降伏機構分離型鉄筋コンクリート造梁の耐震性能と その向上技術に関する研究

STUDY ON SEISMIC PERFORMANCE AND ITS ENHANCEMENT OF HINGE ISOLATED REINFORCED CONCRETE BEAMS

平石久廣*, 牧 隆介**, 松本裕二**

Hisahiro HIRAIISHI, Ryusuke MAKI and Yuji MATSUMOTO

This paper presents seismic test results of hinge isolated reinforced concrete beams with/without openings at beam-ends. At the hinge region of the beams, main bars were un-bonded in order to reduce damage of concrete and supplementary main bars were arranged to resist bending moment and shear force. The major subjects studied in this paper were as follows, which were required to establish the design guideline of this structural type of beams:

- structural details for enhancement of structural and constructive performance;
- limitation of concrete strength and shear stress level;
- openings located at the boundary of un-bonded hinge isolated portion; and
- discussion of modeling of restoring force characteristics of beams with openings.

Keywords : Reinforced Concrete Beam, Hinge Isolation Structural Systems, Damage Mitigation, Opening at Beam-end,

Detail of Reinforcement, Limitation of Structural Variables, Restoring Force Characteristic

鉄筋コンクリート梁, 降伏機構分離型構造, 損傷低減, 梁端開孔, 配筋詳細, 適用限界, 復元力特性

1. はじめに

著者らは、部材角 2%程度までは殆ど損傷が生じず、且つ、3%を超えるような変形でも殆ど耐力低下を生じないような良好な耐震性能を有する構造を実現するため、ヒンジ領域の主筋の付着を除去すると共に、その部分の曲げ及びせん断に対して抵抗機構を形成しうる補助的な曲げ補強筋を配した降伏機構分離型鉄筋コンクリート造梁に関する一連の研究を行ってきた。^{1~3)} 又、この研究においては、梁端部に設備配管用の開孔を設けた場合の開孔補強方法についても研究を進めてきた。³⁾

本研究では、本構造の設計指針作成のため、残された主要な課題の内、以下の項目について確認実験を行った。

1. 構造性能並びに施工性の向上のための構造詳細について
2. コンクリート強度及びせん断応力度レベルの適用範囲に関して
3. 開孔が主筋の付着除去区間の境界位置に存在する場合の復元力特性について
4. 無開孔梁と有開孔梁の復元力特性の比較について

2. 実験計画

2.1 試験体

図 1 に試験体配筋図、図 2 に開孔補強筋の配筋方法、図 3 に開孔補強筋配筋例 (タイプ A) を示す。試験体は実大の約 1/2 を想定し、曲げ降伏が先行するように計画した。全試験体の共通因子は梁幅 250(mm)×梁せい 350(mm)×内法寸法 1400(mm)、せん断スパン比 2 であり、配筋形式は補助的な曲げ補強筋 (添え筋) を主筋と平行に並べた並列配筋方式とした。主筋の付着除去区間は梁端から 233(mm)(2D/3)とし、鉄筋をシース管で覆うことでコンクリートとの絶縁を図った。使用した鉄筋及びコンクリートの素材試験結果をそれぞれ表 1、2 に示す。実験はシリーズ I とシリーズ II の 2 回に分けて行った。以下に各々のシリーズの試験体の概要を記す。

シリーズ I

以下の 1 から 4 の項目に関し 6 体の試験体を計画した。

1. 梁中央側の開孔補強筋について、従来の両端共 180° フックにして添え筋に緊結したもの (図 2 (a)タイプ A 参照) に加え、施工性の向上を目的に梁せい中央であれば筋と平行に折り曲げて定着したもの (図 2 (b)タイプ B 参照) を採用した。

* 明治大学理工学部建築学科 教授・工博
(独立行政法人建築研究所 客員研究員)
** 明治大学大学院理工学研究科 博士前期課程

Prof., Dept. of Architecture, School of Science & Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.
(Visiting Research Fellow, Building Research Institute)
Graduate Student, Graduate School of Science & Technology, Meiji Univ.

- 既往の研究では、 $F_c=48(\text{N/mm}^2)$ クラスが上限であったコンクリート強度について、 $F_c=60(\text{N/mm}^2)$ クラスの試験体を計画した。
- 既往の研究では、開孔は付着除去区間内であったが、その区間を超えて開孔を設ける場合も考えられるので、開孔の中心を付着除去区間との境界とした試験体を計画した。
- 無開孔と有開孔の試験体の復元力特性を比較検討するため、双方の試験体を計画した。

表3にシリーズⅠの試験体一覧を示す。 $F_c=48(\text{N/mm}^2)$ の試験体は【BN-48】及び【BO-48A】、並びに【BO-48AL】及び【BO-48B】の計4体、 $F_c=60(\text{N/mm}^2)$ の試験体は【BN-60】及び【BO-60A】の計2体である。【BN-48】及び【BN-60】は無開孔の試験体であり、【BO-48A】及び【BO-48AL】、並びに【BO-48B】及び【BO-60A】は有開孔の試験体である。開孔径はD/3とし、開孔位置は【BO-48B】のみ梁せいの中心にスタブのフェイス面から開孔の中心までを2D/3とし、それ

以外の3体の試験体はD/3とした。開孔補強筋について、【BO-48A】及び【BO-60A】はタイプA(図2(a)参照)、【BO-48AL】はタイプB(図2(b)参照)、【BO-48B】はタイプC(図2(c)参照)を採用した。

シリーズⅡ

以下の5から7の項目に関し4体の試験体を計画した。

- 梁端側の開孔補強筋について、変形能の改善を目的に梁せい中央で梁中央側に折り返しあばら筋に対し若干の角度をつけて定着するもの(図2(d)タイプD参照)を採用した。
- 既往の研究において、本構造の並列配筋方式を用い、且つ、目標とする変形能を有したものでは、 $0.067\sigma_B$ が上限であったせん断応力度 $[Q_{mv}/(b \cdot j)]$ レベルについて、 $0.080\sigma_B$ レベルの試験体を計画した。
- 大変形時における梁端部のコンクリートの損傷低減と、スタブのフェイス面以外の曲げひび割れを軽減すること等、構造

図1 試験体配筋図

図2 開孔補強筋の配筋方法

図3 開孔補強筋配筋例(タイプA)

表1 鉄筋の材料試験結果

シリーズⅠ

鉄筋径(種別)	降伏歪 (μ)	降伏点 (N/mm^2)	引張り強さ (N/mm^2)	ヤング係数 ($\times 10^5 \text{N/mm}^2$)
D6(SD295)	1960	335	497	1.72
D6(KSS785)	5440	1010	1220	1.85
D13(SD295)	1950	350	518	1.79
D19(SD490)	2830	514	694	1.82
D22(SD490)	2790	505	656	1.81

シリーズⅡ

鉄筋径(種別)	降伏歪 (μ)	降伏点 (N/mm^2)	引張り強さ (N/mm^2)	ヤング係数 ($\times 10^5 \text{N/mm}^2$)
D6(SD295)	2130	397	586	1.87
D6(SD345)	1980	355	576	1.79
D6(KSS785)	5540	1000	1200	1.81
D8(KSS785)	5680	1100	1270	1.94
D13(SD295)	1940	356	515	1.83
D19(SD490)	2830	524	712	1.85
D25(SD490)	2810	521	624	1.85

性能の向上を目的とし、梁端部のかぶりコンクリートにノッチを設けた試験体を計画した。

表4にシリーズⅡの試験体一覧を示す。 $F_c=48(\text{N/mm}^2)$ の試験体は【BPC48-O3-009】、【BPD48-O3-009】及び【BPD48-O3-006】の計3体、 $F_c=60(\text{N/mm}^2)$ の試験体は【BPC60-O3-008】の1体である。開孔補強筋について、シリーズⅡの試験体はタイプD(図2(d)参照)を採用した。また、【BPD48-O3-009】及び【BPD48-O3-006】は梁端部のかぶりコンクリートにノッチ(図1参照)を設けた。せん断応力度レベルは【BPC48-O3-009】及び【BPD48-O3-009】で $0.080\sigma_B$ 、【BPD48-O3-006】で $0.051\sigma_B$ 、【BPC60-O3-008】で $0.074\sigma_B$ とした。開孔径はD/3とし、開孔位置はスタブのフェイス面から開孔の中心までをD/3とした。

2.2 実験方法

図4に加力装置を示す。載荷方法は野式逆対称モーメント載荷とし、H型鋼(H-600×30×12×20、自重11kN)の加力ビームを介して加力点及び支点の位置を変えることにより行った。

表2 コンクリートの材料試験結果

シリーズⅠ

試験体名	養生方法	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)
BN-48, BO-48A BO-48AL, BO-48B	封緘養生	60.9	3.52
BN-60, BO-60A	封緘養生	72.4	3.89

シリーズⅡ

試験体名	養生方法	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)
BPC48-O3-009, BPD48-O3-009 BPD48-O3-006	封緘養生	51.6	3.45
BPC60-O3-008	封緘養生	63.1	3.59

表3 シリーズⅠの試験体一覧

試験体名	BN-48	BO-48A	BO-48AL	BO-48B	BN-60	BO-60A
コンクリート設計基準強度	48 (N/mm ²)				60 (N/mm ²)	
主筋(1段目)	3-D22(SD490)				3-D19(SD490)	
(2段目)	—				2-D19(SD490)	
添え筋(1段目)	3-D13(SD295)					
(2段目)	—				2-D13(SD295)	
せん断補強筋	3-D6@30(SD295)					
開孔径(mm)	—	D/3			—	D/3
開孔位置(mm)	—	D/3	2D/3		—	D/3
孔際補強筋	—	3-D6(KSS785) 3組			—	3-D6(KSS785) 3組
開孔補強筋	—	3-D6(KSS785) 3組			—	3-D6(KSS785) 3組
開孔部せん断余裕度	—	1.36			—	1.20
せん断応力度レベル	0.057σ _B				0.056σ _B	
開孔補強筋の定着	—	タイプA	タイプB	タイプC	—	タイプA

表4 シリーズⅡの試験体一覧

試験体名	BPC48-O3-009	BPD48-O3-009	BPD48-O3-006	BPC60-O3-008
コンクリート設計基準強度	48 (N/mm^2)			60 (N/mm^2)
主筋(1段目)	3-D19(SD490)			3-D25(SD490)
(2段目)	2-D19(SD490)			—
添え筋(1段目)	3-D13(SD295)			
(2段目)	—			
せん断補強筋	3-D6@30(SD295)	3-D6@70(SD295)	3-D6@30(SD295)	3-D6@30(SD295)
開孔径(mm)	D/3			
開孔位置(mm)	D/3			
孔際補強筋	3-D6(KSS785) 2組	3-D6(SD345) 2組	3-D8(KSS785) 3組	3-D8(KSS785) 3組
開孔補強筋	3-D8(KSS785) 1組	—	—	—
開孔部せん断余裕度	1.31	1.26	1.37	—
せん断応力度レベル	$0.080\sigma_B$	$0.051\sigma_B$	$0.074\sigma_B$	—
開孔補強筋の定着	タイプD			
梁端部ノッチ	—	有	有	—

加力サイクルは目標所定部材角 $R=1/400$ 、 $R=1/200$ 、 $R=1/100$ 、 $R=1/50$ 、 $R=1/33$ 、 $R=1/25$ でそれぞれに正負繰り返し載荷を2回ずつ行った後、 $R=1/20$ で正方向に単調載荷することを基本とした。

全体変位の測定は図5に示すように、危険断面より100(mm)スタブに入った位置に埋め込んだボルトに取り付けたL型アングルを、左右それぞれスタブから跳ね出し、これに取り付けた変位計より相対変位を測定した。

3. 実験結果

3.1 諸強度

各試験体の諸強度と計算値を表5に示す。曲げ耐力は学会略算式⁴⁾、開孔部補強範囲のせん断耐力は修正広沢式⁹⁾を用いた。有開孔梁の一般部及び無開孔梁のせん断耐力は靱性保証型耐震設計指針A法⁴⁾に基づいて算定しているが、開孔を設けた場合はアーチ機構の寄与分の項を除いた。

3.2 荷重一部材角関係

図6に各試験体について荷重一部材角関係を示す。尚、【BO-48AL】のみは左右片側毎の部材角を用いた荷重一部材角関係を併せて示す。シリーズⅠ

無開孔の試験体【BN-48】は、部材角 $R=1/16$ まで変形しても耐力低下は見られず極めて安定した履歴を示した。タイプAの試験体【BO-48A】は、 $R=1/20$ に至る過程で開孔部のせん断破壊により耐力が急激に低下したが、 $R=1/25$ まで安定した履歴を示した。タイプBの試験体【BO-48AL】は、 $R=1/33$ まで安定した履歴を示したが、 $R=1/25$ に至る過程で開孔部せん断破壊により耐力が急激に低下した。本試験体は曲げ降伏後、大野式加力で生じがちな梁の左右で変

図4 加力装置

図5 全体変位の測定

表 5 実験結果と計算値

試験体名	実験結果			曲げ耐力		一般部せん断耐力		開孔部せん断耐力		曲げひび割れ荷重	
	Q_{max}	R	破壊形式	Q_{mu}	実験値/計算値	Q_{su}	実験値/計算値	Q_{so}	実験値/計算値	実験値	計算値
BN-48	262	1/16	耐力低下なし	236	1.11	363	0.72	—	—	21.2	30.3
BO-48A	247	1/25	開孔部せん断破壊	236	1.05	363	0.68	321	0.77	22.1	30.3
BO-48AL	244	1/33	開孔部せん断破壊	236	1.03	363	0.67	321	0.76	21.2	30.3
BO-48B	247	1/20	耐力低下なし	236	1.05	363	0.68	321	0.77	24.6	30.3
BN-60	301	1/50	ほぼ耐力低下なし	279	1.08	367	0.82	—	—	27.4	33.0
BO-60A	300	1/50	開孔部せん断破壊	279	1.08	367	0.82	334	0.90	12.5	33.0
BPC48-O3-009	301	1/50	開孔部せん断破壊	284	1.06	367	0.82	372	0.81	27.8	27.9
BPD48-O3-009	292	1/50	ほぼ耐力低下なし	284	1.03	367	0.80	372	0.78	15.9	24.6
BPD48-O3-006	196	1/25	ほぼ耐力低下なし	182	1.08	265	0.74	230	0.85	21.6	24.9
BPC60-O3-008	339	1/33	15%耐力低下	317	1.07	389	0.87	436	0.78	20.9	30.4

Q_{max} : 最大耐力(kN) R: 最大耐力時の部材角 Q_{mu} : 曲げ耐力⁽¹⁾(kN) Q_{su} : 一般部せん断耐力⁽¹⁾(kN) ($R_s=0.02$) Q_{so} : 開孔部せん断耐力⁽¹⁾(kN) 単位(kN)

M_{cr} : 曲げひび割れモーメント(kN・mm) $M_{cr}=\sigma_c \cdot Z$, σ_c : コンクリートの曲げ引張強度($\sigma_c=0.56\sqrt{f_c}$ (N/mm²))

σ_B : コンクリートのシリンダー圧縮試験強度(N/mm²) Z : 鉄筋を考慮した等価断面係数(mm³)

形量の差が生じ、片側の破壊だけが進展した。左右の部材角の内、大きい方の部材角 R' では R=1/33 において R'=1/25 であった。開孔位置がスタブのフェイス面から 2D/3 の試験体【BO-48B】は、R=1/20 まで変形しても耐力低下は見られず極めて安定した履歴を示した。無開孔の試験体【BN-60】は、R=1/20 まで変形しても崩壊には至らなかった。殆ど耐力低下も見られず非常に安定した履歴を示した。タイプ A の試験体【BO-60A】は、R=1/25 の 2 回目加力時に開孔部のせん断破壊により耐力が急激に低下したが、R=1/25 の 1 回目加力までは安定した履歴を示した。

シリーズⅡ

せん断応力度レベルが $0.080\sigma_B$ の試験体【BPC48-O3-009】は、R=1/20 に至る過程で開孔部のせん断破壊により耐力が急激に低下したが、R=1/25 までは耐力低下も見られず安定した履歴を示した。同様のせん断応力度レベルの試験体【BPD48-O3-009】は、R=1/25 まで耐力低下は見られず安定した履歴を示した。せん断応力度レベルが $0.051\sigma_B$ の試験体【BPD48-O3-006】は、R=1/20 まで変形しても殆ど耐力低下は見られず非常に安定した履歴を示した。せん断応力度レベルが $0.074\sigma_B$ の試験体【BPC60-O3-008】は、R=1/20 で 15% 程度の耐力低下が見られた。

3.3 ひび割れ状況

写真 1 にシリーズⅠの各試験体について、R=1/50 の 2 回目加力ピーク時と R=1/25 の 1 回目加力ピーク時のひび割れ状況を示す。ただし、【BO-48AL】のみ R=1/50 の 2 回目加力ピーク時と R=1/33 の 2 回目加力ピーク時のひび割れ状況である。写真 2 にシリーズⅡの各試験体について、R=1/50 の 2 回目加力ピーク時と R=1/25 の 1 回目加力ピーク時のひび割れ状況を示す。尚、試験体のひび割れ性状の比較については「4. 考察」で記述する。

シリーズⅠ

無開孔の試験体【BN-48】及び【BN-60】は、スタブのフェイス面沿いに曲げひび割れが先行し、続いて開孔寄りの一般部にせん断ひび割れが発生し、部材角が大きくなるにつれこれらのひび割れが伸展・拡大した。開孔位置がスタブのフェイス面から D/3 の試験体【BO-48A】、【BO-48AL】及び【BO-60A】は、ヒンジ領域及び開孔周りのひび割れが部材角と共に伸展・拡大し、最終的に開孔部の S 字状のひび割れにより開孔部のせん断破壊に至った。開孔位置がスタブのフェイス面から 2D/3 の試験体【BO-48B】は、開孔周りのひび割れが部材角と共に伸展・拡大した。全試験体に共通して、R=1/50 或いはそれを越える部材角で、梁端部の主筋に沿った位置のひび割

図 6 荷重-部材角関係

れの発生や梁端部のかぶりコンクリートの圧壊が発生した。しかし、【BO-48AL】を除く5体の試験体において、それらの損傷は $R=1/50$ までは軽微なものであった。【BO-48AL】においては、 $R=1/50$ で梁端部のかぶりコンクリートに明瞭な損傷が生じていたが、それ以外の部分には殆ど損傷は無かった。

シリーズII

梁端部のかぶりコンクリートにノッチを設けた試験体【BPD48-O3-006】及び設けていない試験体【BPC60-O3-008】は、ヒンジ領域及び開孔周りのひび割れが部材角と共に伸展・拡大した。また、一般部に開孔周りのひび割れよりもやや大きなせん断ひび割れが生じた。ノッチを設けていない試験体【BPC48-O3-009】は、ヒンジ領域及び開孔周りのひび割れが部材角と共に伸展・拡大し、 $R=1/20$ に至る過程で開孔部のS字状のひび割れにより開孔部せん断破壊に至った。ノッチを設けた試験体【BPD48-O3-009】は、スタブのフェイス面に生じた曲げひび割れが梁せい中心付近でやや開孔側に寄り、部材角が大きくなるにつれ孔際補強筋に沿って伸展した。全試験体に共通して、シリーズIと同様に、 $R=1/50$ 或いはそれを超える部材角で、梁端部の主筋に沿った位置のひび割れの発生や梁端部のかぶりコンクリートの圧壊が発生したが、それらの損傷は $R=1/50$ までは軽微なものであった。

写真1 ひび割れ状況 (シリーズI)

写真3 ひび割れ状況

(梁中央側の開孔補強筋の定着方法の異なる試験体の比較)

写真2 ひび割れ状況 (シリーズII)

4. 考察

4.1 構造性能並びに施工性の向上のための構造詳細について

4.1.1 開孔補強筋の定着方法の異なる試験体の比較

図7に開孔補強筋の定着方法の異なる試験体の荷重一部材角関係を示す。ただし、【BO-48AL】(タイプB)は大変形で梁左右の変形が著しく異なったため、ここでは試験体の左右の変形角の内、大きい方の変形角 R' を部材角として示した。写真3に【BO-48AL】(タイプB)及び【BO-48A】(タイプA)の $R'=1/25$ 付近でのひび割れ状況を示す。写真4に $R'=1/16$ での【BPC60-O3-008】(タイプD)と $R'=1/19$ での【BO-48AL】(タイプB)のひび割れ状況を示す。まず、【BO-48A】(タイプA)と【BO-48AL】(タイプB)を比較する。【BO-48A】(タイプA)は、 $R'=1/19$ ($R=1/20$ に至る過程)で耐力が最大耐力の80%から殆ど上がらなくなり、最終的には開孔部でせん断破壊をした。一方、【BO-48AL】(タイプB)は、 $R'=1/19$ ($R=1/25$

図7 荷重一部材角関係

(開孔補強筋の定着方法の異なる試験体の比較)

に至る過程)で開孔に繋がる S 字状のひび割れにより開孔部せん断破壊を起こした。双方の試験体は $R'=1/25$ 付近でのひび割れ性状に若干の差を確認できるが、いずれの定着方法も目標とする変形能を満足している。施工的には添え筋に緊結する必要の無いタイプ B の方が優れていると言えよう。

続いて、【BPC60-O3-008】(タイプ D) と【BO-48AL】(タイプ B) を比較する。【BPC60-O3-008】(タイプ D) はせん断応力度をコンクリート強度で除した値が 0.074 であったが、 $R'=1/16$ でも崩壊に至らなかったのに対し、【BO-48AL】(タイプ B) は 0.057 と小さかったにもかかわらず、 $R'=1/19$ で開孔に繋がる S 字状のひび割れにより開孔部せん断破壊を起こした。

以上より、梁端側の開孔補強筋については、施工的メリットも考慮すると、梁せい中央で梁中央側に折返しあばら筋に対し若干の角度をつけて定着する方法(タイプ D) が採用した 3 つの定着方法の中では最も推奨しうる補強方法と言える。

4.1.2 梁端部のかぶりコンクリートのノッチの有無の影響

図 8 に梁端部のかぶりコンクリートのノッチの有無をパラメータとした試験体の荷重一部材角関係を示す。写真 5 に同様の試験体の $R=1/25$ の 2 回目加力ピーク時でのひび割れ状況を示す。ノッチを設けていない試験体【BPC48-O3-009】は、スタブのフェイス面沿いに曲げひび割れが発生・伸展したが、ノッチを設けた試験体【BPD48-O3-009】では、スタブのフェイス面に生じた曲げひび割れが梁せい中心付近でやや開孔側に寄り、部材角が大きくなるにつれ孔際補強筋に沿って伸展した。また、双方の試験体でかぶりコンクリートの圧壊も生じ、目的としたノッチの明瞭な効果は確認できなかった。しかし、ノッチを設けた【BPD48-O3-009】はノッチの無い【BPC48-O3-009】に比べ、 $R=1/25$ の 2 回目加力時の耐力の低下が若干ではあるが少なく、開孔周りのひび割れ幅も小さかった。

写真 5 ひび割れ状況
(ノッチの有無をパラメータとした試験体の比較)

図 8 荷重一部材角関係
(ノッチの有無をパラメータとした試験体の比較)

図 9 荷重一部材角関係
(コンクリート強度の異なる試験体の比較)

4.2 コンクリート強度及びせん断応力度レベルに関して

4.2.1 コンクリート強度に関して

図 9 にコンクリート強度の異なる試験体の荷重一部材角関係を示す。せん断応力度をコンクリート強度で除した値がほぼ同様の有開孔の試験体において、 $F_c=60(\text{N/mm}^2)$ の試験体【BO-60A】は、 $F_c=48(\text{N/mm}^2)$ の試験体【BO-48A】に比べひび割れが多かったが、 $R=1/50$ までは損傷が少なかった(写真 1 参照)。又、復元力特性も $R=1/25$ の 1 回目加力まではほぼ同様な良好な性状を示しており、目標とした構造性能は満足していた。

4.2.2 せん断応力度レベルに関して

図 10 にせん断応力度レベルの異なる試験体の荷重一部材角関係を示す。せん断応力度をコンクリート強度で除した値が 0.080 の試験体【BPC48-O3-009】は $R=1/50$ において殆ど損傷が無く(写真 2 参照)、0.051 の試験体【BPD48-O3-006】と比較しても、 $R=1/25$ まではほぼ同様の良好な復元力特性を有しており、目標とした構造性能を満足していた。

4.3 開孔が主筋の付着除去区間の境界に存在する場合の復元力特性について

図 11 に開孔位置の異なる試験体の荷重一部材角関係を示す。開孔の中心位置がスタブのフェイス面から $2D/3$ (付着除去区間の境界) の試験体【BO-48B】は、 $R=1/25$ の 1 回目加力まで開孔の中心位置が $D/3$ の試験体【BO-48A】とほぼ同様の良好な復元力特性を有しており、且つ、 $R=1/50$ において殆ど損傷が無かった(写真 1 参照)。よって、本構造で開孔を付着除去区間の境界に設けることも十分可能であると考えられる。

4.4 無開孔梁と有開孔梁の復元力特性の比較について

図 12 に開孔の有無をパラメータとした試験体の荷重一部材角関係

図 10 荷重一部材角関係
(せん断応力度レベルの異なる試験体の比較)

図 11 荷重一部材角関係
(開孔位置の異なる試験体の比較)

図 12 荷重一部材角関係
(無開孔と有開孔の試験体の比較)

係を示す。有開孔の試験体は無開孔の試験体と殆ど同じ復元力特性を有しており、曲げ降伏が先行すれば、復元力特性において開孔を無視してもよいと言える。

5. 結論

本研究で得られた知見を以下に記す。

- 1) 本構造における梁中央側の開孔補強筋について、両端を 180° フックとし添え筋に緊結する方法 (タイプ A) と梁せい中央であばら筋に対し平行に折り曲げて定着する方法 (タイプ B) とでは構造性能に若干の差があったが、いずれの定着方法も目標とした変形能を満足している。施工的には後者の定着方法 (タイプ B) の方が優れていると言えよう。
- 2) 本構造における梁端側の開孔補強筋について、梁せい中央で梁中央側に折返しあばら筋に対し若干の角度をつけて定着した試験体 (タイプ D) は、梁せい中央であばら筋に対し平行に折り曲げて定着した試験体 (タイプ B) に比べ優れた変形能を有していた。施工的メリットも考慮すると、梁せい中央で梁中央側に折返しあばら筋に対し若干の角度をつけて定着する方法 (タイプ D) が、採用した定着方法の中では最も推奨しうる補強方法と言える。
- 3) 梁端部のかぶりコンクリートのノッチは、梁端部のコンクリートの損傷低減やスタブのフェイス面以外の曲げひび割れを軽減することに対する明瞭な効果を確認できなかったが、ノッチを設けた試験体はノッチの無い試験体に比べ、 $R=1/25$ の 2 回目加力時の耐力の低下が若干ではあるが少なく、開孔周りのひび割れ幅も小さかった。
- 4) せん断応力度をコンクリート強度で除した値がほぼ同様の有開孔の試験体において、 $F_c=60(\text{N}/\text{mm}^2)$ の試験体は、 $F_c=48(\text{N}/\text{mm}^2)$ の試験体に比べひび割れが多かったが、 $R=1/50$ までは損傷が少なかった。又、復元力特性も $R=1/25$ の 1 回目加力まではほぼ同様な良好な性状を示しており、目標とした構造性能は満足していた。
- 5) せん断応力度をコンクリート強度で除した値が 0.080 の試験体は、 $R=1/50$ において殆ど損傷が無く、 0.051 の試験体と比較しても、 $R=1/25$ までほぼ同様の良好な復元力特性を有しており、目標とした構造性能を満足していた。

- 6) 開孔の中心位置がスタブのフェイス面から $2D/3$ (付着除去区間の境界) の試験体は、 $R=1/25$ の 1 回目加力まで開孔の中心位置が $D/3$ の試験体とほぼ同様の良好な復元力特性を有しており、且つ、 $R=1/50$ において殆ど損傷が無かった。よって、本構造で開孔を付着除去区間の境界に設けることも十分可能であると考えられる。
- 7) 有開孔の試験体は無開孔の試験体と殆ど同じ復元力特性を有しており、曲げ降伏が先行すれば、復元力特性において開孔を無視してもよいと言える。

謝辞

本研究は明治大学と大林組、大本組、奥村組、鹿島建設、五洋建設、清水建設、竹中工務店、戸田建設、松村組(順不同)により平成 17 年度共同研究「コンクリート部材の接合部構造に関する共同研究」の一環として行われたものである。研究は建築研究振興協会に設けられた委員会(委員長 平石久廣 明治大学教授)のもとで行われた。石岡拓(戸田建設)、江戸宏彰(大林組)、岡功治(大本組)、毛井崇博(竹中工務店)、塚越英夫(清水建設)、都祭弘幸(五洋建設)、西野和弥(松村組)、早川邦夫(奥村組)、丸田誠(鹿島建設)(順不同)の各委員には極めて貴重な御助言、御協力を賜った。関係各位に深く謝意を表します。尚、本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究 (C) (課題番号: 17560520, 研究代表者: 平石久廣) により行われた。

参考文献

- 1) 平石久廣他: 降伏機構分離型鉄筋コンクリート造の開発, 日本建築学会構造系論文集, No.580, pp.99-104, 2004.6
- 2) 平石久廣他: 重ね継手方式による降伏機構分離型鉄筋コンクリート造の開発, 日本建築学会構造系論文集, No.592, pp.159-165, 2005.6
- 3) 平石久廣他: 材端部に開孔を有する降伏機構分離型鉄筋コンクリート造梁の開発, 日本建築学会構造系論文集, No.596, pp.95-100, 2005.10
- 4) 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 日本建築学会, 1999.8
- 5) 広沢雅也他: 鉄筋コンクリート造有孔梁の設計方法に関する総合的な検討, 財団法人日本建築センター, 1994

(2006年7月10日原稿受理, 2006年9月12日採用決定)