

論文 せん断補強筋のないPCはり部材のせん断耐力に及ぼすプレストレスの効果

三方 康弘*¹・井上 晋*²・小林 和夫*³・仁枝 保*⁴

要旨：本研究では、断面下縁のプレストレス量ならびに断面内のプレストレス分布を変化させたせん断補強筋を配置していないPCはり部材の載荷試験を行い、コンクリートが負担するせん断力に及ぼすプレストレスの効果について、実験的に検討した。また、種々のせん断耐力式ならびに修正圧縮場理論を用いてせん断耐力を算定し、実験値と比較検討することにより、各種耐力式の評価を試みた。

キーワード：PCはり、修正圧縮場理論、プレストレス、コンクリート負担せん断力

1. はじめに

現行の各種基準類に示されているせん断耐力式において、プレストレスを含む軸方向力の影響についてはディコンプレッションモーメントを用いて表現されている場合が多い。しかしながら、ディコンプレッションモーメントによって評価する場合、軸方向力の影響は断面引張縁の応力度の大きさのみによって評価され、断面内の応力分布形状の影響は考慮されないことになる。また、この考え方はもともと CEB-FIP MC1978¹⁾で採用されていたものであるが、現行の CEB-FIP MC1990²⁾ではこの考え方は採用されていない。したがって、ディコンプレッションモーメントを用いた軸方向力の影響の評価に関しては、従来より限界があると考えられており³⁾、軸方向(圧縮)力の影響を合理的に評価できる設計手法の確立が望まれている。

本研究では、断面下縁のプレストレス量ならびにプレストレス分布を変化させたせん断補強筋を配置していないPCはり部材の載荷試験を行うとともに、Collins らの提唱する修正圧縮場理論⁴⁾を用いて純せん断耐力を算出し、実験および解析の両面からコンクリートが負担するせん断力に及ぼすプレストレスの効果について

検討した。

2. 実験概要

本実験で用いたPCはり部材の断面形状・寸法を図-1に示す。PC鋼材には $\phi 19$ ($f_{pu}=1277\text{N/mm}^2$) PC鋼棒を用いた。実験要因として、プレストレスによる断面下縁の応力を 0N/mm^2 、 2.0N/mm^2 、 3.0N/mm^2 、 4.0N/mm^2 の4種類とした。また、断面内のプレストレスの分布形状として、断面の応力を上縁 0N/mm^2 、下縁 4.0N/mm^2 (三角形分布)と上縁 2.0N/mm^2 、下縁 4.0N/mm^2 (台形分布)と上縁 4.0N/mm^2 、下縁 4.0N/mm^2 (長方形分布)の3種類を選定した。さらに、コンクリート強度として、 $f'c=40\text{N/mm}^2$ 、 80N/mm^2 の2種類を選定した。これらの要因の組合せにより合計12体のはり供試体を製作した。それらの詳細を表-1に示す。なお、軸方向鉄筋ならびにせん断補強筋は配置しておらず、計算上はすべてのはりがせん断破壊するようにPC鋼材量を選定している。載荷方法は全長1750mmに対し曲げスパン400mm、せん断スパン450mmとした ($a/d=3.21$) 対称二点集中荷重方式とし、載荷時には荷重、スパン中央たわみ、コンクリートの主引張・主

*1 大阪工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 大阪工業大学助教授 工学部土木工学科, 工博 (正会員)

*3 大阪工業大学教授 工学部土木工学科, 工博 (正会員)

*4 大阪工業大学講師 工学部土木工学科 (正会員)

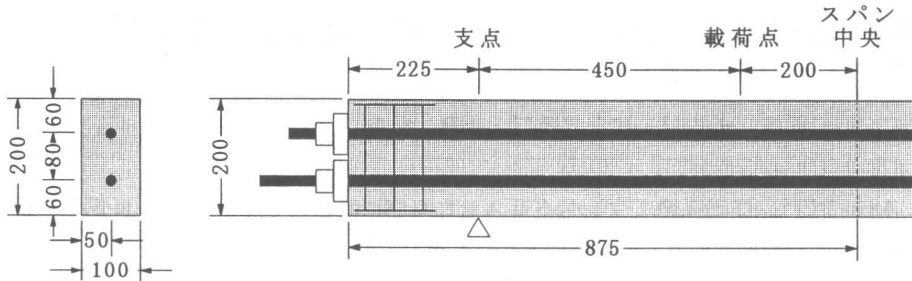


図-1 供試体の断面図・寸法 (単位mm)

圧縮・軸方向ひずみ等を測定した。

3. 解析方法

せん断耐荷挙動を解析する手法として、修正圧縮場理論を用いた。修正圧縮場理論はコンクリート要素に関するモールのひずみ円から得られる2つのひずみ適合条件式とモールの応力円から求められる軸力、モーメント、せん断力と外力に関する3つの釣り合い条件式によって、コンクリートの主圧縮応力と主引張応力、斜めひび割れの傾斜角を求めようとするものである。修正圧縮場理論において用いられているコンクリートの応力-ひずみ曲線の圧縮域を式(1)に、引張域を式(2)に示す。修正圧縮場理論による純せん断耐力はせん断補筋のない場合、式(3)より算出される。なお、解析に用いるコンクリートの引張強度としては、Collinsらが推奨する式(4)⁴⁾を用いた。

$$f_2 = f'_c \left[2 \left(\frac{\varepsilon_2}{0.002} \right) - \left(\frac{\varepsilon_2}{0.002} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$f_1 = E_c \varepsilon_1 \quad (\varepsilon_{cr} \leq \varepsilon_1 < 0) \quad (2)$$

$$V = V_c = f_1 b_w j d \cot \theta \quad (\text{KN}) \quad (3)$$

$$f_t = 0.33 \lambda \sqrt{f'_c} \quad (\lambda = 1.00 : \text{N/mm}^2) \quad (4)$$

ここに、 f_1 : 主引張応力、 f_2 : 主圧縮応力、 f'_c : コンクリートの圧縮強度、 ε_1 : 主引張ひずみ、 ε_2 : 主圧縮ひずみ、 E_c : コンクリートのヤング係数、 ε_{cr} : 斜めひび割れ発生時ひずみ、 b_w : ウェブ幅、 $j d$: 圧縮合力作用位置から引張鋼材図心位置までの距離、 θ : 圧縮斜材角 (斜めひび割れの傾斜角)

4. 結果および考察

4.1 せん断耐力に及ぼす軸方向圧縮力の影響

土木学会コンクリート標準示方書⁹⁾および道路橋示方書⁶⁾では、コンクリートが負担するせん断力に及ぼす軸方向圧縮力の効果を評価するパラメータとして、次式で表される係数(β_n , k)を用いている。

$$\beta_n = k = 1 + M_0/M_d \approx 1 + 2M_0/M_u \quad (N'_d \geq 0 \text{ の場合}) \quad (5)$$

ただし、 $\beta_n > 2$ となる場合は2とする。

M_0 : ディコンプレッションモーメント、 M_u : 曲げ耐力、 M_d : 設計曲げモーメント、 N'_d : 設計軸方向圧縮力

ここでは、以下に示すコンクリート標準示方書、道路橋示方書、ACI CODE⁷⁾で規定されているせん断耐力式ならびに二羽らの式⁸⁾にプレストレスの効果として β_n により補正したせん断耐力式 (以下、二羽式と表示) による算定値および修正圧縮場理論による解析値と実測値を比較検討した。(ただし、部材係数 $\gamma_b=1.0$)なお、式中の記号の意味については各参考文献参照。

i) コンクリート標準示方書

$$V_{cd} = \frac{\beta_d \beta_p \beta_n f_{vcd} b_w d}{\gamma_b} \quad (6)$$

ii) 二羽式

$$V_{cd} = 0.94 (f'_{ca})^{1/3} \beta_d \beta_p \beta_n \{0.75 + 14/(a/d)\} b_w d \quad (7)$$

iii) 道路橋示方書

$$S_c = k \tau_a b_w d \quad (8)$$

表-1 供試体の詳細および実験結果

供試体	実コンクリート強度 f'_c (N/mm ²)	*1 プレストレス量 (N/mm ²)		せん断破壊荷重 (計算値) P_{uu} (KN)		*2 曲げ破壊荷重 (計算値) P_{ub} (KN)	せん断ひび割れ発生荷重 (実測値) P_{cs} (KN)	最大荷重 (実測値) P_u (KN)	*3 破壊形式
		上縁 σ'_{ca}	下縁 σ_{ca}	コンクリート標準示方書	修正圧縮場理論				
P-0-0	41.9	0.0	0.0	35.3	52.0	117.5	52.0	87.4	せん断圧縮
P-0-20		0.0	2.0	38.9	61.0	120.9	55.4	98.3	せん断圧縮
P-0-30	43.0	0.0	3.0	40.8	65.4	124.4	54.8	105.2	せん断圧縮
P-0-40		0.0	4.0	42.4	68.8	126.0	64.1	96.3	せん断圧縮
P-20-40		2.0	4.0	42.5	77.8	123.1	73.7	103.0	せん断圧縮
P-40-40		4.0	4.0	42.7	84.6	120.4	81.7	96.4	せん断圧縮
HP-0-0	82.8	0.0	0.0	44.3	73.8	171.7	65.8	150.1	せん断圧縮
HP-0-20		0.0	2.0	47.5	83.6	172.9	80.0	148.8	曲げ
HP-0-30	79.6	0.0	3.0	48.4	87.2	170.9	82.9	148.2	せん断圧縮
HP-0-40		0.0	4.0	49.8	91.4	171.5	88.9	159.9	せん断圧縮
HP-20-40		2.0	4.0	49.8	101.6	171.4	92.2	168.5	せん断圧縮
HP-40-40		4.0	4.0	49.8	109.2	171.3	109.9	181.5	せん断圧縮

*1 $\sigma_{ca}=0, \sigma'_{ca}=0$ の供試体は P C 鋼棒を非緊張の状態 で配置し、グラウト注入のみを実施したものである

*2 断面分割法による曲げ解析を用いた。応力-ひずみモデルはコンクリート標準示方書による

*3 曲げ破壊した供試体において、P C 鋼棒は降伏していません

iv) A C I CODE

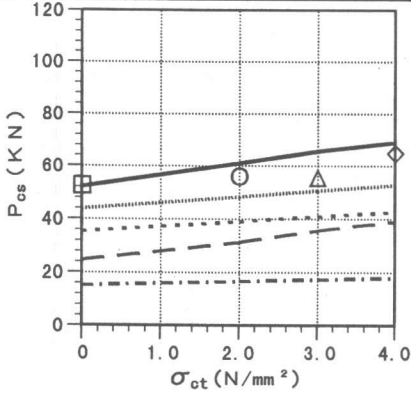
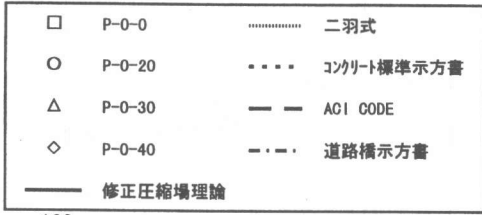
$$V_{ci} = 0.05\sqrt{f'_c}b_w d + \frac{V_i}{M_{max}} M_{cr} \quad (9)$$

表-1 に供試体の詳細および実験結果，コンクリート標準示方書および修正圧縮場理論から算出したせん断破壊荷重を示す。ほとんどの供試体は最終的にせん断圧縮破壊したが，せん断ひび割れ発生後，タイドアーチ的耐荷機構が形成されること，また，P C 鋼棒の図心軸からの偏心距離が小さく，P C 鋼棒がせん断ひび割れ発生後のせん断力のある程度負担している可能性があること等から，せん断補強筋を配置していないにもかかわらず，せん断ひび割れ発生後，さらに大きな荷重に抵抗する傾向を示し，なかには最終的に曲げ破壊に至る供試体 (HP-0-20) もみられた。

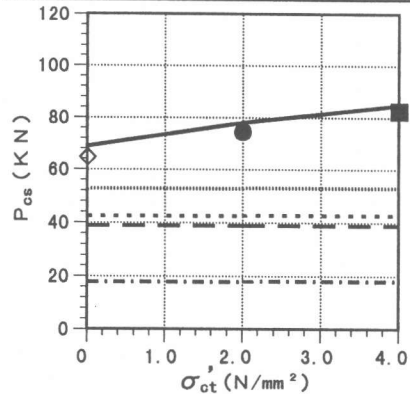
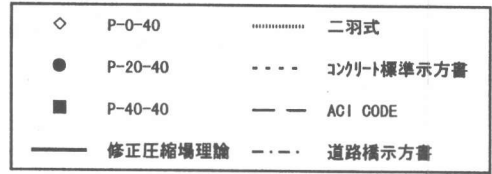
したがって，本来はせん断破壊荷重の実測値と各種耐力式および修正圧縮場理論から算出したせん断破壊荷重を比較すべきであるが，ここでは，せん断ひび割れ発生荷重と各種耐力式および修正圧縮場理論から算出したせん断破壊荷重を比較することとした。

(1) 断面下縁のプレストレス量による比較

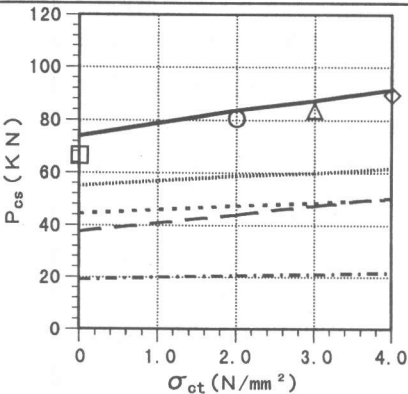
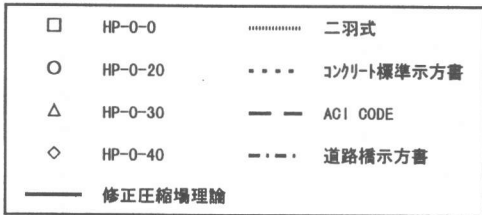
図-2 に断面上縁の応力 $\sigma'_{ca}=0\text{N/mm}^2$ とし，断面下縁の応力 σ_{ca} を 0N/mm^2 ， 2.0N/mm^2 ， 3.0N/mm^2 ， 4.0N/mm^2 と変化させた場合における各種のせん断破壊荷重の算定値とせん断ひび割れ発生荷重の実測値を示す。せん断ひび割れ発生荷重の実測値は P-0-0 ($\sigma_{ca}=0$) に対して，P-0-20 は約 3KN (約 7%)，P-0-40 は約 12KN (約 23%) 増加し，HP-0-0 ($\sigma_{ca}=0$) に対して，HP-0-20 は約 15KN (約 22%)，HP-0-40 は約 23KN (約 35%) 増加した。一方，各種耐力式による計算値は断面下縁のプレストレス量の増加にともなって増加するものの，ACI CODE を除き実測値と比較した場合，その増加率が小さく，断面下縁のプレストレス量が大きくなるほど実測値との差が大きくなる傾向が認められる。また，本研究でとり上げた各種算定式は一方向荷重下においては，プレストレスの効果を含めせん断耐力をかなり安全側に評価する傾向が認められた。これに対して，修正圧縮場理論による解析値は断面下縁のプレストレス量が増加しても，実測値を程良く推定できることがわかる。



(a)普通強度 ($f'_c = 41.9, 43.0 \text{ N/mm}^2$)

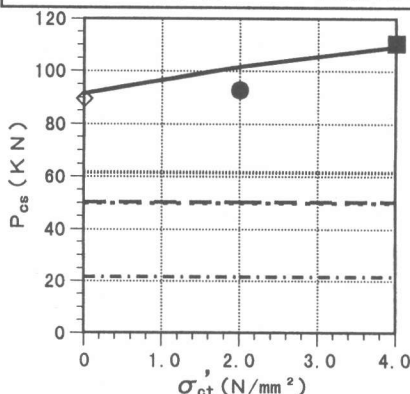
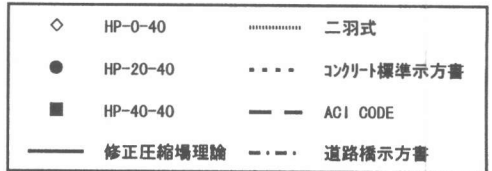


(a)普通強度 ($f'_c = 43.0 \text{ N/mm}^2$)



(b)高強度 ($f'_c = 82.8, 79.6 \text{ N/mm}^2$)

図-2 せん断ひびわれ発生荷重と断面下縁のプレストレス量の関係 ($\sigma'_{ct} = 0 \text{ N/mm}^2$)



(b)高強度 ($f'_c = 79.6 \text{ N/mm}^2$)

図-3 せん断ひびわれ発生荷重と断面内のプレストレス分布の関係 ($\sigma_{ct} = 4.0 \text{ N/mm}^2$)

(2) 断面内のプレストレス分布による比較

図-3に断面下縁の応力 $\sigma_{ct} = 4.0 \text{ N/mm}^2$ とし、断面下縁の応力 σ'_{ct} を 0 N/mm^2 (三角形分布), 2.0 N/mm^2 (台形分布), 4.0 N/mm^2 (長方形分布)

と変化した場合における各種のせん断破壊荷重の算定値とせん断ひびわれ発生荷重の実測値を示す。せん断ひびわれ発生荷重は P-0-40 (三角形分布) に対して、P-20-40 (台形分布)

は約 15%，P-40-40（長方形分布）は約 27%増加し，HP-0-40（三角形分布）に対して，HP-20-40（台形分布）は約 4%，HP-40-40（長方形分布）は約 24%増加した。しかし，各種耐力式による計算値は三角形分布，台形分布，長方形分布の場合のせん断破壊荷重が同値として算出され，断面内のプレストレス分布の影響が考慮されていない。これはせん断耐力に及ぼす軸方向圧縮力の効果をディコンプレッションモーメント（コンクリート標準示方書，道路橋示方書）あるいは曲げひび割れ発生モーメント M_{cr} （ACI CODE）を用いて評価しているためであり，断面下縁の応力のみで軸方向圧縮力の効果を評価する方法には，本研究の結果を考慮すれば限界があると考えられる。一方，修正圧縮場理論による解析値は，断面内のプレストレス分布の影響を適切に評価しており，実測値をほどよく推定している。これらの結果より，プレストレス分布の影響を含めた軸方向圧縮力の影響を合理的に評価できる耐力式を確立していくためには，今後さらなる検討が必要であると考えられる。

4.2 ひび割れ性状

図-4に載荷終了後のせん断スパンのひび割れ状況を示す。曲げひび割れは断面図心軸近傍まで発展したところで，ゆるやかに傾斜し始めた。その後，曲げひび割れが傾斜し始めた位置から下方にも斜めひび割れが進展し曲げせん断ひび割れが形成された。

(1) 断面下縁のプレストレス量による比較

断面下縁のプレストレス量が大きいほど，曲げひび割れ発生荷重が大きくなった。また，曲げひび割れが傾斜し始める荷重が大きくなり，せん断ひび割れ発生荷重が大きくなる傾向を示した。

(2) 断面内のプレストレス分布による比較

断面内のプレストレス分布の変化における曲げひび割れ発生荷重はほぼ同じ値だったが，三角形分布，台形分布，長方形分布の順に曲げひび割れの進行が遅く，曲げひび割れが傾斜し始める荷重が大きくなり，せん断ひび割れ発生荷

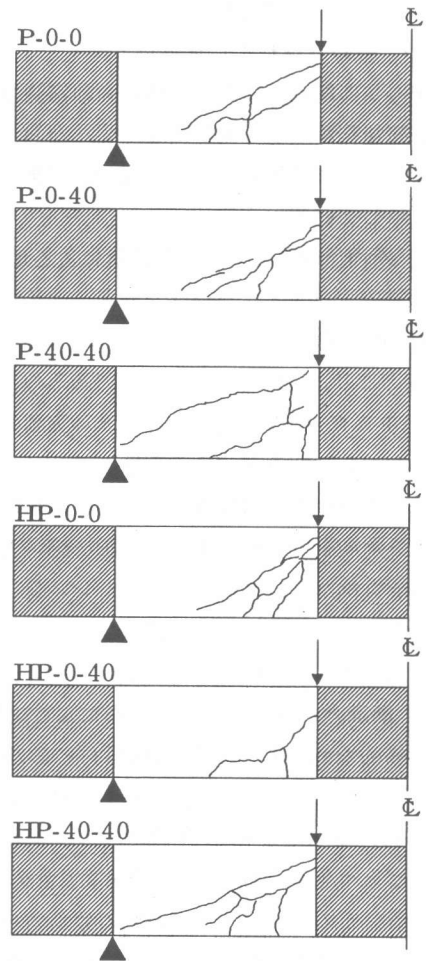


図-4 せん断スパンのひび割れ性状

表-2 斜めひび割れの傾斜角

供試体	斜めひび割れの傾斜角 θ	
	解析値	実測値
P-0-0	45°	37°
P-0-20	40°	38°
P-0-30	39°	34°
P-0-40	37°	35°
P-20-40	34°	35°
P-40-40	32°	30°
HP-0-0	45°	40°
HP-0-20	41°	38°
HP-0-30	40°	40°
HP-0-40	39°	35°
HP-20-40	36°	34°
HP-40-40	34°	30°

重が大きくなる傾向を示した。

4.3 斜めひび割れの傾斜角

表一 2 に斜めひび割れの傾斜角の実測値と修正圧縮場理論による解析値を示す。なお、実測値は最終的に支配的となった斜めひび割れについて示している。

(1) 断面下縁のプレストレス量による比較

最終的な斜めひび割れの傾斜角の実測値は P-0-0 が約 37 度であるのに対して、P-0-40 は約 35 度となり、HP-0-0 が約 40 度であるのに対して、HP-0-40 は約 35 度となった。実測値にややばらつきはあるが、断面下縁のプレストレス量が大きいほど、斜めひび割れの傾斜角が小さくなる傾向を示した。また、修正圧縮場理論による解析値は断面下縁のプレストレス量を変化させた場合においても、最終的な斜めひび割れ傾斜角をほどよく推測している。

(2) 断面内のプレストレス分布による比較

最終的な斜めひび割れの傾斜角の実測値は P-0-40、HP-0-40 が約 35 度であるのに対して、P-40-40、HP-40-40 は約 30 度となり、実測値にややばらつきはあるが、三角形分布、台形分布、長方形分布の順に斜めひび割れの傾斜角が小さくなる傾向を示した。また、修正圧縮場理論による解析値は断面内のプレストレス分布を変化させた場合においても、最終的な斜めひび割れの傾斜角を程良く推測している。

5. まとめ

本研究から得られた主な結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 断面下縁のプレストレス量が大きくなるほど、また、断面内のプレストレス分布が三角形分布、台形分布、長方形分布の順に斜めひび割れの傾斜角が小さくなる傾向を示した。一方、修正圧縮場理論による解析値は実験結果と多少差異があるものの、斜めひび割れの傾斜角を程良く推測しているものと考えられる。

(2) 断面下縁のプレストレス量が大きくなるほど、また、断面内のプレストレス分布が三角

形分布、台形分布、長方形分布の順に斜めひび割れ発生荷重が大きくなる傾向を示した。

(3) 現行の各種基準におけるコンクリートが負担するせん断力の算定式は安全側の値を算出しているものの、プレストレスの効果を過小評価する傾向がある。また、断面内のプレストレス分布の影響が考慮できない。したがって、プレストレスの効果を合理的に考慮できる評価方法を確立することが必要である。

(4) 修正圧縮場理論による解析値は実験結果と多少差異があるものの、断面内のプレストレス分布の影響を含めて、プレストレスの効果を適切に評価しており、コンクリートが負担するせん断力を推測する手法として有効であると考えられる。

参考文献

- 1) Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP MODEL CODE 1978
- 2) Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP MODEL CODE 1990, 1993
- 3) 土木学会 : コンクリート標準示方書(平成 3 年版)改訂資料およびコンクリート技術の今後の動向, コンクリートライブラリー 70, pp61~64, 1991
- 4) M.P.Collins and D.Mitchell : Prestressed Concrete Structures, PRENTICE HALL, 1991
- 5) 土木学会 : コンクリート標準示方書(平成 8 年度制定), 設計編, 1996
- 6) 日本道路協会 : 道路橋示方書(平成 8 年度制定), III コンクリート橋編, 1996
- 7) ACI : Building Code Requirements For Structural Concrete And Commentary, ACI 318-95, pp139-140, 1996
- 8) 二羽・山田・横沢・岡村 : せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価 土木学会論文報告集, 第 372 号 V-5, pp167-176, 1986.8