

矩形断面を有するPCはり部材のせん断耐力評価法に関する一考察

田村 聖^{*1}・濱田 譲^{*2}・Manakan LERTSAMATTIYAKUL^{*3}・二羽 淳一郎^{*4}

1. はじめに

土木学会コンクリート標準示方書¹⁾(以下、標準示方書と称す)のせん断耐力評価式は、せん断補強鉄筋を配置していない鉄筋コンクリート(以下、RCと称す)はり部材の研究を基礎とした実験式²⁾であり、本来斜めひび割れ発生荷重を評価するものである。これに対し、プレストレストコンクリート(以下、PCと称す)はり部材のせん断耐力評価式はRCはりに対する規定に準拠して、プレストレスによる影響についてはデコンプレッションモーメントをパラメータとする係数を上述した実験式に乗ずるのみであり、明瞭な根拠が示されていないのが現状である。

この現行の標準示方書のせん断耐力評価式を用いてPCはりのせん断耐力を算定する場合、設計上は非常に簡便であるが、評価方法としては限界があると考えられている³⁾。また、PCはりのせん断耐力を過小評価するといういくつかの研究成果も報告されている^{4), 5)}。

このような現状のなかで、PCはりのせん断耐力に及ぼすプレストレスの影響を合理的に評価するため、種々のアプローチが行われている。たとえば、プレストレスによって曲げひび割れが発生するまでの荷重は増加するが、そのせん断力の増加量を、コンクリート分担分のせん断耐力に加算する方法が伊藤らによって提案されている⁶⁾。また、修正圧縮場理論に基づいて導いた導入プレストレス量とコンクリートの引張強度の関数を、コンクリート分担分のせん

断耐力に乗ずる方法を三方らは提案している⁷⁾。さらに、ディープビームに対するせん断耐力評価法を基本とし、プレストレスの影響を考慮するため、導入圧縮力の項を加えた方法が渡辺らによって提案されている⁸⁾。

本研究では簡便で合理的なPCはりのせん断耐力評価法を提案するための基礎研究として、国内および国外で行われた実験データを収集し、それらの実験データに対する各種のせん断耐力評価法の適用性について検討を行った。

とくに、PCはりの破壊形式に及ぼす要因を明らかにするため、非線形有限要素法を用いて数値解析的に検討を行った。

2. 既存の実験データの概要

既往の実験データの概要を表-1に示す。本研究では、せん断スパン有効高さ比(a/d)が2.5以上で、最終的な破壊形式が次の2種類の実験データのみを収集した。その一つは、せん断スパンに発生した曲げひび割れが、載荷点付近にまで達する斜めひび割れに発達し、この斜めひび割れの形成と同時に耐力が急激に低下する、いわゆる斜め引張破壊である。他の一つは、せん断スパンに発生した曲げひび割れが、荷重の増加に伴って載荷点および支点方向に徐々に発達して斜めひび割れを形成し、その後も荷重の増加に耐えて、最終的には圧縮域まで達した斜めひび割れの上側のコンクリートが圧壊して破壊に至る、いわゆるせん断圧縮破壊である。また、対象とする断面形状については

表-1 既存の実験データの概要

文献番号	研究者	データ数	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	はり高さ h (mm)	ウェーブ幅 b_w (mm)	有効高さ d (mm)	せん断 スパン比 a/d	下縁導入 プレストレス σ'_{es} (N/mm ²)	せん断補 強鉄筋比 r_w (%)
4	田村 聖ら	3	53.3 ~ 68.7	1100	350	1000	3.75	2.6 ~ 5.8	0.00
5	濱田 譲ら	5	47.0 ~ 58.8	350	200	300	3.50	3.0	0.00 ~ 0.24
8	渡辺博志ら	4	60.3 ~ 65.0	625	200	550	3.00	8.0 ~ 16.0	0.16
9	小林 和夫	4	33.4 ~ 37.3	200	100	140	2.86	2.0 ~ 4.0	0.00
10	佐藤 勉ら	11	39.2 ~ 44.2	400	150	330 ~ 380	2.61 ~ 3.27	4.3 ~ 12.9	0.00 ~ 0.24
11	伊藤忠彦ら	4	40.3 ~ 55.8	300	150	250	2.60	5.0 ~ 10.0	0.00
12	三方康弘ら	9	41.9 ~ 79.6	200	100	140	3.21	2.0 ~ 4.0	0.00
13	荒井康治ら	6	36.4 ~ 37.4	200	100	135	3.70	4.0 ~ 8.0	0.00
14	土木研究所	10	40.6 ~ 92.0	425 ~ 1100	200	350 ~ 950	3.00	3.0 ~ 9.0	0.00
15	三方 康弘	4	34.1 ~ 72.1	200	100	140 ~ 160	2.50 ~ 2.86	2.9 ~ 21.1	0.00 ~ 0.74
16	Kar, J. n.	16	28.1 ~ 35.5	200 ~ 250	100 ~ 125	150 ~ 170	3.03 ~ 5.09	3.4 ~ 10.3	0.00
合計		76	28.1 ~ 92.0	200 ~ 1100	100 ~ 350	135 ~ 1000	2.60 ~ 5.09	2.0 ~ 21.1	0.00 ~ 0.74

^{*1} Satoshi TAMURA : ドービー建設工業(株) 技術センター 研究員

^{*2} Yuzuru HAMADA : ドービー建設工業(株) 技術センター センター長 工博

^{*3} Manakan LERTSAMATTIYAKUL : 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 工修

^{*4} Junichiro NIWA : 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 教授 工博

表 - 2 解析手法の概要¹⁸⁾

使用した要素	コンクリートの圧縮応力下の破壊基準と構成則モデル	コンクリートの引張応力下の破壊基準と構成則モデル	コンクリートのせん断応力下の構成則モデル
・コンクリート：4 節点平面応力 ・鉄筋：離散バー要素 ・付着：完全付着	・Kupfer らの 2 軸強度包絡線により、有効強度を評価 ・等価 1 軸圧縮軟化モデル（要素寸法を考慮した、圧縮破壊エネルギー） ・ひび割れによる圧縮強度低減率を考慮	・固定分散ひび割れモデル ・引張軟化モデル（要素寸法を考慮した引張破壊エネルギー）	・最大主ひずみに依存したせん断保持係数により、ひび割れ発生後のせん断剛性低減を考慮

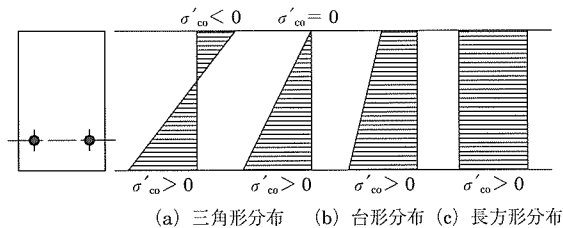


図 - 1 応力分布状態の概要図（圧縮を正としている）

PC はりの破壊形式を明確に判断できるとされる矩形断面を有する実験データに限定することにした。

その結果、表 - 1 に示すとおり、国内の文献より 60 個の実験データ（文献 4), 5), 8) ~ 15)）を収集することができた。

国内の文献より収集した実験データは、①コンクリート圧縮強度 (f'_c) が 30 ~ 50 N/mm²、②はりの高さ (h) が 200 ~ 500 mm、③ウェブの幅が 100 ~ 200 mm、④引張鋼材の有効高さ (d) が 100 ~ 400 mm、⑤せん断スパン有効高さ比 (a/d) が 2.5 ~ 4.0、⑥下縁導入プレストレス量 (σ'_{co}) が 2.0 ~ 6.0 N/mm² の範囲に含まれるものが大部分である。

プレストレスによる断面の応力分布状態の概要を図 - 1 に示す。国内の実験データ 60 個のうち、断面上縁に引張応力（以降、本論文では圧縮を正、引張を負と定義する）が発生している三角形分布のものが 39 個であり、断面上縁応力をゼロとしたものが 17 個であった。

その他の、台形分布および長方形分布とした応力分布状態は、それぞれ 2 個ずつの合計 4 個であった。

3. 国内の実験データの妥当性の検討

3.1 非線形有限要素解析の概要

ここでは、国内の文献より収集した 60 個の実験データに対して、実験結果の妥当性を確認するため非線形有限要素法による解析を行った。試験体のモデル化を行う際には、載荷点および支点の支圧板の大きさも忠実に再現してモデル化しなければ解析結果に影響を及ぼすことが指摘されている¹⁷⁾。そこで、載荷点および支点の支圧板の大きさを忠実にモデル化し、解析を行った。

解析手法の概要を表 - 2 に示す。本研究の解析では、汎用 2 次元非線形有限要素解析プログラム「ATENA」(SBETA の Windows 版)を用いた。荷重の載荷方法は変位制御とし、修正 Newton - Raphson 法を用いて残差力が所定の収束判定基準を満足するまで繰り返し計算を行った。

著者らの過去の研究¹⁹⁾では、このプログラムを用いる

表 - 3 要素寸法の値

はり高さ (mm)	要素寸法 (mm)
200 ~ 300	30
400 ~ 600	40
600 ~ 800	60
800 ~	80

場合、要素寸法をある程度小さくし、固定ひび割れモデルを用いることで PC はりのせん断耐力およびひび割れの発生状況等をおおむね評価できるとの結果を得ている。本研究においても、これらの知見に基づいて解析を行った。参考のため、本研究において設定した要素寸法の値を表 - 3 に示す。また、解析での最大耐力の判定および破壊形式の判定は、6.3 で詳述する。

3.2 実験データの選別

各実験データのせん断耐力の実験値 ($V_{u,exp}$) と解析値 ($V_{u,FEM}$) の比と、せん断スパン有効高さ比 (a/d) および下縁導入プレストレス量 (σ'_{co}) の関係を図 - 2 と図 - 3 に示す。なお、図中の破壊形式は実験で得られた破壊形式を示す。

解析結果は、収集した実験データのせん断耐力をおおむね評価できているが、一部のデータにおいては実験値 ($V_{u,exp}$) と解析値 ($V_{u,FEM}$) の比が大きく乖離しており整合性が悪い結果となった。

実験値 ($V_{u,exp}$) と解析値 ($V_{u,FEM}$) の比の平均値 μ および変動係数 C.V. は次のとおりである。

$$\mu = 1.07, \text{C.V.} = 13.9 \%$$

本研究では、収集した実験データに対して、各種のせん断耐力評価法の適用性の検討を行うことを一つの目的としている。そのため、実験値 ($V_{u,exp}$) と解析値 ($V_{u,FEM}$) の整合性が悪い実験データは検討の対象外とした。すなわち、その比が 0.8 ~ 1.2 の範囲外となるものを対象外とした。

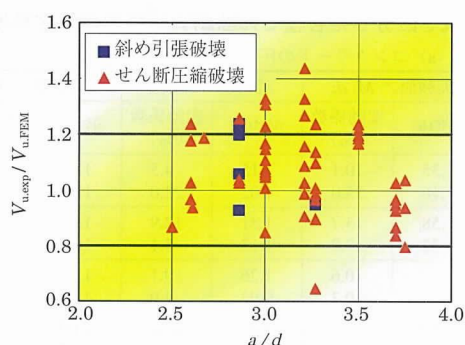
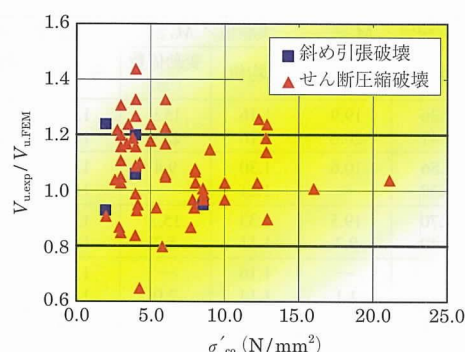
その結果、実験データ 60 個に対し、対象外となるデータが 13 個発生した。したがって、これ以降ではこれらを除いた実験値 ($V_{u,exp}$) と解析値 ($V_{u,FEM}$) の整合性が良い 47 個のデータについて検討を行う。

47 個の実験データの試験値 ($V_{u,exp}$) と解析値 ($V_{u,FEM}$) の比の平均値 μ および変動係数 C.V. は次のとおりである。

$$\mu = 1.02, \text{C.V.} = 10.2 \%$$

4. せん断耐力の評価方法

PC はりのせん断耐力の計算値は、標準示方書のせん断補

図-2 $V_{u,exp} / V_{u,FEM}$ と (a/d) の関係図-3 $V_{u,exp} / V_{u,FEM}$ と σ'_{co} の関係

鉄筋のない RC はりのせん断耐力評価式の基礎となった式 (1) ²⁾ を基本として算定した。

また、プレストレスがせん断耐力に及ぼす影響については、次に示す既存の評価法を用いてそれぞれ算定した。

(1) M_0 法

式 (2) に示すとおり、プレストレスがせん断耐力に及ぼす影響をデコンプレッションモーメント M_0 で評価し、標準示方書の解説に示される係数を用いる方法 (以下、 M_0 法と称す)。

(2) M_{cr} 法

式 (3) に示すとおり、曲げひび割れが発生するまでのせん断力の増加量 (M_{cr}/a) をコンクリート分担分のせん断耐力 (V_c) に加算する方法 ⁶⁾ (以下、 M_{cr} 法と称す)。

(3) θ 法

式 (4) に示すとおり、導入プレストレス量とコンクリートの引張強度の関数 ($[1 + (\sigma'_{cp}/f_t)]^{1/2}$) をコンクリート分担分のせん断耐力 (V_c) に乗ずる方法 ⁷⁾ (以下、 θ 法と称す)。

式 (2) および式 (3) の計算に用いる M_0 、 M_u および M_{cr} は、各文献に基づいて計算した値を用いている。

なお、軽量コンクリートを使用したデータのそれぞれの計算値についても、標準示方書に規定されているせん断耐力の低減率は乗じていない。これについては、5.1.2 で詳述する。

$$V_c = 0.20f'_c{}^{1/3}p_w^{1/3}d^{-1/4}[0.75 + 1.4/(a/d)]b_wd \quad (1)$$

$$V_{u,M_0} = V_c \cdot [1 + 2M_0/M_u] + V_s \quad (2)$$

$$V_{u,M_{cr}} = V_c + M_{cr}/a + V_s \quad (3)$$

$$V_{u,\theta} = V_c \cdot \cot \theta + V_s \quad (4)$$

$$V_s = A_w f_{wy} d / (1.15s) \quad (5)$$

$$\cot \theta = [1 + (\sigma'_{cp}/f_t)]^{1/2} \quad (6)$$

$$f_t = 0.23f'_c{}^{2/3} \quad (7)$$

ここで、

V_c : コンクリートが負担するせん断耐力

V_{u,M_0} : PC はりのせん断耐力 (M_0 法)

$V_{u,M_{cr}}$: PC はりのせん断耐力 (M_{cr} 法)

$V_{u,\theta}$: PC はりのせん断耐力 (θ 法)

V_s : せん断耐力に対するスターラップの分担分

f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

f_t : コンクリートの引張強度 (N/mm²)

p_w : 引張鋼材比 (= $100 A_p / (b_w \cdot d)$)

d : 引張鋼材の有効高さ

a : せん断スパン長

b_w : 部材のウェブ幅

M_0 : デコンプレッションモーメント

M_u : 曲げ耐力モーメント

M_{cr} : 曲げひび割れ発生モーメント

A_w : 1 組のせん断補強鉄筋の断面積

f_{wy} : せん断補強鉄筋の降伏強度

θ : 斜めひび割れの傾斜角

σ'_{cp} : 断面中央の平均プレストレス (N/mm²)

5. 各種のせん断耐力評価方法による算定精度

5.1 国内の実験データに対する算定精度

5.1.1 各実験要因の領域を区分した算定精度

各実験要因の領域を区分した PC はりのせん断耐力の実験値と、各種のせん断耐力評価法による計算値の比の平均値および変動係数を表 - 4 に示す。

表 - 4 より、各種のせん断耐力評価法の中で、比較的精度がよいせん断耐力評価法は M_{cr} 法であった。しかし、各実験要因のそれぞれの領域の平均値を比較すると、ばらつきが大きくなっている。また、各実験要因の大部分の領域において変動係数が 10 % を上回っており、十分に精度よく実験値を評価していない。

各実験要因のそれぞれの領域における M_0 法および θ 法の実験値と計算値の比の平均値はほぼ同程度であるが、変動係数は θ 法のほうが若干大きくなっている。

以上より、各実験要因をいくつかの領域に区分し、それぞれの領域における各種のせん断耐力評価法の算定精度を比較した場合、その精度に明確な差は生じなかった。また、いずれの評価法も算定精度は大部分の領域において不十分であった。

5.1.2 破壊形式を区分したせん断耐力の算定精度

破壊形式を区分した PC はりのせん断耐力の実験値 ($V_{u,exp}$) と各種のせん断耐力評価法による計算値 ($V_{u,cal}$) の比と、せん断スパン有効高さ比 (a/d) および下縁導入プレストレス量 (σ'_{co}) の関係を図 - 4 と図 - 5 に示す。また、せん断耐力の実験値と、各種のせん断耐力評価法による計算値の比の平均値および変動係数を表 - 5 に示す。

実験データの最終的な破壊形式は斜め引張破壊、もしくはせん断圧縮破壊であった。その内訳は、斜め引張破壊に至っているものが3個であり、せん断圧縮破壊に至っているものが44個であった。したがって、大部分の実験データにおいてせん断圧縮破壊となっていた。なお、図-4および図-5に示すとおり、軽量コンクリートを用いた試験体で斜め引張破壊に至っているデータは存在しなかった。

表-5に示す実験値と各種のせん断耐力評価法による計算値の比の平均値より、せん断圧縮破壊に至ったPCはりの場合、比較的精度がよいせん断耐力評価法は M_{cr} 法であった。しかし、変動係数は18.1%であり十分に精度よく実験値を評価しているとはいえない。

また、いずれのせん断耐力評価法も、せん断圧縮破壊に至るPCはりのせん断耐力を過小評価する傾向が見られる。とくに、 M_o 法および θ 法はその傾向が顕著である。これは、コンクリート分担分のせん断耐力評価式が、本来斜めひび割れ発生荷重を評価するための実験式であることが影響していると思われる。

一方、斜め引張破壊に至ったPCはりの場合においても、比較的精度がよいせん断耐力評価法は M_{cr} 法であった。しかし、実験値と計算値の比の平均値は1.37となっており、精度よく実験値を評価できていないことが明らかとなった。

図-4および図-5に示す軽量コンクリートを用いた実験データ18個を、さらに軽量骨材の種類で区分した場合、従来型の軽量骨材を用いた実験データは1個であり、他の17個の実験データは軽量骨材の圧壊強度等が格段に改善された高性能軽量骨材²⁰⁾を用いて実験が行われていた。

この高性能軽量骨材を用いた17個の実験データの実験値と各種のせん断耐力評価法による計算値の比の平均値は、1.37(M_o 法)、1.08(M_{cr} 法)および1.36(θ 法)となり、標準示方書に規定されているせん断耐力の低減率(一律70%)を乗じていなくてもすべての評価法において1.0を上回る結果となり、普通コンクリートの比の平均値と比較して若干小さい程度であった。

この低減率は、従来型の軽量骨材を用いた軽量鉄筋コンクリートはりの実験データに基づき、安全率を考慮したうえで定めた低減率であると思われる。しかし、従来の軽量骨材とは異なり、高強度で低吸水性を示す高性能軽量骨材を対象とした場合は、この低減率は緩和してもよいと考えられる。

5.1.3 応力分布形状により区分した算定精度

表-4 実験要因の領域を区分した各種せん断耐力評価式の算定精度

(a) コンクリートの圧縮強度								
f'_c (N/mm ²)	コンクリートの種別*	データ数	実験値/ M_o 法		実験値/ M_{cr} 法		実験値/ θ 法	
			平均値	変動係数(%)	平均値	変動係数(%)	平均値	変動係数(%)
30 ~ 40	N	7	1.35	10.1	1.15	4.5	1.49	31.0
	L	6	1.16	25.0	1.02	22.0	1.01	37.7
40 ~ 50	N	12	1.58	13.7	1.31	12.9	1.50	10.7
	L	4	1.38	9.0	1.13	5.1	1.33	11.9
50 ~ 60	N	2	1.48	10.6	1.26	9.1	1.56	7.9
	L	2	1.35	0.3	0.93	4.9	1.10	4.5
60 ~ 80	N	4	1.93	17.2	1.47	23.0	2.09	7.7
	L	6	1.38	6.7	1.10	18.5	1.62	18.7
80 ~ 100	N	4	1.98	11.6	1.49	13.7	1.94	9.9
	L	—	—	—	—	—	—	—

(b) 有効高さ								
d (mm)	コンクリートの種別*	データ数	実験値/ M_o 法		実験値/ M_{cr} 法		実験値/ θ 法	
			平均値	変動係数(%)	平均値	変動係数(%)	平均値	変動係数(%)
100 ~ 200	N	11	1.36	19.9	1.16	15.9	1.31	22.6
	L	7	1.41	20.6	1.16	22.9	1.27	26.0
200 ~ 300	N	2	1.56	10.6	1.30	9.4	1.64	7.9
	L	1	1.39	—	1.21	—	1.28	—
300 ~ 400	N	13	1.70	19.5	1.33	15.3	1.78	21.8
	L	3	1.40	9.7	1.11	5.2	1.37	12.0
400 ~ 600	N	1	1.60	—	1.16	—	1.62	—
	L	4	1.44	1.1	1.14	2.0	1.79	10.3
600 ~ 800	N	1	2.03	—	1.49	—	2.10	—
	L	—	—	—	—	—	—	—
800 ~ 1000	N	1	1.93	—	1.63	—	2.23	—
	L	3	1.34	0.6	0.99	9.6	1.11	3.8

(c) 下線導入プレストレス								
σ'_{∞} (N/mm ²)	コンクリートの種別*	データ数	実験値/ M_o 法		実験値/ M_{cr} 法		実験値/ θ 法	
			平均値	変動係数(%)	平均値	変動係数(%)	平均値	変動係数(%)
2.0 ~ 4.0	N	7	1.57	22.1	1.28	14.8	1.52	24.8
	L	5	1.41	8.3	1.07	9.5	1.37	15.4
4.0 ~ 6.0	N	7	1.37	23.3	1.20	16.9	1.48	36.6
	L	5	1.47	20.8	1.22	23.4	1.20	22.9
6.0 ~ 8.0	N	4	1.87	14.7	1.49	14.9	1.79	21.5
	L	2	1.26	5.0	1.04	2.7	0.97	15.4
8.0 ~ 10.0	N	6	1.64	20.5	1.29	14.0	1.68	14.9
	L	3	1.44	1.2	1.16	0.7	1.88	7.0
10.0 ~ 14.0	N	4	1.59	9.9	1.24	4.5	1.67	22.4
	L	2	1.29	7.4	1.05	14.9	1.34	4.4
14.0 ~ 20.0	N	1	1.39	—	0.89	—	1.83	—
	L	1	1.45	—	1.10	—	1.54	—

*：コンクリートの種別、N＝普通コンクリート、L＝軽量コンクリート

プレストレスによる断面の応力分布状態により区分したPCはりのせん断耐力の実験値と、各種のせん断耐力評価法による計算値の比の平均値および変動係数を表-6に示す。

実験値と計算値の比の平均値より、各種のせん断耐力評価法の中で、比較的精度がよいせん断耐力評価法は M_{cr} 法であった。しかし、その平均値は1.11～1.51の範囲である。また、変動係数についても2.0～18.5%の範囲であるので、十分に精度よく実験値を評価できていない。

断面上縁に引張応力を発生させた場合($\sigma'_{\infty} < 0$)と、断面上縁応力をゼロとした三角形分布の場合($\sigma'_{\infty} = 0$)の各種のせん断耐力評価法の算定精度を比較すると、後者の場合、変動係数は小さくなる傾向を示しているが、実験値と計算値の比の平均値は大きくなり算定精度が劣る結果

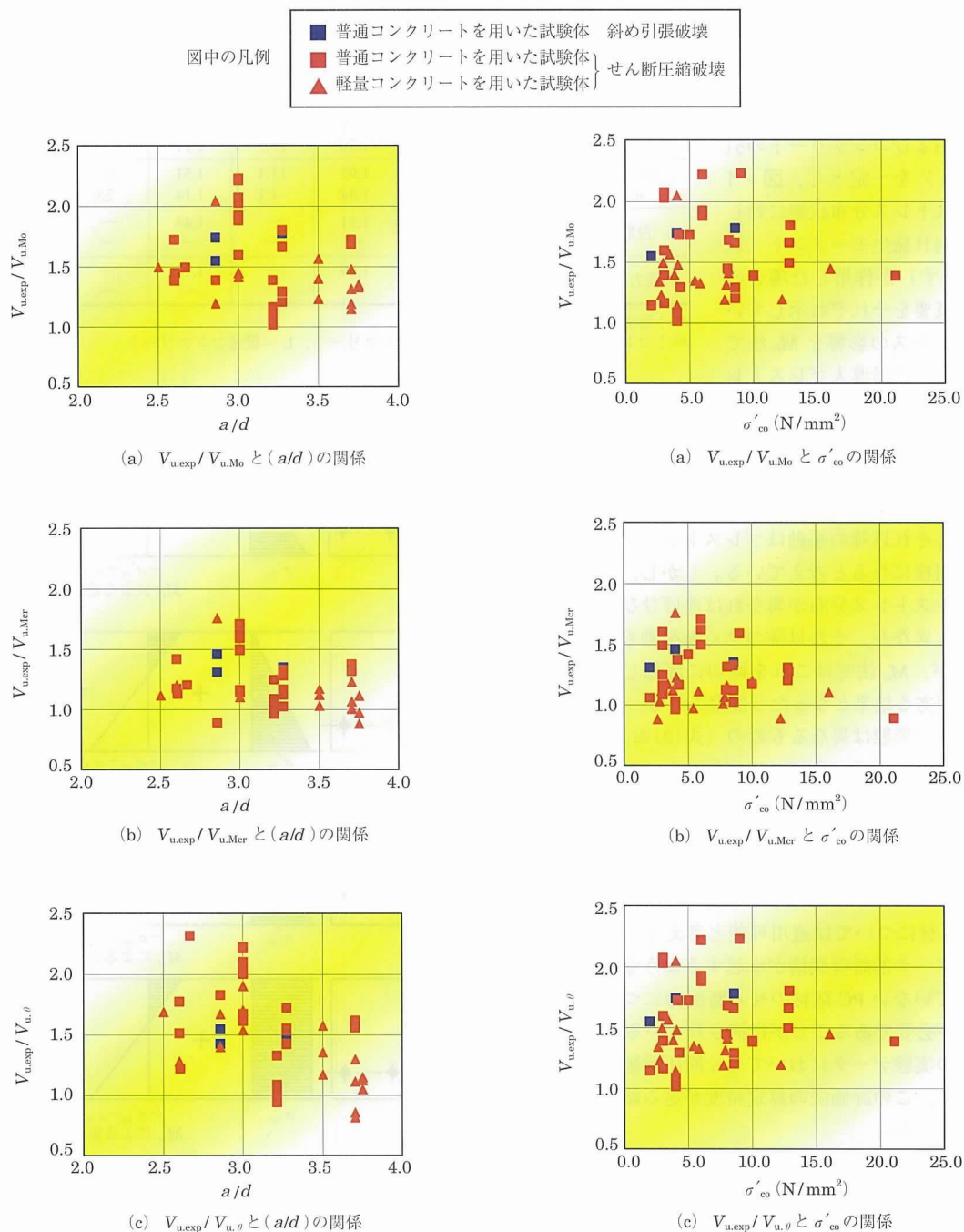
図 - 4 実験値と計算値の比と (a/d) の関係図 - 5 実験値と計算値の比と σ'_{co} の関係

表 - 5 破壊形式を区分した各種のせん断耐力評価法の算定精度

破壊形式	データ数	せん断耐力評価法					
		M_o 法		M_{er} 法		θ 法	
		平均値	変動係数 (%)	平均値	変動係数 (%)	平均値	変動係数 (%)
斜め引張	3	1.69	6.0	1.37	4.6	1.49	3.2
せん断圧縮	44	1.50	20.6	1.20	18.1	1.53	27.2

となった。

台形分布および長方形分布のデータ数は過小であるが、いずれにせよ、各種のせん断耐力評価法はこれらの応力分布形状を有する PC はりのせん断耐力を精度よく評価して

いるとはいいがたい。

以上の結果は、各供試体の応力分布以外の実験要因が異なっていることを考慮せずに得られたものであるが、デコンプレッションモーメントを用いたせん断耐力評価方法に

は評価方法としての限界があるという従来からの指摘³⁾を再確認することにより検証できる。

図 - 6 は、下縁導入プレストレス量 (σ'_{co}) およびコンクリートの引張強度 (σ_{ct}) を一定とし、図 - 1 に示すプレストレス分布状態に対して曲げひび割れ発生モーメント (以下、 M_{cr} と称す) が作用した場合の応力分布の概要をそれぞれ示している。プレストレスの影響を M_{cr} 法で評価する場合、下縁導入プレストレス量およびコンクリートの引張強度が同じであれば M_{cr} も同じとなり、プレストレス分布が異なる場合でもせん断耐力は同一となる。すなわち、プレストレスの影響は M_{cr} と等しい大きさのモーメントが作用した段階で消失し、せん断力に対するそれ以降の挙動はプレストレスが作用していない部材と同様になると考えている。しかし、図 - 6 に示すようにプレストレス分布が異なれば曲げひび割れ発生時の応力分布も異なり、それ以降のせん断挙動も変化すると考えられるが、 M_{cr} 法ではこれを適切に評価していないので算定精度が劣る結果となったと推察される。ただし、 M_{cr} 法は、評価式の形態は異なるものの (式 (2) および式 (3) 参照)、 M_0 法で考慮しているデコンプレッション状態からさらに曲げひび割れが発生するまでのせん断力の増加分も評価しているため、せん断耐力の計算値が大きくなる傾向にあり、 M_0 法より算定精度が向上したと考えられる。

θ 法については、トラス作用が卓越するせん断補強筋を有する PC 部材については適用可能と考えられているものの、タイドアーチ的耐荷機構が卓越するようなせん断補強筋を配置していない PC 部材のせん断耐力については今後更なる検討が必要であることが指摘されている²¹⁾。本研究では大部分の実験データにおいてせん断圧縮破壊となっていることから、この評価法の算定精度が劣る結果となったものと考えられる。

5.2 国外の実験データに対する算定精度

ここでは、各種のせん断耐力評価法の算定精度を、表 - 1 に示す国外の文献より収集した 16 個の実験データ (文献¹⁶⁾) を用いて検討を行うことにした。この実験データ数は、国内の実験データ数と比較して過小である。これは、国外の文献においては I 型の断面形状を有し、最終的な破壊形式がウェブ圧縮破壊であったものが大部分であったことによる。

これらの実験データに関しては、荷重点および支点の支圧板の大きさが明らかにされていなかった。そのため、実験結果の妥当性を確認するための非線形有限要素法による解析は行っており、参考までにすべてのデータを用いて検討を行った。

また、これらの実験データの破壊形式は、すべてせん断圧縮破壊であり、プレストレスによる断面の応力分布状態は、断面上面に引張応力が発生している三角形分布である。

実験データの実験値と各種のせん断耐力評価法による計算値の比と、せん断スパン有効高さ比 (a/d) の関係を図 - 7

表 - 6 応力分布状態を区分した各種せん断耐力評価式の算定精度

応力分布形状 ^{*1}	コンクリートの種別 ^{*2}	データ数	実験値/ M_0 法		実験値/ M_{cr} 法		実験値/ θ 法	
			平均値	変動係数 (%)	平均値	変動係数 (%)	平均値	変動係数 (%)
三角形分布 $\sigma'_{co} < 0$	N	17	1.59	14.8	1.27	14.7	1.68	19.9
	L	14	1.39	15.5	1.11	18.5	1.26	20.7
三角形分布 $\sigma'_{co} = 0$	N	10	1.92	11.1	1.51	9.8	1.88	13.8
	L	4	1.44	1.1	1.14	2.0	1.79	10.3
台形分布	N	1	1.71	—	1.44	—	1.58	—
	L	—	—	—	—	—	—	—
長方形分布	N	1	1.59	—	1.34	—	1.48	—
	L	—	—	—	—	—	—	—

*1: 応力分布形状は、図 - 1 参照

*2: コンクリートの種別、N = 普通コンクリート、L = 軽量コンクリート

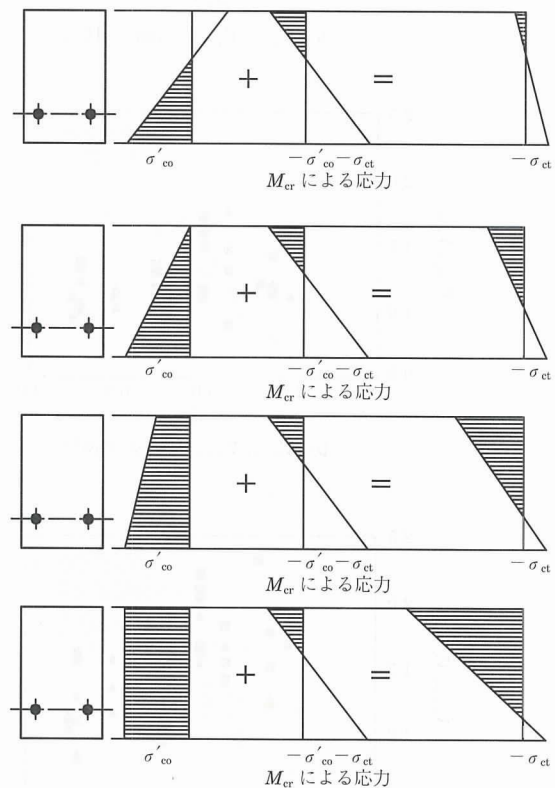


図 - 6 M_{cr} が作用した場合の応力分布の概要図

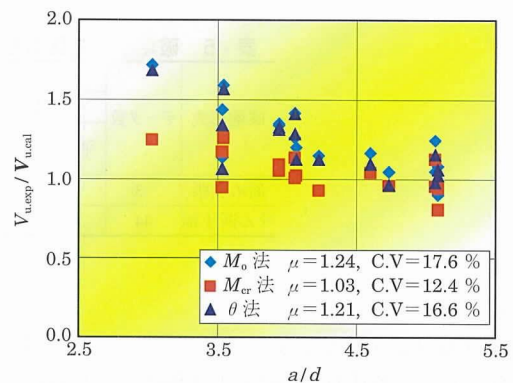


図 - 7 実験値と計算値の比と (a/d) の関係

表-7 検討に用いた実験データの概要

	文献番号	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	有効高さ d (mm)	せん断 スパン比 a/d	下縁プレ ストレス量 σ'_{co} (N/mm ²)	せん断耐力		$\frac{V_{u,exp}}{V_{u,FEM}}$	支圧板の幅	
						実験値 $V_{u,exp}$ (kN)	解析値 $V_{u,FEM}$ (kN)		載荷点 B_1 (mm)	支点 B_2 (mm)
Data-1	9	33.4	140	2.86	2.0	42 ^D	46 ^D	0.91	ローラー	ローラー
Data-2	9	33.4	140	2.86	4.0	52 ^D	49 ^D	1.06	ローラー	ローラー
Data-3	5	47.0	300	3.50	3.4	135 ^S	116 ^S	1.16	65	150
Data-4	10	39.7	330	3.27	8.5	149 ^S	179 ^S	0.83	50	50
Data-5	11	39.2	250	2.60	10.0	111 ^S	105 ^S	1.06	50	200
Data-6	14	86.3	350	3.00	6.0	284 ^S	271 ^S	1.05	100	150
Data-7	14	71.4	950	3.00	6.0	586 ^S	552 ^S	1.06	100	150

* : PC はりの破壊形式, D = 斜め引張破壊, S = せん断圧縮破壊

に示す。

国内の実験データに対する各種のせん断耐力評価法の算定精度と同様に、この場合も実験値と計算値の平均値および変動係数より、比較的精度がよいせん断耐力評価法は M_{cr} 法であった。

5.3 ま と め

各種のせん断耐力評価法の適用性について検討した結果、比較的精度よく PC はりのせん断耐力を評価できた評価法は M_{cr} 法であった。しかし、この評価法の場合でも十分に精度よく PC はりのせん断耐力を評価しているとはいいがたく、せん断耐力評価法としての適用性については十分ではないと思われる。

これは、前述したとおり大部分の実験データにおいてせん断圧縮破壊となっているにもかかわらず、各種のせん断耐力評価法の中のコンクリート分担分のせん断耐力評価式が、斜めひび割れ発生荷重を評価するための実験式であることが影響していると思われる。

以上より、プレストレスの分布形状や破壊形式を考慮した精度のよい新たな PC はりのせん断耐力評価法の提案が必要であると考えられる。

6. PC はりの破壊形式に及ぼす要因

6.1 PC はりの破壊形式

一般に、PC はりの破壊形式に比較的大きく影響を及ぼす実験要因は、せん断スパン有効高さ比 (a/d) および下縁導入プレストレス (σ'_{co}) であると考えられる。

検討の対象とした PC はりの破壊形式は、大部分がせん断圧縮破壊であった。この破壊形式は、せん断スパン有効高さ比 (a/d) が比較的小さい RC はりに見られる形式である。しかし、図-4によれば、せん断スパン有効高さ比 (a/d) を比較的大きく設定している実験データにおいてもせん断圧縮破壊に至っており、このような現象は、PC はりのせん断破壊挙動の一つの特徴であると考えられる。

一方、PC はりの斜め引張破壊は、せん断スパン有効高さ比 (a/d) を比較的大きく設定し、断面下縁に少量のプレストレスしか導入されていないはりに見られる破壊形式であると考えられる。図-5に示す斜め引張破壊に至っている実験データ3個のうち、上述した条件に適合するデータは2個である。残る1個のデータは、せん断スパン有効高さ比 (a/d) を比較的大きく設定し、断面下縁に 10 N/mm² 程度の

比較的大きなプレストレスを導入しているデータであるが斜め引張破壊に至っている。

したがって、これらの実験要因から、斜め引張破壊が発生する領域、または、せん断圧縮破壊が発生する領域などと、領域を特定して PC はりの破壊形式を区分するのは困難であり、他の要因が影響していることが推測された。

そこで、著者らは、PC はりの破壊形式に影響を及ぼす要因について、非線形有限要素法を用いて数値解析的に検討を行うことにした。

6.2 解析に用いた実験データの概要

検討に用いた実験データの概要を表-7に示す。これら7個のデータは、国内で行われた実験データの中から PC はりのせん断耐力を解析においても比較的精度よく評価でき、さらに、破壊形式も再現することができたデータを選別したものである。

Data-1 および Data-2 は、破壊形式が斜め引張破壊となっているもので、Data-3 ~ Data-7 については、せん断圧縮破壊に至っているものである。表-7に示すとおり、斜め引張破壊に至っている実験データは、載荷点および支点到支圧板を使用せず、ローラーを使用していることが分かる。

そこで、まず、せん断圧縮破壊に至った Data-3 ~ Data-7 の載荷点および支点到支圧板の大きさが PC はりの破壊形式に及ぼす影響についてパラメータ解析を行って検討した。

ここで、解析における荷重の載荷方法は、ローラーによる載荷の場合、実験での載荷点(支点)位置に節点を設け、その位置に直接変位を与えた。一方、支圧板による載荷の場合は、載荷点(支点)の支圧板上面の中央位置に節点を設け、その位置に変位を与えた(図-8参照)。

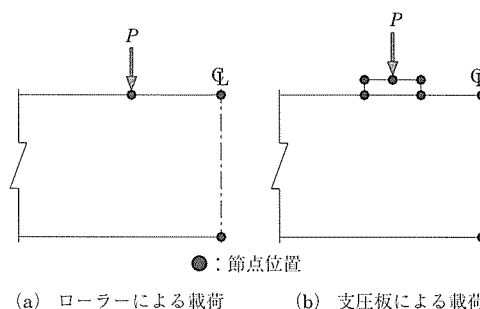


図-8 載荷方法の概要図

6.3 支圧板の幅の影響

ここでは、実験で使用された載荷点の支圧板（以下、載荷板と称す）の幅(B_1)および支点の支圧板の幅(B_2)を0.25倍～1.50倍の範囲で変化させた。その際、載荷板と支点の支圧板の剛性は実験時と同様とするため、支圧板の幅と厚さの比を一定としてモデル化した。

ここで、解析での破壊形式は、ひび割れ図およびピーク応力時ひずみより次のように判定した。解析で得られた代表的なひび割れ図を図-9に示す。なお、ひび割れが卓越している箇所は、太いマーカーで示している。

本研究で使用した解析プログラムは、表-2に示すとおりひび割れが卓越することによるせん断剛性の低下を考慮している。斜め引張破壊の場合、最大荷重に近づくにつれて卓越した斜めひび割れが発生（図中の赤丸で囲む範囲）し、また、その箇所において引張主ひずみも卓越して、載荷点付近の圧縮主ひずみが圧縮を受けるコンクリートのピーク応力時ひずみに達していない状態で耐力が低下する。この状態を斜め引張破壊と想定した。

一方、せん断圧縮破壊の場合、斜めひび割れが発生している個所で引張主ひずみが卓越しても荷重が増加し、最終的に載荷点付近の圧縮主ひずみが圧縮を受けるコンクリートのピーク応力時ひずみに達し耐力が低下する。この状態をせん断圧縮破壊と想定した。

載荷板の幅(B_1)と有効高さ(d)の比と、支圧板の幅の倍率（実験で実際に使用された載荷点および支点の支圧板の大きさを1.00とした場合の比率）の関係を図-10に示す。ここでは、PCはりの破壊形式を特定する場合の一つの判断基準として、載荷板の幅(B_1)と有効高さ(d)との比に着目した。図中の白抜き部の記号(◇□△)は斜め引張破壊を示し、その他の着色している記号はせん断圧縮破壊を示

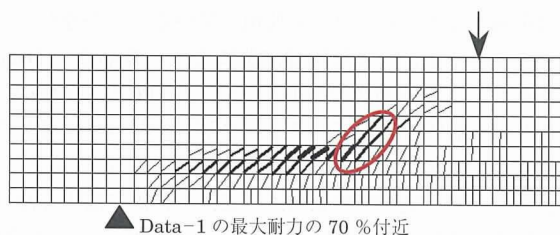


図-9 ひび割れ図

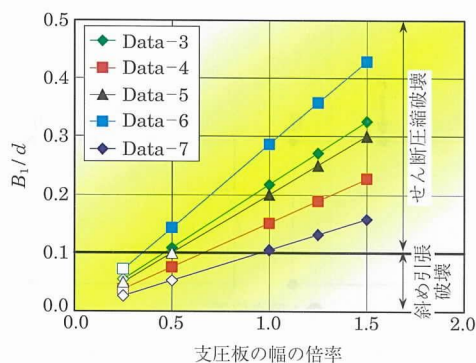


図-10 (B_1/d) と支圧板の幅の関係

す。

本検討の範囲においては、載荷板の幅(B_1)と有効高さ(d)の比が0.1程度以下になると斜め引張破壊となり、0.1程度以上になるとせん断圧縮となる傾向を示した。

次に、以上の結果を検証するため、表-7に示す斜め引張破壊に至ったData-1およびData-2を用いて、載荷板および支点の支圧板の幅がPCはりの破壊形式に及ぼす影響を検討した。

これらのデータは、実際には載荷点および支点にローラーを使用している。これに対し解析では、幅の狭い支圧板を載荷点および支点に使用した実験を想定し、載荷板の幅(B_1)と有効高さ(d)の比を0.05、0.10および0.15として解析を行った。ここで、支点の支圧板の幅については、載荷板の幅と同等の寸法としている。

載荷板の幅(B_1)と有効高さ(d)の比と破壊形式の関係を表-8に示す。その結果、ここでも載荷板の幅(B_1)と有効高さ(d)の比が0.1を下回ると斜め引張破壊となり、0.1を上回るとせん断圧縮破壊となる傾向を示した。

本研究では、載荷板の幅(B_1)と有効高さ(d)の比を用いた場合において前述した傾向を示す結果となっているが、RC部材を対象としたディープビームの評価式²²⁾（せん断スパン有効高さ比(a/d)の適用範囲は0.3～3.0程度）についてもこの比の影響が考慮されている。したがって、載荷板の幅(B_1)と有効高さ(d)の比が破壊形式に及ぼす影響に関しては、PC部材においても同様な傾向を示すものと考えられる。

Data-3～Data-7を用いて、実際に実験で用いられた載荷点および支点の支圧板の幅の大きさ(1.00倍)と、それらの大きさを0.25倍とした場合のせん断耐力の解析値の比を表-9に示す。解析での破壊形式は、1.00倍とした場合は実験結果と同様にすべてのデータでせん断圧縮破壊となったのに対し、0.25倍とした場合はすべてのデータで斜め引張破壊となった。

表-9に示すとおり、破壊形式が斜め引張破壊からせん断圧縮破壊へ移行すると、1.3倍程度せん断耐力が大きくなった。これは、せん断圧縮破壊に至る場合、斜めひび割れ発生後タイドアーチ的耐荷機構が形成され、その後も荷重

表-8 (B_1/d) と破壊形式の関係

	B_1/d		
	0.05	0.10	0.15
Data-1	斜め引張	せん断圧縮	せん断圧縮
Data-2	斜め引張	せん断圧縮	せん断圧縮

表-9 せん断耐力比

	せん断耐力 (kN)		耐力比 ②/①
	0.25倍 ①	1.00倍 ②	
Data-3	87	116	1.33
Data-4	150	179	1.19
Data-5	88	105	1.19
Data-6	236	271	1.15
Data-7	388	552	1.42

の増加に耐えて、最終的には圧縮域まで達した斜めひび割れの上側のコンクリートが圧壊して破壊するのが原因と思われる。したがって、破壊形式が異なる場合、PC はりのせん断耐力にも影響を及ぼすことが明らかとなった。

以上の結果より、PC はりの破壊形式およびせん断耐力に影響を及ぼす要因として、載荷点および支点の支圧板の幅の大きさが影響していると考えられ、その破壊形式を特定する際には、載荷板の幅 (B_1) と有効高さ (d) の比が一つの判断基準になると考えられる。

6.4 ま と め

本章までの検討の結果、PC はりの場合、せん断スパン有効高さ比 (a/d) を比較的大きくしてもせん断圧縮破壊に至っているのが大部分であった。また、PC はりの破壊形式およびせん断耐力は、プレストレスの分布形状ならびに載荷点および支点の支圧板の幅に影響を受けることが明らかとなった。

以上より、これらの影響を取り入れた PC はりのせん断耐力評価法を提案できれば、精度のよいせん断耐力評価法となる可能性が高いと考えられる。

7. 結 論

国内および国外で行われた実験データを用いて、各種のせん断耐力評価法の適合性について検討を行った。また、非線形有限要素法を用いて PC はりの破壊形式に及ぼす要因について検討した。

一連の検討の結果、以下に示す結論を得た。

- (1) 各実験要因をいくつかの領域に区分し、それぞれの領域における各種のせん断耐力評価法の算定精度を比較した場合、その精度に明確な差は生じなかった。また、いずれの評価法の算定精度も大部分の領域において不十分であった。
- (2) 高性能軽量骨材を使用した軽量 PC はりのせん断耐力の実験値と各種のせん断耐力評価法による計算値の比の平均値は、標準示方書に規定される低減率を乗じていなくてもすべての評価法において 1.0 を上回る結果となり、普通コンクリートの比の平均値と比較して若干小さい程度であった。したがって、高性能軽量骨材を対象とした PC はりについては、この低減率を緩和してもよいと考えられる。
- (3) 各種のせん断耐力評価法は設計上は非常に簡便であるが、プレストレスが PC はりのせん断耐力に及ぼす影響を正確に考慮していないと考えられ、せん断耐力評価法としての適用性については十分ではないと思われる。したがって、これらの影響を考慮した精度のよい新たな PC はりのせん断耐力評価法の提案が必要であると考えられる。
- (4) PC はりの破壊形式は、せん断スパン有効高さ比 (a/d) および下縁導入プレストレス量 (σ'_{co}) に関係なく、せん断圧縮破壊が支配的であることが明らかとなった。このような現象は、PC はりのせん断破壊挙動の一つの特徴であると考えられる。
- (5) PC はりの破壊形式およびせん断耐力に及ぼす要因と

して、載荷点および支点の支圧板の幅の大きさが影響していると考えられ、その破壊形式を特定する際には、載荷板の幅 (B_1) と有効高さ (d) の比が一つの判断基準になると考えられる。

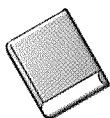
謝 辞

本研究を行うにあたり、実験データを提供していただいた(財)鉄道総合技術研究所 佐藤 勉氏、極東鋼弦コンクリート振興(株)山口隆裕氏、日本大学理工学部 柳沼善明教授、独立行政法人土木研究所 渡辺博志氏、(財)道路保全技術センター 三方康弘氏に、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書・〔構造性能照査編〕, pp.67-72, 2002 年制定
- 2) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村 甫：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.167-176, 1986
- 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, pp.61-64, 1991
- 4) 田村 聖, 濱田 譲, 前堀伸平, 二羽淳一郎：高性能軽量骨材を用いた大型 PC はりのせん断耐荷特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.709-714, 2001
- 5) 濱田 譲, 田村 聖, 前堀伸平, 二羽淳一郎：高性能軽量コンクリートを用いた PC はり部材のせん断耐力, 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, pp.739-744, 2000
- 6) 伊藤忠彦, 山口隆裕, 池田尚治：プレキャストセグメント PC はりの曲げせん断挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.967-972, 1994
- 7) Mikata, Y., et al.: Effect of Prestress on Shear Capacity of Prestressed Concrete Members, Proceedings of fib Symposium, Prague, pp.331-336, Oct.1999
- 8) 渡辺博志, 河野広隆, 鈴木雅博, 佐藤重一：高強度軽量コンクリートを用いた PC 部材のせん断強度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.14, No.1, pp.13-22, 2003
- 9) 小林和夫：はり部材のせん断耐荷特性に対する導入プレストレスの効果, 第 46 回セメント技術大会講演集, pp.802-807, 1992
- 10) 佐藤 勉, 石橋忠良, 山下裕章, 高田三郎：プレストレストコンクリートはりのせん断耐力と破壊性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.2, pp.323-328, 1987
- 11) 伊藤忠彦, 鈴木宣政, 山口隆裕, 池田尚治：人工軽量骨材を用いた PC はりの曲げせん断挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.1133-1138, 1996
- 12) 三方康弘, 井上 晋, 小林和夫, 仁枝 保：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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.319-324, 1998
- 13) 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, 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, pp.545-550, 2000
- 14) 建設省土木研究所：高強度コンクリート部材の設計法に関する共同研究報告書, 1995
- 15) 三方康弘：コンクリート構造部材におけるせん断耐荷特性に関する基礎的研究, 大阪工業大学学位論文, 2002
- 16) Kar, J.N.: Shear Strength of Prestressed Concrete Beams Without Reinforcement, Magazine of Concrete Research, Vol.21, No.68, pp.159-170, 1969
- 17) 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, pp.76-81, 2003

- 18) 金子佳生, 篠原保二, 白井伸明, 長谷川俊昭: コンクリートの破壊のメカニズムの解明に向けた取り組み, コンクリート工学, Vol.40, No.11, pp.26-33, 2002
- 19) 田村 聖, Aravinthan, T., 濱田 譲, 二羽淳一郎: セン断補強筋の無い大型 PC はりのせん断耐力に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.637-642, 2002
- 20) 岡本享久, 石川雄康, 榎木 隆, 笹島昌男: 高性能軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol.37, No.4, pp.12-18, 1999
- 21) 三方康弘, 井上 晋, 小林和夫, 仁枝 保: PC はり部材のせん断耐力に及ぼすプレストレスの効果, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.149-159, 2001
- 22) 二羽淳一郎: FEM 解析に基づくディープビームのせん断耐力算定式, 日本コンクリート工学協会, 第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, pp.119-128, 1983
- 【2003 年 3 月 28 日受付】



刊行物案内

第 1 回 *fib* コンgress 2002 — 21 世紀のコンクリート構造 — 論文集

(平成 14 年 10 月)

平成 14 年 10 月に大阪で開催された標記コンgressの講演論文集です。

下記の 3 種類となります。

- | | |
|---|--|
| (1) プロシーディングス 1 (印刷物 全 2 巻):
全ての招待講演論文および採用論文の要旨
(1 論文あたり 2 ページ) を掲載
頒布価格: 10 000 円 (送料 1 200 円別途) | (3) プロシーディングス 3 (印刷物 全 8 巻):
プロシーディングス 1 および全ての採用論文を掲載
頒布価格: 30 000 円 (送料 2 000 円別途) |
| (2) プロシーディングス 2 (CD-ROM 全 3 枚):
全ての発表論文を掲載
頒布価格: 2 000 円 (送料 400 円別途) | |