

RC梁の材端部を対象とした開孔補強工法の開発

Development of Reinforcement for Web Opening at Plastic Hinge Area of Reinforced Concrete Beams

中澤 敏樹*

萩原 幸男*²

要 旨

本開発は、RC梁の材端部に開孔を設ける場合の補強方法を確立することを目的として行われた。梁部材実験はコンクリート強度が普通強度（Fc24）と高強度（Fc48）の2シリーズで構成され、主な実験因子は、開孔の有無、開孔径、座屈補強筋の有無および定着長さ、開孔補強筋比、座屈補強筋量とした。開孔芯の位置は全て梁端部柱面からD/3（D：梁せい）とした。本実験の結果、開孔径によって最大耐力以降の変形性能に差異があること、開孔補強筋および座屈補強筋は靱性能の向上に対して有効に作用すること、座屈補強筋の定着長さが靱性能に重要な影響を与えることが確認できた。また、端部に開孔を有するRC梁に今回提案する方法によって補強を施すことで、所要の構造性能を得られることが明らかになった。

キーワード：RC梁／材端部／開孔／開孔補強筋／座屈補強筋

1. はじめに

集合住宅等の建物では、階高の制約や換気設備の必要性から梁に貫通孔（以下、開孔）を設けることが一般に行われる。この時、構造性能確保の観点から、鉄筋コンクリート（以下、RC）造の梁では梁端部を避けて開孔を設ける必要がある。これは、端部に開孔を有するRC梁が外力を受けた場合、開孔近傍では応力が増大してひび割れが発生しやすくなるためである。さらに変形が増大すると、せん断ひび割れが拡大して極めて変形能力に乏しい性状を示すことが既往の研究から知られている。

そのため従来方法では、図-1に示すように開孔を柱面より梁せい以上離して設け、設備類の配管は梁端部を迂回させることになる。そのため、現状では天井の一

部に下がり天井を採用するなどの対応が必要となるため、設計プラン上の制約となっている。これに対し梁端部に開孔を設けることができれば、設計上の自由度が増大するだけでなく、迂回配管や下がり天井の増大によるコストアップを抑えることが可能となる。

このような背景から、本研究は梁端部に開孔を設けたRC梁の開孔補強法を開発することを目的として行われた。設定した目標は、図-2に示すように柱面からD/3（D：梁せい）の位置に、径D/3.5の開孔を設けることであり、目標とする構造性能は、無孔梁と同等の曲げおよびせん断耐力を有し、かつ靱性能として $40 \times 10^3 \text{rad}$ の限界部材角を確保することとした。

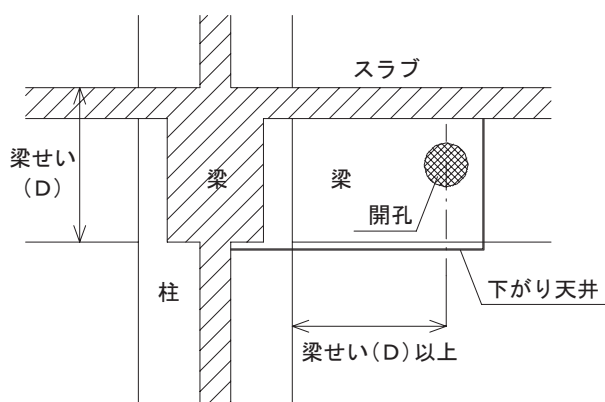


図-1 従来工法による開孔位置

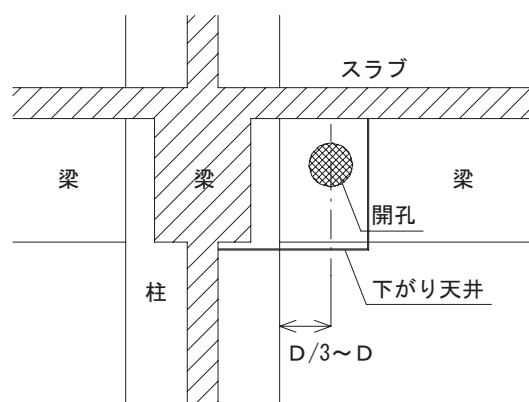


図-2 梁端部に開孔を設けた場合

*建築構造研究室 *²東京分室

表－１ 試験体一覧

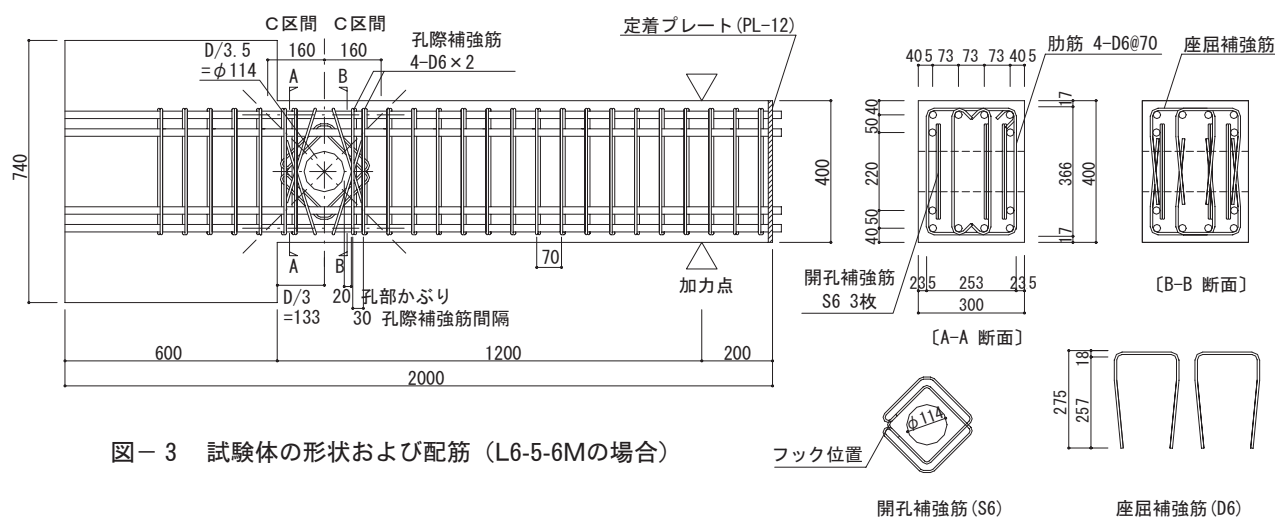
試験体	Fc N/mm ²	主筋		あばら筋		開孔	孔際補強筋		開孔補強筋		座屈補強筋	
		種類	Pt(%)	配筋	Pw(%)	径(H)	配筋 ^{※1}	Pv(%)	配筋	Pd(%)	配筋	定着長
Fc24(1) シリーズ	L6-0	24	6-D19 [SD345]	4-D6@70 [SD295A]	0.61	無孔	—	—	—	—	—	—
	L6-5-4L-B					D/3	4-D6×2 [SD295A]	0.53	S6×2	0.37	D6(4足)	L=25d _b ^{※2}
	L6-5-4L-N								S6×3	0.56	D6(4足)	—
	L6-5-6L-B								S6×3	0.56	D6(4足)	L=25d _b
Fc24(2) シリーズ	L6-5-6L	24	6-D19 [SD345]	4-D6@70 [SD295A]	0.61	D/3	4-D6×2 [SD295A]	0.53	S6×3	0.56	D6(4足)	開孔芯+15d _b
	L6-5-6M					D/3.5						
	L6-5-6S					D/4						
	L6-5-4M					D/3.5						
	L6-5-4S					D/4						
Fc48 シリーズ	H6-0	48	6-D19 [SD490]	4-S6@70 [KSS785]	0.61	無孔	—	—	—	—	—	—
	H6-5-9S-B1					D/4	4-S6×2 [KSS785]	0.53	S8×3	0.88	D6(6足)	開孔芯+15d _b
	H6-5-9S-B2										D10(4足)	

※1：片側のC区間に配筋されたあばら筋、※2：d_bは座屈補強筋径
[共通因子]

- ・断面寸法：b×D=300×400mm、せん断スパン比：a/D=3.0
- ・有開孔試験体の開孔位置は、水平方向：梁端から開孔中心までD/3
上下方向：梁中央
- ・開孔補強筋：KSS785、座屈補強筋：SD295A

試験体の記号の意味

L:Fc24 ← L6-5-6L-B → 座屈補強筋
H:Fc48
主筋本数
孔際補強筋比 開孔補強筋比
L:H=D/3
M:H=D/3.5
S:H=D/4



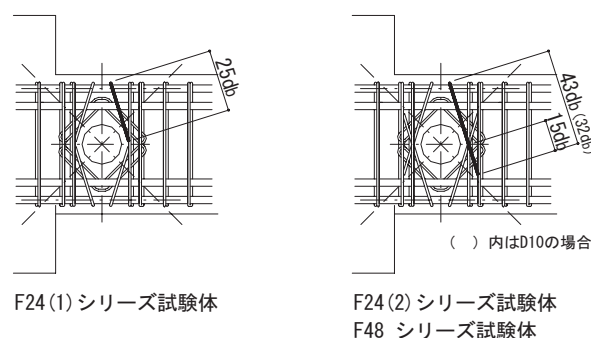
図－３ 試験体の形状および配筋（L6-5-6Mの場合）

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体一覧を表－１に、形状および配筋を図－３に示す。試験体は、コンクリート強度が24N/mm²のFc24(1)シリーズとFc24(2)シリーズおよび48N/mm²のFc48シリーズから構成されている。実部材に対する縮小率は約1/2とした。

有開孔試験体の開孔水平位置はいずれも梁端部スタブ面からD/3（D：梁せい）、鉛直位置は梁部材芯とし、径はD/3、D/3.5およびD/4の3種類とした。有開孔試験体の開孔部のせん断補強は、既成の補強金物（以下、開孔補強筋）とC区間内のあばら筋（以下、孔際補強筋）からなり、貫通孔の上下には主筋の座屈を防止するための〇型鉄筋（以下、座屈補強筋）が配筋されている。ここで、C区間とは、開孔部中心を通り、かつ部材軸と45度をなす直線が1段目主筋と交わる点と開孔部芯までの区間と定義する。



図－４ 座屈補強筋の定着長さ

主な実験因子は、Fc24(1)シリーズでは①開孔の有無、②座屈補強筋の有無、③開孔補強筋比であり、Fc24(2)シリーズでは①開孔径である。また、Fc48シリーズでは①開孔の有無、②座屈補強筋量である。

各実験シリーズにおける座屈補強筋の定着長さを図－

4に示す。座屈補強筋の定着長さは、Fc24(1)シリーズでは $25d_b$ (d_b : 座屈補強筋径)としたが、Fc24(2)およびFc48シリーズでは開孔芯+ $15d_b$ とした。また、Fc24(1)シリーズでは開孔補強筋のフック位置を加力点側に配置したのに対し、Fc24(2)およびFc48シリーズではフックがスタブ側に面するように配置した。

試験体の形状を決定するにあたって、修正広沢式による開孔部のせん断終局強度²⁾が、建築学会略算式による曲げ終局時せん断強度¹⁾を上回るように設計した。また、梁端部以外の範囲では曲げ終局強度に対するせん断終局強度³⁾の比が1.0以上確保されるように計画した。

2.2 使用材料

表－2、表－3に鉄筋およびコンクリートの材料試験結果を示す。あばら筋はFc24(1)およびFc24(2)シリーズでは135度フック形式としたが、Fc48シリーズではKSS785材を用いて溶接閉鎖型とした。また、開孔補強筋には全てKSS785材を使用した。

2.3 実験方法

荷重方法を図－5に示す。荷重は片持ち梁形式とし、押し引き型の油圧ジャッキを用いて、梁の反曲点に相当する位置に水平力を加えた。荷重スケジュールは、目標所定部材角 R を $\pm 5, 10, 20, 30, 40, 50 \times 10^{-3} \text{rad}$ に設定し、正負交番繰返し荷重を各2サイクルずつ行った後、 $R=+100 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで正方向に単調荷重した。

計測は、部材角、開孔部せん断変形角、全軸方向変形量、梁端部の軸方向変形量および曲げ回転角を変位計により測定した。また、主筋、あばら筋、開孔補強筋、孔際補強筋および座屈補強筋の主要な位置に歪みゲージを貼り付け、歪みの測定を行った。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

写真－1に各試験体の $R=+40 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時における破壊状況を、図－6に各試験体のせん断力(Q)－部材角(R)関係を示す。なお、図中には実験中に観察された主な現象を記した。

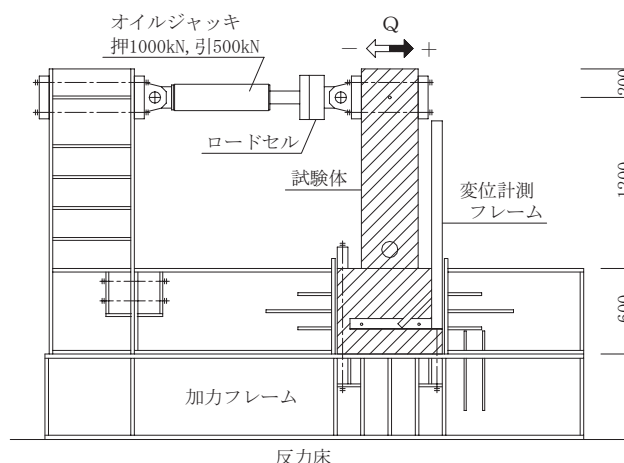
開孔の無いL6-0とH6-0では $R=7 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に梁端部付け根で主筋の引張降伏が発生して剛性が低下した。L6-0では $R=50 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に最大強度に達した後、梁端部付け根から1Dの範囲でせん断ひび割れ幅が大きくなり、この領域での被りコンクリートの剥落および主筋の局部座屈が発生して強度が低下した。H6-0では、 $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時にほぼ最大強度に達し、その後は強度低下が認められず、 $Q-R$ 関係は紡錘形でエネルギー吸収性能に富

表－2 鉄筋の材料試験結果

シリーズ	呼び名・規格	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
Fc24(1)	D6[SD295A]	381	513
	D19[SD345]	375	560
	S6[KSS785]	981	1126
Fc24(2)	D6[SD295A]	329	503
	D19[SD345]	367	587
	S6[KSS785]	905	1096
Fc48	D6[SD295A]	361	528
	D10[SD295A]	364	500
	D19[SD490]	538	690
	S6[KSS785]	882	1068
	S8[KSS785]	993	1162

表－3 コンクリートの材料試験結果

シリーズ	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
Fc24(1)	24.4	2.42
Fc24(2)	27.1	2.65
Fc48	54.6	3.69



図－5 荷重方法および計測方法

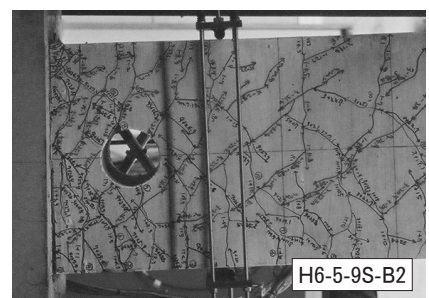
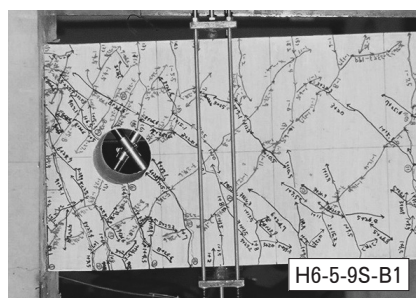
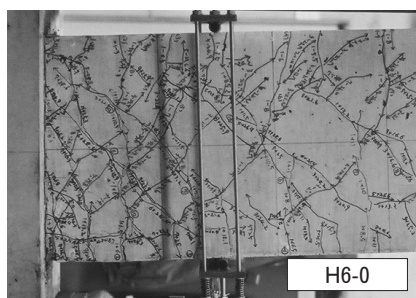
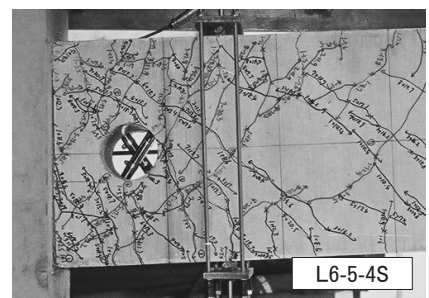
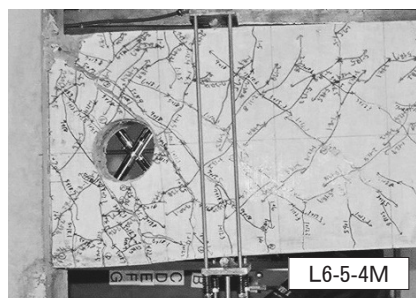
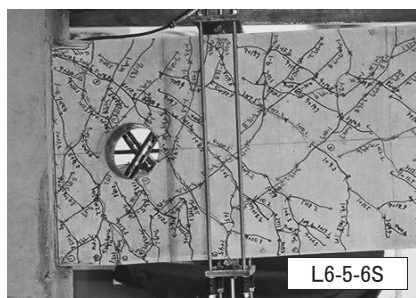
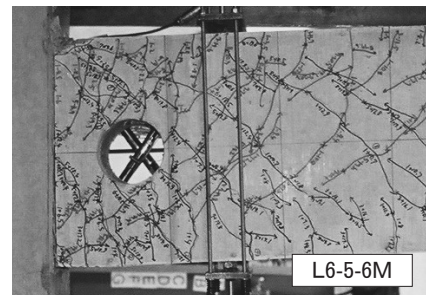
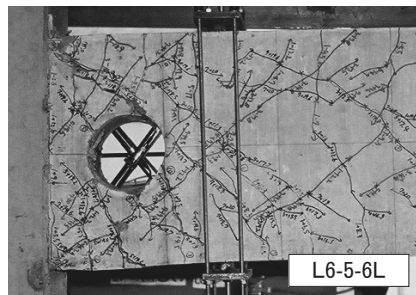
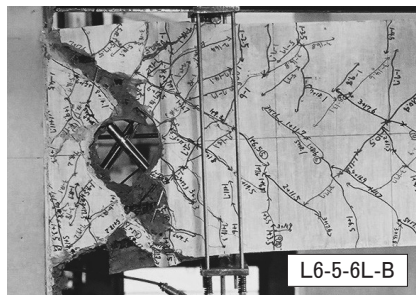
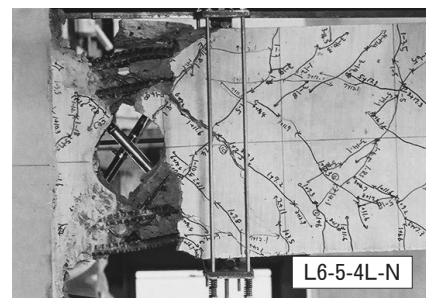
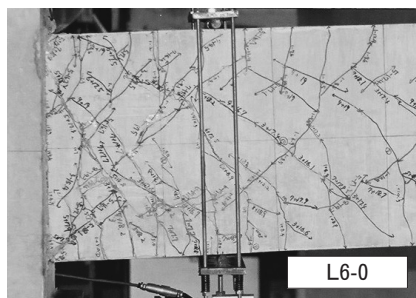
んだ履歴性状を示した。

全ての有孔梁においても無孔梁と同様、 $R=6 \sim 7 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に梁端部で主筋の引張降伏が発生し剛性が低下した。Fc24(1)(2)シリーズでは、最大強度に至った後に開孔近傍でせん断ひび割れ幅が大きくなり、強度が低下した。その後、開孔部から梁端部隅部にかけて、被りコンクリートおよびコアコンクリートの剥落、主筋の局部座屈が発生した。座屈補強筋が無いL6-5-4Nと座屈補強筋の定着長さが $25d_b$ のL6-5-4L-BとL6-5-6L-B、および座屈補強筋の定着長さが開孔芯+ $15d_b$ で開孔径がD/3のL6-5-6Lでは、強度の低下を伴う開孔部近傍のせん断ひび割れが $R=20$

～ $30 \times 10^{-3} \text{ rad}$ で拡大した。開孔径をD/3.5としたL6-5-6M、D/4としたL6-5-6S、L6-5-4Sでは、開孔近傍のせん断ひび割れが $R=40 \times 10^{-3} \text{ rad}$ の負側2サイクル目で拡大し始めたが、 $R=40 \times 10^{-3} \text{ rad}$ まで良好な履歴性状を示した。ただし、開孔径をD/3.5とし開孔補強筋比を小さくしたL6-5-4Mでは $R=40 \times 10^{-3} \text{ rad}$ に達する過程で耐力が低下した。せん断ひび割れが急増した位置は、開孔径がD/3およびD/3.5の場合には曲げ圧縮側の開孔周面より材端部付根にかけてであるのに対して、開孔径がD/4の場合には、開孔の中

心位置から材端部付根にかけてであり、開孔径の違いはせん断ひび割れが拡大する位置に影響を及ぼす傾向が認められた。

Fc48シリーズのH6-5-9S-B1では $R=50 \times 10^{-3} \text{ rad}$ の第2サイクルで強度が低下したのに対し、H6-5-9S-B2は最終変形($R=100 \times 10^{-3} \text{ rad}$)までほとんど強度低下は認められず、エネルギー吸収能力に富んだ履歴性状を示した。また、H6-5-9S-B2では、開孔部付近のせん断ひび割れ幅の拡大は観察されなかった。



写真－1 $R = +40 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 時の破壊状況

以上より、端部に開孔を有する梁の限界部材角は、開孔補強筋および座屈補強筋を有効に配筋することによって増大することが確認できた。その場合、開孔径および座屈補強筋の定着長さの相違によって破壊性状や最大強

度以降の変形性能が異なることから、靱性能として $R=40 \times 10^{-3} \text{rad}$ を確保するためには、開孔径と座屈補強筋の定着長さを適切に設定する必要があることがわかった。

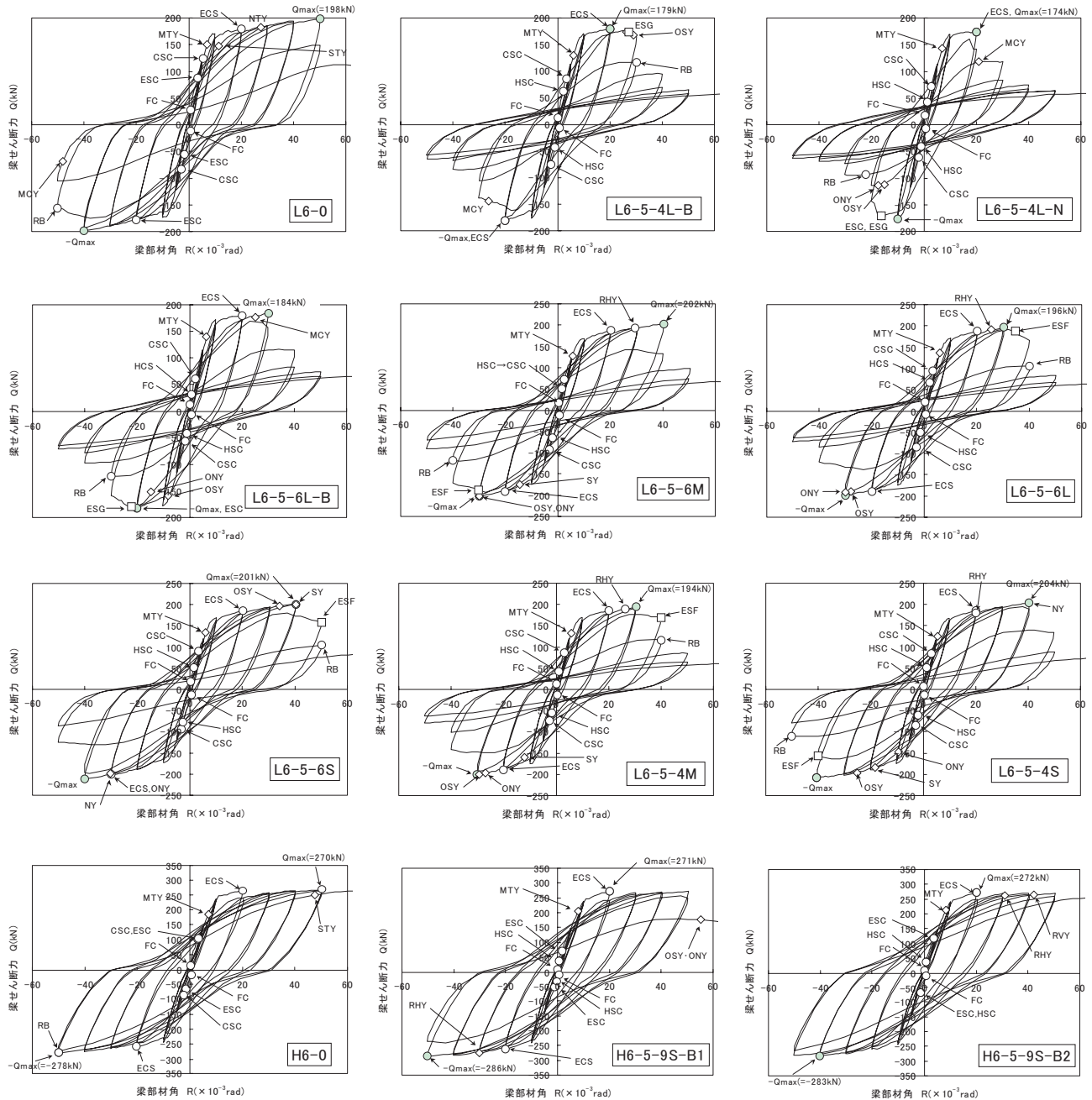


図-6 せん断力(Q)－部材角(R)関係

【記号の説明】

Qmax：最大強度、FC：曲げひび割れ、CSC：せん断ひび割れ、HSC：開孔部斜めひび割れ

ECS：材端部コンクリートの圧壊、MTY：主筋の引張降伏、MCY：主筋の圧縮降伏、RB：主筋の局部座屈

ESC：端部せん断ひび割れ、ESF：開孔部近傍のせん断ひび割れの急増、ESG：開孔部付近のせん断ひび割れのずれ発生

SY：あばら筋（外周筋）の引張降伏、NY：あばら筋（中子筋）の引張降伏、OSY：孔際補強筋（外周筋）の引張降伏

ONY：孔際補強筋（中子筋）の引張降伏、RHY：座屈補強筋（加力平行側）の引張降伏

表－４ 実験値と計算値との比較

試 験 体	実 験 値					計 算 値			Qmax /Qmu	Qsu0 /Qmu	Qsuh /Qmu	Qmu /bDσ _B	Qmu /bDeσ _B
		Qmax (kN)	Qmax* /(Qmax)0	Rmax (×10 ³ rad)	Ru (×10 ³ rad)	Ru* /(Ru)0	Qmu (kN)	Qsu0 (kN)	Qsuh (kN)				
Fc24(1) シリーズ	L6-0	198	1.00	50.2	52.5	1.00	166	189	—	1.19	1.14	0.057	0.170
	L6-5-4L-B	179	0.90	20.1	32.7	0.52			191	1.08			
	L6-5-4L-N	174	0.88	20.1	21.4	0.41			191	1.05			
	L6-5-6L-B	184	0.93	30.1	32.3	0.62			211	1.11			
Fc24(2) シリーズ	L6-5-6L	196	0.99	30.3	41.4	0.79	163	185	215	1.20	1.13	0.050	0.150
	L6-5-6M	202	1.02	40.3	43.3	0.82			221	1.24			0.140
	L6-5-6S	201	1.02	40.4	48.7	0.93			225	1.23			1.134
	L6-5-4M	194	0.98	30.4	41.5	0.79			199	1.19			0.140
	L6-5-4S	204	1.03	40.4	41.7	0.80			203	1.25			0.134
Fc48 シリーズ	H6-0	270	1.00	50.1	100.0	1.00	238	300	—	1.13	1.26	0.037	—
	H6-5-9S-B1	272	1.01	50.1	75.2	0.75			353	1.14			0.098
	H6-5-9S-B2	271	1.00	40.2	100.0	1.00			353	1.14			0.098

注) Qmax：最大強度、Rmax：最大強度時の部材角、Ru：限界部材角、b：梁幅、D：梁せい、De：開孔部の縁あき

*：Qmax/(Qmax)0、Ru/(Ru)0は、L6-0およびH6-0（無開孔試験体）に対する比率

Qmu：略算式による曲げ終局時せん断力¹⁾、Qsu0：荒川min式による終局せん断強度³⁾、Qsuh：修正広沢式による開孔部の終局せん断強度²⁾で下式による

$$Q_{suh} = \left\{ \frac{0.053 p_v^{0.23} (F_c + 18)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{p_v \sigma_{vy} + p_d \sigma_{dy}} \right\} b \cdot j$$

H：開孔の直径（mm）、p_v：孔際補強筋比、p_d：開孔補強筋比、σ_{vy}、σ_{dy}：孔際補強筋および開孔補強筋の規格降伏点（N/mm²）
計算に用いた材料強度は、素材実験結果を用いた。ただし、開孔補強筋、孔際補強筋の強度はσ_y>25σ_Bではσ_y=25σ_Bとした。

4. 実験結果の考察

4.1 実験値と終局強度計算値

表－４に実験値と終局強度計算値の一覧を示す。表中の限界部材角(Ru)は各部材角の繰返し载荷による第1サイクルの包絡線上の強度が最大強度の80%に低下した時点の部材角と定義する。

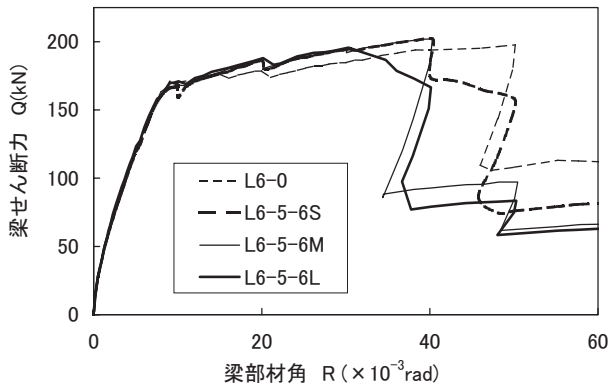
L6試験体における曲げ終局時せん断力計算値(Qmu)と最大強度(Qmax)との比は、Fc24(1)シリーズの有開孔試験体が1.05～1.11であるのに対し、Fc24(2)シリーズでは1.19～1.25となり、無孔梁(L6-0)の1.19に近い値となっている。これは、座屈補強筋の定着長さを大きくしたことによって主筋の座屈に対する補強効果を高め、圧縮側コンクリートの損傷を比較的小さく抑えることができたことによると考えられる。一方、Fc48シリーズについては、有孔梁の最大強度は無孔梁と同等の値となった。

以上より、適切な補強を施した有開孔梁の曲げ強度は曲げ強度略算式¹⁾によって安全側にかつ精度よく評価できることが確認できた。

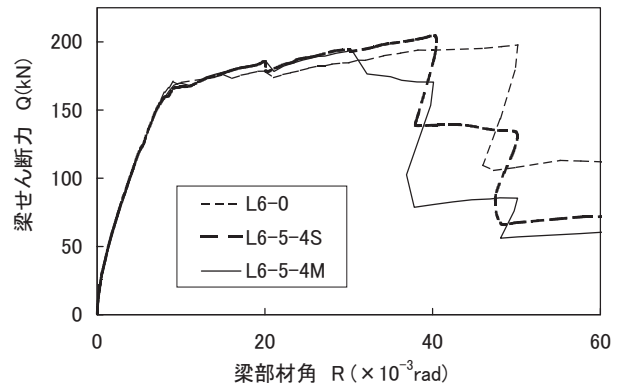
4.2 各因子の影響

(1) 開孔径の影響

開孔径の異なる試験体について、荷重－変形包絡線の比較を図－7、図－8に示す。同図より、開孔補強筋がS6×3で開孔径がD/3.5、D/4のL6-5-6M、L6-5-6Sおよび開孔補強筋がS6×2で開孔径がD/4のL6-5-4Sについては、R=40×10³radまで無開孔のL6-0とほぼ同じ性状を示した。ただし、開孔径の増大に伴って最大強度以降の耐力の低下は大きくなった。開孔補強筋がS6×3で開孔径がD/3のL6-5-6Lおよび開孔補強筋がS6×2で開孔径がD/3.5のL6-5-4Mでは、R=30×10³radから耐力が低下した。



図－7 開孔径の影響（開孔補強筋：S6×3）



図－8 開孔径の影響（開孔補強筋：S6×2）

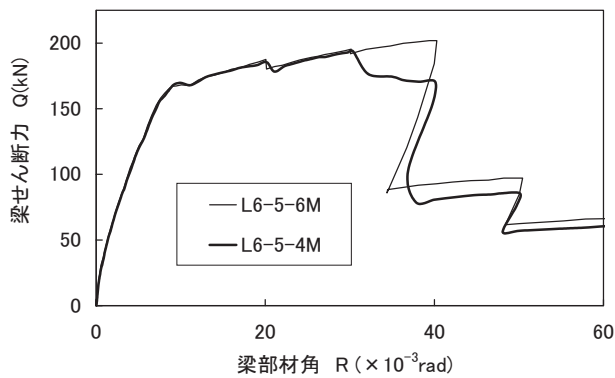


図-9 開孔補強筋の影響（開孔径：D/3.5）

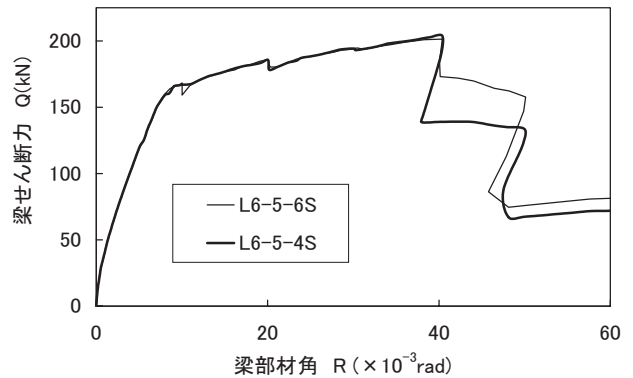


図-10 開孔補強筋の影響（開孔径：D/4）

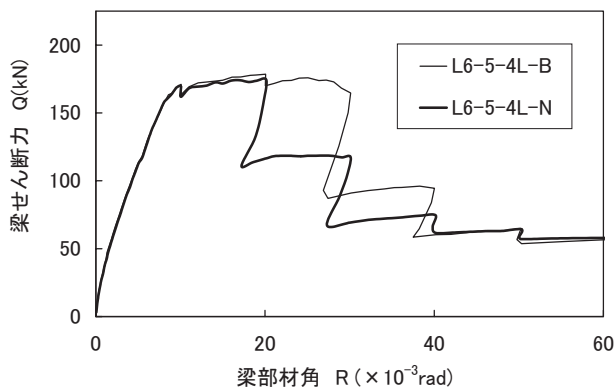


図-11 座屈補強筋の影響（有・無）

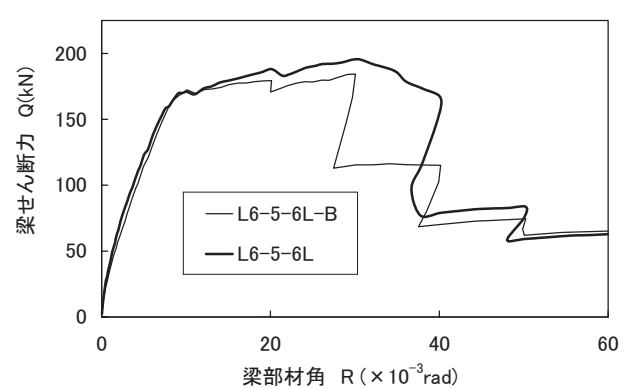


図-12 座屈補強筋の影響（定着長さ）

(2) 開孔補強筋の影響

開孔補強筋の異なる試験体について、荷重－変形包絡線の比較を図-9、図-10に示す。開孔径がD/3.5の場合、開孔補強筋の少ないL6-5-4Mでは $R=30 \times 10^{-3} \text{ rad}$ から耐力が低下しているのに対し、開孔補強筋の多いL6-5-6Mでは $R=40 \times 10^{-3} \text{ rad}$ まで耐力を保持した。開孔径がD/4の場合、 $R=40 \times 10^{-3} \text{ rad}$ まで開孔補強筋の影響はみられなかった。

(3) 座屈補強筋の影響

座屈補強筋の有無および定着長さの異なる試験体について、荷重－変形包絡線の比較を図-11、図-12に示す。

座屈補強筋を配しないL6-5-4L-Nでは、 $R=20 \times 10^{-3} \text{ rad}$ から急激に耐力が低下しており、座屈補強筋の効果が確認できた。また、定着長さを $L=25d_b$ としたL6-5-6L-Bについては、開孔芯から $15d_b$ 定着としたL6-5-6Lと比較して $R=30 \times 10^{-3} \text{ rad}$ から耐力の低下が顕著になっている。これは、定着長さが小さいと、開孔部周辺に発生したひび割れによって座屈補強筋の付着性能が低下したためであると考えられる。これより、主筋の座屈に対して座屈補強筋を有効に作用させるには、開孔芯を超えて定着を確保する必要があることがわかった。

4.3 各補強筋の歪み

開孔周囲に配した各補強筋の応力負担状況を把握するために、図-13に示す補強筋の歪みについて検討する。

(1) 開孔補強筋

開孔径の異なる試験体について、各第1サイクルピーク時の開孔補強筋の歪みと部材角との関係を図-14に示す。開孔径による開孔補強筋の歪みへの影響はほとんどみられず、全ての試験体において降伏歪みの半分以下となっていた。また、開孔補強筋の歪みは最大荷重時に最も大きくなっており、荷重の低下に伴い開孔補強筋の歪みも小さくなった。

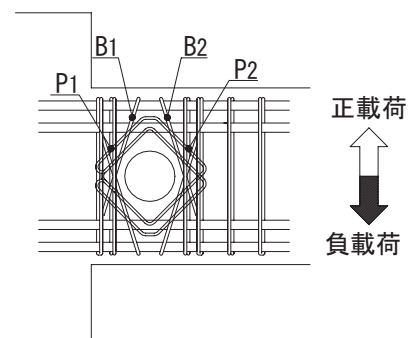


図-13 各補強筋の歪み測定位置

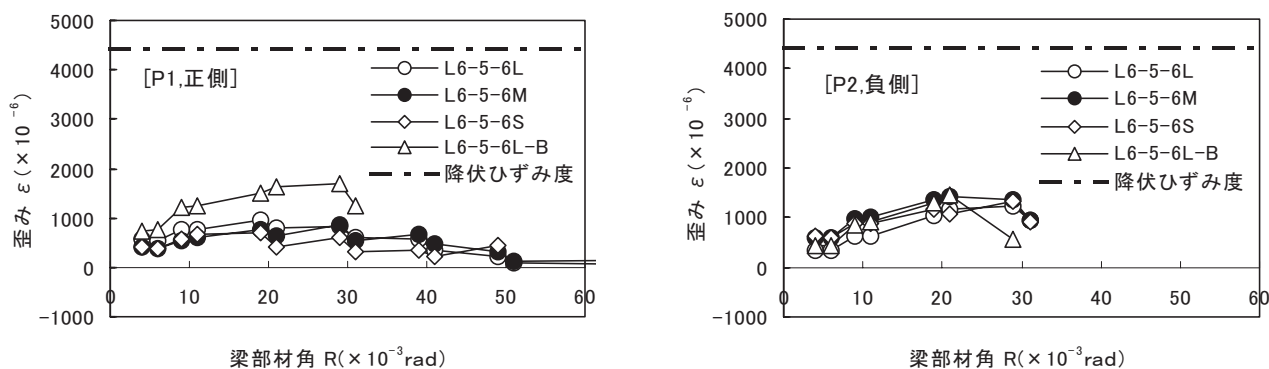


図-14 開孔補強筋の歪み

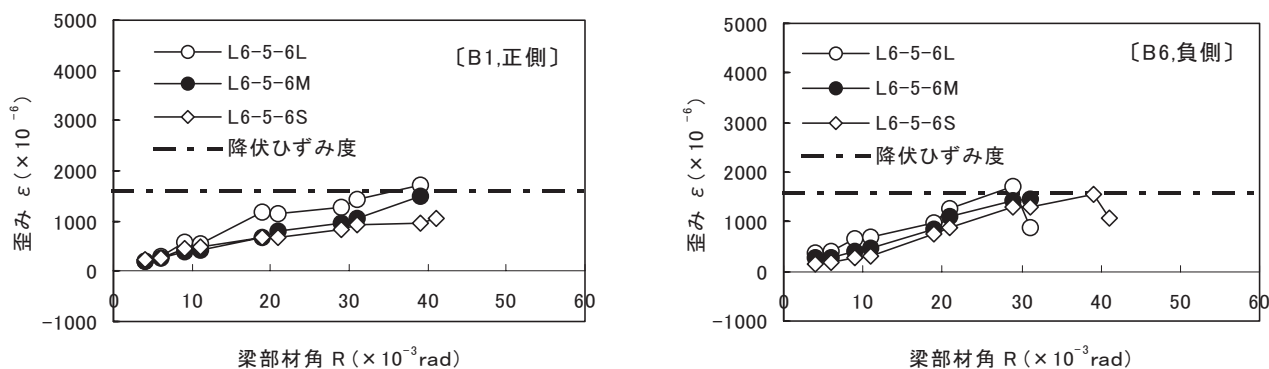


図-15 座屈補強筋の歪み

(2) 座屈補強筋

開孔径の異なる試験体について、各第1サイクルピーク時の座屈補強筋の歪みと部材角との関係を図-15に示す。ここでは座屈補強筋の定着長さを開孔芯+15d_bとした試験体を対象とした。何れの試験体においても、最大荷重時における座屈補強筋の歪みは、正負荷荷共に降伏歪み付近まで進展している。また、開孔径が大きいほど座屈補強筋の歪みは大きくなり、荷重の低下と共に歪みも小さくなった。

5. まとめ

材端部に貫通孔を設けた梁の補強方法を確認することを目的として、有開孔梁の曲げせん断実験を行った。その結果、以下のことが確認できた。

- (1) 開孔径が相違しても、適切な補強を施すことで最大強度は無開孔梁と同程度となる。ただし、破壊性状や最大強度以降の変形性能は開孔径によって大きく異なる。
- (2) 限界部材角を増大させるためには、開孔径と各補強筋による補強が重要となる。また、座屈補強筋はその効果が発揮できる定着長さを確保することが必要である。
- (3) 曲げ終局強度略算式は、有開孔梁の曲げ強度を精度良く評価できる。

今後は、今回行った実験をもとにしてせん断応力度がより高い領域での実験を行い、梁端部を対象とした開孔補強設計法を確立する予定である。

なお、本研究は梁端開孔補強研究会（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、日産建設、松村組、ティエム技研の10社で構成）の共同研究として行われたものである。

〔謝 辞〕

本実験は、(財)日本建築総合試験所で実施されました。本研究の実施にあたり、同試験所の益尾潔構造部長にご指導を頂きました。ここに深く感謝いたします。

〔参考文献〕

- 1) 日本建築センター：構造計算指針・同解説、1991年版
- 2) 広沢雅也、清水 泰：鉄筋コンクリート造有孔はりのせん断強度とじん性、建築技術、No.331、pp.93～101、1979。
- 3) 荒川 卓：鉄筋コンクリートばりの許容せん断応力度とせん断補強について－実験結果による再検討－、コンクリートジャーナル、Vol.8、No.7、pp.11～20、1970.7