

論文 せん断補強筋の無い大型 PC はりのせん断耐力に関する解析的研究

田村 聖^{*1}・ARAVINTHAN.T^{*2}・濱田 譲^{*3}・二羽 淳一郎^{*4}

要旨：本研究は、せん断圧縮破壊した PC はりの実験結果と非線形有限要素法による解析結果との比較を行い、解析結果の妥当性を検討したものである。その結果、汎用の 2 次元非線形有限要素解析プログラムを用いて解析を実施しても、実験結果を概ね評価することができた。また、せん断圧縮破壊する PC はりのせん断耐力は、曲げ圧縮部の深さに関係することを解析的に明らかにした。

キーワード：PC はり、せん断圧縮破壊、タイドアーチ的耐荷機構、非線形有限要素法

1. はじめに

せん断圧縮破壊は、せん断スパン有効高さ比(以下、 a/d と称す)が比較的小さいはりにおいて一般的に生ずるせん断破壊形式である。しかし、プレレストコンクリート(以下、PC と称す)はりのせん断載荷試験を行った場合、 a/d を 3.0 以上と比較的大きくしてもせん断圧縮破壊が生じることが指摘されており¹⁾、このような破壊形式に至る PC はりのせん断耐荷機構を明確にする必要があると思われる。また、土木学会コンクリート標準示方書²⁾のせん断耐力評価式は、斜めひび割れ発生荷重を評価するものであり、せん断圧縮破壊となる部材のせん断耐力評価式は規定されていないのが現状である。

そこで、本研究ではせん断圧縮破壊した PC はりの実験結果と非線形有限要素法による解析結果との比較を行い、解析結果の妥当性を検討した。次に、PC はりのせん断耐荷機構を解析的

に明らかにするため、導入プレストレス量および最大曲げモーメント区間のコンクリート圧縮領域に着目して検討を行った。

2. 解析の対象とした実験の概要

著者らは、過去に高性能軽量コンクリートを用いた PC 部材のせん断耐力を検証するため、有効高さ 1m を有する大型 PC はりのせん断載荷試験を実施した³⁾。その実験結果を表-1 に示す。供試体の a/d は 3.75 で、比較的少ないプレストレス量を導入した。供試体が破壊に至るまでの過程は、斜めひび割れ上部のコンクリートと引張鋼材でタイドアーチ的な耐荷機構が形成され、さらに荷重が上昇した。最終的には載荷点付近で斜め斜めひび割れ上部のコンクリートが圧縮破壊した。

本研究では、この実験結果を解析の対象とした。

表-1 実験結果

供試体 No,	はり高さ (mm)	a/d	下縁導入プレストレス (N/mm ²)	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	引張強度 f_t (N/mm ²)	破壊エネルギー G_f (N/m)	終局荷重 P_{max} (kN)	破壊形式
45LC-3	1100	3.75	2.60	55.1	2.50	68.02	1010	せん断圧縮
45LC-5	1100	3.75	5.44	53.3	2.29	59.31	1137	せん断圧縮
60LC-5	1100	3.75	5.78	68.7	3.41	76.08	1200	せん断圧縮

*1 ドーピー建設工業(株) 技術センター 研究員 (正会員)

*2 ドーピー建設工業(株) 技術センター 主任研究員 工博 (正会員)

*3 ドーピー建設工業(株) 技術センター 主任研究員 工修 (正会員)

*4 東京工業大学大学院教授 理工学研究科 土木工学専攻 工博 (正会員)

3. 非線形有限要素解析

本研究では、2次元非線形有限要素解析プログラム「ATENA」を用いて解析を実施した。コンクリート要素は4節点アイソパラメトリック要素であり、非線形破壊力学に基づいた引張破壊および圧縮域でのひずみ軟化を含む非線形挙動などの特性を考慮した。

3.1 構成則

2軸応力状態に基づいた等価1軸則と Kupfer の2軸破壊基準⁴⁾を図-1および図-2に示す。解析では、2軸応力状態に基づいた等価1軸則を用い2次元コンクリート要素をモデル化した。ただし、2軸応力状態を考慮するため図-2に示す Kupfer の2軸破壊基準により圧縮強度(R_c^{ef})および引張強度を(R_t^{ef})を評価した。

等価1軸則における引張側の構成則は、引張強度に達するまでを線形弾性材料とした。また、引張強度に達した後は式(1)に示す Hordjik の指数関数モデル⁴⁾によって軟化を考慮した。

$$\frac{\sigma}{R_t^{ef}} = \left[1 + \left(3.0 \frac{w}{w_{cr}} \right)^3 \right] \exp \left(-6.93 \frac{w}{w_{cr}} \right) - \frac{w}{w_{cr}} (1 + 3.0^3) \exp(-6.93) \quad (1)$$

$$w_{cr} = 5.14 \frac{G_f}{R_t^{ef}} \quad (2)$$

ここで、 w はひび割れ開口変位、 w_{cr} は応力が完全に解放された時のひび割れ開口変位、 G_f は破壊エネルギーをそれぞれ示す。

圧縮側の構成則は、圧縮強度に達するまでは図-1に示す放物線状の応力-ひずみ関係を用いた。圧縮強度に達した後は、仮想圧縮平面モデルに基づいた軟化則を用いた。仮想圧縮平面モデルを図-3に示す。このモデルでは、応力が完全に解放された時点のひずみ ε_d を式(3)のように定義した。

$$\varepsilon_d = \varepsilon_c + \frac{w_d}{L_c} \quad (3)$$

ここで、 ε_c は応力ピーク時のひずみ、 w_d は塑性変位、 L_c は圧縮に対する損傷幅を示す。Van

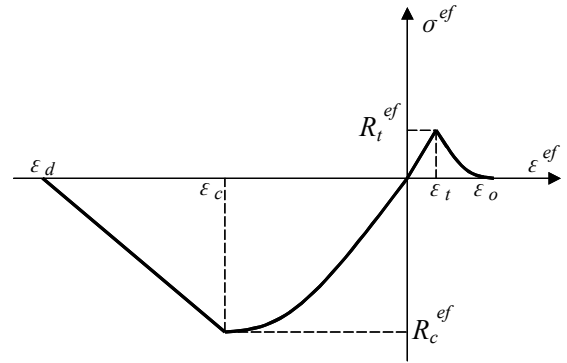


図-1 2軸応力状態に基づいた等価1軸則

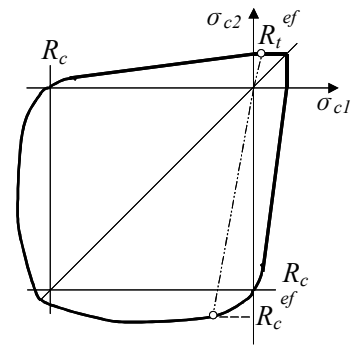


図-2 Kupfer の2軸破壊基準

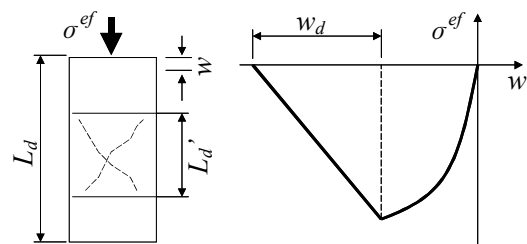


図-3 仮想圧縮平面モデル

Mier の実験⁴⁾より普通コンクリートの場合、 $w_d=0.0005m$ となっている。本解析で対象とした実験では高性能軽量コンクリートを使用しているが、 w_d の値が明確にされていないため普通コンクリートと同じ値を用いた。ひび割れの発生は、任意のコンクリート要素において引張応力がコンクリートの引張強度に達した時と定義し、分散ひび割れモデルを用いた。

3.2 解析モデル

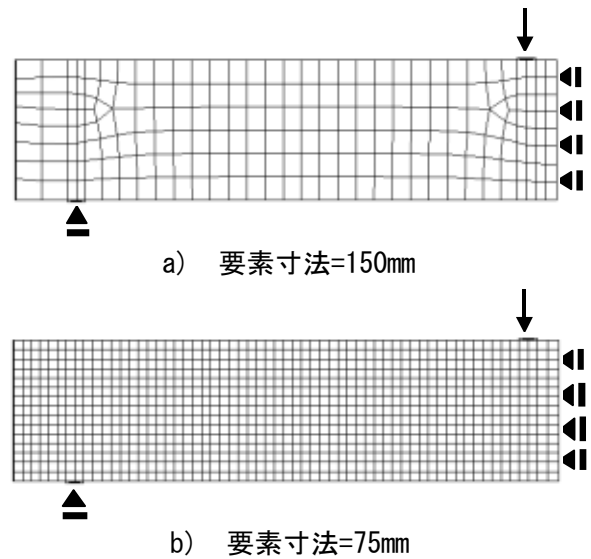
解析モデル図と解析ケースを図-4および表-2に示す。解析に用いた材料物性は表-1に示す値を用いた。

本解析では、要素寸法依存性およびひび割れモデルの違いによる解析結果の妥当性を検討す

るため、要素寸法を 75mm および 150mm とした 2 ケースを設定した。また、ひび割れモデルは固定ひび割れモデルおよび回転ひび割れモデルの 2 ケースを設定し、1 体の供試体につき合計 4 ケースのモデルを設定し解析を実施した。

供試体のモデル化にあたっては、各大型 PC はり供試体の対称性を考慮した 1/2 モデルとした。荷重の載荷は変位制御とし、修正 Newton-Raphson 法を用いて残差力が所定の収束判定基準を満足するまで繰返し計算を行った。

PC 鋼材は、離散バー要素を用い 250mm 間隔でコンクリート要素と接合した。また、プレストレス力は、実験で測定された有効プレストレスをひずみに換算し PC 鋼材の要素に一樣に作用させた。



a) 要素寸法=150mm

b) 要素寸法=75mm

図-4 解析モデル図

4. 解析結果

4.1 荷重-変位関係

各解析ケースの解析結果を表-3に示す。また、fix-75 モデルで解析を実施した各供試体の載荷点荷重とスパン中央変位の関係を図-5に示す。解析値と実験値の最大荷重を比較すると、要素寸法を 75mm と設定したケースのほうが、要素寸法を 150mm と設定したケースよりも実験値をより精度よく評価できている。また、要素寸法が同一の場合、ひび割れモデルの違いによる最大耐力への影響は小さかった。

最大変位については、一部の解析ケースを除いて実験値よりも解析値のほうが小さくなった。これは、PC 鋼材のモデル化に際して離散バー要素を用いコンクリート要素と接合している影響

表-2 解析ケース

解析case	要素寸法		ひび割れモデル	
	75mm	150mm	固定	回転
fix-75	○		○	
fix-150		○	○	
rot-75	○			○
rot-150		○		○

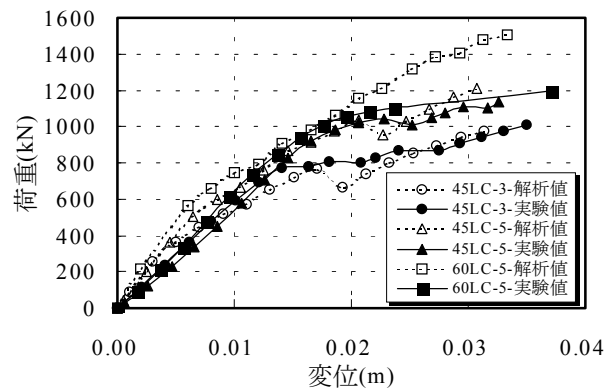


図-5 各供試体の荷重-変位関係

表-3 実験値と解析値の比較

供試体	比較項目	解析値				実験値 ⑤	解析値と実験値の比率			
		fix-75	fix-150	rot-75	rot-150		fix-75	fix-150	rot-75	rot-150
		①	②	③	④		①/⑤	②/⑤	③/⑤	④/⑤
45LC-3	最大荷重 (kN)	975	865	982	1052	1010	0.97	0.86	0.97	1.04
	最大変位 (m)	0.031	0.021	0.031	0.037	0.035	0.89	0.60	0.89	1.06
45LC-5	最大荷重 (kN)	1207	1275	1186	1190	1137	1.06	1.12	1.04	1.05
	最大変位 (m)	0.031	0.032	0.028	0.031	0.033	0.94	0.97	0.85	0.94
60LC-5	最大荷重 (kN)	1506	1569	1424	1593	1200	1.26	1.31	1.19	1.33
	最大変位 (m)	0.033	0.034	0.031	0.038	0.037	0.89	0.92	0.84	1.03

であると思われる。

本解析では、全ての解析ケースにおいて支配的な斜めひび割れが発生している要素の主引張ひずみおよび荷点付近の主圧縮ひずみが卓越することで耐力が低下した。

4.2 ひび割れ状況

実験および解析で得られた 45LC-3 供試体の最大荷重時におけるひび割れ状況を図-6に示す。解析結果の図中の太いひび割れ線は、より大きなひび割れ幅を示している。解析では、(1) 曲げひび割れが進展しない、(2) せん断スパン内を中心に明瞭な斜めひび割れが発生する、(3) 斜めひび割れ上部のコンクリートと引張鋼材でタイドアーチ的な耐荷機構を形成し荷重は上昇する、など実験的に観察されたせん断圧縮破壊特有の顕著な特徴を推定することができた。

実験で得られたひび割れ状況と各解析ケースで得られたひび割れ状況を比較すると、要素寸法を 75mm と設定し固定ひび割れモデルを用いたケースのひび割れパターンが実験結果の主要な斜めひび割れが発生している位置およびひび割れ角度と概ね一致した。この解析結果は、他の供試体においても同様であった。

以上より、本解析に用いた非線形有限要素法では、要素寸法を 75mm とし固定ひび割れモデルを用いることにより実験結果を概ね評価できることが明らかとなった。

5. PC はりのせん断耐荷機構

著者らの実験結果より、せん断圧縮破壊する PC はりの破壊までの過程は、曲げひび割れの延長として斜めひび割れが発達し、その後、斜めひび割れ上部のコンクリートと引張鋼材でタイドアーチ的な耐荷機構を形成し、さらに荷重は上昇する。そして最終的に、荷点付近で斜めひび割れ上部のコンクリートが圧縮破壊し、タイドアーチ的機構の破壊に至っていると思われる。PC はりに導入されるプレストレス力が、このような耐荷機構にどのような影響を与えるのかを解析的に明らかにするため、表-2に示す

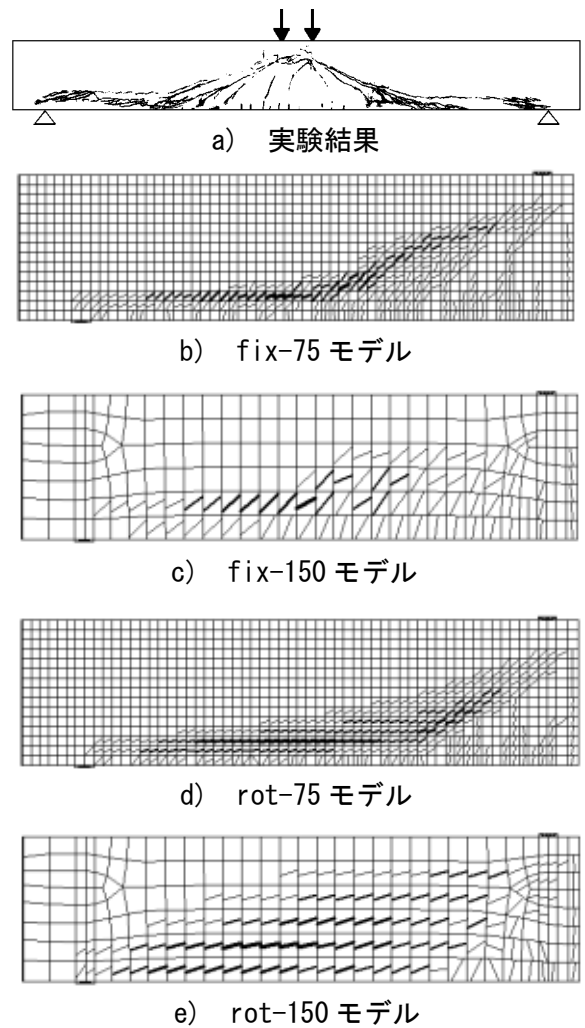


図-6 45LC-3 供試体のひび割れ状況図

解析ケースの中で実験結果を概ね評価できた fix-75 のモデルを用い、45LC-5 および 60LC-5 供試体の導入プレストレス量のみ変化させて検討を行った。プレストレスは、供試体上縁に有害なひび割れが発生しない程度のプレストレス量とし、供試体下縁応力度を $\sigma_{pc}=6.0, 8.0, 10.0\text{N/mm}^2$ にそれぞれ設定した。

5.1 荷重-変位関係

解析結果を表-4に示す。また、60LC-5 供試体の荷点荷重とスパン中央変位の関係を図-7に示す。非線形有限要素解析によっても導入プレストレス量の増加に伴ってせん断耐力が増加することが確認できた。また、変位量が減少することも確認できた。

表-4に示す曲げひび割れ発生荷重は、解析で得られたひび割れ図において、スパン中央に

表-4 解析結果

供試体	下縁導入 プレストレス (N/mm ²)	最大耐力 (kN)	最大変位 (m)	曲げ*1 (kN)	斜め*2 (kN)
45LC-5	$\sigma_{pe}=5.4$	1207	0.031	525	571
	$\sigma_{pe}=6.0$	1278	0.031	643	668
	$\sigma_{pe}=8.0$	1308	0.030	723	772
	$\sigma_{pe}=10.0$	1412	0.030	807	856
60LC-5	$\sigma_{pe}=5.7$	1506	0.033	588	635
	$\sigma_{pe}=6.0$	1556	0.032	664	742
	$\sigma_{pe}=8.0$	1637	0.032	730	795
	$\sigma_{pe}=10.0$	1658	0.030	831	896

*1: 曲げひび割れ発生荷重

*2: 斜めひび割れ発生荷重

曲げひび割れが発生した時点の荷重を示す。また、斜めひび割れ発生荷重は同様にせん断スパン内に明瞭な斜めひび割れが発生した時点の荷重を示す。この2つのひび割れ発生荷重についても、導入プレストレス量の増加に伴って大きくなることが確認できた。

5.2 ひび割れ状況

解析より得られた 45LC-5 供試体の最大荷重時におけるひび割れ状況を図-8に示す。導入プレストレスが増加するのに伴い、斜めひび割れの発生領域が抑制され、圧縮ストラットの幅が増加しているように見うけられる。この現象が導入プレストレス量の増加に伴ってせん断耐力も増加する一つの要因であると考えられる。

5.3 主圧縮ひずみおよび中立軸の検討

せん断圧縮破壊するPCはりのせん断耐力は、最大曲げモーメント区間のコンクリート圧縮領域と大きく関係することが指摘されており^{5),6)}、本検討においてもこの研究成果に着目し検討を行った。

通常、等価応力ブロックの考え方にに基づき算出した中立軸深さ(X_{REC})および最大荷重時において主圧縮ひずみが卓越している深さ(X_{PRI})を表-5に示す。ここで、主圧縮ひずみが卓越している深さは、載荷点付近の主圧縮ひずみが1500 μ 程度以上発生している範囲で、供試体上面からの距離(図-9参照)である。両者を比較すると、通常、等価応力ブロックの考え方にに基づき算出した中立軸深さ(X_{REC})より主圧縮ひず

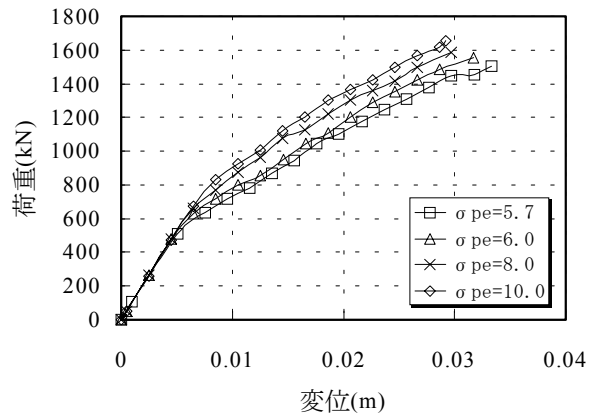


図-7 60LC-5 供試体の荷重-変位関係

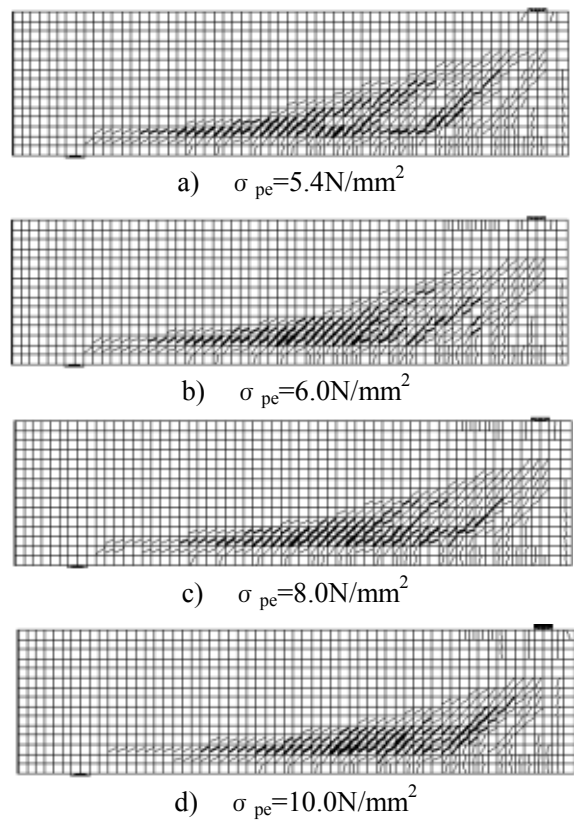


図-8 45LC-5 供試体のひび割れ状況図

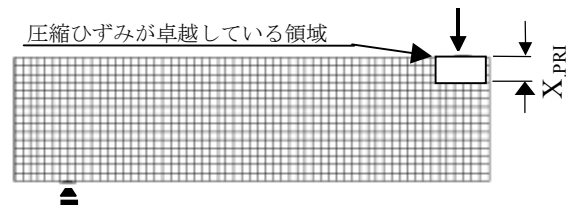


図-9 主圧縮ひずみが卓越している領域の概要図

みが卓越している深さ(X_{PRI})のほうが小さくなった。本検討の範囲においては、その深さ(X_{PRI})が全ての解析ケースにおいて 147mm となった

(約 $0.5X_{REC}$)。一部の解析ケースを用いて、さらに要素寸法を小さくし(35mm), 主圧縮ひずみが卓越している深さを同様に検討した。その結果, 主圧縮ひずみが卓越している深さは同じく $0.5X_{REC}$ 程度となり要素寸法が主圧縮ひずみの卓越する深さに及ぼす影響は認められなかった。

主圧縮ひずみが卓越している深さ(X_{PRI})を用い, 通常の等価応力ブロックの考え方にに基づき算出した圧縮応力(σ_{PRI})および解析より得られた最大荷重時での載荷点付近の圧縮応力(σ_{FEM})を表-5に示す。

通常の等価応力ブロックの考え方にに基づき算出した圧縮応力と解析より得られた圧縮応力の比率は $0.96 \sim 1.19$ の範囲となり概ね圧縮応力を評価できている。従って, 主圧縮ひずみの卓越する深さ(X_{PRI})が PC はりのせん断耐力に関係していると思われる。

今回は, 導入プレストレス量のみを変化させてせん断耐荷機構の検討を行った。しかし, 断面形状のほか, コンクリートの圧縮強度(f'_c), 引張鋼材比(p_w), せん断スパン有効高さ比(a/d), 等のせん断耐力に影響を及ぼす主な要因が変化した場合の主圧縮ひずみの卓越する深さも検討する必要がある。今後は, 今回の結果を踏まえ主圧縮ひずみの卓越する深さを比較的簡易に評価し, PC はりのせん断圧縮耐力評価法を確立していきたいと考える。

6. まとめ

- (1) 本検討に用いた非線形有限要素プログラムによれば, 要素寸法をある程度小さくし, 固定ひび割れモデルを用いることにより実験結果を概ね評価できた。
- (2) 非線形有限要素解析によっても, 導入プレストレス量が増加することに伴ってせん断耐力が増加することおよび変形量が減少することを確認することができた。
- (3) 最大荷重時の載荷点付近において, 主圧縮ひずみが卓越している深さをを用い, 通常の等価応力ブロックの考え方にに基づき算出

表-5 中立軸および圧縮応力

供試体	下縁導入 プレストレス (N/mm^2)	中立軸		圧縮応力		
		X_{REC} (mm)	X_{PRI} (mm)	σ_{PRI} (N/mm^2)	σ_{FEM} (N/mm^2)	$\frac{\sigma_{PRI}}{\sigma_{REC}}$
45LC-5	$\sigma_{pe}=5.4$	344	147	44	39	1.13
	$\sigma_{pe}=6.0$	345	147	44	38	1.16
	$\sigma_{pe}=8.0$	346	147	44	37	1.19
	$\sigma_{pe}=10.0$	347	147	44	37	1.19
60LC-5	$\sigma_{pe}=5.7$	284	147	44	45	0.98
	$\sigma_{pe}=6.0$	284	147	44	44	1.00
	$\sigma_{pe}=8.0$	285	147	44	48	0.92
	$\sigma_{pe}=10.0$	285	147	44	46	0.96

た圧縮応力と解析より得られた圧縮応力は概ね一致した。従って, 主圧縮ひずみが卓越している深さが PC はりのせん断耐力に影響するものと思われるが, 引張鋼材比等のせん断耐力に影響を及ぼす主な要因が変化した場合の検討も必要である。

参考文献

- 1) Mikata, Y., et al. : Effect of Prestress on Shear Capacity of Prestressed Concrete Members, Proceedings of fib Symposium, Prague, pp.331-336, Oct. 1999
- 2) 土木学会 : コンクリート標準示方書・〔設計編〕, pp.60-65, 1996
- 3) 田村聖ほか : 高性能軽量コンクリートを用いた大型 PC はりのせん断耐荷特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.3, pp.709-714, 2001
- 4) Cervenka Consulting : ATENA Program Documentation Part-1 Theory Revision, May. 2000
- 5) 上田多門ほか : せん断補強筋の無いプレストレストコンクリート梁のせん断耐力の解析的研究, プレストレストコンクリート, Vol.33, No.2, pp.60-65, 1991
- 6) 中野清司ほか : プレストレストコンクリート部材のせん断耐力に関する基礎研究, 第3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.33-38, 1992