

論文 RC および PRC はり部材のせん断耐荷挙動に関する検討

示 敬三*¹・井上 晋*²・小林 和夫*³

要旨：RCおよびPRCはり部材のせん断耐力等の基本的せん断耐荷特性に及ぼす、断面形状、コンクリート強度、導入プレストレス量の影響を静的載荷試験によって検討するとともに、そのせん断耐荷挙動を M.P.Collins らの提案する修正圧縮場理論を用いて解析し、コンクリートのせん断抵抗力について実験値と比較・検討した。その結果、修正圧縮場理論は、はり部材のコンクリートの引張強度を適切に評価すれば十分に適用性があることが確認された。

キーワード：修正圧縮場理論、せん断耐荷挙動、コンクリートのせん断抵抗力

1. はじめに

現在のせん断に対する設計 [1] では、棒部材のせん断耐力はコンクリートが負担するせん断力 (V_{cd}) とせん断補強筋が負担するせん断力 (V_{sd}) の和として与えられ、せん断ひび割れ発生後も V_{cd} は一定値をとると考えられている。しかしながら、せん断ひび割れ発生後のせん断抵抗メカニズムは複雑であり、特に V_{cd} と V_{sd} の分担率の変化を明確にとらえることが重要であると考えられる。また、近年、曲げひび割れを許容する PRC (従来の第Ⅲ種 PC) 部材が、その経済性や、優れた力学特性等から数多く採用されるようになってきているが、せん断に対するプレストレスの効果については不明な点が多く、そのせん断抵抗メカニズムを解明していくことが今後の重要な課題である。

本研究では、上述の点に関する基礎資料を得ることを目的として、RCならびに PRC はり部材に対して静的載荷試験を行うとともに、Collins らの提案する修正圧縮場理論 [2] を用いてせん断耐荷挙動を解析し、実験および解析の両面から、せん断耐荷挙動について検討した。

2. 実験概要

2. 1 Aシリーズ供試体 (PRC はり)

Aシリーズの供試体の断面形状・寸法を図-1に示す。いずれの供試体も主鉄筋は 2-D16 ($f_{sy}=3920\text{kgf/cm}^2$) とし、せん断補強筋には D6 スターラップ ($f_{sy}=4220\text{kgf/cm}^2$) を用いた。また、スターラップの配置間隔は 8cm、コンクリートの設計圧縮強度は 300kgf/cm^2 とし、さらに矩形断面では $\phi 9.2\text{mm}$ PC 鋼棒 ($d_p=14\text{cm}$)、T形断面では $\phi 11\text{mm}$ PC 鋼棒 ($d_p=10\text{cm}$) を用いて各々の断面下縁に 0 (非緊張状態でナット定着後グラウト注入)、20、 40kgf/cm^2 の有効プレストレスを導入した。また、PC 鋼棒はスパイラルシース内にセメントペーストグラウト (W/C=35%) を注入したボンドタイプとした。

2. 2 Bシリーズ供試体 (RC はり)

Bシリーズの供試体の断面形状・寸法を図-2に示す。いずれの供試体も主鉄筋は 2-D16

*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)

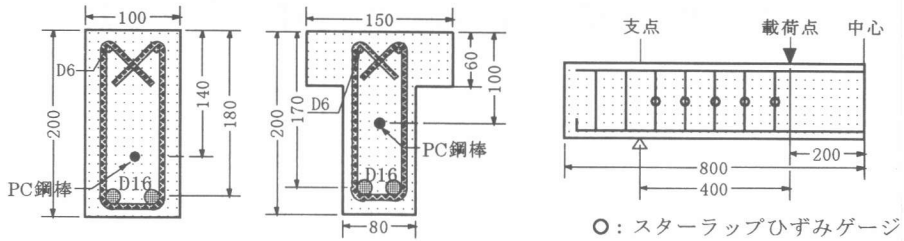


図-1 Aシリーズ供試体の断面形状・寸法(単位: mm)

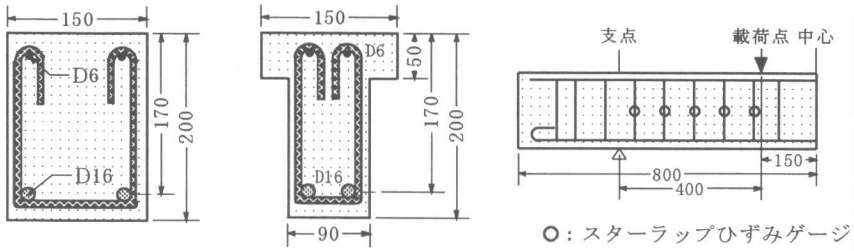


図-2 Bシリーズ供試体の断面形状・寸法(単位: mm)

($f_{sy} = 3760 \text{ kgf/cm}^2$) とし、せん断補強筋には D6 スターラップ ($f_{sy} = 4170 \text{ kgf/cm}^2$) を用いた。スターラップの配置間隔は 8cm、さらにコンクリートの設計圧縮強度 (f'_{ck}) は 400 kgf/cm^2 と 800 kgf/cm^2 の二種類とした。

2. 3 荷重試験

荷重試験は A シリーズ、B シリーズともに全長 160cm の単純はりに対して、せん断スパン 40cm とした対称 2 点集中荷重方式で実施し、A シリーズでは、荷重、せん断スパン内の全スターラップひずみ、スパン中央位置での変位、主鉄筋、PC 鋼棒のひずみを測定した。なお、B シリーズではこれに加えて、せん断スパン内のコンクリートの主引張・主圧縮ひずみ等を測定した。荷重試験に用いた A、B シリーズ供試体の詳細を一括して、それぞれ表-1、2 に示す。

3. 解析方法

せん断耐荷挙動を解析する方法として、斜めひび割れ間のコンクリートの引張応力とひび割れ後の圧縮強度の低下を考慮した Collins らによる修正圧縮場理論 [2] を用いた。同理論によるせん断抵抗力は式 (1) より算出される。この式は強度累加式の形をとり、ひび割れ傾斜角 θ と主引張応力 f_1 の関数で表されている。

$$V = V_c + V_s = f_1 b_w j d \cot \theta + (A_w f_w / s) j d \cot \theta \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 f_1 : コンクリートの主引張応力 (斜めひび割れ発生後はひび割れ間コンクリートの引張抵抗の寄与を考慮)、 b_w : ウェブ幅、 $j d$: 圧縮合力作用位置から引張鉄筋図心位置までの距離、 θ : 圧縮斜材角 (せん断ひび割れの角度)、 A_w : せん断補強筋の断面積、 f_w : せん断補強筋の応力、 s : スターラップ配置間隔である。

なお、この理論は純せん断に対するものであるが、断面切断法等の通常の曲げ解析と組み合わせることにより、曲げモーメント・軸力・せん断力同時作用下のスターラップ等のひずみを求めることができる。また、比較のために 45° トラス理論に基づく土木学会コンクリート標準示方書

表-1 Aシリーズ供試体の詳細および実験結果

供試体	断面形状	せん断スパン比 a/d	*1 PC鋼材	*2 断面下縁 プレストレス σ_p (kgf/cm ²)	実コンクリート 強度 f'_c (kgf/cm ²)	*3 曲げ破壊 荷重計算値 P_{ub} (tf)	*3 せん断破壊 荷重計算値 P_{us} (tf)	*3 V_{cd} (tf)	*3 V_{sd} (tf)	最大荷重 実測値 P_{max} (tf)
AR1	矩形	2.22	φ 9.2	0	3 4 1	14.08	14.96	2.25	5.23	15.33
AR2	矩形	2.22		2 0		13.61	15.72	2.63	5.23	16.83
AR3	矩形	2.22		4 0		14.18	16.34	2.94	5.23	17.21
AT4	T形	2.35	φ 11	0		14.79	13.42	1.77	4.94	16.22
AT5	T形	2.35		2 0		14.90	14.1	2.11	4.94	17.58
AT6	T形	2.35		4 0		14.90	14.66	2.39	4.94	16.71

*1 φ 9.2 : $f_{py}=145\text{kgf/mm}^2$ 、φ 11 : $f_{py}=147\text{kgf/mm}^2$

*2 $\sigma_p = 0$ の供試体は PC 鋼棒を非緊張の状態に配置し、グラウト注入のみを実施したものである

*3 土木学会コンクリート標準示方書による (ただし部材係数 $\gamma_b = 1.0$)

表-2 Bシリーズ供試体の詳細および実験結果

供試体	断面形状	せん断スパン比 a/d	実コンクリート 強度 f'_c (kgf/cm ²)	*1 曲げ破壊 荷重計算値 P_{ub} (tf)	*1 せん断破壊 荷重計算値 P_{us} (tf)	*1 V_{cd} (tf)	*1 V_{sd} (tf)	曲げ降伏 荷重実測値 P_y (tf)	最大荷重 実測値 P_{max} (tf)
BR1	矩形	2.35	536	11.46	16.21	3.21	4.90	12.25	13.80
BT2	T形	2.35	536	11.46	14.36	2.28	4.90	12.14	13.70
BR3	矩形	2.35	943	11.79	17.60	3.90	4.90	12.91	16.12
BT4	T形	2.35	943	11.79	15.35	2.78	4.90	12.60	15.55

*1 土木学会コンクリート標準示方書による (ただし部材係数 $\gamma_b = 1.0$)

式 [1] (材料係数・部材係数は全て 1.0) を用いた。なお、コンクリートの圧縮および引張側の応力-ひずみ関係は Collins らが提案しているもの [2] を用いた。解析値の種類は、10 φ 20cm の円柱供試体による割裂強度を用いたものを解析値 1、コンクリート標準示方書式 ($f_t = 0.5 f'_c \sqrt{\text{kgf/cm}^2}$) で算出した引張強度を用いたものを解析値 2、Collins らが提案している式 ($f_t = 4.00\lambda \sqrt{f'_c} \sqrt{7/100} \text{ kgf/cm}^2$; $\lambda = 1.0$ 、 f'_c : 圧縮強度) で算出した引張強度を用いたものを解析値 3 とした。

4. 試験結果および考察

4.1 ひび割れ性状

図-3 に A、B シリーズの T 形断面供試体における載荷終了後のせん断スパンのひび割れ状況を示す。A シリーズでの導入プレストレス $\sigma_p = 0 \sim 40\text{kgf/cm}^2$ の範囲においては、プレストレスレベルの大きい供試体ほどひび割れ傾斜角が若干小さくなる傾向が認められた。B シリーズでのひび割れ発生パターンについては、コンクリートの強度による影響は顕著に見られなかった。また、両者を比較すると RC はり部材は PRC はり部材に比べひび割れが複雑で本数が増える傾向が認められた。一方、A、B シリーズとも、コンクリート強度、導入プレストレスの大きさ、断面形状に関係なく、最終的には曲げスパン内のコンクリート圧壊によって曲げ破壊を呈した。

4.2 コンクリートおよびせん断補強筋のせん断抵抗

図-4 および図-5 は、それぞれ A シリーズ、B シリーズにおける作用せん断力とコンクリ

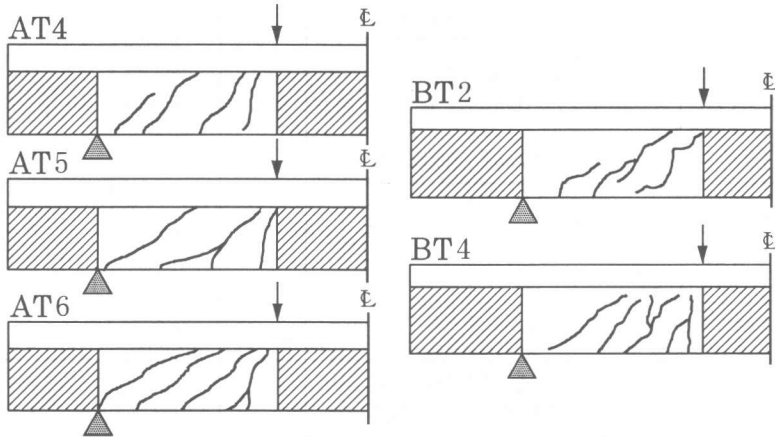


図-3 せん断スパンのひび割れ性状（載荷終了時）

ト、せん断補強筋のせん断抵抗力の関係を示したものである。これらの図中の V_s の実測値は、支配的なせん断ひび割れと交差するスターラップひずみの実測値の平均値からトラス理論により計算したものであり、 V_c の実測値は作用せん断力 V から V_s を差し引いたものである。一方、 V_s および V_c の解析値は、それぞれ(1)式の右辺第2項および第1項から作用曲げモーメントの値を考慮して解析的に得られた値である。その解析位置は、せん断ひび割れの発生している領域を平均化して考え、その代表位置としてスターラップひずみが計測されている支点より20cm位置(Aシリーズ)および22cm位置(Bシリーズ)とした。なお、図-4においては解析値2と解析値3はほぼ同様の結果を与え、図中に示すと見にくくなるためここでは解析値2を省略した。

(1) Aシリーズ

図-4に示すように、解析値1、3とも実測値のコンクリートせん断抵抗力の低下現象やスターラップのせん断抵抗の増加を程良くとらえているものの、解析値1はコンクリートのせん断抵抗力を危険側に評価する傾向が認められた。また、斜めひび割れ発生後、プレストレストレレベルが大きいはり部材ほどコンクリートのせん断抵抗力の減少が実験、解析の両者で顕著に現れた。コンクリートのせん断抵抗の実測値は、斜めひび割れ発生後、一旦減少傾向を示すものもあったが、いずれの供試体においても示方書の設計せん断耐力は、実験における斜めひび割れ発生時のコンクリートの負担せん断力に対して安全側の値を与えることが示された。

また、修正圧縮場理論から算出される斜めひび割れの傾斜角度は、導入プレストレストレレベルの増大とともに多少小さくなるが、プレストレスが20~40kgf/cm²の範囲においては顕著な差はなくほぼ30°となり、せん断ひび割れに対する実測値ともほぼ一致することが認められた。

(2) Bシリーズ

図-5に示すように、斜めひび割れ発生後、 $f'_{ck} = 800 \text{ kgf/cm}^2$ のコンクリートを用いたはりではコンクリートせん断抵抗力が一時急激に減少するがその後は一定値もしくは微増の傾向にあり、 $f'_{ck} = 400 \text{ kgf/cm}^2$ のコンクリートはりでの減少は前者程のものではない。また、 $f'_{ck} = 400 \text{ kgf/cm}^2$ の矩形断面はりの終局荷重域では修正圧縮場理論による解析値2と実測値はほぼ等しいが、 $f'_{ck} = 800 \text{ kgf/cm}^2$ のはりあるいはT形断面はりでは、解析値2でもかなり危険側の値を示す傾向がうかがえる。一方、斜めひび割れ発生時では、解析値1はいずれの場合も実測値を危険側に評価する傾向があり、これに対し、解析値3は多少差異があるものの実測値に対しほぼ安全側の値

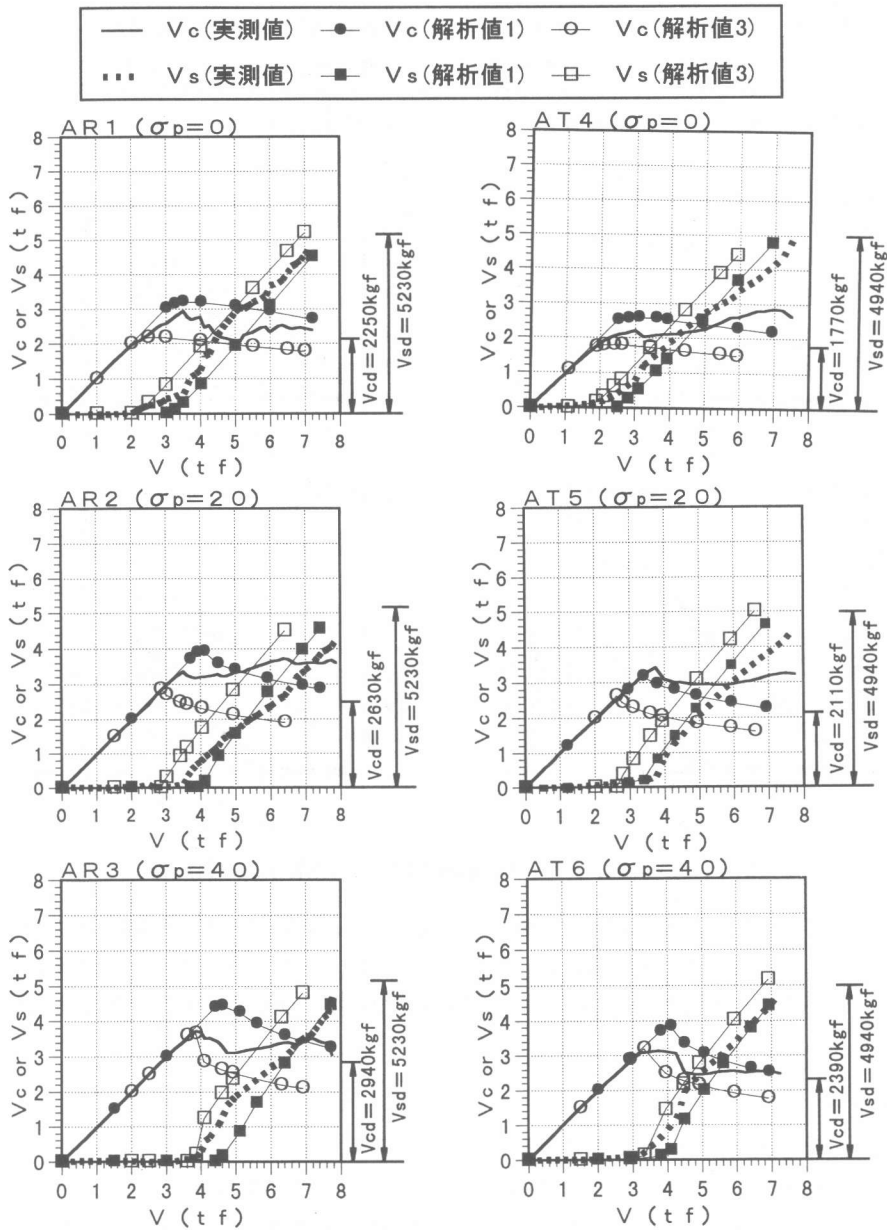


図-4 コンクリート・せん断補強筋のせん断抵抗力の関係

を与える傾向がみられた。また、斜めひび割れ発生後のコンクリートのせん断抵抗力は示方書より計算される値をほとんど下回ることなく、コンクリートせん断抵抗力は一定という仮定にほぼ適応した結果が得られた。

また、T形断面ではスターラップのせん断抵抗力が増加し始めるせん断力が矩形に比べて小さく、ウェブ幅の減少に伴うコンクリートせん断抵抗力の減少が如実に現れた。なお、解析値1～3で比較すると、Collinsらの式を用いた解析値3が最も良く実測値を推定していることがうかがえた。

解析値1がせん断耐力を過大評価する一因としては、10φ20cmの円柱供試体より求めた割

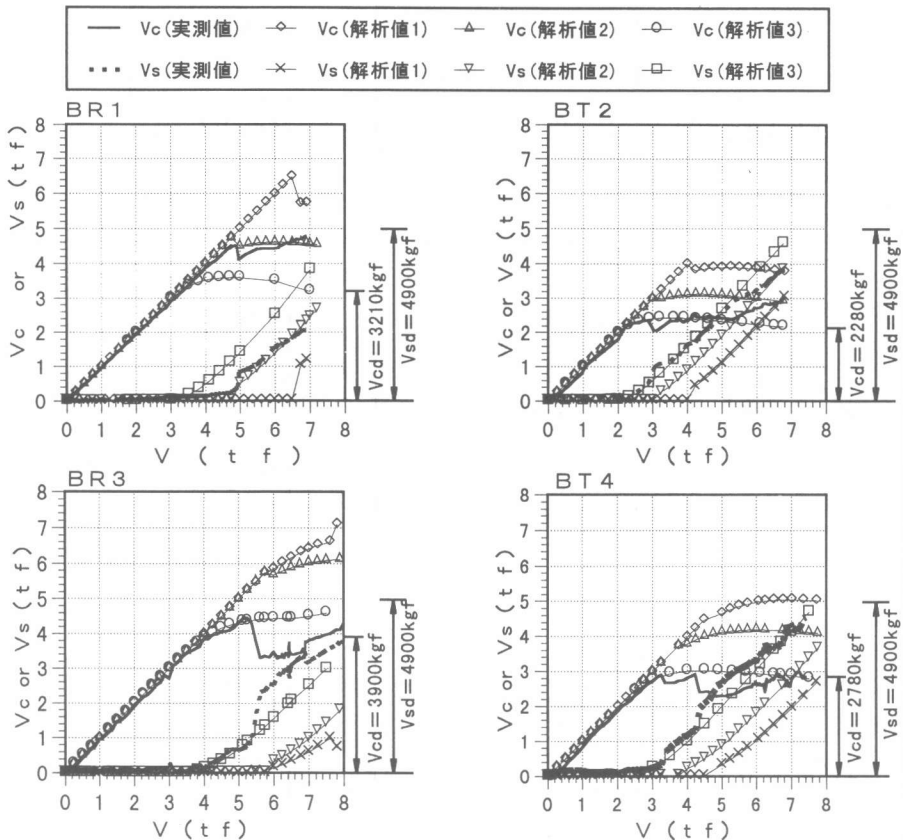


図-5 コンクリート・せん断補強筋のせん断抵抗力の関係

裂強度を用いているが、はり供試体では純引張状態に近く、実際の引張強度が割裂強度に比べ低くなっていることが考えられる。また、いずれの供試体においてもコンクリート標準示方書におけるコンクリート負担せん断力 V_{cd} は、一方向荷重下での斜めひび割れ発生荷重を程良く推測していることがうかがえる。

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とおりである。

(1) 20~40kgf/cm²程度の比較的少量のプレストレスを導入することにより、コンクリートせん断抵抗力を増加させることができるが、斜めひび割れ発生後のコンクリートせん断抵抗の一時的な減少が大きくなる傾向がある。

(2) 本研究で得られた解析値1~3の中では、Collinsらの提案している引張強度式を適用した解析値3が実測値を最もよく、また、安全側に評価することが示された。

(3) 修正圧縮場理論による解析結果は、実験結果と多少差異があるものの、はり部材のコンクリートの引張強度を適切に評価すれば、本研究のような一方向荷重下でのRCおよびPRCはり部材の荷重の進行に伴うせん断抵抗挙動を追跡できると考えられる。

参考文献

- [1] 土木学会：コンクリート標準示方書〔平成8年版〕設計編、1997.3
- [2] Collins, M. P. and Mitchell, D :Prestressed Concrete Structures, Prentice Hall,1991