

軽量骨材を用いたPC床版の破壊過程および耐荷力の検討

法政大学 正会員 工博 ○藤山 知加子
IHIインフラ建設(株) 正会員 小林 崇

Abstract : Punching shear tests for pre-stressed concrete slab using light weight aggregate were studied by three dimensional FE analysis. The tension softening model of the light weight concrete was determined based on the fracture energy obtained by the normalized tests. The deflection and strains of both concrete and rebar calculated in FE analysis were examined, and the angle of fatal cracks indicating the punching shear failure was determined from the strain contour at mid-span cross section. Furthermore, parametric study in accordance with the influence of pre-stressing force and the arrangement of pre-stressing steel was performed. This suggested that the angle of fatal cracks can decrease with increase of pre-stressing force, and can be affected by the arrangement of pre-stressing steel as well.

Key words : Light weight concrete , Pre-stressed slab , Punching shear, FEM

1. はじめに

本研究の目的は、粗骨材と細骨材ともに軽量骨材を用いる軽量コンクリート2種（以下軽量2種と称す）を用いたプレキャストPC床版の耐力および破壊形態の分析である。PC床版では、プレストレスの導入によって耐荷力が向上するとともに押抜きせん断破壊時の破壊面角度が小さくなる¹⁾ことが知られている。しかし、一般に、軽量コンクリートではヤング係数や引張強度、曲げ強度が普通コンクリートに比べて低い²⁾ことが知られている中で、PC床版に軽量コンクリートを使用した研究事例は限られているのが現状である。そこで本研究では、特に既往の軽量2種PC床版の静的押抜き載荷試験^{3) 4)}を対象とし、再現解析およびパラメトリックスタディを実施することで、これらの影響度の分析を行うこととした。

2. 解析モデルの検討

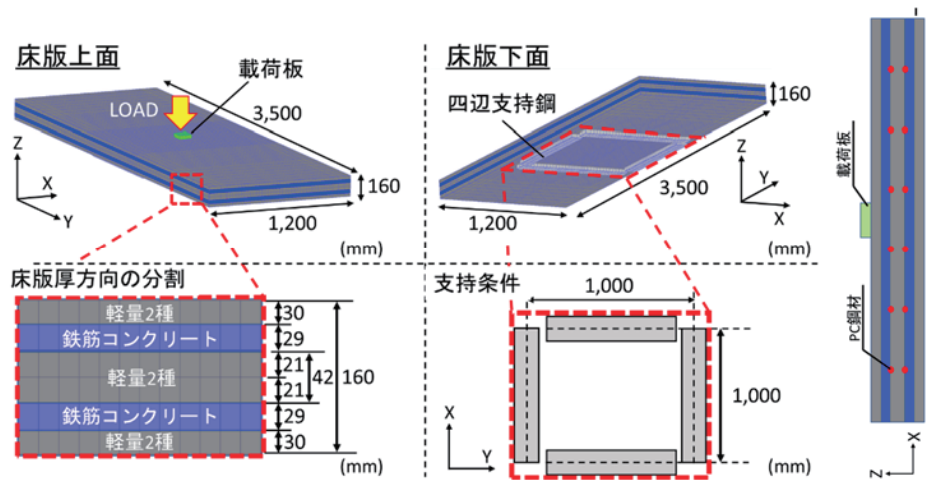
2.1 対象試験体およびモデルの概要

試験体³⁾は、幅3500mm、奥行1200mm、厚さ160mmの軽量2種床版の長手方向にプレストレスを導入（1S12.7, 6か所, 上下2段）したもので、載荷時は両方向とも支持間隔1000mmの4辺支持とされている。これらの条件を再現するため、解析では、本体床版のほかに載荷板および支持鋼材をモデル化し、鋼材とコンクリートとの間には境界面要素を配置した。解析モデルの概要図を図-1に示す。PC鋼材のみ節点間を結ぶトラス要素を用いたが、それ以外はすべて8節点ソリッド要素で再現を行った。このため、要素分割はPC鋼材配置を優先して決定している。プレストレスは鋼材1本あたりの有効緊張力100.6kN(1019.8N/mm²)に相当するひずみをトラス要素に与えて再現した。

鉄筋は埋込み要素（RC要素）を用い、鉄筋層内に分散的に存在するものとして設定した。載荷は、実験を再現するため、載荷板上面の節点25点に500Nずつ1stepあたり60秒間40stepで載荷する（実験では425kNで破壊に至ったため、解析での最大荷重は500kN）方法と、変位制御で同節点に1step60秒間で0.25mmの変位を与える方法の2種類で実施した。

2.2 材料特性値および材料構成則

解析モデルで用いた主要な材料の特性値を表－1に示す。いずれも実験時に得られたものである。鉄筋およびPC鋼材はバイリニアモデルを使用した。コンクリートのモデルは弾塑性破壊モデル⁵⁾を用い、引張軟化特性は、JCI-S-001「切欠きはりを有いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法」により支点間隔300mmの3点曲げ載荷試験⁶⁾で得た破壊エネルギーから求めた。具体的には、既往の普通コンクリートの軟化曲線のモデル⁵⁾における軟化勾配を決定する係数 $c=1.50$ と設定した。なお、軽量2種の破壊エネルギーの平均値 0.0546N/mm^2 に対し、同時に実施した同程度の圧縮強度を持つ普通コンクリートは 0.128N/mm^2 であったが、軟化曲線の勾配はほぼ同等であった⁶⁾。したがって、破壊エネルギーの数値の差は、軟化特性の違いではなく、引張強度の差によって生じたものとする。



図－1 解析モデルの概要図

表－1 材料特性値

材 料	ヤング係数 N/mm ²	圧縮強度N/mm ² (降伏強度N/mm ²)	引張強度 N/mm ²	ポアソン比	単位重量 kN/m ³
軽量2種	19,500	59.0	2.27	0.20	1.60
主鉄筋(D13)	210,000	386	558	0.30	77.0
配力鉄筋(D16)	210,000	393	560	0.30	77.0
PC鋼材(SWPR7BL)	191,600	1,824	1,975	0.30	77.0

2.3 解析モデルの検証

(1) 荷重－変位関係

解析で得られた荷重－たわみ関係を、実験結果と併せて図－2に示す。測定位置D2は版中央より短辺方向に245mm外側にずれたものであり、解析でも同じ位置の変位を抽出しているが、解析では荷重制御、変位制御いずれの場合でも実験より高い初期剛性を示した。耐荷力は、実験の420kNに対し解析(変位制御)が418kNであり、概ね一致した。一方、荷重制御の解析では耐荷力は増加し続けピークが明確に得られないため、以降は変位制御のみを対象として、検討を行った。

(2) 破壊形態

実験後の切断面で観察されたひび割れと、同位置での解析で得られたせん断ひずみのコンター図を併せて図－3に示す。実験ではひび割れは複数生じているため、最も内側のひび割れの接線から破壊面角度を算定している。解析においても高ひずみ領域は幅を持っているため、載荷板端部から高ひずみ領域の内側に接する線より、破壊面角度を定義した。その結果、実験、解析いずれも、プレストレスの導入によって破壊面角度が小さくなる傾向が確認された。

(3) ひずみ分布

版中央の荷重位置付近での下側鉄筋および上面コンクリートのひずみについて検証を行った。解析および実験で得られた下側鉄筋ひずみの比較を図-4に示す。着目した下側鉄筋は、支間中央よりX方向、Y方向それぞれ75mmずつ外側に配置しているものである。RC断面方向(X方向)、PC断面方向(Y方向)のいずれも、荷重初期において解析と実験概ね整合していたが、200kN程度以降は解析でのひずみのほうが大きい傾向であった。解析ではひずみを要素平均で算出しているが、実験ではひずみゲージの位置がひび割れに遠く、ひずみが比較的小さく計測されていた可能性が考えられる。

同様に、版上面でのひずみを比較したものが、図-5である。着目位置は100mm×100mmの荷荷板の脇にあり、支間中央よりX方向、Y方向それぞれ50mm外側に位置している。コンクリートのひずみも、全体的な傾向としては概ね整合していると言えるが、RC断面方向(X方向)では70kN程度以降、実験のひずみが解析を上回っていた。

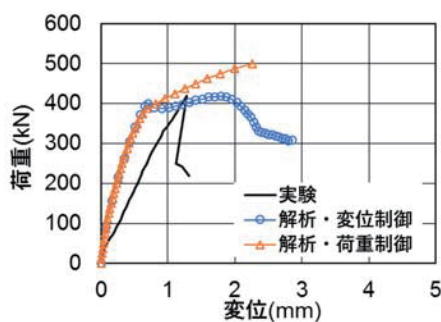


図-2 解析モデルの概要図

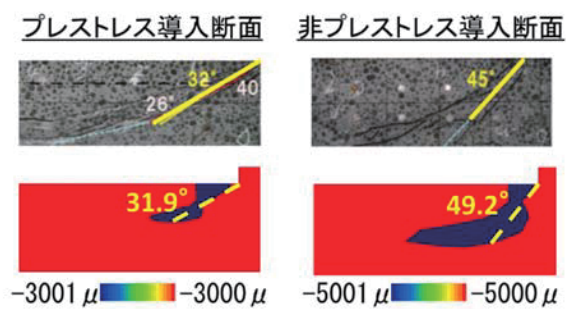


図-3 ひび割れとせん断ひずみの比較

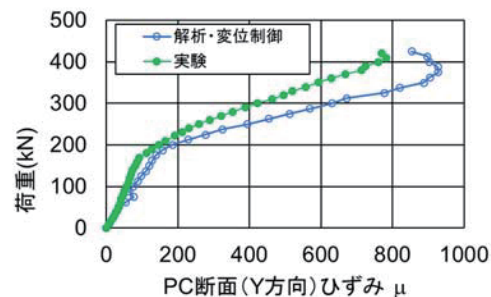
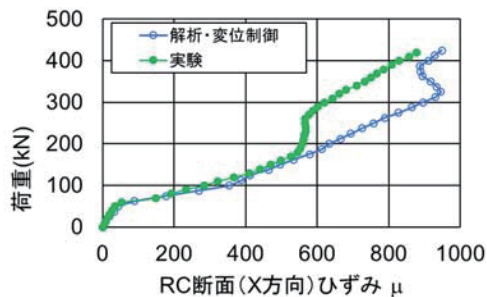


図-4 版下側鉄筋のひずみ

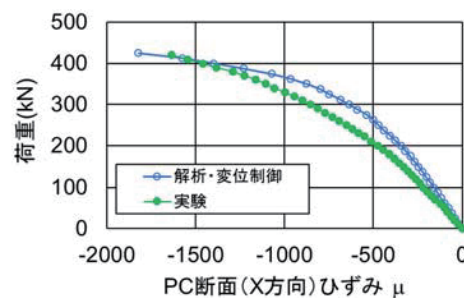
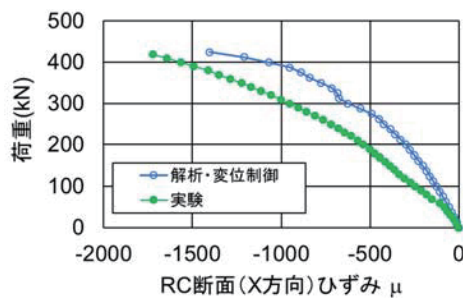
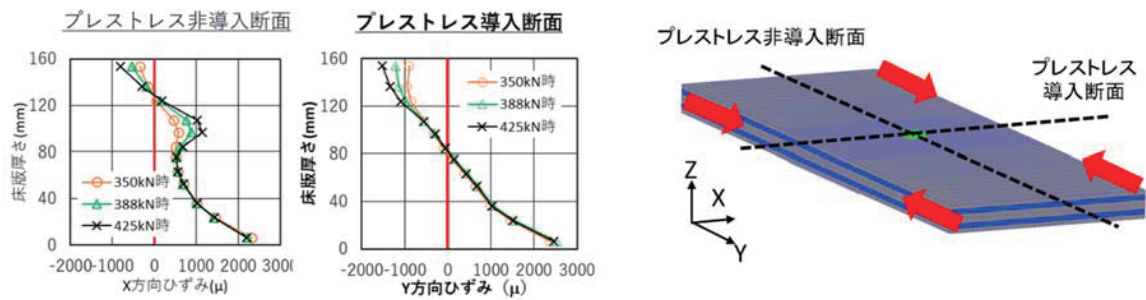


図-5 版上面コンクリートのひずみ

(4) 中立軸位置

支間中央を通る直交2方向の断面について、支間中央に位置する6層の要素のひずみをすべて抽出し、3つの荷重段階においてその値を断面高さごとにプロットした(図-6)。これより、版上縁より中立軸位置を算出したところ、プレストレスを導入した断面での中立軸位置は77.8mm、プレストレス非導入(RC)断面では30.5mmであった。プレストレスの導入によって圧縮領域が増加する効果が、改めて確認された。



図－6 各断面における中立軸位置の算定

3. 各種要因がPC床版の破壊面角度および押抜きせん断耐力に及ぼす影響

3.1 検討条件

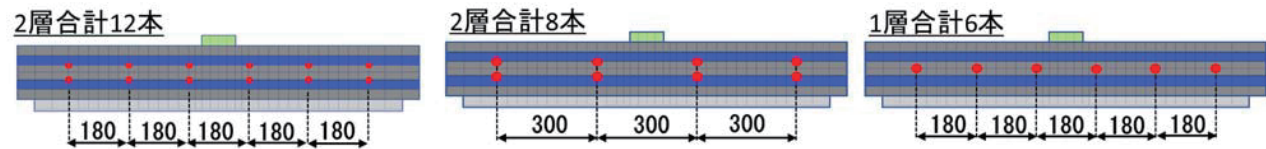
破壊面角度および耐荷力についてさらに検討するため、プレストレス導入量、コンクリート種類、PC鋼材配置をパラメータとしたケーススタディを実施した。検討ケースの一覧を表－2に示す。プレストレス導入量をパラメータとしたシリーズでは、鋼材配置はそのまま、導入緊張力を半分あるいは2倍としたものである（Z6-PC-0.5、Z6-PC-2）。コンクリート種類は、圧縮強度が同等の普通コンクリートおよび粗骨材のみに軽量骨材を用いる軽量コンクリート1種（以下軽量1種と称す）を再現した（Z6-PC-N、Z6-PC-LC1）。これらのコンクリートのヤング係数、引張強度および軟化曲線は、要素実験⁶⁾⁷⁾で得られたものをもとに設定した（表－3）。なお、軽量1種の破壊エネルギーは0.0673N/mm²であった。PC鋼材配置は、上下2段のままで本数を8本に減らしたZ6-PC-8tと、さらに本数を減らして床版高の中心のみに鋼材を配置したZ6-PC-C6tについて検討を行った。鋼材配置図を図－7に示す。合計プレストレス導入量が基準床版と同等となるように、鋼材1本あたりの緊張力は調整している。

表－2 検討ケース一覧

パラメータ	(基準)	プレストレス導入量		コンクリート種類		PC鋼材配置	
モデル名	Z6-PC	Z6-PC-0.5	Z6-PC2	Z6-PC-N	Z6-PC-LC1	Z6-PC-8t	Z6-PC-C6t
緊張力 kN／本	100.6	50.3	201.8	100.6	100.6	151.0	201.3
コンクリート種類	軽量2種	軽量2種	軽量2種	普通	軽量1種	軽量2種	軽量2種
PC鋼材配置	2層12本	2層12本	2層12本	2層12本	2層12本	2層8本	1層6本

表－3 コンクリートの代表的な物性値

モデル名	分類	ヤング係数 kN/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	ポアソン比	単位重量 g/cm ³
Z6-PC（基準）	軽量2種	19.5	59.0	2.27	0.20	1.60
Z6-PC-LC1	軽量1種	25.0	57.5	2.59	0.20	1.83
Z6-PC-N	普通	35.4	55.1	3.81	0.20	2.35



図－7 ケーススタディにおけるPC鋼材配置図

3.2 検討結果および考察

（1） 荷重－たわみ関係

検討に加えた6ケースについて、解析で得られた荷重－版中央たわみ関係を図－8に示す。最大耐荷力

は、418kN (基準), 399kN (Z6-PC-0.5), 498kN (Z6-PC-2), 523kN (Z6-PC-N), 440kN (Z6-PC-LC1), 419kN (Z6-PC-8t), 420kN (Z6-PC-C6t) であった。プレストレス導入量が半分のZ6-PC-0.5の耐力は基準床版の95%, プレストレス導入量が2倍のZ6-PC-2の耐力は基準床版の119%であった。一方, PC鋼材配置を変えた2ケースでは, 耐力に有意な差が見られなかった。

コンクリート種別の影響については, 軽量1種のZ6-PC-LC1の耐力は基準床版の105%, 普通コンクリートでは125%という結果となった。圧縮強度は軽量2種を用いた基準床版が最も高かったにも関わらず, 引張強度は軽量1種が基準の114%, 普通コンクリートが168%であることから, 押抜きせん断耐力は, 引張強度への依存性が高いと考えられる。さらに, ヤング係数について軽量2種と比較すると, 軽量1種が128%, 普通コンクリートが182%である。ヤング係数は骨材自体の剛性および強度に強く依存することから, 軽量骨材の使用によって同一荷重に対する圧縮ひずみが比較的大きくなることも, 部材剛性の低下につながっているものと推察される。なお, 今回の解析では, ひび割れ面のせん断応力伝達に関する構成式はすべてのモデルにおいて同じものを用いているため, 軽量コンクリートにおけるひび割れ面のせん断伝達機能の低下は考慮していない。

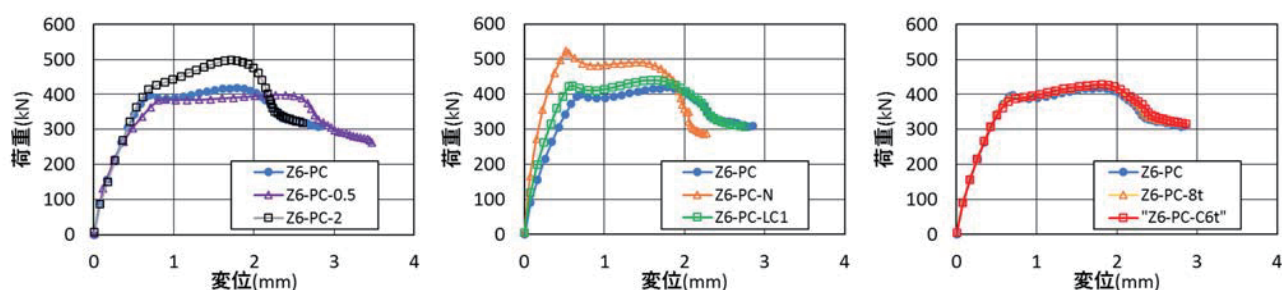


図-8 荷重-たわみ関係図の比較

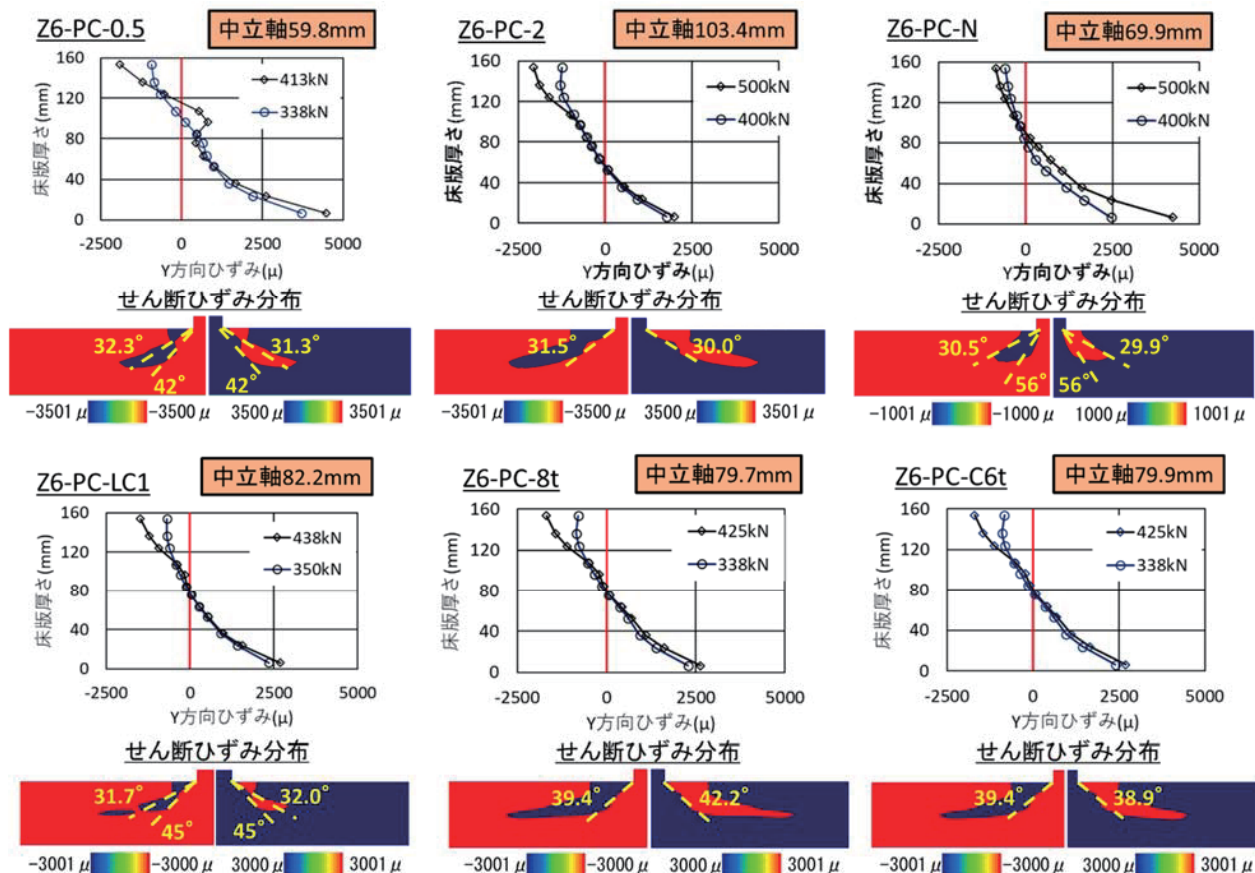


図-9 高さ方向のひずみ分布およびせん断ひずみ分布から得られる破壊面角度

(2) 中立軸位置および破壊形態

プレストレス導入方向断面の高さ方向のひずみ分布およびせん断ひずみ分布から得られる破壊面角度を図-9に示す。プレストレス導入方向断面での中立軸位置は、合計のプレストレス導入量が少ない場合は小さくなり (Z6-PC-0.5)，プレストレス導入量が多いと大きくなる (Z6-PC-2) 傾向が確認された。また、コンクリート種類による比較では、軽量1種では基準の軽量2種よりも中立軸位置が4mm程度大きく、普通コンクリートでは8mm程度小さい結果となった。したがって、圧縮強度、引張強度、ヤング係数の大小関係に応じた傾向は見出せなかった。また、荷重-たわみ関係図と同様に、全体のプレストレス導入量が同等であれば鋼材配置を変更しても中立軸位置はほぼ変化がないことがわかった。

せん断ひずみ分布からは、中立軸位置が比較的小さかったZ6-PC-0.5およびZ6-PC-Nにおいて、載荷板から斜め下に伸びる領域がやや内側にあるように見える。つまり、中立軸位置が短い場合、破壊面角度は急になると考えられる。これは、図-3に示す、プレストレスを導入しない断面 (RC断面) での傾向に一致する。しかしながら、2.3(3)で定めたとおり載荷板端部から高ひずみ領域の内側に接する線より破壊面角度を定義すると、いずれも角度は30度程度となり、明確な傾向は得られない。

一方、合計プレストレス導入量が同等だが鋼材本数を減らして1本あたりの導入量を大きくしたZ6-PC-8tおよびZ6-PC-C6tでは、破壊面角度が大きくなる傾向が確認された。つまり、プレストレス導入量および中立軸位置が同程度であっても、PC鋼材の配置によってひび割れ性状が異なる可能性がある。

4. 結論

本研究では、既往の軽量2種PC床版の静的押抜き載荷試験を対象とし、再現解析を実施し、結果の検証を行った。また、PC床版の押抜きせん断耐力に影響を及ぼすと予想される項目についてパラメトリックスタディを実施した。その結果、軽量2種、1種、普通コンクリートでの比較において、押抜きせん断耐力は、圧縮強度よりも引張強度あるいはヤング係数に依存すると考えられた。また、プレストレス導入量が同一でもPC鋼材の配置によって破壊面角度が異なる場合があることを指摘した。

謝辞

解析データ作成には間根山亮氏 (当時法政大学) に協力いただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 東山浩士, 太田博士, 朴淙珍, 松井繁之: PC床版の押し抜きせん断耐荷力について, 第7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. 13-16, 1997.
- 2) 日本メサライト工業株式会社: 軽量コンクリートと普通コンクリートの物性比較
https://www.mitsui-kinzoku.co.jp/group/mesalite/new/new_1_8.html
- 3) 小林崇, 中村定明, 郷保英之, 松井繁之: 軽量2種を用いたプレキャストPC床版の押抜きせん断耐荷力および疲労耐久性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 2, pp. 325-330, 2017.
- 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7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, 2017, 10
- 5) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991. 5
- 6) 小林崇, 中村定明, 石川寛範: 低含水状態の軽量骨材を使用したコンクリートの引張軟化特性, 土木学会第73回年次学術講演会, 2018, 8 (掲載予定)
- 7) 株式会社IHIインフラ建設: スーパーHSLスラブ 技術報告書, 平成29年3月