

超軽量コンクリートを用いた外ケーブル方式T形はりのせん断挙動と FEM 解析

東エン株式会社 正会員 工修 ○井口 淳  
 日本大学 正会員 工博 柳沼 善明

1. はじめに

コンクリートの軽量化は、ビルの高層化や橋梁の長大スパン化、さらに軟弱地盤上への施工などで有利になる。外ケーブル方式のプレストレストコンクリート (以下PC と略) 箱桁橋は、コンクリート断面の外部にPC 鋼材を配置するため、コンクリートのウェブ幅を低減でき、橋梁の軽量化につながる。本研究は、外ケーブル方式箱桁橋のさらなる軽量化を図るために、密度の小さいコンクリートを用いた基礎研究である。

軽量コンクリートを用いたポストテンション方式PRCはりのせん断耐力は、コンクリートの密度が低下するにしたいが、著しく低下することが指摘されている<sup>1)</sup>。したがって、外ケーブル方式箱桁橋へ超軽量コンクリートを使用するには、そのせん断耐力を明確にしなければならない。そこで、本研究は超軽量コンクリート (密度 1200 kg/m<sup>3</sup>程度) を用いた外ケーブル方式T形はりのせん断耐力ならびにせん断挙動を調べ、さらに、非線形の有限要素法 (以下FEMと略) による解析結果の適用性について検討する。

2. 実験概要

実験に用いた供試体は、コンクリート密度の異なる外ケーブル方式T形はり (表-1 参照)、タイプTSは超軽量コンクリートを、タイプTNは普通コンクリートを用いたはりである。外ケーブル方式T形はりのせん断耐力ならびにせん断挙動に及ぼすプレストレス力 $P_0$ の影響を調べるために、 $P_0$ がない鉄筋コンクリート (以下RCと略) はりと、 $P_0$ を2種類に変化させたPRCはりとを、各タイプで作製した

(表-1 参照)。使用したコンクリートの密度はタイプTS、TNでそれぞれ 1200、2300 kg/m<sup>3</sup>程度であり、各タイプの圧縮強度は 35 N/mm<sup>2</sup>を目標とした。

実験に用いた供試体の形状を図-1に示す。鉄筋は、下縁側に D29 を 1 本、上縁側に  $\phi 6$  を 2 本配置し、せん断補強鉄筋としてスターラップ ( $\phi 6$  mm) を垂直に 15 cm 間隔で配置した。外ケーブルとして  $\phi 9.2$  mm の PC 鋼棒を 2 本用いた。使用した鉄筋の材質は SD345 と SR295 で、PC 鋼材の材質は SBPR1080/1230 であった。導入プレストレス力は 50、100 kN の 2 種類である。なお、すべてのはりで曲げ破壊しないように供試体

表-1 供試体の概要

タイプ	供試体名	$P_0$ (kN)	$A_p$ (mm <sup>2</sup> )	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	$A_s'$ (mm <sup>2</sup> )	$A_w$ (mm <sup>2</sup> )	スターラップ 間隔 (mm)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
TS	TS15-0	—	—	642.4	56.34	56.34	150	1200
	TS15-50	50	132.9					
	TS15-100	100						
TN	TN15-0	—	—	642.4	56.34	56.34	150	2300
	TN15-50	50	132.9					
	TN15-100	100						

備考)  $P_0$ はプレストレス力、 $A_p$ はPC鋼材の断面積、 $A_s$ は下縁側鉄筋の断面積、 $A_s'$ は上縁側鉄筋の断面積、 $A_w$ はスターラップの断面積である

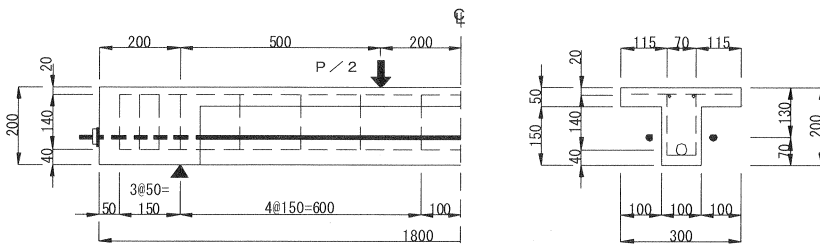


図-1 供試体の形状 (単位: mm)

形状を定めている。

載荷実験は対称二点載荷で、載荷は変位制御 (0.2 mm/分) で行ない、静的にせん断破壊させた。T 形はりには、スパン 1400 mm、せん断スパン 500 mm であった。コンクリートのクリープや乾燥収縮、および PC 鋼材のリラクゼーションの影響を極力少なくするために、プレストレスの導入後ただちに載荷実験を実施した。

使用した材料を表-2に示す。軽量細骨材には、低吸水率の造粒型人工軽量細骨材と硬質パーライトの2種類を用いた。タイプ TS、TN の配合を表-3に示す。なお、表-3中の S1, S2, G1 の数値は絶乾状態の質量である。

3. 実験結果

3.1 材料の力学的特性

T 形はりの載荷時におけるコンクリートの力学的特性を表-4に示す。タイプ TS、TN の引張強度は圧縮強度のそれぞれ約 1/23、1/12 となり、タイプ TS の引張強度はタイプ TN と比較して非常に小さい。曲げ強度についても引張強度と同様な傾向にある。

図-2に代表的な圧縮応力と縦ひずみとの関係を示す。タイプ TN と比較して、タイプ TS ではピーク時応力までの圧縮応力と縦ひずみとの関係はほぼ直線であることがわかる。タイプ TS の挙動がタイプ TN と相違するのは、軽量コンクリートと普通コンクリートとでは骨材周辺の応力状態が相違する<sup>2)</sup> ことにより、供試体内部のひび割れの発生や進行が異なるためであると推察される。

使用した鋼材の力学的性質を表-5に示す。

3.2 ひび割れ状況

図-3に破壊後のひび割れ状況を示す。すべてのはりはせん断圧縮破壊であった。タイプ TS は、曲げひび割れと斜めひび割れがほぼ同時に発生した。ひび割れの発生後、さらに荷重を増加させると、斜めひび割れ先端の上部コンクリートが圧壊してせん断圧縮破壊した。TS15-100 については、支付近の主鉄筋下のカブリコンクリートが剥離した直後に、はりが破壊した。タイプ TN は、まず曲げひび割れが発生し、その後荷重が増加して斜めひび割れが発生した。さらに荷重を増加させると、斜めひび割れの上部コンクリートと主鉄筋とでタイドアーチ的な耐荷機構を形成して、さらに大きな荷重に耐え、最終的にはせん断圧縮破壊となった。

表-2 使用材料

使用材料	記号	種類	適用
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度 3.16 g/cm <sup>3</sup>
混和材	P	高炉スラグ微粉末	密度 2.88 g/cm <sup>3</sup> , ブレーン値 4640 cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S1	造粒型人工軽量細骨材	絶乾密度 0.73 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 3.97 %
	S2	硬質パーライト	絶乾密度 1.04 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 5.70 %
	RS	木更津産山砂	表乾密度 2.62 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.28 %
粗骨材	G1	造粒型人工軽量粗骨材	粒径 5-10 mm, 絶乾密度 0.77 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 5.73 %
	RG	北海道上磯郡産砕石	最大寸法 20 mm, 表乾密度 2.70 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.47 %
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系
	AE	AE助剤	変形アルキルカルボン酸化合物

表-3 コンクリートの配合

タイプ	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								SP (Bx%)	AE (Bx%)
			W	B=(C+P)		S			G			
				C	P	S1	S2	RS	G1	RG		
TS	26.5	43.0	151	462	107	132	88	-	270	-	0.95	0.4
TN	53.0	43.1	176	332	-	-	-	776	-	1021	0.1	-

表-4 コンクリートの力学的特性

タイプ	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	ピーク応力時のひずみ (μ)	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
TS	1240	36.0	12.0	0.222	3040	2.07	1.54
TN	2350	41.1	30.5	0.218	2260	4.59	3.44

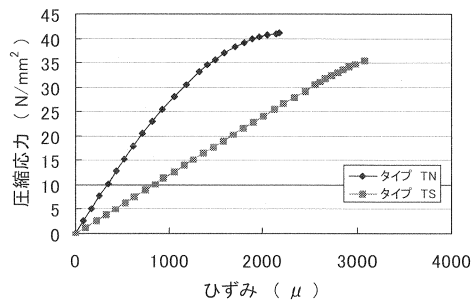


図-2 圧縮応力と縦ひずみとの関係

表-5 鋼材の力学的特性

タイプ	種類	呼び名	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
TS	鉄筋	D29	380	567	175
		φ6	299	464	205
	PC鋼材	φ9.2	1256	1308	200
TN	鉄筋	D29	390	553	177
		φ6	316	457	200
	PC鋼材	φ9.2	1271	1322	201

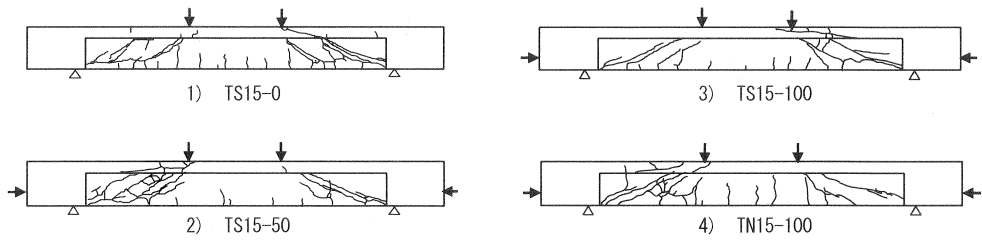


図-3 破壊後のひび割れ状況

3.3 変形状

図-4にタイプTSとTNの変形状を示す。図-4から、タイプTSのTS15-100とTS15-0を比較すれば、プレストレス力の効果によりせん断耐力が増加していることがわかる。また、タイプTSとTNの変形状を比較すると(図-4のTS15-100とTN15-100参照)、コンクリート密度の小さいタイプTSは、タイプTNよりも同一のせん断力でたわみが大きくなっている。これは、主に超軽量コンクリートのヤング係数が普通コンクリートよりも小さいこと(表-4参照)に起因している。さらに、タイプTSのせん断耐力はタイプTNよりも著しく小さい。

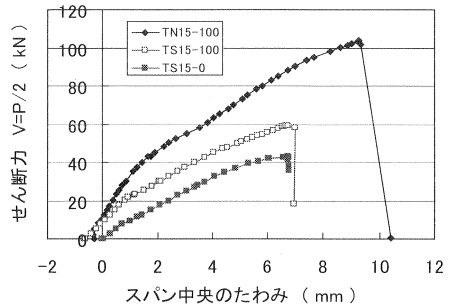


図-4 変形状

3.4 斜めひび割れ発生せん断力とせん断耐力

外ケーブル方式T形はりの載荷実験結果を表-6に示す。ここに、 $V_{dia}$ は斜めひび割れ発生せん断力、 $V_u$ はせん断耐力、 $P_e$ は導入時のプレストレス力、 $P_{e,u}$ は破壊時のプレストレス力である。

図-5に斜めひび割れ発生せん断応力度  $\tau_{dia}$  ( $=V_{dia}/A_{cd}$ ) に及ぼす導入時

表-6 T形はりの載荷実験結果

タイプ	供試体名	$P_e$ (kN)	$V_{dia}$ (kN)	$V_u$ (kN)	$P_{e,u}$ (kN)	破壊形式
TS	TS15-0	—	11.3	41.8	—	せん断圧縮破壊
	TS15-50	57.7	18.6	55.8	70.8	せん断圧縮破壊
	TS15-100	104.8	21.0	59.2	117.6	せん断圧縮破壊
TN	TN15-0	—	30.7	65.5	—	せん断圧縮破壊
	TN15-50	56.5	34.4	73.3	74.7	せん断圧縮破壊
	TN15-100	106.2	42.9	103.3	130.2	せん断圧縮破壊

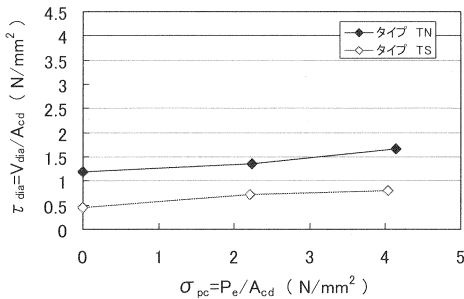


図-5  $\tau_{dia}$ に及ぼす $\sigma_{pc}$ の影響

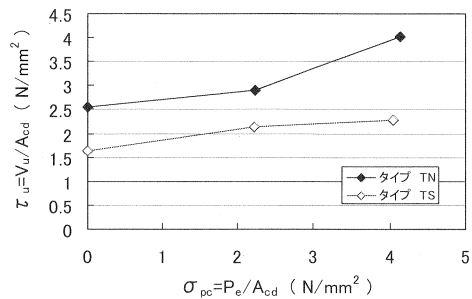


図-6  $\tau_u$ に及ぼす $\sigma_{pc}$ の影響

プレストレス力の平均応力度  $\sigma_{pc}$  ( $=P_e/A_{cd}$ ) の影響を示す。ここに、 $A_{cd}$ はT形はりの断面積である。図-5に

よれば、タイプTS、TNの $\tau_{dia}$ はともに $\sigma_{pc}$ が増加するにしたがい増加する傾向にある。いずれの $\sigma_{pc}$ においても、タイプTSの $\tau_{dia}$ はタイプTNよりも小さく、 $\tau_{dia}$ のタイプTSとTNとの比はRCはりでは0.37、 $\sigma_{pc}$ が約4 N/mm<sup>2</sup>のPRCはりでは0.48である。

図-6に破壊時のせん断応力度 $\tau_u (=V_u/A_{c,d})$ に及ぼす $\sigma_{pc}$ の影響を示す。図-6によれば、タイプTS、TNの $\tau_u$ はともに $\sigma_{pc}$ が増加するにしたがい増加する傾向にあり、プレストレス力の効果が表れている。いずれの $\sigma_{pc}$ においてもタイプTSの $\tau_u$ はタイプTNよりも小さく、 $\tau_u$ のタイプTSとTNとの比は、RCはりでは0.64、 $\sigma_{pc}$ が約4 N/mm<sup>2</sup>のPRCはりでは0.57である。

#### 4. 非線形 FEM 解析の適用性

本 FEM 解析は、2次元有限要素解析プログラム「ATENA ver3.2」を用いた。コンクリート要素は4節点アイソパラメトリック要素を用い、鉄筋とPC鋼棒はバー要素でモデル化した。

FEM 解析での载荷は変位制御で行い、修正 Newton-Raphson 法により残差が所定の収束判定値を満足するまで繰り返し計算を行った。本 FEM 解析では、収束判定値を 0.5 % とし、繰り返し計算の回数は 120 回とした。所定の繰り返し回数を超えて収束判定値内に入らなかった場合には、変位制御の変位量を小さくして、再度繰り返し計算を行った。変位量が初期設定値の 2/100 として収束しなかった場合、強制的に FEM 解析を終了させた。これは、収束しない場合には、節点力、節点変位ならびにエネルギーの誤差を次のステップに持ち越すため、解の精度が保持できないと判断したためである。

せん断破壊する部材の非線形 FEM 解析では、ひび割れ面でのせん断伝達モデルが大きく影響するといわれ、せん断軟化のモデル化によって、解析結果が異なる。せん断軟化を考慮しない場合には、ひび割れ面での過剰なせん断力やストレスロッキングが生じて、解析結果が硬くなる危険性がある<sup>3)</sup>。せん断軟化挙動の解析については、いまだ十分に研究されていない。そこで、解析結果に及ぼすせん断軟化モデルの影響を調べるために、固定ひび割れモデルと回転ひび割れモデルにより解析し、比較検討する。

##### 4.1 構成則

コンクリートの構成則は、2軸応力状態に基づく等価1軸則と Kupfer の2軸破壊基準である<sup>4)</sup>。等価1軸則における引張側の構成則は、引張強度までは線形弾性材料とし、引張強度に達した後はひずみ軟化を考慮して、非線形挙動とした。破壊エネルギー $G_f$ の値は、タイプTNについては土木学会の計算式<sup>5)</sup>にしたがい設定した。コンクリートの単位容積質量が小さくなるにしたがい $G_f$ が小さくなる<sup>6)</sup>ことから、タイプTSの $G_f$ 値は土木学会の計算値の1/5と仮定した。圧縮側の構成則は、圧縮強度に達するまでは放物線の応力-ひずみ関係として、ピーク応力以降は軟化直線を仮定した。軟化勾配は過去の実験<sup>7)</sup>から、軟化直線の傾きをタイプTSでは $2.8E_c$ 、タイプTNでは $0.2E_c$ とした。ここに、 $E_c$ はコンクリートのヤング係数である。要素のひび割れは、分散ひび割れモデルとして解析を行った。固定ひび割れモデルによるせん断剛性モデルはKolmarによるVariableモデル<sup>8)</sup>を用いた。

##### 4.2 解析結果に及ぼす要素寸法依存性

供試体 TN15-100 を対象として、要素寸法を3種類 (12.5, 25, 50mm) に変化させて、要素寸法依存性を調べた結果、要素寸法 25mm の解析結果は、斜めひび割れと曲げひび割れの状況が概ね実験結果と一致している。一方、要素寸法が大きい要素寸法 50mm の解析結果は、斜めひび割れの状況がアーチ状になっている。要素寸法の小さい 12.5mm の解析結果は、主鉄筋に沿ったひび割れや、実験結果では見られないフランジとウェブの境界に沿ったひび割れが顕著に見られる。したがって、本研究では要素寸法を 25mm として FEM 解析を行うものとする。

##### 4.3 ひび割れ状況

タイプTSとTNのひび割れ状況について、固定ひび割れモデルと回転ひび割れモデルによる解析結果と実験結果を図-7に示す。ひび割れ状況には、ひび割れ幅が0.05 mm以上のひび割れのみを表示している。図-7によれば、回転ひび割れモデルによる解析結果は、固定ひび割れモデルによる解析結果よりも、せん断スパン内の広

範囲にひび割れが分布し、ひび割れ本数が多くなっている。

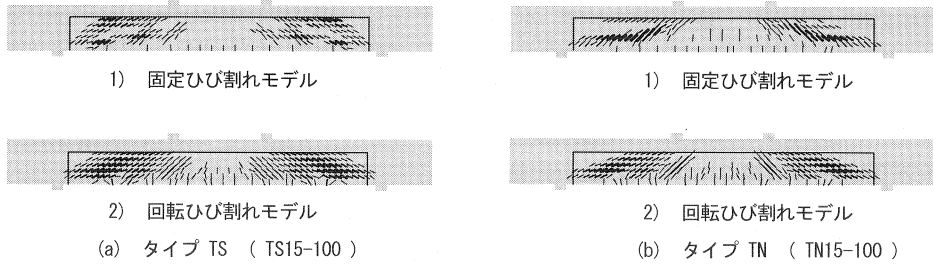
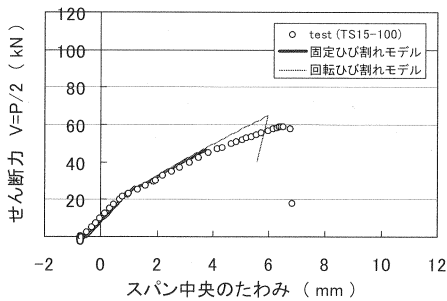


図-7 解析終了後のひび割れ状況

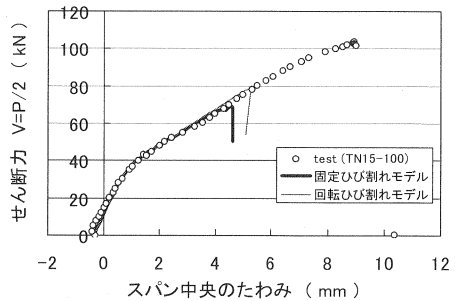
4.4 変形状

せん断力とスパン中央のたわみの関係について、固定ひび割れモデルと回転ひび割れモデルによる解析結果と実験結果を図-8に示す。図-8(a)によれば、タイプTSの変形状は、固定ひび割れモデルによる解析結果では、最大荷重が小さく解析されてはいるものの、実験結果と良く一致している。一方、回転ひび割れモデルでは、最大荷重が大きく解析され、変形状が硬く解析されている。これらの傾向は、TS15-50においても同様である。

固定ひび割れモデルの解析結果は(図-8)、タイプTS、TNともに最大荷重が実験値よりも小さく解析されている。これは、解析されたひび割れの形状と分布(図-7参照)に起因しているもので、ひび割れの状況がPC鋼材の緊張量の増加量ならびに最大荷重の解析に影響を与えているものと考えられる。さらに、ウェブと上部フランジとの境界部分にひび割れが生じ、そのために荷重が増加しなくなっている可能性が考えられる。



(a) タイプ TS (TS15-100)



(b) タイプ TN (TN15-100)

図-8 変形状に及ぼすひび割れモデルの影響

4.5 せん断耐力

せん断耐力 $V_0$ の実験値と解析値との比較を表-7に示す。表-7によれば、タイプTS、TNともに固定ひび割れモデルによる解析値は、回転ひび割れモデルよりも小さく解析され、実験値よりも小さい。一方、回転ひび割れモデルの場合には、TN15-100を除き、タイプTSとTNの解析値は実験値よりも大きく解析されている。プレストレスト力 $P_0$ が大きくなると、解析値が実験値よりも小さくなっている。

表-7  $V_0$ の実験値と解析値との比較

タイプ	供試体名	固定ひび割れモデル		回転ひび割れモデル	
		calc (kN)	test/calc	calc (kN)	test/calc
TS	TS15-0	36.51	1.15	64.35	0.65
	TS15-50	42.58	1.31	64.75	0.86
	TS15-100	46.55	1.27	64.86	0.91
	平均値		1.24	平均値	0.81
TN	TN15-0	51.36	1.28	73.54	0.89
	TN15-50	65.56	1.12	76.38	0.96
	TN15-100	69.05	1.50	78.71	1.31
	平均値		1.30	平均値	1.05

4.6 破壊時の外ケーブル緊張量

破壊時の外ケーブル緊張量 $P_{e,u}$ について、実験値と解析値との比較を表-8に示す。表-8によれば、タイプTS、TNともに固定ひび割れモデルによる解析値は、回転ひび割れモデルよりも小さく計算されている。固定ひび割れモデルと回転ひび割れモデルの解析値はいずれのタイプでも実験値と良く一致している。

表-8  $P_{e,u}$ の実験値と解析値との比較

タイプ	供試体名	固定ひび割れモデル		回転ひび割れモデル	
		calc (kN)	test/calc	calc (kN)	test/calc
TS	TS15-50	67.8	1.04	75.1	0.94
	TS15-100	114.6	1.03	120.5	0.98
	平均値		1.03	平均値	0.96
TN	TN15-50	73.8	1.01	77.7	0.96
	TN15-100	121.4	1.07	125.2	1.04
	平均値		1.04	平均値	1.00

5. まとめ

超軽量コンクリートを用いた外ケーブル方式T形はりのせん断挙動を普通コンクリートのT形はりと比較した結果を、さらにFEM解析の結果を以下にまとめる。

- 1) タイプTSとTNのはりの $V_u$ は、プレストレス力 $P_e$ の増加にしたがい増加する。
- 2) 超軽量コンクリートはりのせん断耐力 $V_u$ は普通コンクリートはりよりも著しく低下する。
- 3) 変形性状において、固定ひび割れモデルの解析結果は実験結果とよく一致しているが、 $V_u$ が小さく解析される。回転ひび割れモデルの解析結果は、せん断力が大きくなると硬く解析される。
- 4)  $V_u$ の解析値は、タイプTS、TNともに固定ひび割れモデルよりも回転ひび割れモデルのほうが大きい。
- 5) 回転ひび割れモデルによる $V_u$ の解析値は、タイプTS、TNともに $P_e$ が小さい場合には実験値と一致する。 $P_e$ が大きい場合には実験値よりも小さく解析される。
- 6) 破壊時の外ケーブル緊張量 $P_{e,u}$ の解析値は、固定ひび割れモデルと回転ひび割れモデル両者ともに、タイプTS、TNの実験値とよく一致する。

以上により、非線形FEM解析において、せん断耐力の解析結果はプレストレスが大きくなるとより安全側に解析されるが、変形性状の解析結果は実験結果と一致している。したがって、超軽量コンクリートを用いた外ケーブル方式T形はりのせん断挙動は非線形FEMで概ね解析できるものと思われる。しかし、非線形FEMの解析精度をさらに上げるためには、圧縮を受けるコンクリートにエネルギーを考慮することや、ひび割れ発生以降のせん断剛性の軟化などに検討すべき点があり、これらについては今後の検討課題である。

最後に、本実験を実施するに当たり日本大学理工学部社会交通工学科構造工学第二研究室の関係者各位に感謝する。なお、本研究は著者が大学院で行ったものである。

参考文献

- 1) 荒井康治・柳沼善明：軽量骨材コンクリートを用いたPCはりのせん断性状，プレストレストコンクリート技術協会，第10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，2000，pp. 545-550
- 2) 岡田清編：最新コンクリート工学，国民科学社，昭和61年，pp. 22-24
- 3) 土木学会：コンクリート構造物の非線形解析技術研究小委員会成果報告書，コンクリート技術シリーズ50，2003，pp. 94-95
- 4) Vladimir Cervenka, Libor Jendele and Jan Cervenka：ATENA Program Documentation Part 1 Theory，2004，pp. 18-26
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，2002年制定，2002，pp. 27-28
- 6) 川口哲生・二羽淳一郎・文載欽・前堀伸平：超軽量人工軽量骨材を使用した普通強度RCはりのせん断耐力，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22，No. 3，2000，pp. 595-600
- 7) 柳沼善明・荒井康治・永海一尚：超軽量コンクリートを用いたPCはりの力学的挙動，日本大学理工学研究所周報，104号，2004，pp. 19-31
- 8) Vladimir Cervenka, Libor Jendele and Jan Cervenka：ATENA Program Documentation Part 1 Theory，2004，p. 29