビニロン繊維補強軽量コンクリートの基礎物性，軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp. 35-40，2000.
- 7) 雨宮美子，川口哲生，二羽淳一郎：繊維補強された超軽量コンクリートの破壊力学特性値に関する実験，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24，No. 2，pp. 1453-1458，2002.
- 8) 八若幹彦，檜貝勇，中村光，斉藤成彦：3D-FEMによるRCスラブの押し抜きせん断破壊性状の解析，構造工学論文集，土木学会，No. 47A，pp. 1339-1346，2001.
- 9) 計算力学研究センター・ATENA理論マニュアル，2004.
- 10) Hajime Ito, Mitsuyasu Iwanami, Hiroshi Yokota, Ema Kato: Analytical study on shear capacity evaluation of RC beams with PVA short fiber, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 12, pp. 187-199, 2014.
- 11) 田辺忠顕，檜貝勇，梅原秀哲，二羽淳一郎：コンクリート構造，朝倉書店，pp. 107-142，2004.

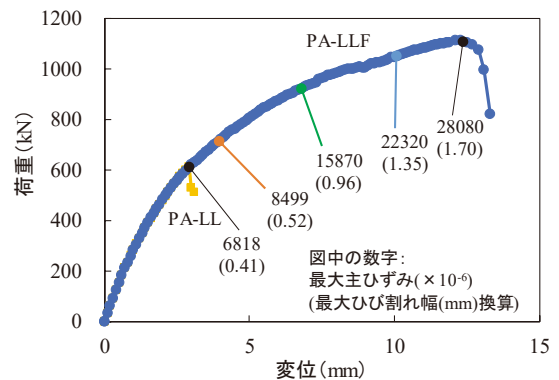


図-14 最大主ひずみと最大荷重