

報告

[2055] 鉄筋コンクリート有孔梁のせん断伝達に関する実験研究

正会員 林 静雄 (東京工業大学工業材料研究所)

正会員○下妻 泰 (大成建設)

1 はじめに

建築物の構造設計では、架構全体を曲げ崩壊させ耐震安全性を確保する靱性設計型の耐震設計が進められており、RC構造においても、曲げ破壊をせん断破壊に先行させ靱性を確保することの重要性が増している。梁部材のせん断終局強度式は、せん断力を、コンクリート圧縮束の負担分と、せん断補強筋の負担分の和で表す理論的な考えが定着しつつある。しかし有孔梁では、孔のためにアーチ、トラスが形成されないと考えられるにもかかわらず、この方面の理論的研究はほとんどなされていない。

本研究では、せん断スパン、孔位置をパラメータとしたRC有孔梁の曲げせん断実験を行い、昨年提案した補強金物の有効性を示すとともに、有孔梁のせん断伝達機構を考察している。

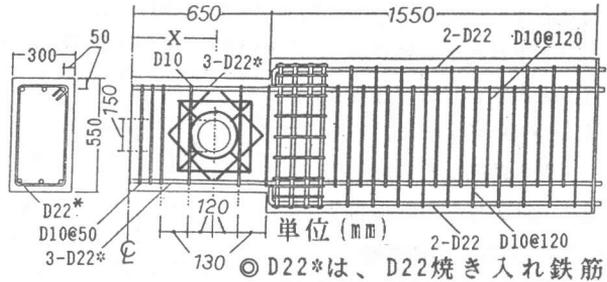


図1 試験体形状・配筋

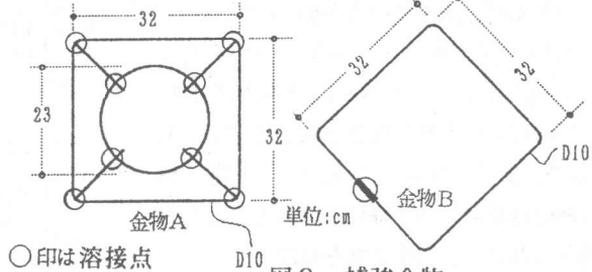


図2 補強金物

表1 試験体一覧

差し番号	試験体名	a/d	ps	X	Fc
1	B20-21-0	2.0	0.21	0	221
2	B'20-21-0	2.0	0.21	0	241
3	B20-80-0	2.0	0.80	0	241
4	B20-80N-0	2.0	0.80	0	232
5	B20-110-0	2.0	1.10	0	241
6	B13-21-0	1.3	0.21	0	221
7	B13-21-40	1.3	0.21	40	217
8	B13-21-53	1.3	0.21	53	217
9	B13-110-0	1.3	1.10	0	232
10	B13-110-40	1.3	1.10	40	232
11	B13-110-53	1.3	1.10	53	232
12	B13-154-0	1.3	1.54	0	217
13	B06-21-0	0.6	0.21	0	221

a/d:せん断スパン比
 ps:孔周り補強筋比
 (表3の(注)参照)
 X: 孔位置(cm)
 Fc:コンクリート強度
 (kgf/cm²)

◎ B'20-21-0とB20-21-0はコンクリート強度のみ異なる。

◎ B20-80N-0のNは補強金物Aを45度回転させて配置したことを示す。

◎ B-(せん断スパン比)-(孔周りせん断補強筋比)-(内のリスパン中心より孔中心までの距離)

2 実験概要

2-1 試験体

試験体一覧を表1に、試験体形状・配筋を図1に、使用した補強金物を図2に示す。通し番号2,3,5は昨年報告したものである¹⁾。試験体名は、B(せん断スパン比) - (孔まわりせん断補強筋比) - (内のりスパン中心より孔中心までの距離)を表す。試験部分断面は、 $b \times D = 30 \times 55 \text{cm}$ 、孔径15cm、引張鉄筋比0.77%、孔周り以外のせん断補強筋比0.95%、孔周りの補強筋比(p_s)は、コンクリート

のみのせん断伝達を調べるため、最小に抑えた0.21%(縦筋のみ)と、0.80%(金物A2枚), 1.10%(A,B各2枚), 1.54%(A,B各3枚)とした。使用材料の力学的性質を表2に示す。主筋はD22、あばら筋はD10を用いた。試験体がせん断破壊以前に曲げ降伏しないように主筋は焼き入れをし、引張強度を高めた。

2-2 加力・測定方法

加力装置を図3に示す。逆対称一方単調載荷を行い荷重はロードセルで検出した。L、 l_0 、 $\delta_1 \sim \delta_4$ により相対変形 δ を、また P_1 、 P_2 によりせん断力Qを、図4に示す方法で計算した。

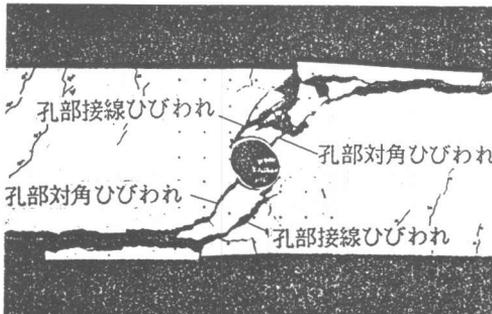


写真1 B20-21-0の破壊状況

表2 使用材料の力学的性質

◎ 鉄筋

鉄筋	通し番号	σ_y	σ_t	E
D10	3, 5	3908	5310	1765
(補強金物)	4, 9, 10, 11, 12	3746	5235	1603
D10	2, 3, 5	3929	5704	1945
(縦筋)	上記以外	3826	5403	1855
D13	2, 3, 5	3596	5391	1914
	上記以外	3475	4976	1844
D22*	2, 3, 5	7100	8473	1837
	上記以外	10209	12188	1871

◎ D22*は D22 焼き入れをしめす。

σ_y (kgf/cm²): 降伏応力度 σ_t (kgf/cm²): 破断強度
E (tf/cm²): 弾性係数

◎ コンクリート

通し番号	$c\sigma_B$	$c\sigma_t$	E (1/3)	$c\sigma_B$ (kgf/cm ²)
2, 3, 5	241	20.9	223	: 圧縮強度
1, 6, 13	221	21.0	196	$c\sigma_t$ (kgf/cm ²)
4, 9, 10, 11	232	22.4	223	: 割裂強度
7, 8, 12	217	20.1	218	E (1/3) (tf/cm ²)
				: 1/3割線弾性係数

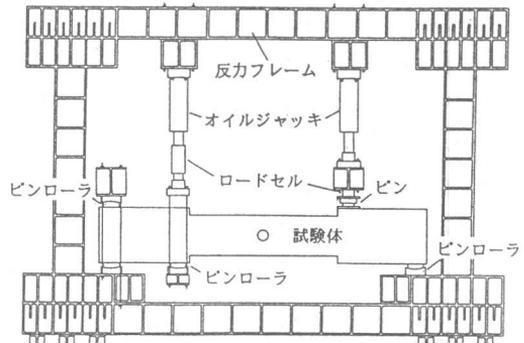
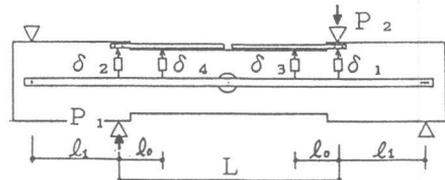


図3 加力装置



3 実験結果

3-1 ひびわれ状況

ひびわれは、写真1に示すように、孔の中心を通り材軸と約45度をなす角度に入るもの（以下孔部対角ひびわれ）と、孔の接線方向に45度よりやや低い角度で入るもの（以下孔部接線ひびわれ）がみられた。全試験体とも試験部分端部曲げひびわれ、曲げせん断ひびわれ、孔部対角ひびわれ、孔部接線ひびわれの順に発生し、最後は、孔部接線ひびわれが卓越して破壊に至った。

3-2 最大耐力

実験結果一覧を表3に示す。図5に示すように、最大耐力は $a/d=2.0$ のとき、孔周り補強筋比を0.21%から0.8%, 1.10%と増やすと、 $F_c=241(\text{kgf/cm}^2)$ の時、耐力は1.16倍, 1.46倍（これは曲げ降伏後せん断破壊している）となった。 $F_c=221(\text{kgf/cm}^2)$ では、金物Aを45度回転して配置した

表3 実験結果一覧

通し番号	試験体	Q _{ue} (tf)	Q _{uh} (tf)	Q _{ut} (tf)	Q _{ue} /Q _{uh}	Q _{ue} /Q _{ut}	δu (mm)
1	B20-21-0	23.0	17.1	28.2	1.34	0.81	14.2
2	B'20-21-0	29.6	17.1	30.6	1.73	0.97	15.4
3	B20-80-0	34.2	27.3	34.2	1.25	1.00	18.1
4	B20-80N-0	37.8	27.3	33.7	1.38	1.12	19.0
5	B20-110-0	43.2	--	--	--	--	38.1
6	B13-21-0	26.8	20.6	28.2	1.30	0.95	8.0
7	B13-21-40	25.0	20.5	27.7	1.21	0.90	6.3
8	B13-21-53	33.2	20.5	27.7	1.61	1.20	9.0
9	B13-110-0	32.8	33.7	35.3	0.97	0.93	8.0
10	B13-110-40	35.8	33.7	35.3	1.06	1.01	8.0
11	B13-110-53	41.6	33.7	35.3	1.23	1.18	9.8
12	B13-154-0	39.7	37.8	36.4	1.05	1.09	12.3
13	B06-21-0	26.4	30.9	28.2	0.85	0.94	3.8

Q_{ue}:最大せん断耐力 Q_{uh}:広沢式による計算値
 Q_{ut}:提案式（4有孔梁のせん断強度の推定参照）による計算値
 δu:最大せん断耐力時の相対変位
 ◎B20-110-0は、曲げ降伏後せん断破壊した。

(注)

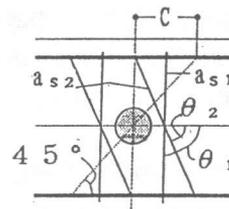
(学会広沢式)

$$Q_{uh} = bj \left\{ \frac{0.092k_u \cdot k_p (180 + F_c)}{M/Qd + 0.12} (1 - 1.61H/D) + 2.7 \sqrt{p_s \cdot \sigma_y} \right\}$$

$$p_s = \sum a_s (\sin \theta + \cos \theta) / bc$$

b:梁幅 j:応力中心距離 H:孔径
 M/Qd:せん断スリット比 D:梁成
 F_c:コンクリート強度 k_u, k_p:補正係数

p_s:孔周りせん断補強筋比
 σ_y:孔周りせん断補強筋
 降伏強度



とき、補強筋量を0.8%とすると、耐力が1.64倍になった。これは、ひびわれに直交する補強筋が、大きく効いたためと思われる。

$a/d=1.3$ では、補強筋量が0.21%から1.10%、1.54%に増えると、耐力は1.23倍、1.48倍となった(図6)。補強金物を用いたものは、ほぼ直線的に耐力が上昇し($a/d=2.0$ で傾き約16tf/%、 $a/d=1.3$ で約10tf/%)、有効であり、広沢式に対する比は0.97~1.38となっていた。

また、図7に示すように孔位置をパラメータとすると、補強筋なし($P_s=0.21\%$)、A、B各2枚($P_s=1.10\%$)ともに、広沢式では最大耐力に変化がないのに対し、実験では、 $X=0$ 、40cmでほぼ等しく、53cmではそれらより2~3割上昇した。これは、孔が柱近傍まで寄ると、全体梁のアーチが大きく効き、より無孔梁に近い形でせん断力が伝達されるためと思われる。

さらに、図8に示すように、せん断スパン比をパラメータとすると、補強筋なし($P_s=0.21\%$)の試験体の場合、広沢式では a/d の増加とともに耐力は減少しているが、実験ではほぼ一定であった。せん断破壊が孔付近で起こることを考えれば、最大耐力は全体梁のせん断スパン比の影響が少ないものと思われる。

4 有孔梁のせん断終局強度の推定

現在RC梁のせん断終局強度(Q_u)の推定式は、実験式(荒川式)に代わって、トラス、アーチ理論に基づく理論式が定着しつつある。この考えは図9に示すように、せん断力が、部材両端の圧縮域を直接結ぶコンクリート圧縮束(アーチ機構)負担分と、とせん断補強筋(トラス機構)負担分との和で表されるというものである^{2)~4)}。実験より得られた次の点を考慮してこの理論を有孔梁用に修正した式を提案する。

◎ Q_u は、全体梁のせん断スパン比に因らず、孔の上下の部材(以下小梁と呼ぶ)の断面寸法と補強筋量に因る。(図10)

ここで、小梁の成 $D'=(D-E)/2$ 、内のりスパン $l=1.67E$ とし、孔周り補強筋比は、実験で孔部接線ひびわれが卓越して破壊した

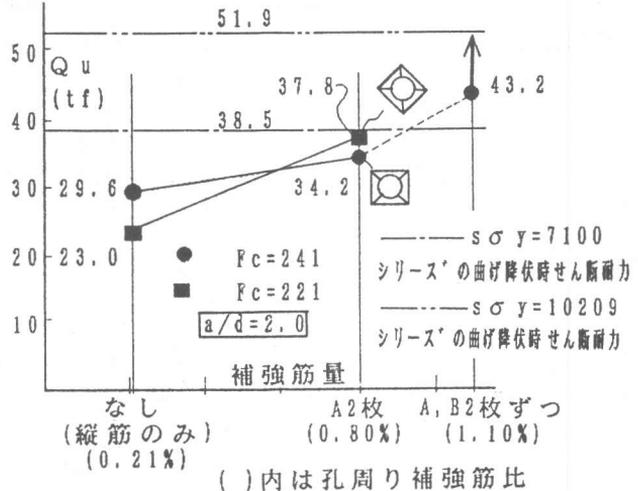


図5 Q_u - (孔周り補強筋量) 関係($a/d=2.0$)

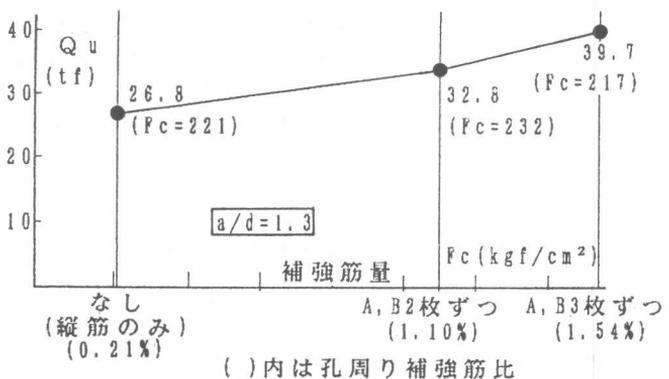


図6 Q_u - (孔周り補強筋量) 関係($a/d=1.3$)

ことを考慮して、図11の一点鎖線（孔部接線ひびわれ）を横切る補強筋で計算する。また、小梁におけるせん断補強筋は必ずしも材軸方向に直行しない。また、その梁成は材端と中央で違い、通常の梁とは異なるので、補強筋に関係する項としない項に分け、それぞれに k_1, k_2 という補正係数を掛けた。

$$Q_u = 2b \{ k_1 (d' - 2\alpha D') p_s' \cdot \sigma_y + k_2 \alpha D' \nu F_c \} \quad \dots \text{ (提案式)}$$

$$p_s' = \frac{\sin \alpha \cos \theta + \cos \alpha \sin \theta}{\cos \alpha} \cdot \frac{\sum a_s}{(H + D')/2} \quad \tan \alpha = \frac{(j_t - H)/2}{(H + D')/2}$$

b : 梁幅 D' : 小梁成 d' : 小梁有効成 F_c : コンクリート強度
 α : $(\sqrt{1+\eta^2} - \eta)/2$ η : l/D' ν : $(1+\eta)/4$ H : 孔径
 p_s' : 孔部接線ひびわれを横切る補強筋比 j_t : 主筋間距離
 σ_y : 孔部接線ひびわれを横切る補強筋の降伏強度

既往の有孔梁実験資料167体のうち、下の4条件を満たすものは31体あり、これらから最小2乗法で k_1, k_2 を決めると、それぞれ0.57, 1.00であった。31体についての、広沢式及び提案式の実験値と計算値の関係を図12、13に示す。

- 条件; (1) せん断破壊している。 (2) $F_c \geq 210 \text{ kgf/cm}^2$ である。
 (3) $b \times D \geq 400 \text{ cm}^2$ である。 (4) 逆対称応力載荷である。

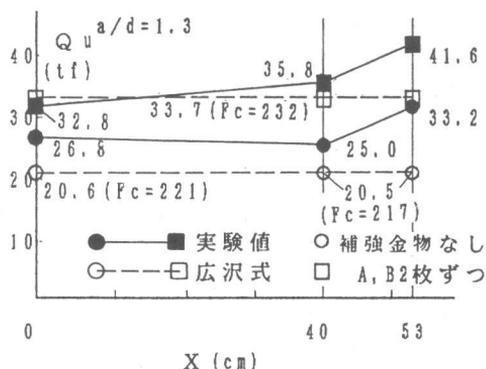


図7 $Q_u - X$ 関係

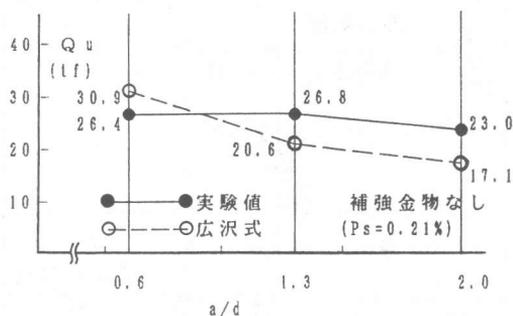


図8 $Q_u - a/d$ 関係

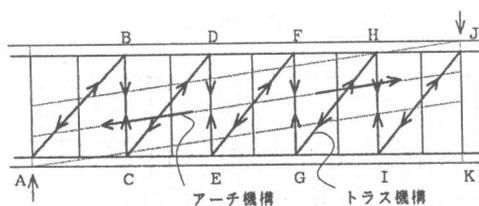


図9 無孔梁のトラス・アーチ機構

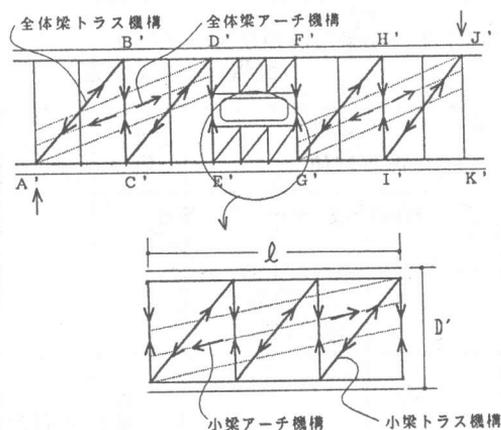


図10 提案する有孔梁のせん断伝達機構

5 まとめ

補強金物を用いたものは、補強筋量に比例してほぼ直線的に耐力が上昇した。

孔付近のせん断力は、孔の上下の部材（小梁）それぞれのトラス・アーチ両機構で伝達されると考えるべきである。その結果、終局せん断耐力は全体梁のせん断スパン比に因らず、孔径により決まる小梁の断面寸法及びせん断補強量に関係する。このため、孔周りのせん断補強筋量は、孔部対角よりも孔部接線ひびわれを横切る補強筋で評価すべきである。

<謝辞>

実験計画に際し、東京理科大学 松崎育弘 教授に有益な助言をいただきました。また試験体製作に際し、省建工業(株) 田中省治氏、(株)銭高組 吉田俊夫氏、寺田謙一氏他の皆様に御協力いただきました。ここに深く感謝致します。

<参考文献>

- 1) 林 静雄他：鉄筋コンクリート有孔梁のせん断補強に関する実験研究、第11回コンクリート工学年次論文報告集(第2号)、1989、pp87~90
- 2) 南 宏一、若林 実：鉄筋コンクリート部材のせん断強度について、第2回コンクリート工学年次論文報告集(1980)、1980、6月、pp449~452
- 3) 南 宏一、渡辺史夫：RC耐震部材のせん断設計式の開発-日本建築学会RC耐震設計小委員会せん断WGの考え方-、RC耐震壁のマクロモデルに関するパネルディスカッション論文集、1988・1、pp21~40
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)・同解説、1988、pp112~129

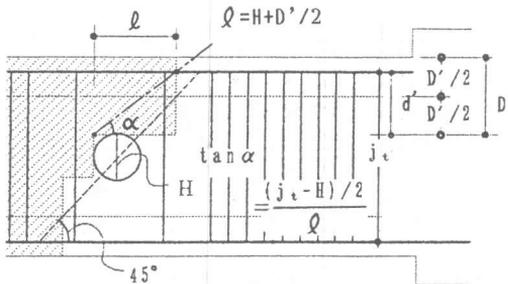


図11 小梁の内りスパン(l)及び梁高(D')の決定

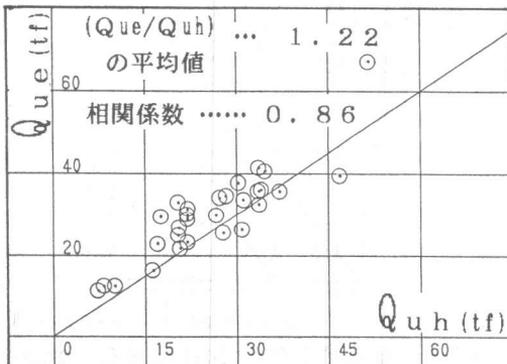


図12 (実験値) - (広沢式計算値)関係

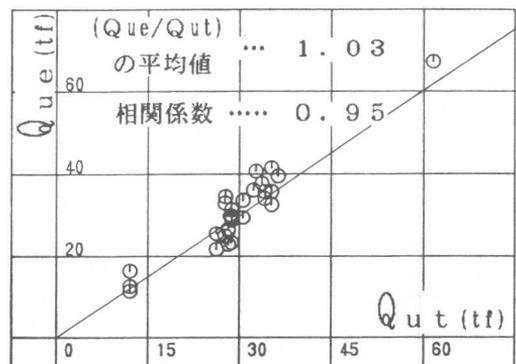


図13 (実験値) - (提案式計算値)関係