論文　材端部に開孔を有するＲＣ梁の構造性能に関する実験的研究

濱田　真[*1]・細矢　博[*2]・安居　功二[*3]・馬場　真史[*4]

要旨：本実験的研究は，ＲＣ梁の材端部に設備配管用の開孔を設けても，構造性能が確保できる補強方法を確立することを目的として行われたものである。実験因子として，コンクリート設計基準強度，孔径，梁主筋比，孔際補強筋比，開孔補強筋比，座屈補強筋の径およびその定着長さを設け，合計 28 体の曲げせん断実験を行った。実験結果より，材端部に開孔を設けても無開孔梁とほぼ同等の構造性能を持つＲＣ梁を実現することができた。特に座屈補強筋の有効性が確認でき，その定着長さが変形性能に与える影響が大きいことが分かった。

キーワード：材端部，開孔，ＲＣ梁，座屈補強筋，定着長さ，構造性能

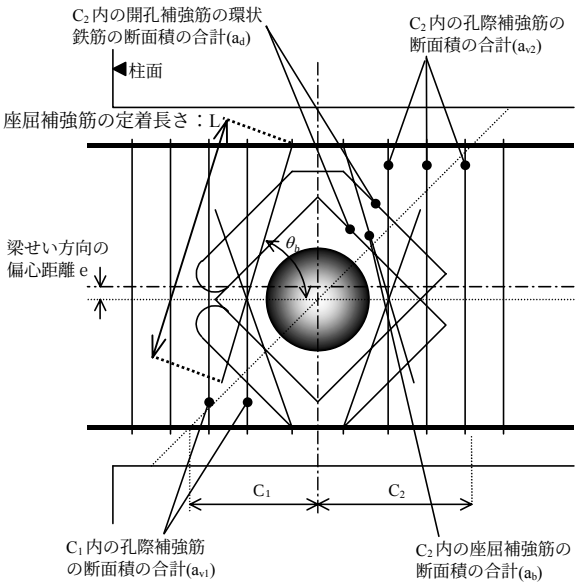
1.　はじめに

ＲＣ造建物では，構造性能確保の観点から梁のスパン中央部に設備配管用の開孔を設けることが一般的に行われている。しかし，柱面の近い位置に開孔を設けることができれば，設計の自由度が増すと考えられる。一方，ＲＣ造建物は梁曲げ降伏型の骨組になるように設計されることが多い。そのため，梁材端部は曲げ降伏後の十分な塑性変形が要求されるので，構造上重要な部位にあたり，損傷が集中する部位として降伏ヒンジと呼ばれている。本論文ではこの降伏ヒンジを含む柱面から梁せいの領域を材端部と呼ぶ。従来，材端部に開孔を設けたＲＣ梁の挙動は明確ではなく，設計に取り入れることが出来なかった。本研究の目的は，材端部に開孔を有するＲＣ梁について，所定の構造性能を確保するための補強方法を確立することである。

2.　実験概要

2.1　試験体

材端部は梁主筋ならびに開孔周囲のコンクリートに大きな応力が作用するため，開孔は**図-1**



$$Q_{mu}=0.9a_t\cdot\sigma_y\cdot d/a \quad (1)$$

$$Q_{su}=[0.053p_t^{0.23}(Fc+18)/\{M/(Q\cdot d)+0.12\}\times(1-1.61H/D)+0.85\sqrt{p_v\sigma_{vy}+p_d\sigma_{dy}}]b\cdot j \quad (2)$$

$$p_v=\min\{a_{v1}/(b\cdot C_1),a_{v2}/(b\cdot C_2)\} \quad (3)$$

$$p_d=\sqrt{2}\ a_d/(b\cdot C_2) \quad (4)$$

Q_{mu}:曲げ強度(kN)，a_t:梁引張主筋量(mm^2)，σ_y:梁主筋の降伏強度(N/mm^2)，d:梁有効せい(mm)，a:梁せん断スパン長さ(mm)，Q_{su}:開孔部のせん断強度(kN)，p_t:梁引張鉄筋比(%)，σ_{vy}:孔際補強筋の降伏強度(N/mm^2)，σ_{dy}:開孔補強筋の降伏強度(N/mm^2)，j=7d/8，$1\leqq M/(Qd)\leqq 3$

C_1,C_2,a_{v1},a_{v2}:左図参照

図-1　材端部開孔の補強要領ならびに強度式と記号の説明

*1 (株)熊谷組　技術研究所　建築構造研究グループ　工修　(正会員)
*2 (株)奥村組　技術研究所　第 5 研究グループ　工博　(正会員)
*3 (株)松村組　技術研究所　構造研究課　(正会員)
*4 元(株)熊谷組　首都圏支社　設計部構造設計グループ

表-1　試験体一覧および諸元

シリーズ	試験体名	F_c	梁主筋	開孔諸元 H	開孔諸元 A	開孔諸元 e	あばら筋	孔際補強筋 配筋	孔際補強筋 p_v	開孔補強筋 配筋	開孔補強筋 p_d	座屈補強筋 配筋	座屈補強筋 a_b	座屈補強筋 L	座屈補強筋 Σ(ψ・L)
Fc24(1)	L6-0	24	6-D19 [SD345]	無孔			4-D6@70	—	—	—	—	—	—	—	—
	L6-3-4			D/3	D/3	0		4-D6×1	0.27	S6×2	0.37	4-D6	128	$25d_b$	12000
	L6-5-4							4-D6×2	0.53						
	L6-5-4N											—	—	—	—
	L6-8-4							4-D6×3	0.80			4-D6	128	$25d_b$	12000
	L6-5-6							4-D6×2	0.53	S6×3	0.56				
	L6-5-9									S8×3	0.88				
	L6-12-4							4-D10×2	1.18	S6×2	0.37				
	L8-12-9		8-D19 [SD345]				4-D10@70			S8×3	0.88	4-D10	284	$25d_b$	30000
	L8-12-12									S8×4	1.17				
Fc24(2)	L6-5-6L	24	6-D19 [SD345]	D/3	D/3	0	4-D6@70	4-D6×2	0.53	S6×3	0.56	4-D6	128	$43d_b$	20640
	L6-5-6M			D/3.5											
	L6-5-6S			D/4											
	L6-5-4M			D/3.5						S6×2	0.37				
	L6-5-4S			D/4											
Fc24(3)	L6-5-6SE-B1	24	6-D19 [SD345]	D/4	D/3	D/24	4-D6@70	4-D6×2	0.48	S6×3	0.51	6-D6	192	$43d_b$	30960
	L6-5-6SF				D/3×2	0			0.53		0.56	4-D6	128		20640
	L6-5-6M-B1			D/3.5	D/3							6-D6	192		30960
Fc24(4)	L8-12-8M-B2	24	8-D19 [SD345]	D/3.5	D/3	0	4-D10@70	4-D10×2	1.18	S6×4	0.75	4-D10	284	$32d_b$	38400
	L8-12-8M-B3											4-D8	200	$36d_b$	28800
	L8-8-12M-B3							4-D6×3	0.80	S8×4	1.17				
Fc48(1)	H6-0	48	6-D19 [SD490]	無孔			4-S6@70	—	—	—	—	—	—	—	—
	H6-5-9S-B2			D/4	D/3	0		4-S6×2	0.51	S8×3	0.88	4-D10	284	$32d_b$	38400
	H6-5-12S-B2								0.56	S8×4	1.17				
	H6-5-9S-B1									S8×3	0.88	6-D6	192	$43d_b$	30960
	H6-5-9SE-B2					D/24					0.79	4-D10	284	$32d_b$	38400
Fc48(2)	H8-12-8M-B2	48	8-D19 [SD490]	D/3.5	D/3	0	4-S10@90	4-S10×2	1.19	S6×4	0.75	4-D10	284	$32d_b$	38400
	H8-8-12M-B2							4-S6×3	0.79	S8×4	1.17				

F_c:コンクリート設計基準強度(N/mm^2), H:孔径, A:柱面から開孔中心までの水平距離, e:梁せい中央からの上下偏心距離, D:梁せい(=400mm)
p_v:孔際補強筋比(%), p_d:開孔補強筋比(%), a_b:座屈補強筋断面積(mm^2), L:座屈補強筋の定着長さ(mm), d_b:鉄筋径, Σ(ψ・L):座屈補強筋の付着面積(mm^2)

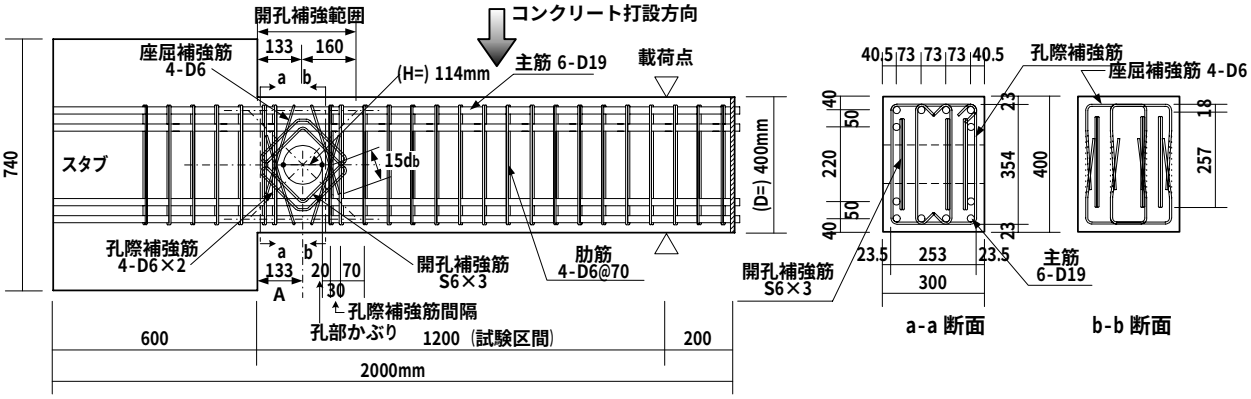


図-2　試験体形状および配筋(L6-5-6M の場合)

に示すように孔際補強筋と開孔補強筋に加え，新たに開孔上下を拘束する座屈補強筋を組み合わせた補強形式とした。**表-1** に試験体一覧および諸元を示す。試験体は，Fc を 2 水準設け，Fc24(1)～(4)と Fc48(1)～(2)シリーズから構成されている。**図-2** に試験体の形状および配筋例を示す。梁断面は b×D=300×400mm，せん断スパン比は a/D=3 で全試験体共通である。実部材に対する縮小率は約 1/2 である。主筋強度は Fc24 が SD345，Fc 48 が SD490 で，主筋比は 2 水準とした。開孔は孔径(H)が D/3～D/4，柱面からの水平位置(A)は D/3 と 2D/3，上下の偏心(e)は最大で D/24 とした。孔際補強筋は Fc24 に SD295A を，Fc 48 に

表-2　材料試験結果

		Fc24(1)	Fc24(2)	Fc24(3)	Fc24(4)	Fc48(1)	Fc48(2)
Fc	Fc24	24.4	27.1	28.9	24.6	—	—
	Fc48	—	—	—	—	54.6	35.6
D6	SD295A	381	329	361	367	361	—
D8	SD295A	—	—	—	417	—	—
D10	SD295A	372	—	—	362	364	362
D19	SD345	375	367	371	375	—	—
	SD490	—	—	—	—	538	538
S6	785級	981	905	孔際:882 開孔:977	905	882	孔際:833 開孔:905
S8	785級	919	—	—	938	993	938
S10	785級	—	—	—	—	—	915

Fcは実験期間中の平均圧縮強度: σ_B(N/mm^2)
D8,D10,D19:降伏強度(N/mm^2)
D6,S6,S8,S10:0.2%オフセット法により算出した降伏強度(N/mm^2)

785N/mm^2 級を用いて p_v=0.27～1.19%(式(3))とした。開孔補強筋は全て 785N/mm^2 級で p_d=0.37～1.17%(式(4))とした。座屈補強筋は SD295A を用い，その定着長さ(L)を変化させた。定着長さ

は折り曲げ終端部からの長さである。各試験体とも，曲げ終局強度は式(1)の略算式 [1]により，開孔部のせん断強度は式(2)の修正広沢式 [2]により算定し，曲げ降伏が先行するように計画した。あばら筋および孔際補強筋は，SD295A の場合が 135 度フック形状とし，785N/mm^2 級の場合が溶接閉鎖型とした。

2.2　使用材料

表-2 に使用したコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を示す。

2.3　実験方法

載荷は片持ち梁形式とし，梁の反曲点に相当する位置に水平力を押し引き型油圧ジャッキにより作用させた。**図-2** に示したコンクリート打設上面が圧縮となる時を正載荷とした。載荷履歴は変形角(R)で制御し，R=(5,10,20,30,40,50)×10^{-3}rad の正負繰り返しを各 2 サイクルずつ載荷した後，R=+100×10^{-3}rad まで単調載荷した。変形は反曲点変位，開孔部せん断変形などを，ひずみは主筋，孔際補強筋，開孔補強筋および座屈補強筋鉄筋について計測した。

3.　実験結果

3.1　破壊モード

写真-1 に無開孔梁 L6-0 と有開孔梁 L6-5-6M の破壊状況を示す。材端部に開孔を有する場合は，開孔に接するせん断ひび割れが顕著であった。そのため，開孔上下および圧縮領域のコンクリートの損傷が激しくなっていた。開孔から梁中央側のひび割れ発生状況には無開孔梁と比べて大きな差はみられなかった。

無開孔梁
L6-0
R=1/20rad
第1サイクル

有開孔梁
L6-5-6M
R=1/25rad
第2サイクル

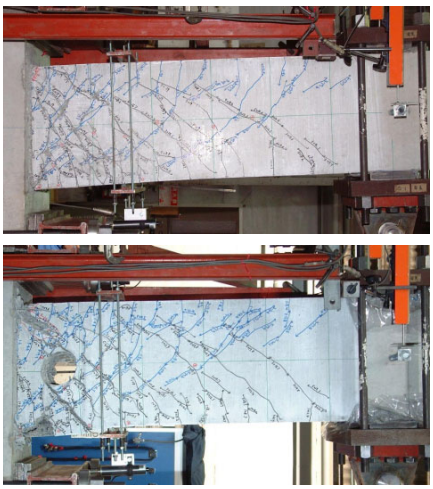


写真-1　破壊モードの比較

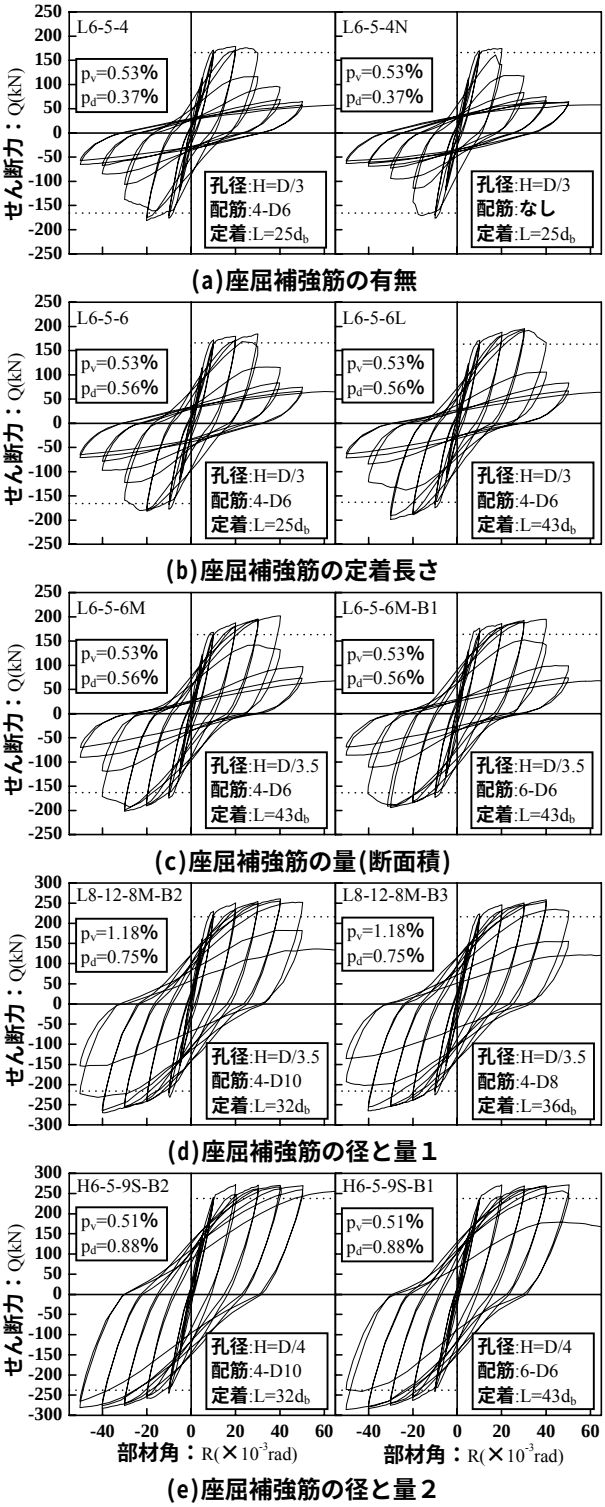


図-3　せん断力－部材角関係

3.2　せん断力(Q)－部材角(R)関係の比較

図-3(a)～(e)に座屈補強筋を要因とした Q－R 関係の比較を示す。図中の点線は計算値曲げ

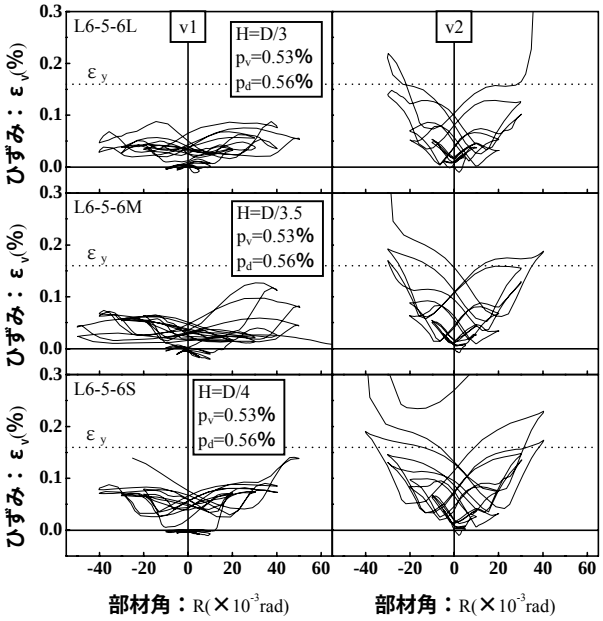


図-4　孔際補強筋のひずみ－部材角関係

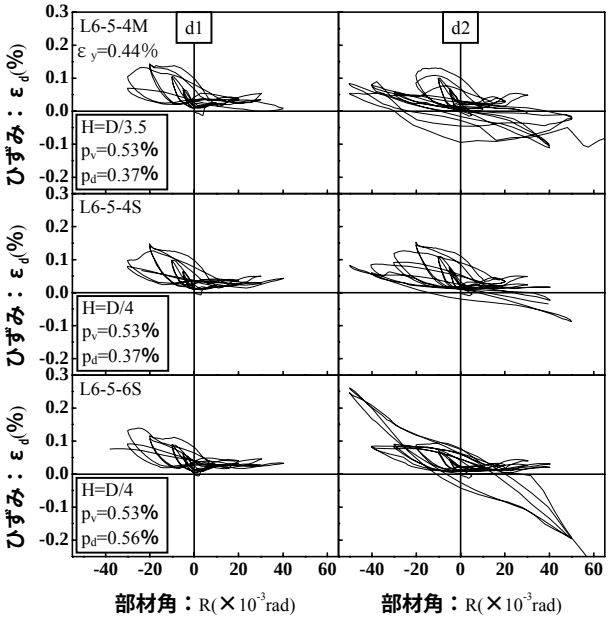


図-5　開孔補強筋のひずみ－部材角関係

終局強度(Q_{mu}：**表-3** 参照)である。

(a)　座屈補強筋の有無

孔径 H=D/3，定着長さが L=25d_b と短い場合ではあるが，座屈補強筋の有無により顕著な差が見られた。座屈補強筋が無い L6-5-4N は R=-20×10^{-3}rad 時に耐力低下を示していたのに対し，座屈補強筋を有する L6-5-4 は R=+30×10^{-3}rad で耐力低下を示した。

(b)　座屈補強筋の定着長さ

孔径 H=D/3 で，定着長さが L=25d_b と L=43d_b(=開孔中心+15 d_b)の場合を比較する。定着が短い L6-5-6 は R=-30×10^{-3}rad で耐力低下を示したが，定着が長い L6-5-6L は R=+40×10^{-3}rad で耐力低下した。

(c)　座屈補強筋の量(断面積)

孔径 H=D/3.5，定着長さが L=43 d_b で，その量(断面積)を変化させた場合を比較する。L6-5-6M の配筋は 4-D6，L6-5-6M-B1 の配筋は 6-D6 なので 1.5 倍の量が配筋されている。配筋が多い方がいくぶん耐力低下の度合が小さいが，両者には大きな差は見られなかった。

(d)・(e)　座屈補強筋の径と量

先ず，主筋比が大きく孔径 H=D/3.5 の場合について比較する。座屈補強筋の配筋は L8-12-8M-B2 が 4-D10(L=320mm)，L8-12-8M-B3 が 4-D8 (L=288mm)であり，量が 1.42 倍，長さが 1.11 倍であるが，両者にはほとんど差はみられなかった。次に，Fc48 で孔径 H=D/4 の場合について比較する。座屈補強筋の配筋は H6-5-9S-B2 が 4-D10 (L=320mm)，H6-5-9S-B1 が 6-D6(L=258mm)であり，量が 1.48 倍，長さが 1.24 倍であるが，H6-5-9S-B1 が最終ループで耐力低下を示したが，H6-5-9S-B2 は耐力低下を示していなかった。

以上の Q－R 関係の比較から，座屈補強筋は材端部の開孔に対して有効な補強方法であることが確認できた。また，変形性能を改善するには，座屈補強筋の断面積(a_b)を増やすよりも，座屈補強筋の定着長さ(L)を長くする方が有効であることが分かった。

3.3　開孔周囲の補強筋のひずみ

(1)　孔際補強筋のひずみ(εv)

図-4 に εv－R 関係の比較を示す。開孔径を要因としたものを示したが，柱側の孔際補強筋(v1)と梁中央側の孔際補強筋(v2)を比較すると，v1 は 0.1%程度に留まっているのに対して，v2 では降伏ひずみを(εy)越えていた。これは柱側の領域ではせん断ひび割れの発生が少なかったためである。v2 が εy に達した時期を比較すると，孔径が大きいほど早期に達しているのが分かる。また，v2 は部材降伏後(R=10×10^{-3}rad)にひずみ

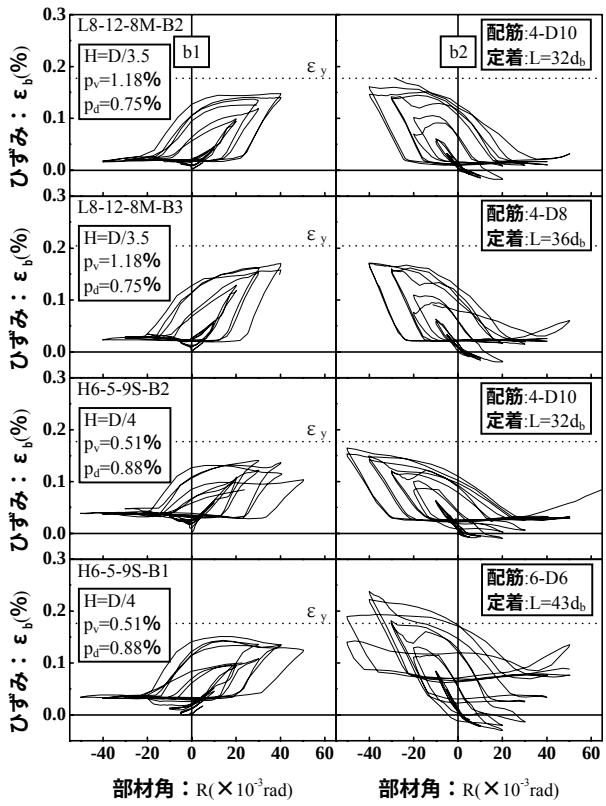


図-6　座屈補強筋のひずみ－部材角関係

が進展していることから，孔際補強筋は変形性能向上に寄与しているといえる。なお，ゲージ貼付位置は**図-7** に示した。

(2)　開孔補強筋のひずみ(ε_d)

図-5 にε_d－R 関係を示す。孔際補強筋比(p_v)と開孔補強筋比(p_d)が同じで孔径が異なる場合を比較すると，その推移には大きな差はみられない。孔径が同じで p_d が異なる L6-5-4S と L6-5-6S を比較すると，p_dが大きいとひずみが大きくなっている。このことから p_dが大きいほど開孔近傍のひび割れ進展を抑制していることが分かる。

(3)　座屈補強筋のひずみ(ε_b)

図-6 に**図-3(d)**と**(e)**で示した試験体についてε_b－R 関係を示す。**(d)**の場合は b1,b2 ともε_bの推移はほとんど同じであり，Q－R 関係に差がみられなかったことと対応している。一方，**(e)**の場合は，H6-5-9S-B1 の b2 が R=-40×10^{-3}rad の時にε_yを越えたが，R=-50×10^{-3}rad ではひずみが小さくなっている。これは座屈補強筋の拘束が緩んだためで，その後 Q－R 関係で耐力低下を

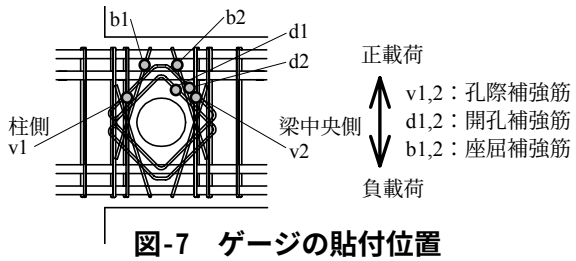


図-7　ゲージの貼付位置

表-3　実験値および計算値

シリーズ	試験体名	実験値		計算値		Q_{max}	Q_{su}
		Q_{max}	R_u	Q_{mu}	Q_{su}	Q_{mu}	Q_{mu}
Fc24(1)	L6-0	198	52.5	166	—	1.19	—
	L6-3-4	179	34.8	166	199	1.08	1.20
	L6-5-4	179	32.7	166	216	1.08	1.30
	L6-5-4N	174	21.4	166	216	1.05	1.30
	L6-8-4	182	35.5	166	231	1.10	1.39
	L6-5-6	184	32.3	166	243	1.11	1.46
	L6-5-9	183	32.1	166	276	1.10	1.66
	L6-12-4	183	31.4	166	250	1.10	1.51
	L8-12-9	236	42.5	216	298	1.09	1.38
	L8-12-12	236	43.6	216	325	1.09	1.50
Fc24(2)	L6-5-6L	196	41.4	163	235	1.20	1.44
	L6-5-6M	202	42.3	163	241	1.24	1.48
	L6-5-6S	201	48.7	163	245	1.23	1.50
	L6-5-4M	194	41.5	163	215	1.19	1.32
	L6-5-4S	204	41.7	163	219	1.25	1.34
Fc24(3)	L6-5-6SE-B1	191	44.3	164	246	1.16	1.50
	L6-5-6SF	193	44.3	164	255	1.18	1.55
	L6-5-6M-B1	195	46.1	164	251	1.19	1.53
Fc24(4)	L8-12-8M-B2	261	66.6	216	289	1.21	1.34
	L8-12-8M-B3	258	60.0	216	289	1.19	1.34
	L8-8-12M-B3	256	67.2	216	319	1.19	1.48
Fc48(1)	H6-0	270	100↑	238	—	1.13	—
	H6-5-9S-B2	272	100↑	238	353	1.14	1.48
	H6-5-12S-B2	278	100↑	238	382	1.17	1.61
	H6-5-9S-B1	271	75.2	238	353	1.14	1.48
	H6-5-9SE-B2	274	100↑	238	340	1.15	1.43
Fc48(2)	H8-12-8M-B2	332	61.4	310	364	1.07	1.17
	H8-8-12M-B2	334	67.0	310	364	1.08	1.17

単位:Q_{max}(kN), Q_{mu}(kN), Q_{su}(kN), R_u(×10^{-3}rad)

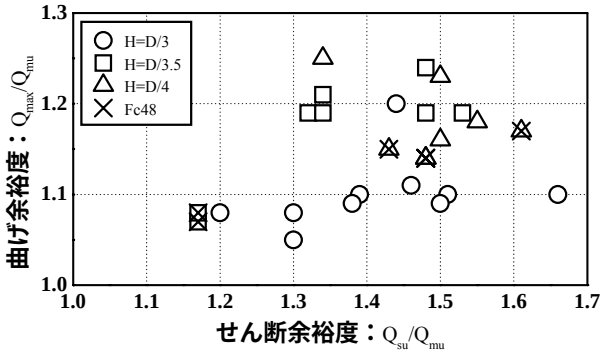


図-8　曲げ余裕度－せん断余裕度関係

示したことと一致している。座屈補強筋のひずみは，孔際補強筋と同様に部材降伏後(R=10×10^{-3}rad)に進展しているので，座屈補強筋もせん断抵抗要素の一つと考えることができる。

3.4　最大強度と限界変形角

表-3 に実験値および計算値を示す。実験値である最大強度(Q_{max})と限界変形角(R_u)は正載荷時の値を，計算値は材料試験結果に基づく式(1)の

曲げ終局強度時せん断力(Q_{mu})と式(2)の開孔部せん断強度(Q_{su})を示した。なお，R_u は各変形角における第 1 サイクルの Q－R 曲線の包絡線上で，荷重が最大強度の 80%に低下した時の変形角とした。

図-8 に曲げ余裕度(Q_{max}/Q_{mu})－せん断余裕度(Q_{su}/Q_{mu})関係を示す。Fc24 の H=D/3 と Fc48 の H=D/3.5 の曲げ余裕度が小さくなっているが，全試験体とも Q_{max} が Q_{mu} を上回っているので，材端部に開孔を有する場合でも，略算式によって曲げ終局強度を評価できるものと考えられる。一方，Q_{su}/Q_{mu} は 1.17～1.66 に分布しているのが分かる。実験では全試験体とも曲げ降伏が先行していたので，Q_{su}/Q_{mu} を 1.2 以上に設定すれば曲げ降伏が先行すると考えられる。したがって，修正広沢式は材端部の開孔のせん断終局強度に対しても下限値を与えるものと考えられる。

図-9 に R_u－Q_{su}/Q_{mu} 関係を示す。既往の実験的研究[3)]によれば，R_u と Q_{su}/Q_{mu} との間には相関関係があると報告されている。しかしながら，本実験結果では相関関係があるとは言い難い。図中に**図-3** で比較した試験体同士を ●—● で結んで示したが，**(a)**,**(d)**と**(e)**のように Q_{su}/Q_{mu} が同じで R_u が増大しているのは，Q_{su} に座屈補強筋の効果が考慮されていないためである。そこで，本実験結果の変形性能の評価にあたり座屈補強筋の影響を考慮した指標を考えた。

$$B\text{指標}=\Sigma(\Psi\cdot L)\times Q_{su}/Q_{mu} \qquad (5)$$

この B 指標は、Q_{su}/Q_{mu} に $\Sigma(\Psi\cdot L)$を乗じることにより座屈補強筋の影響を考えたものである。$\Sigma(\Psi\cdot L)$は座屈補強筋の付着面積を表しており，鉄筋径(d_b)と定着長さ(L)の関数になっている。すなわち，限界変形角(R_u)は座屈補強筋の径ならびに定着長さに比例すると考えたものである。なお，記号は**表-1**,**3** を参照のこと。**図-10** に R_u－B指標関係を示す。**図-9** で示した**(a)**～**(e)**は全て正の相関に変化している。したがって，本実験結果の変形性能を評価するには，座屈補強筋の径と定着長さを考慮する必要があることが分かる。

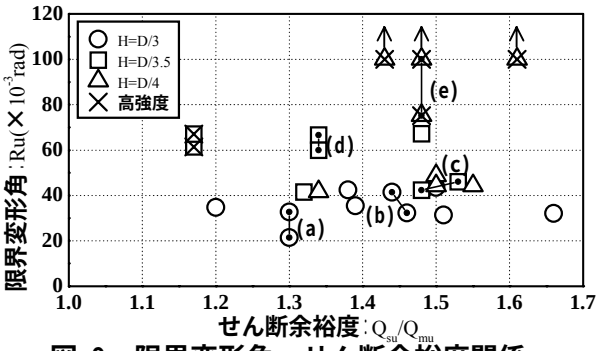


図-9　限界変形角－せん断余裕度関係

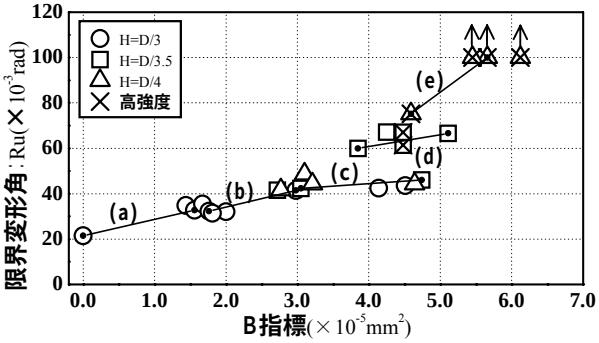


図-10　限界変形角－Ａ指標関係

4.　まとめ

材端部に開孔を有するＲＣ梁について，本実験範囲では以下の知見が得られた。

- 座屈補強筋は材端部の開孔に対して有効な補強方法である。
- 座屈補強筋は，孔際補強筋と開孔補強筋と同様にせん断抵抗要素の一つである。
- 曲げ終局強度は略算式で評価できる。
- 開孔部せん断強度は修正広沢式で安全側に評価できる。
- 変形性能は座屈補強筋の径および定着長さを考慮する必要がある。

謝辞

本研究は,浅沼組,安藤建設,大木建設,奥村組,熊谷組,五洋建設,大末建設,テイエム技研,日産建設,松村組の 10 社による共同研究である。実験は(財)日本建築総合試験所で行われました。また,研究の実施にあたり,同試験所の益尾部長には貴重なご指導・ご助言を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1)2001 年版　建築物の構造関係技術基準解説書,日本建築センター,p.520,2001.3
2)鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説,日本建築学会,pp.271～272,1999.11
3)飯塚正義,八木敏行,石原利江子,益尾潔：ヒンジゾーンに開口を設けたハーフプレキャスト鉄筋コンクリート梁の耐震性能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.16,No.2,pp.389～394,1994.7