論文　高強度材料を用いたRC梁のせん断耐力に関する実験的検討

黒岩　俊之*1・佐藤　勉*2・岡本　大*3・吉田　幸司*3

要旨：高強度コンクリートを用いたせん断補強筋のない梁について，単純梁形式の載荷試験を行い，既往の研究結果を踏まえて斜めひび割れ強度に関する検討を行った。また同様に，高強度帯筋を用いた梁試験体についてコンクリート強度と帯筋強度の組合わせを変化させた場合のせん断耐力に関する検討を行った。その結果，せん断耐力の評価において，コンクリートの負担せん断力に上限値を設定する必要があること，高強度のコンクリートを使用する場合には，帯筋強度の規格値を用いて評価できる可能性があることがわかった。

キーワード：高強度コンクリート，高強度鉄筋，せん断耐力，鉄筋コンクリート梁

1.　はじめに

RC 構造物における過密配筋の対策，あるいは高耐久化などを目的として，コンクリートや鉄筋に対して高強度材料を適用するための研究開発が行われてきている。高強度材料を RC 部材に適用するためには，耐力や変形性能などの基本的な部材特性を明らかにし，設計に反映させることが必要である。

H8 年版土木学会標準示方書[1)]（以後，土木学会示方書と記す）におけるせん断補強筋のない棒部材のせん断耐力（V_c）の算定式には，斜めひび割れ強度（f_{vcd}）に対して上限値が設定されている。V_c の算定式を，f_{vcd} の上限値を考慮せずに高強度コンクリートに対して用いると危険側の評価を与えるとの報告もある。また，せん断補強筋によって受け持たれるせん断耐力（以後，V_s）の算定において考慮するせん断補強筋の降伏強度（f_{wyd}）は，400 N/mm^2 以下に制限されているが，実験結果等に基づいた十分な検証が行われているとはいえない。

本検討では，高強度材料を用いた梁部材の載荷実験を実施し，せん断補強筋のない梁部材のせん断耐力の実験値と，土木学会示方書における V_c の計算値を比較し，V_c の再評価を行った。また，同様にせん断補強筋に f_{wyd}＝400 N/mm^2 以上の高強度鉄筋を用いた梁部材のせん断耐力の実験値と計算値の比較検討を行い，土木学会示方書のせん断耐力算定式における，せん断補強筋強度の適用範囲についての再評価を行った。

2.　実験概要

2.1　試験体

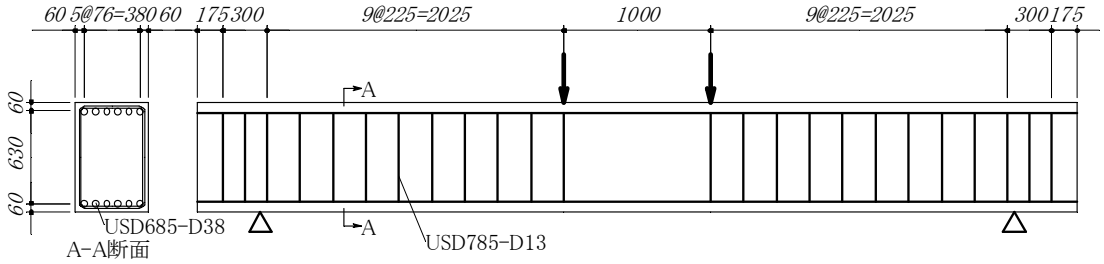
試験体一覧を**表－1**に示す。主なパラメータは，コンクリート強度，軸方向筋比，帯筋比，帯筋強度とした。これらの試験体のうち代表的なものとしてNo.5, 6の配筋図を**図－1**に示す。

各試験体ともに軸方向鉄筋にはネジフシ鉄筋を用い，定着は端部の定着プレートにて確保した。帯筋は溶接閉鎖型のものを用いた。

表－1　試験体一覧

試験体	B (mm)	H (mm)	d (mm)	La (mm)	La/d	軸方向筋 規格	軸方向筋 本数	軸方向筋 p_t(%)	帯筋 規格	帯筋 ピッチ	帯筋 p_w(%)	f'_{ck} (N/mm^2)
1	500	750	690	2070	3.0	USD685-D22	6	0.67	－	－	－	80
2						USD685-D38	4	1.32	－	－	－	
3							6	1.98	USD785-D13	ctc200-2	0.25	
4							4	1.32	USD785-D10	ctc300-2	0.10	
5							6	1.9	USD785-D13	ctc225-2	0.23	30
6											0.23	50
7									USD1275-D10		0.16	30
8											0.16	50

*1 東急建設(株)　技術研究所土木研究室　工修　（正会員）
*2 (財)鉄道総合技術研究所　構造物技術研究部コンクリート構造室長　工博　（正会員）
*3 (財)鉄道総合技術研究所　構造物技術研究部コンクリート構造　工修　（正会員）



図－1　試験体配筋図（No.5,6）

2.2　使用材料

コンクリートは，目標強度が 30，50，80N/mm^2 の 3 種類とした。各試験体に使用したコンクリートの示方配合表を**表－2**に示す。

鉄筋は，軸方向鉄筋に降伏強度の規格値が 685 N/mm^2，帯筋には 785 N/mm^2 および 1275 N/mm^2 のものを使用した。鉄筋の材料特性を**表－3**に示す。

2.3　載荷方法

載荷は，変位制御による 2 点集中（等曲げ区間：1000㎜）の単純梁形式で行った。支点は試験体の回転変形および軸方向変形を拘束しないように,両端をピン+スライド支持とした。

表－2　示方配合表

試験体	W/C	s/a	単位量(kg/m^3)						混和剤
	%	%	W	C	S1	S2	G	Ad	種類
1～4	28.0	46.6	170	608	533	222	872	8.51	高性能AE減水剤
5,7	55.6	45.8	170	306	583	242	985	3.83	AE減水剤
6,8	40.0	44.4	165	413	540	150	967	4.34	高性能AE減水剤

表－3　鉄筋の材料特性

用途	鉄筋の種類	試験体No.	降伏応力度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 ×10^5(N/mm^2)
軸方向筋	USD685 D22	1	664	934	1.90
	USD685 D38	2,3,4	709	900	1.96
	USD685 D38	5～8	700	904	1.87
帯筋	USD785 D10	4	1086	1216	2.03
	USD785 D13	3	1065	1226	2.01
	USD785 D13	5,6	1029	1192	2.02
	SBPD1275 ϕ10.7	7,8	1403	1497	2.34

3.　せん断耐力の評価

3.1　評価手法の概要

本研究の実験結果および高強度材料を使用した既往の梁実験[2)~7)]の結果を併せて，せん断耐力の評価式を検討する。評価手法を以下に示す。

(1)　V_cの計算

土木学会示方書において V_c の算定式の基本となっているのが，二羽らの研究[8)]による(1)式である。

$$V_c = f_{vc} \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot b \cdot d / \gamma_b \qquad (1)$$

ここで，$f_{vc} = 0.2 \cdot \sqrt[3]{f'_c}$

$\beta_d = \sqrt[4]{1000/d} \leq 1.5$

$\beta_p = \sqrt[3]{100 p_t} \leq 1.5$

$\beta_a = 0.75 + 1.4 d / a$

d：有効高さ　L_a: せん断スパン長

f'_c: コンクリート圧縮強度

p_t: 引張鉄筋比

また，土木学会示方書における高強度コンクリートを用いる場合の対応としては，$f_{vc} \leqq$ 0.72N/mm^2 という上限値を設けている。

本検討では，実験値と(1)式に基いた計算値の比較により，V_c 算定時の f_{vc} の上限値についての検討を行った。

(2)　V_yの計算

せん断耐力（V_y）の計算は，基本的には V_c と V_s の和で表されている。V_s は土木学会示方書に示されるトラス理論に基く式を適用することとした。

$$V_y = V_c + V_s \qquad (2)$$

$$V_s = \left\{ A_w \cdot f_{wy} \left(\sin\alpha_s + \cos\alpha_s \right) / s_s \right\} z / \gamma_b \qquad (3)$$

ここで，A_w：区間 s_s における帯筋の総断面積

f_{wy}：帯筋の設計降伏強度

α_s：帯筋と部材軸とのなす角度

s_s：帯筋の配置間隔

z：応力中心間距離で，d/1.15

なお，土木学会示方書においては帯筋の強度の適用範囲として $f_{wy} \leqq$ 400N/mm^2 としているが，

今回の検討では f_{wy} の値に材料試験による降伏強度の実測値を使用した。

3.2　V_cに関する検討

(1)　f_{vc}の上限値に関する検討

V_cの実験値として，今回の検討で対象とした帯鉄筋を有していない試験体は全部で 24 体である。その諸元およびせん断耐力を**表－４**，**表－５**に示す。なお，V_cの実験値（V_cEXP）は，斜めひび割れが発生し初めに耐力低下を生じた点とした。V_cEXP と V_cの計算値を比較して基本式の適用性を検討する際には，f_{vc}の上限値を考慮する場合としない場合についての検討を行う必要がある。V_cの実験値 V_cEXP から(1)式によって逆算した f_{vc}の実験値（$f_{vc}EXP$）と基本式による f_{vc}の計算値の比較を**図－２**に示す。

$f_{vc}EXP$ の分布を見ると，コンクリート圧縮強度 f'_c に対する f_{vc} の値には頭打ちの傾向が観察され，f_{vc}≦0.72 N/mm^{2}という上限値を考慮しない場合，**図－２**に示すように土木学会示方書で用いられている部材係数 γ_b＝1.3を考慮しても依然として多くの実験データは危険側の評価となっている。しかし，上限値を考慮した場合は，**図－２**に示すように部材係数 γ_b＝1.3を考慮することで実験データは安全側の評価となった。

今回取り扱ったデータの範囲では，$f_{vc}EXP$ の平均値は 0.67N/mm^2 であり，土木学会示方書の上限値 0.72N/mm^2 では危険側の評価を与える結果となったが，現状では実験データ数も少ないことを考えると，部材係数 γ_b＝1.3 を考慮して，f_{vc} の上限値としては 0.72N/mm^2 という値を用いることが妥当であると考えられる。

(2)　β_dおよびβ_pに関する検討

図－３には，V_cEXP から(1)式によって逆算した β_d と有効高さ d の関係を示す。なお，f_{vc}≦0.72 N/mm^2 としている。

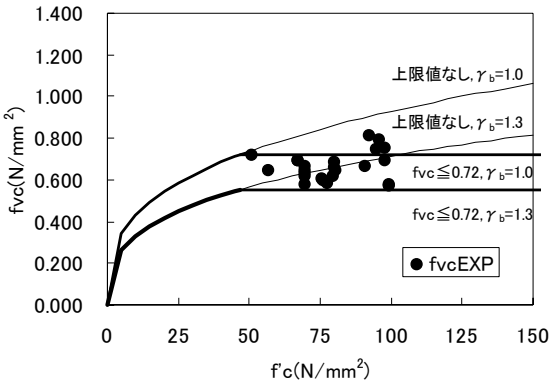
図より，寸法効果が普通強度コンクリートに比べて若干顕著となる傾向も見られるが，実験の範囲では β_d が d の 1/4 乗に反比例するという関係は，高強度コンクリートを用いた場合にも概ね成り立っていると考えられる。

表－４　試験体諸元（V_cの検討）

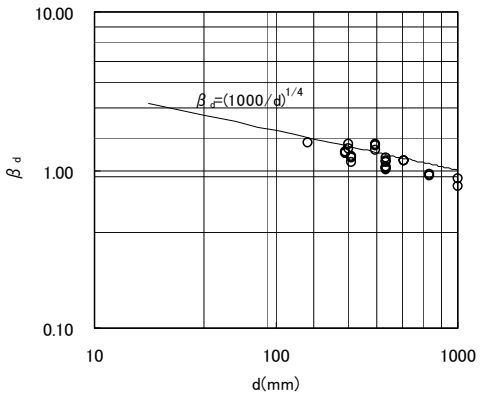
試験体 文献番号	No.	部材幅 b(mm)	有効高さ d(mm)	せん断スパン La(mm)	La/d	b/d	コンクリート圧縮強度 f'c(N/mm^2)	引張鉄筋 降伏強度 fsy(N/mm^2)	引張鉄筋 鉄筋比 p_t(%)
本実験	1	500	690	2070	3.00	0.72	75.7	664	0.67
	2	500	690	2070	3.00	0.72	79.4	709	1.32
2)	3	350	400	1200	3.00	0.88	99.3	895	2.27
3)	5	600	400	1200	3.00	1.50	79.7	744	2.32
	6	525	400	1200	3.00	1.31	79.8	744	2.27
	7	435	400	1200	3.00	1.09	77.3	744	2.28
	8	350	400	1200	3.00	0.88	75.9	744	2.27
	9	600	400	1200	3.00	1.50	80.5	737	2.32
4)	TS4	200	150	600	4.00	1.33	90.6	815	1.27
	M3	200	350	1050	3.00	0.57	95.5	781	1.23
	M4	200	350	1400	4.00	0.57	94.5	781	1.23
	M6	200	350	1050	3.00	0.57	92.5	815	0.54
5)	1	150	260	780	3.00	0.58	69.5	711	1.47
	3	150	260	780	3.00	0.58	69.5	333	1.47
	5	150	240	780	3.25	0.63	69.5	1050	1.59
	7	150	240	780	3.25	0.63	69.5	363	1.59
	9	150	260	780	3.00	0.58	69.5	711	1.47
6)	M25-3	150	250	750	3.00	0.60	67.1	388	1.53
	M50-3	150	500	1500	3.00	0.30	67.1	388	1.53
	M100-3	350	1000	3000	3.00	0.35	56.9	388	1.36
	U25-3	150	250	750	3.00	0.60	97.5	388	1.53
	U50-3	150	500	1500	3.00	0.30	97.5	388	1.53
	U100-3	350	1000	3000	3.00	0.35	99.1	388	1.36
7)	1	400	350	1050	3.00	1.14	51.0	698	1.84

表－５　V_cに関する実験値と計算値の関係

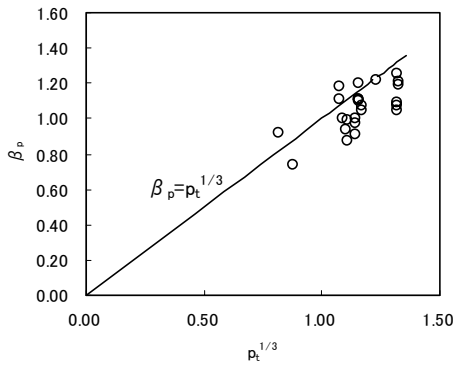
試験体 文献番号	No.	実験値 VcEXP(kN)	計算値(fvc上限なし) VcEXP/VcCAL1	計算値(fvc≦0.72) VcEXP/VcCAL2
本実験	1	245.0	0.718	0.844
	2	311.7	0.718	0.857
2)	3	162.4	0.623	0.801
3)	5	319.85	0.764	0.914
	6	290.1	0.798	0.954
	7	205.95	0.690	0.816
	8	169.25	0.710	0.835
	9	314.75	0.750	0.899
4)	TS4	38.2	0.741	0.924
	M3	94.1	0.868	1.102
	M4	80.4	0.823	1.041
	M6	73.5	0.901	1.132
5)	1	47.8	0.769	0.879
	3	46.8	0.753	0.860
	5	47.1	0.808	0.923
	7	45.9	0.787	0.899
	9	43.7	0.703	0.803
6)	M25-3	51.5	0.852	0.962
	M50-3	86.9	0.855	0.965
	M100-3	304.1	0.838	0.895
	U25-3	55.9	0.817	1.044
	U50-3	86.4	0.751	0.960
	U100-3	270.2	0.619	0.795
7)	1	194.7	0.967	0.997



図－２　f_{vc}の実験値と計算値の関係



図－３　β_p - dの関係



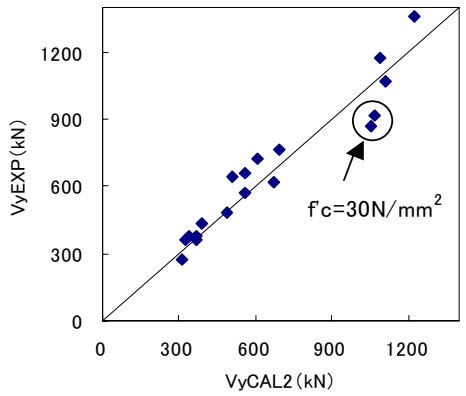
図－４　$p_t^{1/3}$ - β_pの関係

表－６　試験体諸元（V_yの検討）

試験体 文献番号	No.	部材幅 b(mm)	有効高さ d(mm)	せん断スパン La(mm)	La/d	b/d	コンクリート 圧縮強度 f'c(N/mm²)	引張鉄筋 降伏強度 fsy(N/mm²)	引張鉄筋 鉄筋比 p_t(%)	帯鉄筋 径	帯鉄筋 降伏強度 fwy(N/mm²)	帯鉄筋 間隔 s(mm)	帯鉄筋 本数 n(本)	帯鉄筋 総断面積 Aw(mm²)	帯鉄筋 鉄筋比 p_w(%)
本実験	3	500	690	2070	3.00	0.72	75.3	709	1.98	D13	1065	200	2	253.40	0.253
	4	500	690	2070	3.00	0.72	73.5	709	1.32	D10	1086	300	2	142.66	0.095
	5	500	690	2070	3.00	0.72	33.9	704	1.98	D13	1029	225	2	253.40	0.225
	6	500	690	2070	3.00	0.72	54.3	704	1.98	D14	1029	225	2	253.40	0.225
	7	500	690	2070	3.00	0.72	35.6	704	1.98	D10.7	1403	225	2	179.84	0.160
	8	500	690	2070	3.00	0.72	54.7	704	1.98	D10.7	1403	225	2	179.84	0.160
2)	4	350	400	1200	3.00	0.88	93.2	724	2.27	D6	1138	200	2	63.34	0.090
	6	350	400	1200	3.00	0.88	98.5	724	2.27	D13	814	200	2	253.40	0.362
	10	350	400	1200	3.00	0.88	95.0	724	2.27	D6	1138	150	2	63.34	0.121
3)	1	600	400	1200	3.00	1.50	75.0	744	2.32	D10	1028	200	2	142.66	0.119
	2	525	400	1200	3.00	1.31	78.1	744	2.27	D10	1028	200	2	142.66	0.136
	3	435	400	1200	3.00	1.09	78.2	744	2.28	D10	1028	200	2	142.66	0.164
	4	350	400	1200	3.00	0.88	79.5	744	2.27	D13	967	300	2	253.40	0.241
	10	600	400	1200	3.00	1.50	81.0	737	2.32	D10	1028	150	2	142.66	0.159
7)	2	400	350	1050	3.00	1.14	49.4	698	1.84	D6	747	100	2	63.34	0.158
	3	400	350	1050	3.00	1.14	51.0	698	1.84	D10	803	200	2	142.66	0.178
	4	400	350	1050	3.00	1.14	55.2	698	1.84	D6	747	75	2	63.34	0.211
	5	400	350	1050	3.00	1.14	27.8	698	1.84	D6	747	100	2	63.34	0.158

表－７　V_yに関する実験値と計算値の関係

試験体 文献番号	No.	実験値 VyEXP(kN)	Vc上限なし VyEXP/VyCAL1	Vc上限あり VyEXP/VyCAL2
本実験	3	1360.0	1.048	1.109
	4	619.7	0.845	0.920
	5	919.5	0.860	0.860
	6	1067.7	0.942	0.960
	7	868.6	0.825	0.825
	8	1173.1	1.055	1.077
2)	4	364.1	0.956	1.110
	6	659.5	1.066	1.175
	10	364.1	0.859	0.984
3)	1	721.8	1.085	1.193
	2	568.4	0.923	1.017
	3	640.0	1.154	1.261
	4	482.2	0.916	0.991
	10	763.9	1.004	1.107
7)	2	381.0	1.110	1.123
	3	376.8	1.003	1.019
	4	437.4	1.097	1.129
	5	274.5	0.890	0.890



図－５　V_yに関する実験値と計算値の関係

次に**図－４**に，引張鉄筋比 p_t(%)と V_cEXP から式(1)により逆算したβ_pの関係を示す。なお，f_{vc}≦0.72 N/mm^{2}とし，**図－４**は，従来のβ_p - p_tの関係が直線表示となるように，X 軸を $p_t^{1/3}$ としたものである。

これらの図に示すように，今回の実験の範囲ではβ_pが p_tの 1/3 乗に比例するという関係は，高強度コンクリートを用いた場合にも概ね成り立っていることが分かる。

3.3　V_yに関する検討

帯鉄筋を有している試験体は全部で 18 体とし，その諸元およびせん断耐力の実験値を**表－６**，**表－７**に示す。なお，せん断耐力の実験値（V_yEXP）は，初めに耐力低下した点と帯筋の

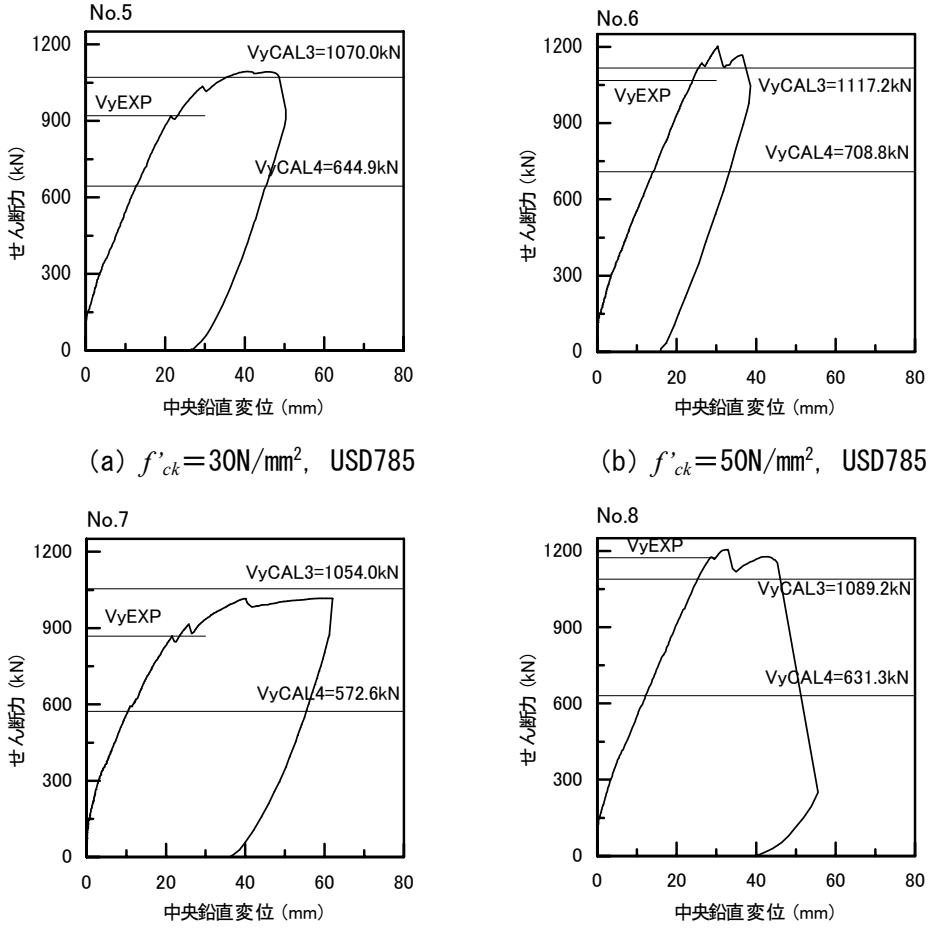
ひずみが最初に降伏ひずみに達した点のうち小さい方とした。**図－５**には，V_yEXP と計算値 V_yCAL の関係を示す。なお，V_yCAL1 は V_c 算定時の f_{vc} の値に上限値を考慮していない値で，V_yCAL2 は f_{vc}≦0.72N/mm^2 の上限値を考慮した値である。ここでは f_{wy} の値に上限値を設けず，材料試験による降伏強度の実測値を使用した。

表－７より，基本式で算定した V_y の計算値は危険側の評価を与えているデータはあるものの，V_yEXP/V_yCAL1 の平均値は 0.99 程度であり，V_c に比べると安全側へシフトしている。上限値を設けて f_{vc} を低減した場合は γ_b＝1.0 でほぼ安全側の評価となっており，V_yEXP/V_yCAL2 の平均値は 1.09 程度となっている。しかし，f'_c＝30N/mm^2 程の試験体については，V_yEXP/V_yCAL1 は 0.83～0.89 と低く，危険側の評価となった。

(2)式では，通常，V_s 算定時の帯筋強度 f_{wy} に f_{wy}≦400N/mm^2 の上限値が設けられている。この上限値は，帯筋を高強度化して帯筋量を減少した場合には，せん断破壊時の斜めひび割れ幅が過大になることで，十分なせん断耐力が得られなくなることを防止するために設けられている。しかし，**表－７**および**図－５**に示すように，USD785 の高強度帯筋を用いた場合でも，高強度コンクリートと組合わせた場合には，帯筋の強度に実降伏強度を用いても計算値は実験値を安全側に評価していることが分かる。

次に f'_c＝30N/mm^2 および f'_c＝50N/mm^2 のコンクリートに高強度帯筋を組合わせた場合のせん断耐力について，本実験の試験体 No.5～8 の実験結果から検討を行う。

帯筋に USD785 を用いた試験体の荷重 - 変位関係を示したものが**図－６**（a），（b）で，（a）は f'_c＝30N/mm^2，（b）は f'_c＝50N/mm^2 の場合で



（a）f'_{ck}＝30N/mm^2，USD785　（b）f'_{ck}＝50N/mm^2，USD785

（c）f'_{ck}＝30N/mm^2，USD1275　（d）f'_{ck}＝50N/mm^2，USD1275

図－６　荷重 - 変位関係

ある。図には，V_s 算定時の帯筋強度 f_{wy} に材料試験結果を用いた場合の V_y の計算値（V_yCAL3）と f_{wy} の制限値である 400N/mm^2 を用いた場合の計算値（V_yCAL4）を合わせて示す。これらの図を見ると，どちらの場合についても最大耐力は f_{wy} を実強度とした場合の計算値を上回っている。ただし，(a) の場合は，計算値の耐力に達する以前にせん断ひび割れが大きく開口することで剛性が低下している。これに対して (b) では顕著な剛性低下が生じていない。

帯筋に SPBD1275 を用いた場合が**図－６**(c)，(d) である。これらの図を見ると，(c) では，f_{wy} を実強度とした場合の計算値に達していない。また，この計算値の 80%程度の耐力で剛性の低下が顕著となっている。これに対して (d) の場合には，f_{wy} を全強とした場合の計算値よりも最大耐力は大きくなっており，極端な剛性の低下も見られなかった。

一方，f_{wy} に，土木学会示方書に示される 400N/mm^2 の上限値を用いた計算値と実験値を比較すると，いずれの試験体に関しても計算値は過小評価となっている。

4. まとめ

高強度材料を用いた RC 梁部材のせん断耐力に関する検討の結果を以下にまとめる。

(1) V_c の計算値については，土木学会示方書に示される f_{vc}≦0.72N/mm^2 の上限値を設定することで，V_cEXP/V_cCAL の平均値は 1.0 を下回ったものの，γ_b＝1.3 で安全側の評価となった。V_c 算定時には，f_{vc}≦0.72N/mm^2 の上限値を設定することが妥当と考えられる。

(2) V_c 算定における係数 β_d，β_p に関しては，今回の検討範囲（d=150～1000mm，pt=0.54～2.32%）において従来の算定式が適用できると考えられる。

(3) V_s の算定にあたって，USD785 および USD1275 の帯筋を f'_c≧50N/mm^2 のコンクリートと組合わせた場合には，帯筋の強度に実降伏強度を用いても計算値は実験値を安全側に評価することができた。

(4) V_s の算定にあたって f'_c＝30N/mm^2 のコンクリートと 1275N/mm^2 の高強度鉄筋を組合わせた場合，V_y の実験値は計算値を下回る結果となった。785N/mm^2 の帯筋と組合わせた場合には，帯筋強度を全強とした場合の計算値は上回ったものの，せん断ひび割れ幅の拡大により，剛性の低下が大きかった。

参考文献

1) 土木学会編：平成 8 年制定・コンクリート標準示方書（設計編），1996.3

2) 下野一行ほか：高強度材料を用いた RC 梁部材に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.1039-1044，1998

3) 下野一行ほか：高強度材料を用いた RC 梁部材のせん断耐力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.175-180，1999

4) 阿部祐規ほか：超高強度材料を用いたせん断補強筋のない RC 梁部材のせん断耐力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.181-186，1999

5) 土屋智史，大内雅博：高強度材料を用いた RC 梁のせん断破壊実験，土木学会第 55 回年次学術講演会Ｖ，pp.1042-1043，2000

6) 藤田学ほか：高強度コンクリートはり部材の寸法効果に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.349-354，1998

7) 原夏生ほか：自己充填型高強度耐久コンクリートを用いた RC 梁のせん断耐力，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.3，pp.925-930，2001

8) 二羽淳一郎ほか：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，第 372 号/V-5，pp.167-176，1986.8