

論文 トラス鉄筋ハーフプレハブ合成はりの架設系及び完成系における曲げ特性

左東 有次^{*1}・日野 伸一^{*2}・松井 繁之^{*3}・平岩 昌久^{*4}

要旨: トラス鉄筋ハーフプレハブ合成床版の架設系及び完成系のトラス鉄筋の構造的機能を明らかにすることを目的として、架設系及び完成系に対するはり供試体による静的曲げ試験を行った。その結果、架設系においてはトラス鉄筋が曲げ剛性に寄与し、これを考慮した設計を行うことが合理的であること、完成系においてはトラス鉄筋が曲げ耐力や曲げ変形にはほとんど影響しないが、せん断抵抗部材として機能することなどが判明した。

キーワード: ハーフプレハブ合成床版, トラス鉄筋, HPCS 床版, 架設系, 完成系

1. はじめに

プレキャスト PC 板や鋼板を埋め殺し型枠として、上部に現場打ちコンクリートを打設一体化したハーフプレハブ合成床版は近年道路橋等で盛んに採用されている。この床版は、場所打ちコンクリート系床版に比べ、型枠、足場等が不要なため、現場工期が短く、安全性が高く、かつ耐久性にも優れた構造である。これらのハーフプレハブ合成床版の一つとして、溶接されたトラス鉄筋を PC 板内に埋め込んだ合成床版（以下、HPCS 床版と称する）が近年開発され、これまで行われた輪荷重走行試験からも疲労耐久性に優れた床版構造であることが実証されている^{1), 2)}。その原因の一つとして、立体トラス構造をしたトラス鉄筋の荷重分担、変形拘束等の構造的効果が考えられる。しかし、これまでのところ HPCS 床版について施工時（架設系）や合成後（完成系）のトラス鉄筋の構造的機能に関する検討はほとんど行われておらず、トラス鉄筋を考慮した設計法はもちろん整備されていない。

そこで、本研究では、HPCS 床版の架設系及び完成系におけるトラス鉄筋の基本的な構造特性を明らかにすることを目的として、架設系及び完成系における HPCS 床版の耐荷特性をはり供試体による静的曲げ試験により究明した。

2. 実験の概要

2.1 架設系はりの静的曲げ試験

(1) 試験計画

HPCS 床版の架設系における曲げ特性を究明するため、図-1 に示すような幅 600mm、長さ 2200mm のプレテンション PC はり供試体を製作し、静的曲げ試験を行った。PC 板厚及びトラス鉄筋が曲げ剛性や耐力に及ぼす影響を検討するため、供試体は PC 板厚、トラス鉄筋の列数をパラメーターとした表-1 に示す 8 タイプを各 1 体製作した。

(2) 供試体製作

供試体は工場にてプレテンション方式で製作した。コンクリートは設計基準強度 50N/mm² の早強コンクリートを使用し、養生は蒸気養生とした。プレストレスの導入は、コンクリートの圧縮強度が 35N/mm² 以上発現したことを確認して行った。

表-1 架設系はり供試体の種類

タイプ	スパン方向	曲げの向き	PC 板厚	トラス配列
A1P-60	主鉄筋方向	正曲げ	60mm	4列
A1P-75			75mm	4列
A1P-75'			75mm	2列
A1P-90			90mm	4列
A1N-60		負曲げ	60mm	4列
A1N-75			75mm	4列
A1N-75'			75mm	2列
A1N-90			90mm	4列

- *1 九州大学大学院助手 工学研究院 建設デザイン部門 (正会員)
 *2 九州大学大学院助教授 工学研究院 建設デザイン部門 工博 (正会員)
 *3 大阪大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻 工博 (正会員)
 *4 日本カイザー株式会社 本社土木製品グループ課長

使用鋼材の材料特性を表-2に示す。

(3) 載荷試験

載荷試験は図-1に示す支間 2.0m の2点对称載荷で、正曲げと負曲げの2方向について行った。載荷パターンは、ひび割れ発生荷重まで、載荷、徐荷を2回繰り返す、その後破壊まで単調載荷した。各載荷ステップにおいて、供試体のたわみ、コンクリートおよび鉄筋のひずみ、ひび割れの発生とその進展状況などを測定した。

2.2 完成系はりの静的曲げ試験

(1) 試験計画

HPCS 床版の完成系における構造特性を究明するため、図-2に示すような PC 板厚が 75mm、後打ちコンクリート厚が 105mm の合成はり供試体を製作し、静的曲げ試験を行った。供試体の幅は、主鉄筋方向を 600mm、配力鉄筋方向を 500mm としたが、長さはいずれも 2200mm とした。供試体は、スパン方向、曲げ方向、トラス鉄筋の列数、配置間隔をパラメーターとした表-3に示す計 12 タイプを各 1 体製作した。ただし、トラス鉄筋

が 4 列、2 列の供試体においては軸方向鉄筋量を同一とし、トラス鉄筋のみの数量を変化させた。負曲げ供試体は、図-2に示す正曲げ供試体とトラス鉄筋、PC 鋼材の配置は同一であるが、後打ちコンクリート部に引張補強筋として主鉄筋方向では D19 を 8 本、配力鉄筋方向では D19 を 7 本追加した。

(2) 供試体製作

供試体は、架設系と同様にプレテンション方式で PC 板部を製作し、材令 2 週間後に上部に後打ちコンクリートを打設した。ただし、配力鉄筋方向の PC 板部は RC 構造である。コンクリートは PC 板部を設計基準強度 50N/mm²、後打ち部を 35N/mm² のいずれも早強コンクリートを使用した。コンクリートの養生は、PC 板部を蒸気養生、後打

表-3 完成系はり供試体の種類

タイプ	スパン方向	曲げの向き	トラス鉄筋
B1P-T4	主鉄筋方向	正曲げ	有 (4列)
B1P-T2			有 (2列)
B1P-N		負曲げ	無
B1N-T4			有 (4列)
B1N-T2			有 (2列)
B1N-N			無
B2P-T4	配力鉄筋方向	正曲げ	15cm間隔
B2P-T2			30cm間隔
B2P-N			無
B2N-T4		負曲げ	15cm間隔
B2N-T2			30cm間隔
B2N-N			無

表-2 使用鋼材の材料特性

種類	記号	降伏値 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
鉄筋	SD295A	345	200
トラス斜筋	SWRM8	343	200
PC鋼より線	SWPR7BL	1863	191

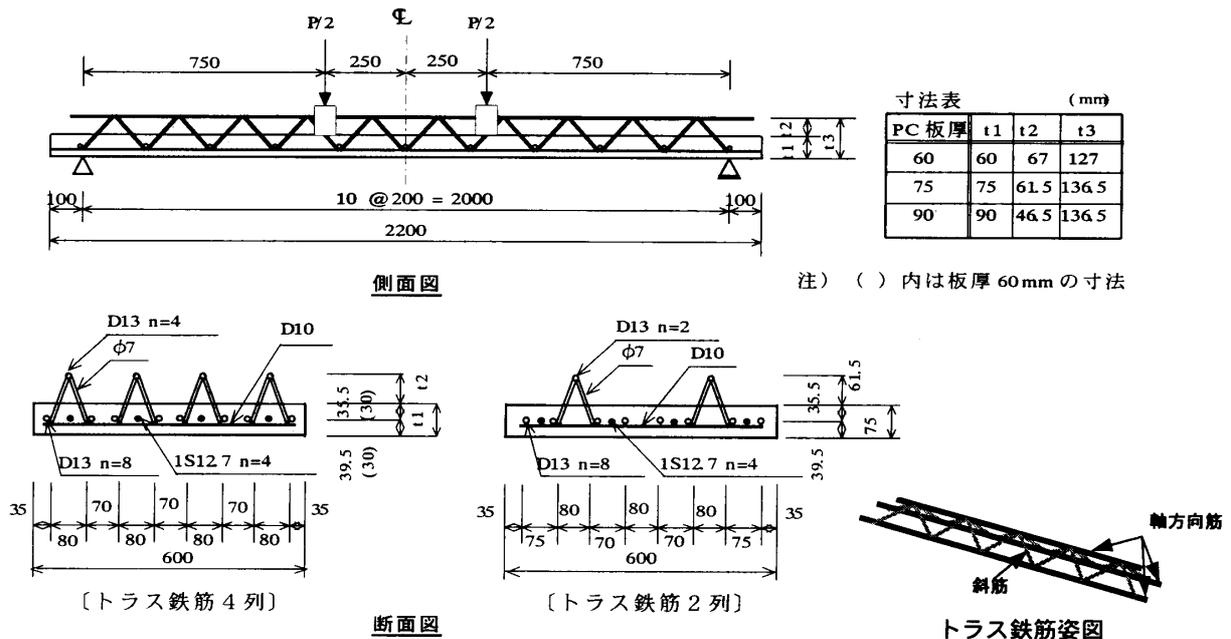


図-1 架設系はり供試体構造図 (正曲げ)

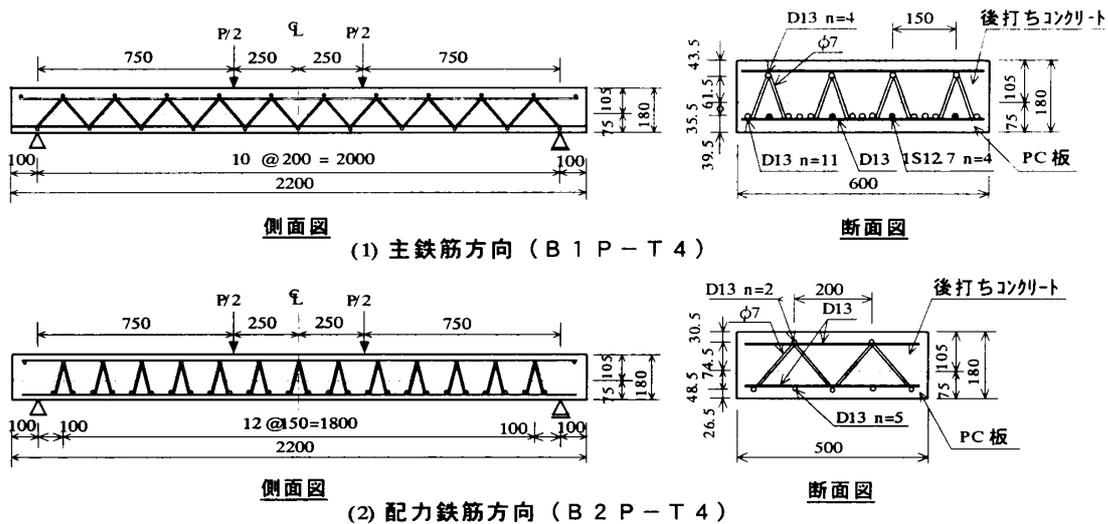


図-2 完成系はり供試体構造図(正曲げ)

ち部を養生マットによる湿潤養生とした。鉄筋、トラス鉄筋及びPC鋼より線の材質は架設系と同一である。

(3) 載荷試験

載荷試験は、図-2に示す支間2.0mの2点対称載荷で正曲げと負曲げの2方向について行った。荷重は供試体全幅に線載荷させた。載荷パターンは、ひび割れ発生荷重まで単調載荷とし、その後載荷徐荷を繰り返しながら荷重を増加させて供試体を破壊させた。各載荷ステップにおいて、供試体のたわみ、コンクリート及び鉄筋のひずみ、PC板と後打ちコンクリートのずれ量、ひび割れの発生とその進展状況などを測定した。

ひび割れ発生荷重の計算値は、次式により求めたひび割れ発生モーメント M_{cr} より算出した。

$$M_{cr} = (f_{bk} + \sigma_{pe} + \sigma_d) \times W_{OL} \quad (1)$$

ここに、 M_{cr} : ひび割れ発生モーメント

f_{bk} : コンクリートの曲げ強度

σ_{pe} : 引張縁の有効プレストレス

σ_d : 供試体自重による引張縁の曲げ応力度

W_{OL} : コンクリートの引張抵抗を考慮した引張縁の断面係数

3. 実験結果及び考察

3.1 架設系はりの静的曲げ試験

(1) ひび割れ発生荷重

架設系はり供試体のひび割れ発生荷重の計算値と実験値及びコンクリートの材料特性を表-4に示す。計算値は一般にPC板の設計で用いられるPC板断面のみを考慮したタイプI断面と、PC板断面に加えてトラス鉄筋の上下軸方向筋を考慮したタイプII断面について、それぞれひび割れ発生荷重を算出した。実験値は目視によるひび割れ

表-4 ひび割れ発生荷重と破壊荷重の実験値と計算値(架設系はり供試体)

タイプ	曲げの向き	コンクリート(PC板)		ひび割れ発生荷重						破壊荷重			破壊形式	
		圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	計算値(kN)		③実験値 (kN)	実験値/計算値		計算値(kN)		③実験値 (kN)	実験値/計算値		
				①タイプI	②タイプII		③/①	③/②	①タイプI	②タイプII		③/①		③/②
A1P-60	正曲げ	50.3	35.5	16.6	49.0	44.1	2.66	0.90	31.2	77.5	66.9	2.14	0.86	トラス上筋座屈後、コンクリート圧壊
A1P-75		56.1	35.5	20.7	45.8	46.6	2.25	1.02	42.0	90.5	79.1	1.89	0.87	
A1P-75'		56.1	35.5	20.5	34.8	36.8	1.79	1.06	41.8	66.8	54.7	1.31	0.82	
A1P-90		56.1	35.5	37.7	55.3	56.4	1.50	1.02	73.3	129.6	109.0	1.49	0.84	
A1N-60	負曲げ	52.9	34.5	16.9	56.9	46.6	2.76	0.82	32.0	81.9	85.8	2.68	1.05	引張鉄筋降伏後、コンクリート圧壊
A1N-75		57.8	35.1	25.8	52.7	41.7	1.62	0.79	49.8	107.0	118.4	2.38	1.11	
A1N-75'		57.8	35.1	25.5	40.7	36.8	1.44	0.90	49.4	80.1	88.3	1.79	1.10	
A1N-90		57.8	35.1	23.3	39.1	34.3	1.47	0.88	49.4	106.8	124.0	2.51	1.16	

発生荷重である。表より、いずれの供試体のひび割れ発生荷重も、タイプⅠ断面の計算値より40%以上大きく、タイプⅡ断面の計算値に近づいている。特に、正曲げ供試体では実験値と計算値はほぼ等しくなっている。このことより、トラス鉄筋はひび割れ発生まで部材剛性に大きく寄与していることがわかる。

(2) 破壊荷重

架設系はり供試体の破壊荷重の計算値と実験値を表-4に示す。計算値は鉄筋やコンクリートの強度特性の実験値を用いて、コンクリート標準示方書の曲げ耐力算定式³⁾に準じて算出した。また、ひび割れ発生荷重と同様にタイプⅠ断面とタイプⅡ断面について計算値を求めた。表より、いずれの供試体の破壊荷重も、タイプⅠ断面の計算値に比べて最小でも30%以上実験値が大きくなっており、特に負曲げ供試体では2倍以上の場合も少なくなく、タイプⅡ断面の計算値に近づいている。これより、負曲げ供試体では、破壊までト

ラス鉄筋が有効に抵抗したといえる。一方、正曲げ供試体では、トラス鉄筋の上筋が降伏点以下で格点間を座屈長とする局部座屈を生じたため、タイプⅡ断面の計算値の90%以下で破壊した。

(3) 曲げ性状

架設系はり供試体の支間中央における荷重-たわみ曲線とトラス鉄筋の荷重-ひずみ曲線を図-3, 4に示す。計算値はトラス鉄筋を考慮したタイプⅡ断面のRC弾性理論値である。図-4より、トラス鉄筋のひずみは、正曲げでは1100 μ 付近から上筋の局部座屈により急増しているのに対し、負曲げは1700 μ 付近から下筋の引張降伏により顕著な増加傾向を示している。ただし、正曲げでも、たわみ、鉄筋ひずみともにひび割れ発生まで計算値と実験値はほぼ等しく、全断面有効の挙動を示している。このことより、トラス鉄筋は圧縮側の鉄筋が座屈するまで、はりの曲げ剛性に有効に寄与していると考えられる。負曲げでは、ひび割れ発生後も急激な剛性低下は認められない。

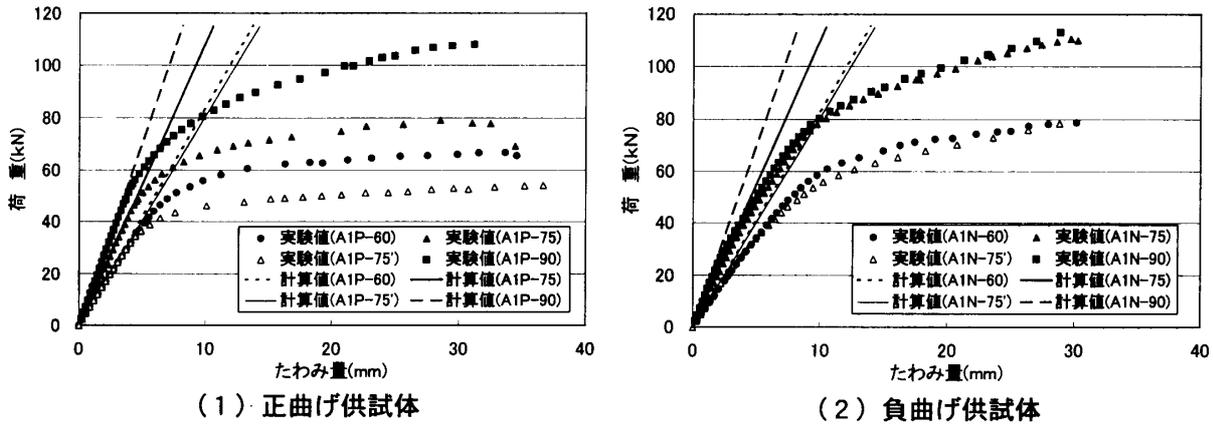


図-3 荷重-たわみ曲線 (架設系) (支間中央)

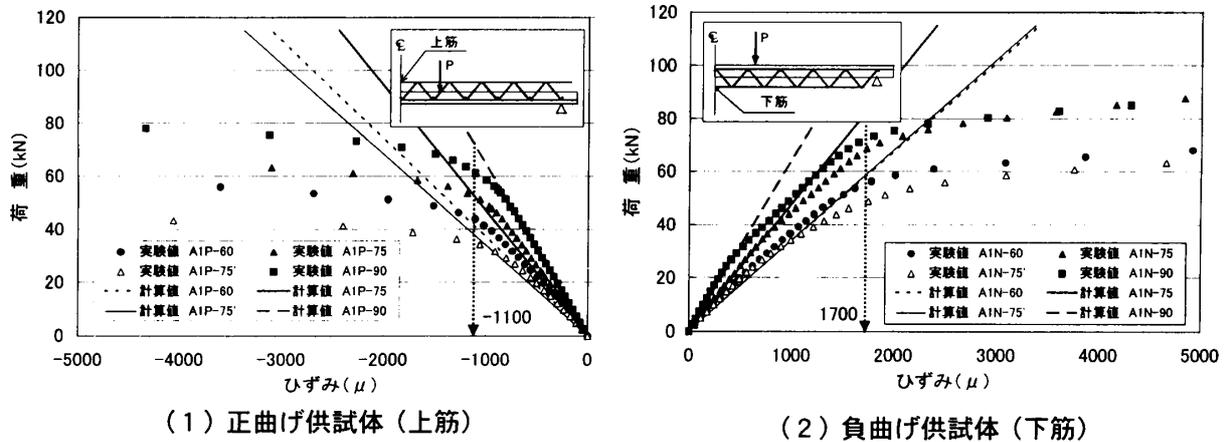


図-4 トラス鉄筋の荷重-ひずみ曲線 (架設系)

PC 板厚の違いによるたわみや鉄筋ひずみを比較すると、正曲げではその差が顕著に見られるが、負曲げではひび割れ発生後の A1N-75 と A1N-90 に差はほとんど見られない。これは、中立軸付近のコンクリート断面の曲げ剛性への影響が小さいことを示すものと考えられる。

トラス鉄筋の列数の違いによるたわみや鉄筋ひずみの差は、PC 板厚 75mm の供試体を比較すると顕著に見られる。このことより、トラス鉄筋の剛性がはりの剛性に大きく影響することがわかる。

以上より、HPCS 床版の架設系では、トラス鉄筋の曲げ剛性への寄与は無視できず、これを考慮した設計を行うことが合理的であると考えられる。

3.2 完成系はりの静的曲げ試験

(1) ひび割れ発生荷重

前記(1)式により求めた完成系はり供試体のひび割れ発生荷重の計算値と実験値を表-5に示す。ひび割れ発生荷重はいずれの供試体とも、計算値に対して実験値が小さくなっている。これは、架設系においては実験値と計算値がほぼ等しかったことから考えると、PC板と後打ちコンクリートの材令差によるクリープ差や乾燥収縮差の影響ではないかと考えられる。

(2) 破壊荷重

表-5に完成系はり供試体の破壊荷重の計算値と実験値を示す。曲げ破壊荷重の計算値は架設系はり供試体と同様にコンクリート標準示方書の曲げ耐力算定式に準じて求めた。また、せん断破壊荷重の計算値は材料特性の実験値を用いて、コ

ンクリート標準示方書のせん断耐力算定式³⁾に準じて求めた。なお、トラス鉄筋の斜筋はせん断破壊荷重の計算にのみ考慮している。表より、曲げ破壊した供試体の破壊荷重は実験値と計算値がほぼ等しく、また、トラス鉄筋量による曲げ耐力の差はほとんど認められない。このことより、完成系はり供試体では、トラス鉄筋を含む軸方向筋とPC鋼材の引張抵抗を考慮したRC理論で曲げ耐力を評価するのが妥当であると考えられる。トラス鉄筋のないB1P-N, B1N-N, B2N-Nなどがせん断破壊しており、せん断破壊した供試体の破壊荷重は、B1P-N, B1N-Nで実験値が計算値より少し大きくなったが、その他の供試体では実験値と計算値はほぼ等しくなっている。これより、トラス鉄筋は主鉄筋方向、配力鉄筋方向ともせん断補強筋として有効に機能していること、また、それらのせん断耐力評価に既往のRC構造のせん断耐力式が適用できることが明らかになった。

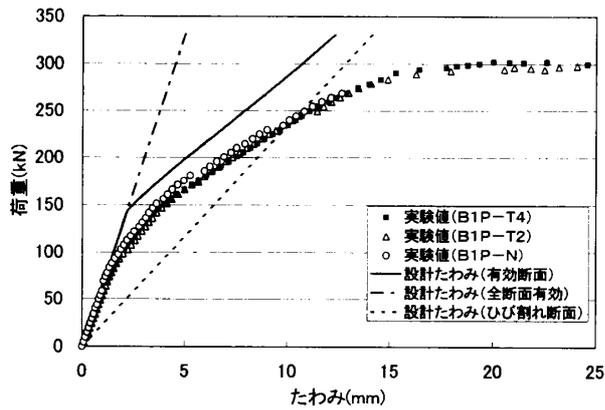
(3) 曲げ性状

主鉄筋方向の荷重-たわみ曲線を図-5に示す。正曲げ、負曲げともトラス鉄筋量による曲げ剛性の差はほとんど見られない。正曲げ供試体では、ひび割れ発生荷重の100kN付近まで、実験値は全断面有効の計算値とほぼ等しいが、負曲げ供試体では、荷重初期から実験値がひび割れ断面の理論値と近い挙動を示している。これは、載荷試験前に供試体に発生していた微小クラックの影響であると考えられる。

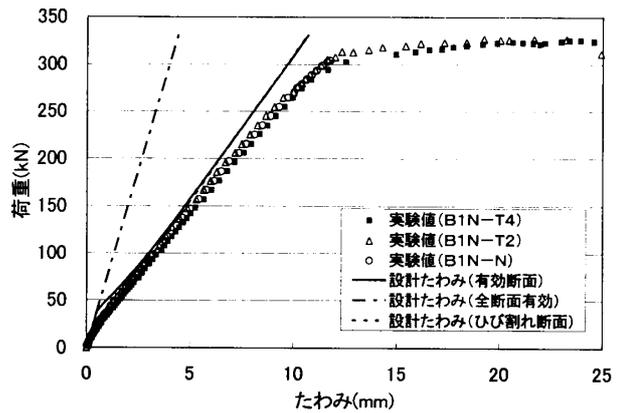
図-6に主鉄筋方向正曲げ供試体のトラス鉄筋の荷重-ひずみ曲線を示す。図より、トラス鉄

表-5 ひび割れ発生荷重と破壊荷重の実験値と計算値 (完成はり供試体)

タイプ	スパン方向	曲げの向き	コンクリート(PC板)		コンクリート(後打ち部)		ひび割れ発生荷重			曲げ破壊荷重			せん断破壊荷重			破壊形状
			圧縮強度ヤング係数		圧縮強度ヤング係数		理論値	実験値	変位係数	理論値	実験値	変位係数	理論値	実験値	変位係数	
			(N/mm ²)	(kN/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN)	(kN)	理論値	(kN)	(kN)	理論値	(kN)	(kN)	理論値	
B1P-T4	主鉄筋方向	正	51.7	33.9	30.6	28.5	144.2	93.1	0.65	320.0	302.2	0.94	377.2	-	-	曲げ破壊
B1P-T2			51.7	33.9	30.6	28.5	136.9	97.6	0.71	320.0	298.0	0.93	285.9	-	-	曲げ破壊
B1P-N			54.5	33.7	30.1	30.3	121.7	88.0	0.72	318.7	-	-	193.5	264.3	1.37	せん断破壊
B1N-T4		負	54.5	33.7	30.1	30.3	38.1	14.7	0.39	312.3	325.1	1.04	435.2	-	-	曲げ破壊
B1N-T2			54.5	33.7	30.1	30.3	38.0	17.0	0.45	311.9	323.6	1.04	348.4	-	-	曲げ破壊
B1N-N			54.5	33.7	30.1	30.3	37.9	17.8	0.47	311.9	-	-	261.6	303.9	1.16	せん断破壊
B2P-T4	配力鉄筋方向	正	49.5	33.1	29.6	30.7	41.2	32.0	0.78	91.4	102.9	1.13	243.1	-	-	曲げ破壊
B2P-T2			49.5	33.1	29.6	30.7	41.2	29.2	0.71	91.4	96.0	1.05	185.5	-	-	曲げ破壊
B2P-N			49.5	33.1	29.6	30.7	41.2	29.2	0.71	91.4	107.8	1.18	127.9	-	-	曲げ破壊
B2N-T4		負	49.5	33.1	29.6	30.7	35.2	26.8	0.76	281.2	310.4	1.10	345.3	-	-	曲げ破壊
B2N-T2			49.5	33.1	29.6	30.7	35.2	29.2	0.83	281.2	-	-	288.1	274.1	0.95	せん断破壊
B2N-N			49.5	33.1	29.6	30.7	35.2	39.0	1.11	281.2	-	-	230.8	245.5	1.06	せん断破壊



(1) 正曲げ供試体



(2) 負曲げ供試体

図-5 荷重-たわみ曲線 (完成系 (主鉄筋方向)) (支間中央)

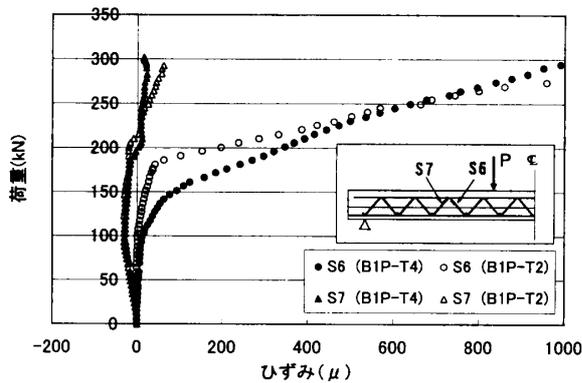


図-6 トラス鉄筋の荷重-ひずみ曲線 (完成系 (主鉄筋方向正曲げ))

筋量によるトラス鉄筋のひずみの差は明確に見られなかった。これは、いずれの供試体とも曲げ破壊していることより、コンクリートのせん断抵抗が大きいと、トラス鉄筋の負担するせん断力が小さかったためと考えられる。なお、載荷試験時に PC 板と後打ちコンクリートのずれ量を測定したが、いずれの供試体ともほとんどずれは生じず、トラス鉄筋のずれ止め機能は確認できなかった。これは、PC 板をハウキ目仕上げとしたため、コンクリート打継面のずれ止め抵抗が十分に大きかったためと考えられる。

4. まとめ

架設系および完成系 HPCS 床版の主鉄筋、配力鉄筋の各方向を対象とした供試体の静的曲げ試験の結果、以下のような結論を得た。

①架設系では、正・負曲げいずれの荷重状態でもトラス鉄筋の HPCS 床版の曲げ剛性への影響は

大きく、これを考慮した設計を行うのが合理的である。

②架設系では、正曲げの場合はトラス上筋の座屈により、また負曲げの場合には引張鉄筋の降伏による曲げ破壊により終局となる。

③架設系では、ひび割れ発生以前の使用状態における PC 板のたわみや各部の応力はトラス鉄筋を考慮した RC 弾性理論で評価できる。

④完成系では、トラス鉄筋を含む軸方向筋と PC 鋼材の引張抵抗を考慮した RC 理論で曲げ耐力を評価できる。

⑤完成系では、トラス鉄筋はコンクリートのせん断抵抗部材として機能し、そのせん断耐力評価に既往の RC 構造のせん断耐力式が適用できる。

なお、本実験は「ハーフプレハブ合成床版研究会」(委員長 松井繁之大阪大学教授)の研究活動の一環として実施したものである。最後に、供試体製作に多大なご協力を戴いた東海コンクリート工業(株)ならびに貴重なご助言を賜った本研究会委員各位に対し、心より感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) Shigeyuki Matsui, Hirokazu Hiragi, Hajime Nashiwa: Proc. Of Developments in Short and Medium Span Bridge Engineering'94, 1994
- 2) 建設省土木研究所:道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書(その2), pp.198~218, 1999
- 3) 土木学会:コンクリート標準示方書(平成8年版)設計編, pp.53~56, pp.59~65, 1996