

(70) プレストレスの導入された鉄骨鉄筋コンクリート梁の力学性状に関する基礎的研究

オカモトハルヒコ ヒラデトオル タブチ マサミチ サダモテルマサ
 榊竹中工務店 正会員 岡本晴彦 ○平出亨 田淵勝道 定本照正

1. はじめに プレストレスの導入された鉄骨鉄筋コンクリート梁（以下P S R C梁と略記）ではS R C梁およびP R C梁と比較して、梁成の低減や大スパン化が可能となり、設計の自由度の拡大が図れるが、設計に際しては現行の規準及び既往の研究成果では必ずしも十分ではない。このような現状を踏まえ、本研究ではP S R C梁の耐力、復元力特性、及びひびわれ性状等の基礎的な力学性状を実験的に明らかにすることを目的とする。

2. 試験体 表-1に試験体の断面仕様を、表-2~4に使用材料の機械的性質を示す。試験体数は全部で8体あり、2つのシリーズに分けられる。シリーズIでは、曲げ降伏モーメントが同一となるように鉄骨量と鉄筋量を変化させ、平均プレストレスは同一とした ($\sigma_g = 33 \text{ kgf/cm}^2$)。このうち試験体PRC-1は鉄骨量がゼロの比較用P R C梁である。これに対して、シリーズII中の3試験体では、平均プレストレスを変化させ ($\sigma_g = 0, 33, 50 \text{ kgf/cm}^2$)、鉄骨量と鉄筋量は一定とした。さらに比較用としてP R C梁のPRC-0と鉄骨梁のS-0の2体を設定した。試験体のコンクリート断面寸法は全て同一である。プレストレスの導入はプレテンション法により材令一日（蒸気養生 60℃ 4時間）で行った。

表-1 試験体の断面仕様

試験体	シリーズ I			シリーズ II				
	PSR-1	PSR-2	PRC-1	PRC-0	PSR-0	PSR-02	SRC-0	S-0
断面								
主筋	上	2-LD10	2-LD10	2-LD10	2-LD10	2-LD10	2-LD10	—
	下	2-LD10	2-LD19	4-LD19	2-LD10	2-LD10	2-LD10	—
あばら筋	LD13□ @100			LD10□ @100				
鉄骨	H-260-85-4.5-9	H-260-60-4.5-6	—	—	H-260-85-6-19	H-260-85-6-19	H-260-85-6-19	H-260-85-6-19
P C 鋼材	4-SWPR7A	4-SWPR7A	4-SWPR7A	4-SWPR7A	4-SWPR7A	6-SWPR7A	—	—
プレス入力	33.3 ton	33.3 ton	33.3 ton	33.3 ton	33.3 ton	50.0 ton	—	—

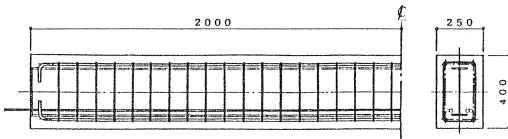


表-2 コンクリートの機械的性質

試験期間	試験体名	材令 (日)	圧縮強度 F_c (kgf/cm ²)	弾性係数 $E_{1.5} \times 10^4$ (kgf/cm ²)	割裂強度 F_t (kgf/cm ²)
プレス導入直前	PRC-1, PSR-1	1	288	—	—
	PSR-02	1	347	—	—
	PRC-0, PSR-0	3	418	—	—
	SRC-0, PSR-02	3	472	—	—
実験時	PRC-1, PSR-1	36	545	3.02	32.3
	PSR-02	31	528	2.87	35.7
	PRC-0, PSR-0	36	505	2.24	29.4
	SRC-0, PSR-02	22	582	2.82	31.5

表-3 鉄筋及び鉄骨の機械的性質

	呼び名	規格	降伏強度	引張強度	降伏ひずみ	ヤング係数	伸び (%)
			σ_y (kgf/cm ²)	σ_u (kgf/cm ²)	$\epsilon_y (\times 10^{-4})$	$E \times 10^4$ (kgf/cm ²)	
鉄筋	D10	SD30A	3500	4921	1880	1.87	19.5
	D10*	SD30A	3666	5480	2030	1.95	23.3
	D13	SD30A	3628	5217	1918	1.92	18.4
	D19*	SD35	3986	6128	2152	1.98	16.5
	鉄骨	ウェブ	4.5 SS41	2622	3508	1413	2.04
フランジ		6.0 SS41	3519	4234	1650	2.13	30.5
ウェブ		9.0 SS41	3466	4770	1623	2.17	30.1
フランジ		19.0* SS41	3760	4247	2448	2.09	23.0
			2818	4401	1821	2.12	24.5

注) *印はシリーズIIの試験体使用材料を示す。

表-4 P C 鋼より線の機械的性質

公称径 ϕ (mm)	種類	降伏荷重 P_y (kg)	引張荷重 P_u (kg)	伸び (%)	ヤング係数 $E (\times 10^4 \text{ kgf/cm}^2)$	リフトオフ (%)
10.8	SWPR7A	12700*	13500	6.1	1.97	1.51

注) * : 0.2% オフセット

3. 加力・計測方法 加力装置

装置を図-1に示す。スパンを3mとして試験体を単純支持し、中央部を2点载荷した。スパン中央部の長さ400mmの領域が純曲げ区間となっている。

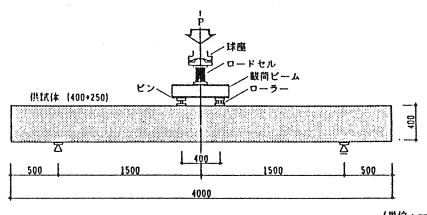


図-1 加力装置

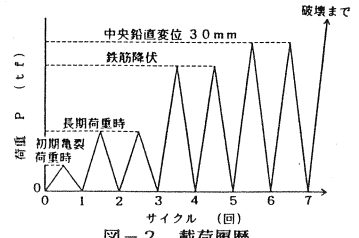


図-2 载荷履歴

る。载荷履歴を図-2に示す。図-3に変位測定位置を示す。鉛直変位6ヶ所と純曲げ区間内の平均曲率を測定するための上下縁の軸方向変形4ヶ所の測定を行った。また、試験体の各部の鉄筋、鉄骨、及びPC鋼材のひずみをひずみゲージにより測定した。

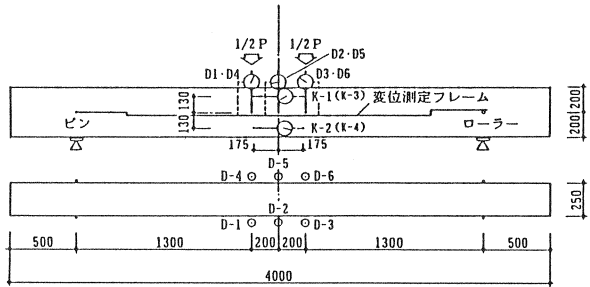


図-3 変位測定位置

4. 実験結果及び考察

4.1 破壊経過 シリーズI

の試験体1体の荷重P-たわみδ関係実験値を図-4に、シリーズIIの試験体5体のモーメントM-曲率φ関係実験値の包絡線を図-5に示す。

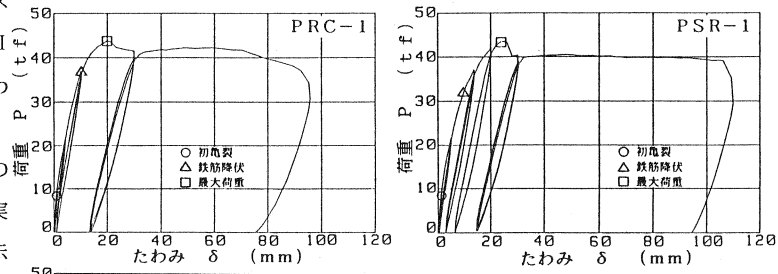


図-4 荷重-たわみ関係

す。PSRC梁の破壊経過は大略以下の通りであった。初曲げひびわれは試験体の純曲げ区間の中央下端に発生した。これにより、P-δ関係、あるいはM-φ関係における剛性がやや低下した。徐々に曲げひびわれの本数が増加し、また曲げひびわれの長さも進展した。試験体のスパン中央位置で鋼材の降伏が起これば、剛性はさらに低下した。スパン中央上端においてコンクリートの圧壊が発生した時点で、やや耐力が低下した。結果的にその直前の耐力が試験体の最大耐力となり、以降は耐力の上昇を見ることなく変形のみ増大した。多くの試験体ではPC鋼材の破断により耐力が急激に低下し、载荷を終了した。

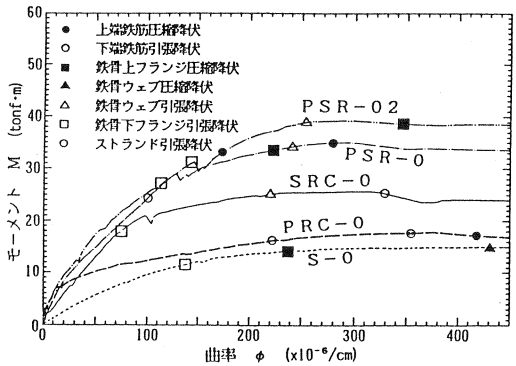


図-5 M-φ関係実験値

表-5 実験結果一覧

荷重レベル		シリーズ I						シリーズ II							
		PSR-1		PSR-2		PRC-1		PRC-0		PSR-0		PSR-02		SRC-0	S-0
		実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	実験値
初きれつ	モーメント (t・m)	5.85	7.80 9.24	5.53	8.00 9.00	5.18	8.00 8.61	5.82	7.20 7.79	2.76	7.67 10.8	5.23	10.1 14.9	3.22	-
	曲率 ($\times 10^{-6}/\text{cm}$)	11.0	19.0 18.9	13.0	19.0 19.9	11.0	20.0 18.9	10.0	20.2 27.3	3.74	18.2 27.3	11.5	21.0 37.5	10.6	-
鋼材降伏	モーメント (t・m)	20.8	20.8 19.1	22.1	22.2 19.2	24.0	22.4 -	16.3	12.0 -	27.3	25.3 24.4	24.6	30.0 26.1	17.8	11.5
	曲率 ($\times 10^{-6}/\text{cm}$)	57.0	100 133	119	104 138	114	103 -	223	96.9 -	115	111 126	102	116 126	74.6	137
最大荷重	モーメント (t・m)	28.3	28.9 20.0	29.8	29.5 22.6	28.5	28.9 23.6	17.8	21.1 14.8	35.1	33.7 28.8	39.3	39.4 30.2	25.7	15.4
	曲率 ($\times 10^{-6}/\text{cm}$)	231	293 178	314	277 206	291	294 199	377	398 294	297	298 294	297	287 389	314	601

注) 計算値の上段の値は層分割モデル、下段は単純累加モデルによる。

4.2 耐力評価 試験体

断面の平面保持を仮定し、断面を複数の層に分割した弾塑性解析（以下層分割モデルと略記）により $M-\phi$ 関係計算値を求め、実験値と共に図-6、7に、実験結果一覧表を表-5に示す。初曲げひび割れ発生時の M 、 ϕ についてはいずれの試験体においても計算値は実験値よりも大きい、これはコンクリートの乾燥収縮によると考えらる。総括的に、層分割モデルは PSRC 梁の $M-\phi$ 関係を適切に推定できると判断される。すなわち、曲げひびわれ発生、曲げ降伏、および最大耐力時のモーメント及び曲率の計算値は実験値と良い対応を示す。また、 $P-\delta$ 関係を以下の方法で検討した。通常の算定式から求めた PRC 梁のひびわれ荷重、降伏荷重、及び、PRC 梁のプレストレスを RC 柱の軸力と対応させて求めた RC 柱の剛性低下率³⁾から PRC 梁の $P-\delta$ 関係をトリリニアにモデル化した。鉄骨梁の $P-\delta$ 関係は、全塑性モーメントを折れ点に対応させたバイリニアにモデル化し、同一たわみ条件で PRC 梁の荷重と鉄骨梁の荷重を単純累加することにより PSRC 梁の $P-\delta$ 関係計算値を求めた（以下単純累加モデルと略記）。PSR-0 について単純累加モデルによる計算値と実験値を比較したものを図-8に示す。両者は比較的良く対応しており、PSRC 梁の $P-\delta$ 関係は単純累加モデルによって評価できると考えられる。

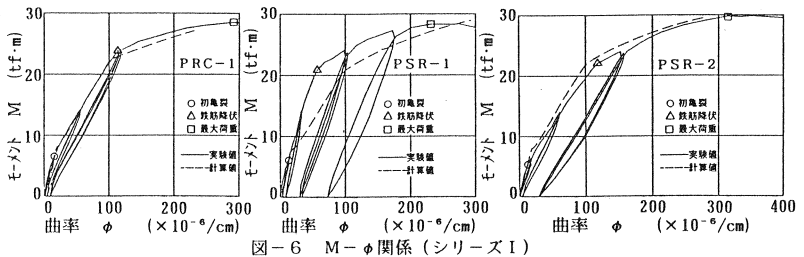
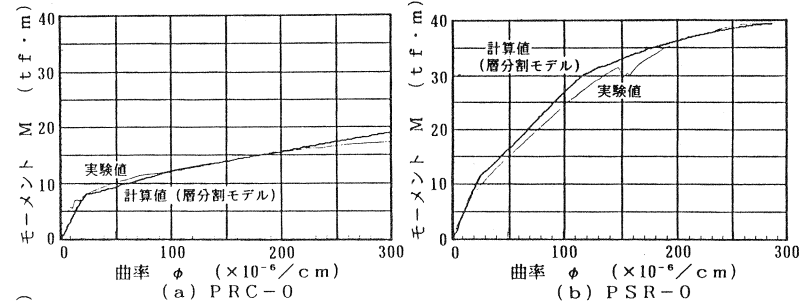
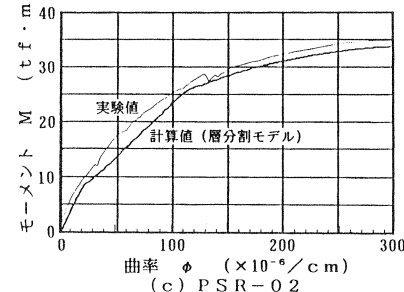


図-6 $M-\phi$ 関係(シリーズI)



(a) PRC-0

(b) PSR-0



(c) PSR-02

図-7 $M-\phi$ 関係(シリーズII)

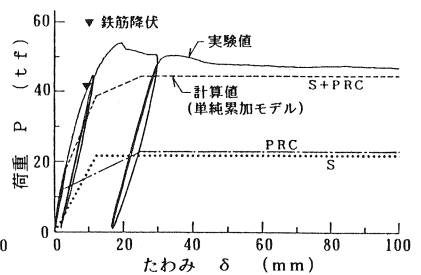


図-8 $P-\delta$ 関係(PSR-0)

4. 3 履歴ループ性状

シリーズIIについて、各サイクルでのM、 ϕ 実験値をそのサイクルのピーク時のM、 ϕ 実験値で除して無次元化した履歴ループ形状を図-9に示す。PSR-0とPSR-02のループ形状はSRC-0のそれと同じであり、P S R C梁の無次元化ループは平均プレスト

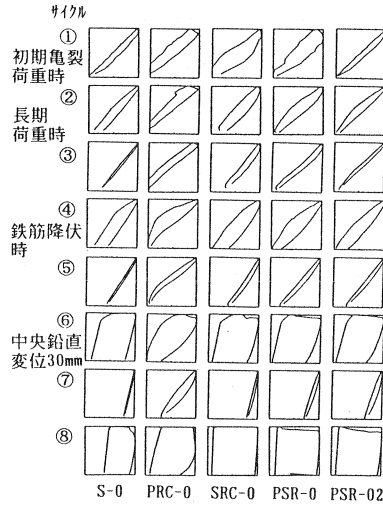


図-9 M- ϕ 関係の無次元化履歴ループ形状

レスの変化にかかわらず同じ形状であることがわかる。各サイクルでのピーク時の曲率実験値に対しての(残留変形量)/(ピーク時変形量)の値を図-10に示す。内部に鉄骨を有する3体は同一曲率においてPRC梁よりもこの残留変形の比率が大きく、鉄骨梁に近い履歴特性を持っている事がわかる。

4. 4 ひびわれ性状

a. ひびわれ分布性状及び平均ひびわれ間隔 シリーズIのうち、PSR-1の最終破壊状況を図-11に示す。シリーズIでは初ひびわれ発生から降伏までの間は内部の鉄骨の断面の多い試験体のほうがややひびわれの分散性が悪い傾向が見られたが、降伏以後は3体ともほぼ同様のひびわれ分布性状を示した。シリーズIIの各試験体の最終破壊状況を図-12に、平均ひびわれ間隔実験値とモーメントの関係を図-13に示す。平均ひびわれ間隔実験値は試験体の純曲げ区間長を同区間に発生したひびわれ本数で除した値である。PSR-02では鉄筋降伏以降も新たなひびわれが発生し、平均ひびわれ間隔が減少しており、P S R C梁においてもP C鋼材量が多くなるとひびわれの分散性が良くなる事がわかる。

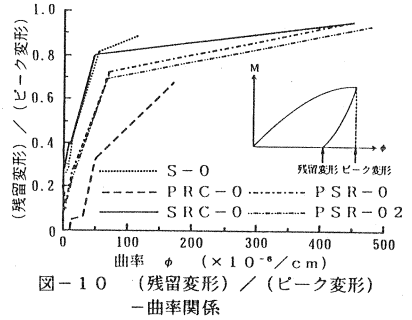


図-10 (残留変形)/(ピーク変形) - 曲率関係



図-11 最終破壊状況 (PSR-1)

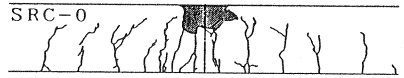
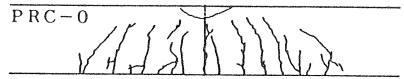


図-12 最終破壊状況 (シリーズII)

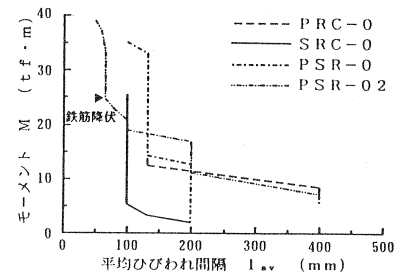


図-13 平均ひびわれ間隔-モーメント関係

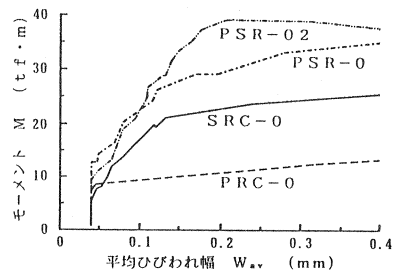


図-14 平均ひびわれ幅-モーメント関係実験値

b. 平均ひびわれ幅 シリーズIIの各試験体の平均ひびわれ幅実験値-モーメント関係を図-14に示す。この実験値は純曲げ区間内に発生したひびわれの下端鉄筋高さにおける幅をクラックゲージにて測定したものの平均値であ

る。同一モーメントにおける平均ひびわれ幅実験値はSRC-0、PSR-0、PSR-02の順に小さくなっている。ひびわれ幅を制御するためにプレストレスを与える事はP S R C梁においても有効な手段であると考えられる。内部に鉄骨を有する3体に観察される、載荷モーメントに対して平均ひびわれ幅実験値がほぼ比例関係にある傾向はPRC-0には見られないものであり、PSR-02は最大耐力時付近までこの傾向が続く。PRC-0、PSR-0、PSR-02の3体について層分割モデルから鋼材の応力を求め、文献2)の算定式により平均ひびわれ幅を算定した。図-15(a)にPRC-0についてこの計算値とモーメントとの関係を実験値と比較したものを示す。計算値は実験値よりも若干大きいですが、両者は良く一致している。従って、層分割モデルによる平均ひびわれ幅の計算値によってPRC梁の平均ひびわれ幅は評価できると考えられる。P S R C梁に対しては平均ひびわれ幅を算定する場合、内部の鉄骨のフランジの扱い方法が問題となる。ここでは以下の算定方法①②③で平均ひびわれ幅計算値を求め、実験値と比較検討した。

算定方法①：平均ひびわれ間隔を算定する時のみ鉄骨の存在を無視する方法：鉄筋応力をP S R C断面の層分割モデルにより算定し、平均ひびわれ間隔のみ鉄骨の存在を無視して求め、両者を用いて平均ひびわれ幅を求める。PSR-0とPSR-02について算定結果を図-15(b),(c)に示す。同一モーメントに対する平均ひびわれ幅計算値は実験値よりも大きい。また計算値ではひびわれ幅が急激に増加し始める時点のモーメントが実験値よりも低く、この点でもPRC-0の場合の実験値と計算値との対応と異なっていることがわかる。

算定方法②：鉄骨のフランジを等価な鉄筋に置換する方法：断面積と周長が、各々、フランジと鉄筋とで等しくなるような等価鉄筋にフランジを置換できると仮定する。その等価鉄筋径と普通鉄筋径とを平均した(平均の方法はフランジと普通鉄筋の断面積比による加重平均)平均鉄筋径に対し、平均ひびわれ間隔を算定する。この平均ひびわれ間隔と、フランジと普通鉄筋の重心位置におけるフランジと普通鉄筋の平均鋼材応力を用いて平均ひびわれ幅を算定する。PSR-0について平均ひびわれ幅を算定したものを図-16に示す。同一モーメントに対する平均ひびわれ幅に関して、この算定方法②

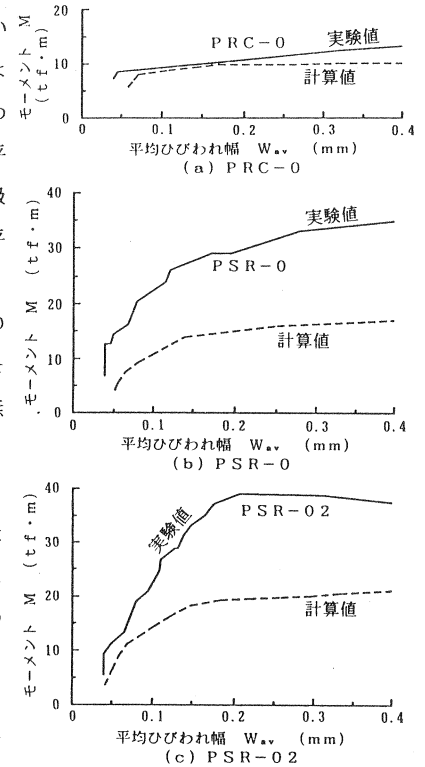


図-15 平均ひびわれ幅-モーメント関係

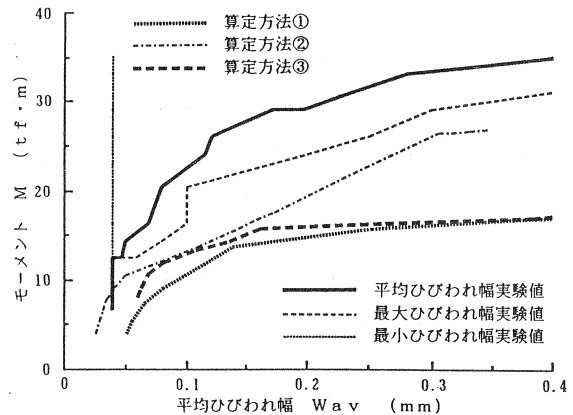


図-16 ひびわれ幅-モーメント関係 (PSR-0)

は算定方法①よりも実験値との対応は良いが、実験値のおよそ2倍程度のひびわれ幅を与えている。

算定方法③：単純累加モデルを利用する方法：単純累加モデルを用いて、あるたわみに対するP S R C梁の荷重に占めるP R C梁の荷重の分担比率を算定する。この分担比率を用いてP S R C梁の荷重実験値からP R C梁分担分の荷重を求め、それに対してP R C梁の平均ひびわれ幅を算定し、これをP S R C梁の荷重実験値に対する平均ひびわれ幅とする。PSR-0について平均ひびわれ幅を求めたものを図-16に示す。算定方法③による計算値は算定方法①による計算値とほぼ同じであることがわかる。また同図にはPSR-0の実験値のばらつきを見るために、ひびわれ幅実験値の最大値と最小値をプロットしてある。同一モーメントに対する算定方法①及び算定方法③による平均ひびわれ幅計算値は最大ひびわれ幅実験値よりも大きい傾向を示した。算定方法②の仮定には付着応力及びコンクリートの有効引張断面の評価等に多少の無理があり、算定方法①及び算定方法③が設計には適用できる可能性が高いと考えられる。

5. まとめ

鉄骨鉄筋コンクリート構造にプレストレスを導入した梁(P S R C梁)の単純梁形式の一方方向加力実験を行ない、以下の事項が明らかとなった。

- (1) 平面保持の仮定による断面層分割弾塑性解析手法(層分割モデル)はP S R C梁のモーメントM-曲率 ϕ 関係を適切に推定できる。すなわち、曲げひびわれ発生、曲げ降伏、および最大耐力時のモーメント及び曲率の計算値は実験値と良い対応を示す。
- (2) 通常の算定式から求まるP R C梁のひびわれ荷重、降伏荷重、及び剛性低下率からP R C梁の荷重-たわみ関係をトリリニアに、鉄骨梁のそれをバイリニアにモデル化し、両者を同一たわみ条件で単純累加した計算値(単純累加モデル)によってP S R C梁の荷重-たわみ関係を評価することができる。
- (3) 本実験で採用したパラメータの範囲内ではP S R C梁の無次元化ループの性状は平均プレストレスに依存せず、P R C梁のものよりもS R C梁の性状に近い。
- (4) P R C梁と曲げ降伏モーメントが同一になるように設計されたP S R C梁は降伏までの初期段階ではひびわれの分散性に関してP R C梁よりもやや劣るが、降伏以後はほぼ同様のひびわれ分布性状を示した。P C鋼材量を多くしたP S R C梁においても良好なひびわれ分散性状が得られた。平均ひびわれ幅の算定に関しては、平均ひびわれ間隔を算定する時のみ鉄骨の存在を無視する方法、及び単純累加モデルを利用する方法による計算値は最大ひびわれ幅実験値よりも大きい傾向を示し、これらの算定方法が設計に適用できる可能性が高いと考えられる。

謝辞 試験体の製作に際しては黒沢建設株式会社 尾高英雄氏の御協力を得た。ここに謝意を表する。

参考文献) 1) 岡本晴彦、平出亨、石井修、田淵勝道、定本照正、プレストレスを導入した鉄骨鉄筋コンクリート梁に関する基礎的研究、その1~3、1989、1990年、日本建築学会大会学術講演梗概集。2) 日本建築学会、プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種P C)構造設計・施工指針・同解説、1986年。3) 日本建築学会、鉄筋コンクリート構造設計標準・同解説、1982年。