

論文 降伏機構分離型鉄筋コンクリート造梁の構造詳細に関する研究

武 争也^{*1}・平石 久廣^{*2}・松本 裕二^{*1}

要旨：本論文では、ヒンジ領域の主筋の付着を除去する一方で、その部分の曲げおよびせん断に対して抵抗しうる補助的な補強筋を配することにより、地震時において損傷を軽減させるとともに、良好なエネルギー吸収性能を有する降伏機構分離型鉄筋コンクリート造梁の適用範囲の拡大のため、応力度レベル、複数開孔、付着除去区間長さをパラメータとした試験体の構造実験を行い、その性状について検討を行った。結果として、せん断応力度レベルの上限はコンクリート強度の0.08程度であること、梁せい以上の間隔を取れば複数開孔が可能で、付着除去区間を梁せいの半分程度まで短くできる可能性が高いことなどを示した。
キーワード：鉄筋コンクリート造梁, 降伏機構分離型, 高応力, 複数開孔, 付着除去区間長さ, 復元力特性

1. はじめに

一般の鉄筋コンクリート造建築物では部材の塑性化によりエネルギーを吸収することで大地震に耐えるように設計されている。しかし、部材が塑性化すると、コンクリートと鉄筋の一体化がなくなり、コンクリートに大きなひび割れや圧壊が生じるなど損傷は不可避である。

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。

本報告では本工法の適用範囲の拡大のため、以下の項目について試験体を計画し、構造実験を行い、その性状について確認を行った。

- ・せん断応力度レベルの適用範囲について
- ・降伏機構分離型 RC 造梁と通常 RC 造梁の復元力特性について
- ・複数開孔を設けた場合の耐震性能について
- ・付着除去区間を短くした場合の耐震性能について

なお、本論文の作成に当たる図や表などは文献^{4), 5)}から引用している。

2. 配筋方式

重ね継ぎ手による降伏機構分離型(Hinge Isolation Systems; HIS と略す)工法は、ヒンジ領域の主筋の付着を除去する一方で、その部分の曲げおよびせん断に対して抵抗しうる補助的な曲げ補強筋を配することによって、地震時においてヒンジ領域の損傷を軽減させるとともに、梁主筋の付着除去部の塑性化によりエネルギーを吸収する部材の工法である。

この機構を形成しうる配筋方法としては、図-1 に示すような添え筋方式と接合部筋方式の二つのタイプがある。

ただし、添え筋と接合部筋を梁クリアスパン内においてカットオフすることなく、梁部材全長に配せば両者は同一の配筋方式となり、本研究ではこの方式による配筋方式とした(図-2.3 参照)。なお以下では添え筋、曲げ補強筋ともに添え筋と称す。

開口部の補強には、孔際補強筋と斜め補強筋を用いた。

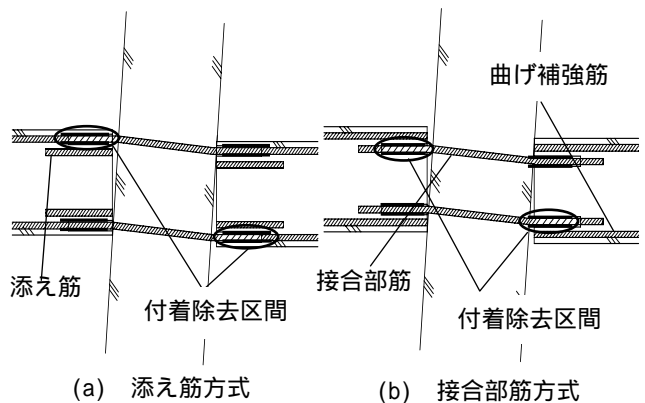


図-1 梁端部に重ね継手形式を用いた降伏時概念

3. 実験概要

図-2 に試験体形状、図-3 に試験体配筋図、図-4 に開孔補強筋、表 1 に梁試験体の概要を示す。

全試験体の試験区間の両端で曲げ降伏が先行するように計画した。試験体は全部で 4 体、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)で、せん断スパン比は 2.0、コンクリートの設計基準強度は $F_c=36(N/mm^2)$ とした。

試験体はすべて接合部筋と添え筋を並列に配した並列配筋方式を採用した(図-3 参照)。

以下に各試験体の特徴について記す。

*1 明治大学大学院博士前期課程

*2 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)

B036-008

既往の研究ではコンクリート強度に対するせん断応力度レベルの値が0.07を上限としたのに対し、本試験体では0.08に設定した。

BOM36-005

降伏機構分離型 RC 造梁において複数開孔を設けることによる影響を検討する。本試験体は梁の端部に開孔を設けるとともに更に開孔間内法長さを梁せいとして計4個の開孔を設けている。

B01S36-005

付着除去区間を短くすることによる影響に関する検討のため、既往の研究では主筋の付着除去区間の長さが $2D/3$ であったのに対し、本試験体は付着除去区間の長さを $D/2$ と短く設定している。

BN36-005(通常 RC 造)

降伏機構分離型 RC 造梁の復元力特性や破壊性状について比較・検討するための一般的な無開孔通常 RC 造である。

主筋の付着除去区間は試験体 B036-008, BOM36-005 は梁端から 233(mm), B01S36-005 は梁端から 175(mm)である。付着除去方法は鉄筋をシース管で覆うことによりコンクリートとの絶縁を図った。開孔は梁せいの中央に設け直径は 117(mm)とし、梁端から開孔部中心までの距離を試験体 B036-008, B01S36-005 は 117(mm), BOM36-005 は 117(mm), 467(mm)とした。

開孔補強筋の形状を図4に示す。

斜め補強筋は開孔の上下では添え筋に 180° フックで緊結し、梁せいの中央部で折り曲げ、他端側の添え筋近傍まで定着長さを有するようにした。なお、折り曲げははり端部では、梁内側に少し戻るようにし、その他のものは梁の材軸に直交するように行った。

4. 載荷方法

図-5に加力装置を示す。

載加方法は大野式の逆対称モーメント載荷とし、試験体は全て、正負繰り返し載加である。加力はH型鋼(H 600×30×12×20, 自重 1.1kN)の加力ビームを介して加力点および支点の位置を変えることによって行った。

加力サイクルは図-6に示す。

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回ずつ行うことを基本とした。全体変位の測定は図-7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。

表-2, 表-3 に試験体に使用したコンクリートおよび鉄筋の素材実験結果を示す。

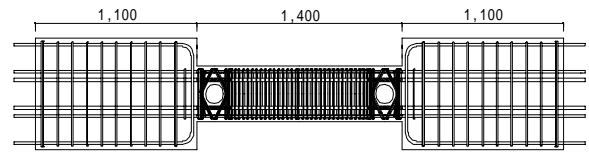
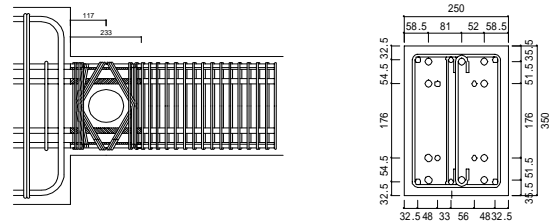
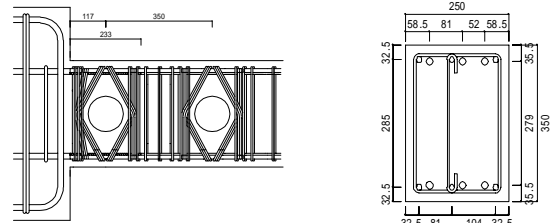


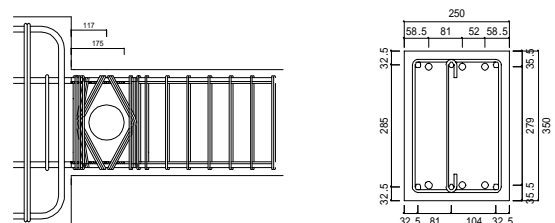
図-2 試験体形状



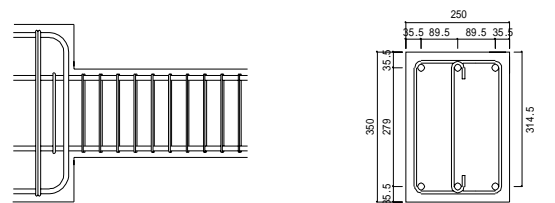
B036-008



BOM36-005

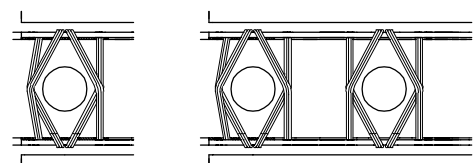


B01S36-005



BN36-005

図-3 試験体配筋図



B036-008 & BOM36-005

図-4 開孔補強筋図

表-1 試験体概要

試験体名	BO36-008	BOM35-005	BOIS36-005	BN36-005
Qmax(kN)	276	198	194	196
Qmax/Qmu	0.99	1.11	1.09	1.10
Qmax/(bD _g)	0.0800	0.0574	0.0563	0.0569
コンクリート強度F _c (N/mm ²)	39.5			
主筋	1段目:3-D19(SD490)	3-D19(SD490)	3-D19(SD490)	3-D19(SD490)
	2段目:2-D19(SD490)			
添え筋	1段目:3-D13(SD295)	3-D13(SD295)	3-D13(SD295)	-
	2段目:2-D13(SD295)			
せん断補強筋	3-D6@30(SD295)	3-D6@70(SD295)	3-D6@70(SD295)	3-D6@70(SD295)
曲げ耐力(kN・m)	195	125	125	125
2M/L(kN)	278	179	179	179
せん断耐力(kN) R _d =0.02	319	248	248	248
せん断余裕度	1.15	1.39	1.39	1.39
開孔位置(mm)	117(D/3)	117(D/3)	117(D/3)	-
		467(4D/3)		
孔際補強筋	3-D6(KSS785) 3組	3-D6(SD295) 3組	3-D6(SD295) 3組	-
開孔補強筋	3-D6(KSS785) 3組	3-D6(SD295) 3組	3-D6(SD295) 3組	-
孔際補強筋比(P _v)	0.00826	0.00826	0.00826	-
開孔補強筋比(P _d)	0.01117	0.01117	0.01117	-
P _d /P _v	1.35	1.35	1.35	-
P _{d, g} /P _{v, w}	1.35	1.35	1.35	-
開孔部せん断耐力 (kN)	303	199	199	-
開孔部せん断余裕度	1.02	1.12	1.12	-
付着除去区間(mm)	梁端から233 (2D/3)		梁端から175 (D/2)	-
試験体スパン(mm)	1400			
断面積(mm×mm)	250×350			
開孔径(mm)	117 (D/3)		0 (無開孔)	

表-2 コンクリートの材料実験結果

試験体名	養生方法	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
		試験結果	試験結果
BO36-008 BOM36-005 BOIS36-005 BN36-005	封緘生	39.5	3.18

表-4 実験値と理論値

試験体名	実験結果			曲げ強度		せん断耐力				曲げひび割れ荷重	
	+Qmax(kN)	部材角(rad)	破壊形式	Qmu(kN)	Qmax/Qmu	開孔なし		開孔有り		実験値(kN)	算定値(kN)
						Qsu(kN)	+Qmax/Qsu	Qso(kN)	+Qmax/Qso		
BO36-008	276	1/50	開孔部せん断破壊	278	0.99	319	0.865	303	0.911	21.9	25.6
BOM36-005	198	1/33	付着割裂破壊	179	1.11	248	0.798	199	0.995	18.7	25.6
BOIS36-005	194	1/33	付着割裂破壊	179	1.08	248	0.782	199	0.975	19.6	25.6
BN36-005	196	1/50	付着割裂破壊	179	1.10	229	0.858	-	-	27.6	25.6

Qmax(kN) : 最大耐力 Qmu(kN) : 曲げ耐力 Qso(kN) : せん断耐力(開孔なし) Qsu(kN) : せん断耐力(開孔あり)

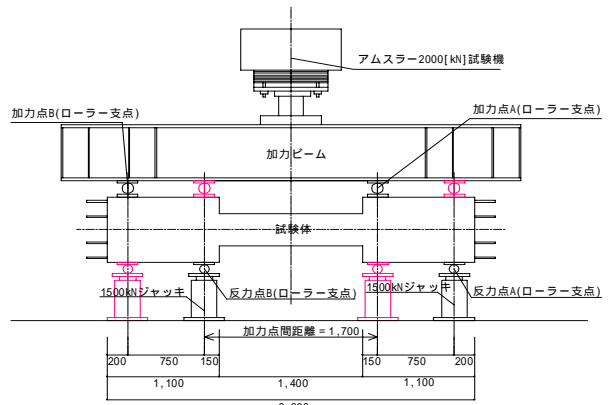


図-5 加力装置

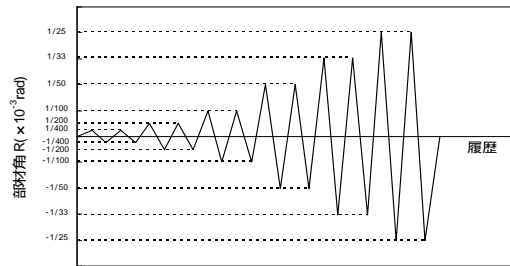


図-6 加力サイクル

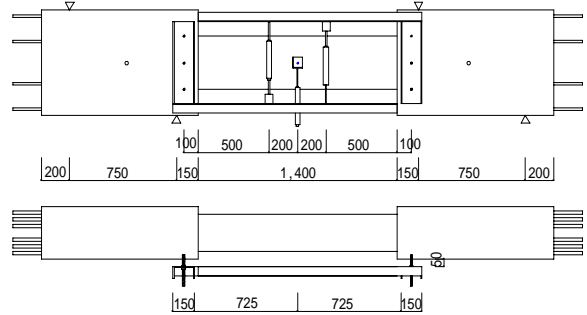


図-7 全体変位の測定

表-3 鉄筋の材料実験結果

鉄筋径(種別)	降伏時至 (μ)	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁵ N/mm ²)	伸び率 (%)
D6(SD295)	2025	373	538	1.78	14.6
D6(KSS785)	5614	980	1200	1.74	8.2
D13(SD295)	1889	350	506	1.81	23.1
D19(SD490)	2872	513	687	1.8	16.2

5. 諸強度

各試験体の諸強度と理論値を表-4 に示す。

有孔梁のせん断耐力は修正広沢式，無開孔梁のせん断耐力は靱性保証型設計指針，曲げ耐力は学会略算式を用いた。

曲げ耐力

$$M_u = 0.9 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot d \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$Q_{mu} = M_u / (2/L) \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで，

a_t : 鉄筋断面積 (mm^2) σ_y : 鉄筋降伏強度 (N/mm^2)

d : 断面有効せい (mm) L : 部材長さ (mm)

無開孔梁せん断強度

$$Q_{su} = \min(Q_{su01}, Q_{su02}, Q_{su03})$$

$$Q_{su01} = (\mu \cdot p_{we} \cdot \sigma_{wy}) \cdot b_e \cdot j_e + \left(v F_c - \frac{5 \cdot p_{we} \cdot \sigma_{wy}}{\lambda} \right) \cdot \frac{bD}{2} \tan \theta \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$Q_{su02} = (\lambda \cdot v \cdot F_c + p_{we} \cdot \sigma_{wy}) \cdot b_e \cdot j_e / 3 \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$Q_{su03} = (\lambda \cdot v \cdot F_c) \cdot b_e \cdot j_e / 2 \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで，

μ : トラス機構の角度を表す係数 $\mu = 2(1 - 10R_p)$

p_{we} : 有効あばら筋比 $p_{we} = a_w / (b_e \cdot s)$

b_e : トラス機構に關する断面の有効幅 (mm)

s : あばら筋間隔 (mm)

σ_{wy} : あばら筋の規格降伏点 (N/mm^2)

ただし， $\sigma_{wy} = 25F_c$ とする

j_e : 梁せい方向のあばら筋芯々間距離 (mm)

: トラス機構の有効係数

$$= 1 - s / (2 \cdot j_e) - b_s / (4 \cdot j_e)$$

b_s : あばら筋の断面方向の最大間隔 (mm)

v : コンクリート圧縮強度の有効係数

$$v = (1 - 20R_p) v_0$$

v_0 : 非ヒンジ部材のコンクリート圧縮強度の有効係数 $v_0 = 0.7 - b/200$

F_c : コンクリートの設計基準強度 (N/mm^2)

開孔部せん断強度

$$Q_{s0} = \left\{ \frac{0.092 k_u \cdot k_p (\sigma_B + 18)}{\frac{M}{Qd} + 0.12} \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{p_{w01} \cdot \sigma_{0y}} \right\} b \cdot j \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで，

b : 梁幅 (mm) j : 応力中心距離 (mm)

H : 開孔径 (mm) D : 梁せい (mm)

σ_B : 設計強度 (N/mm^2)

p_{w01} : 開孔周囲のせん断補強筋比

σ_{0y} : 開孔周囲補強筋の降伏点強度 (N/mm^2)

k_u : 有効せい d による係数

k_p : 引張鉄筋比による係数

6. 試験結果

6-1 荷重 - 部材角関係

図-8 に各試験体の荷重 - 部材角関係を示す。

試験体 B036-008 は $R=1/50$ まで安定した履歴を示した。しかし， $R=1/33$ に至る過程で開孔部せん断破壊により耐力が大幅に低下した。

試験体 B0M36-005 は $R=1/33$ の 1 回目までは安定した履歴を示した。しかし， $R=1/33$ の 2 回目で付着割列破壊が起こり $R=1/25$ で大幅に耐力が低下した。

試験体 BN36-005 は $R=1/33$ の 1 回目までは安定した履歴を示した。しかし， $R=1/33$ の 2 回目で付着割列破壊が起こり $R=1/25$ で大幅に耐力が低下した。

試験体 B0IS36-005 は $R=1/33$ の 1 回目までは，安定した履歴を示した。しかし， $R=1/33$ の 2 回目で微少な付着割裂破壊により耐力が大幅に低下した。

6-2 ひび割れ状況

写真-1 に実験終了時のひび割れ状況の写真を，図-9 に実験終了時のひび割れ状況と各部材角ピーク時のひび割れ幅をそれぞれ示す。

試験体 B036-008 は試験体 B0M36-005 ，B0IS36-005 に比べ開孔部周りのひび割れの数が多く，ひび割れ幅も大きかった。 $R=1/50$ 終了時には開孔部周りに S 字状のひび割れが発生し， $R=1/33$ に至る途中でこれらのひび割れが伸展・拡大し，開孔部せん断破壊に至った。

試験体 B0M36-005 ，B0IS36-005 は共に $R=1/33$ の 2 回目で付着割列破壊により耐力は低下したが，通常の試験体 BN36-005 に比べヒンジ領域でのひび割れは少なく，ひび割れ幅も明らかに小さかった。



写真 1 ひび割れ状況 (実験終了時)

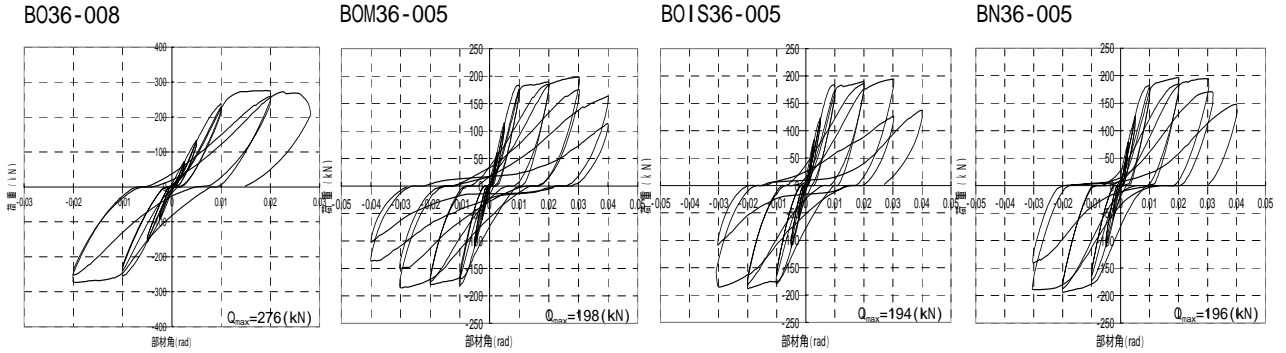
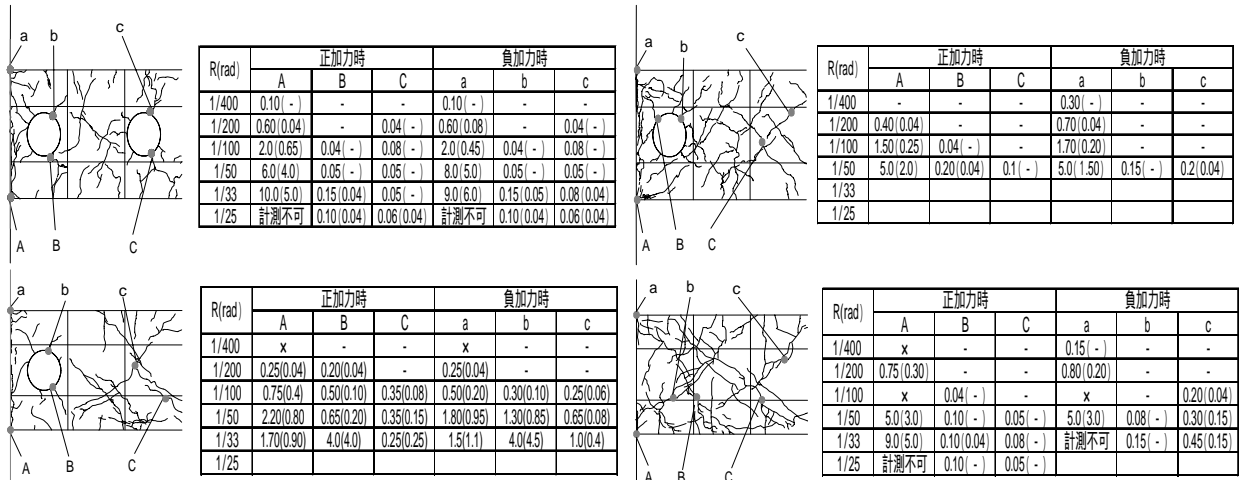


図8 荷重 - 部材角関係



はひび割れ幅 0.04mm 未満 x は未測定 括弧内は除荷後の残留ひび割れ幅

図9 最終ひび割れ状況と各部材角ピーク時のひび割れ

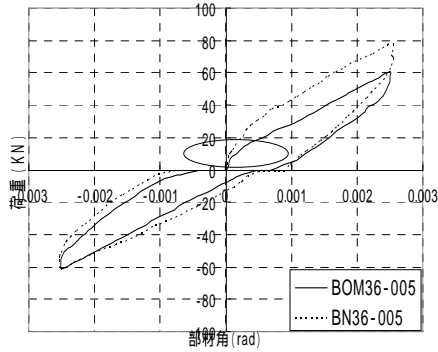


図10 荷重 - 部材角関係
(加力第1サイクル目の比較)

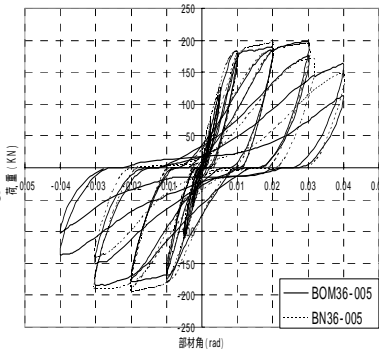


図11 荷重 - 部材角関係
(開孔の有無による比較)

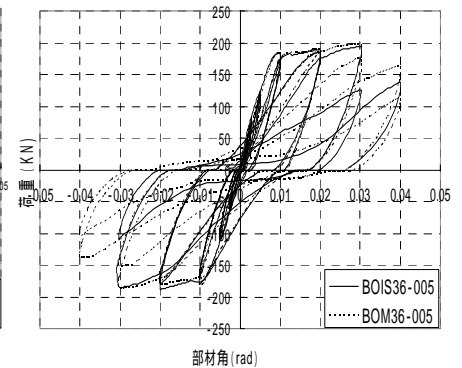


図12 荷重 - 部材角関係
(付着除去区間の違いによる比較)

7. 検討

7-1 初期剛性, 曲げひび割れ発生後剛性

降伏機構分離型 RC 造と通常の RC 造との復元力特性の違いについて検討するために, 図-10 に BOM36-005 と BN36-005 について加力第1サイクル目の荷重 - 部材角関係を示す。

通常 RC 造試験体 BN36-005 と降伏機構分離型 RC 造試験体 BOM36-005 の初期剛性には明瞭な差異は見られない。また降伏機構分離型 RC 造試験体 BOM36-005 は曲げひ

び割れ発生後急激に剛性は低下するが, その後の剛性に大きな差異が見られない。

以上から降伏機構分離型 RC 造の初期剛性および曲げひび割れ発生後の剛性は, 付着を除去した接合部筋による曲げ戻し効果もあり, 通常 RC 梁の BN36-005 と同等の剛性評価ができると言える。

7-2 複数開孔を設けることによる影響に関する検討

図-11 に複数開孔を設けたことによる影響を比較した試験体の荷重 - 部材角関係を示す。

複数開孔を設けた試験体 BOM36-005 は $R=1/33$ の 1 回目までは通常 RC 造試験体 BN36-005 とほぼ同等の安定した履歴を示している。

このことからマクロ的な観点からは降伏機構分離型 RC 造梁は無開孔通常 RC 造梁とほぼ同様の復元力特性を有していると言える。

また梁端部側、梁中央側の両開孔部周辺には目立ったひび割れは生じていないことから、降伏機構分離型 RC 造梁においてこのような複数開孔を設けることに問題はないと考えられる。

7-3 付着除去区間を短くすることによる影響に関する検討

図-12 に付着除去区間の長さの違いを比較した試験体の荷重 - 部材角関係を示す。

付着除去区間の長さを梁端部から $D/2$ と短くした試験体 B0IS36-005 と付着除去区間の長さを $2D/3$ とした試験体 BOM36-005 は $R=1/33$ の 1 回目までほぼ同様の安定した履歴を示している。

また試験体 B0IS36-005 は最終的に付着破壊したので断定はできないが、開孔部周りに目立ったひび割れは生じていないことから、付着強度に余裕をもたせることができれば降伏機構分離型 RC 造梁において付着除去区間を短くすることに問題はないと考えられる。

7-4 付着破壊について

文献⁶⁾によると本工法における既往の試験体はコンクリート強度 $21(\text{N}/\text{mm}^2)$ から $60(\text{N}/\text{mm}^2)$ の範囲に限定すれば設計用付着応力度を設計用付着強度で除した値である $R_{\text{CHIS}} = f / f_{\text{bu}}$ の値が 1.25 から 1.50 の範囲にすれば、付着割れ破壊した試験体は存在しない。

本報告の試験体 BOM36-005 は 1.6 と高かったことが付着割れ破壊した原因であると考えられる。

ただし、試験体 B0IS36-005 は $R_{\text{CHIS}} = f / f_{\text{bu}}$ 値が 1.42 であるにも係わらず付着破壊した。これは付着除去区間が $D/2$ と設定したためであると考えられる。

以上のことから本工法の付着に関する実強度として $R_{\text{CHIS}} = f / f_{\text{bu}}$ の値を 1.50 程度（付着除去区間の長さ $2D/3$ の場合）としたことは妥当であると考えられるが、付着除去区間の長さを $2/3D$ より短くした場合は、この値については更なる検討の必要があろう。

7. まとめ

本論文で得られた成果を以下に記す。

(1) 曲げ耐力は計算値とよい対応を示した。

(2) せん断応力度レベル (Q_{max} / bD_c) の値を 0.08 とした試験体 B036-008 は $R=1/50$ までは安定した性状を示したが、 $R=1/33$ に至る過程で開孔部がせん断破壊した。本構造においては、せん断応力度レベル 0.08 がほぼ許容しうる上限と考えられる。

(3) 降伏機構分離型 RC 造梁試験体は曲げひび割れ発生後急激に剛性が低下するが、通常 RC 造梁試験体とは、初期剛性および曲げひび割れ発生以後の剛性に明瞭な差異は見られなかった。

(4) 降伏機構分離型 RC 造梁試験体において、開孔間内法長さとして梁せいの間隔を確保し複数開孔を設けた試験体では開孔の影響はほとんどみられなかった。

(5) 降伏機構分離型 RC 造梁試験体の付着除去区間の長さは $D/2$ 程度まで短くしても問題はないと考えられる。ただし、付着除去区間の長さを短くした場合の付着強度の値については更なる検討の必要があると考えられる。

謝辞

本研究は建築研究振興協会に設けられた「降伏機構分離型鉄筋コンクリート造（略称 RC-HIS）研究会」（委員長 平石久廣 明治大学教授）のもとで行われたものである。委員会の委員ならびに関係各位に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 平石久廣他：重ね継手方式による降伏機構分離型 RC 造の開発，日本建築学会大会学術講演概要集 C-2，pp.247-250，2004.8
- 2) 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
- 3) 平石久廣他：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，日本建築学会構造系論文集，No.610，pp.161-167，2006.12
- 4) 武争也他：降伏機構分離型鉄筋コンクリート造梁の適用範囲に関する研究（その1 実験概要）日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.219-220，2007.8
- 5) 松本裕二他：降伏機構分離型鉄筋コンクリート造梁の適用範囲に関する研究（その2 実験結果）日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.211-222，2007.8
- 6) 牧隆介他：降伏機構分離型鉄筋コンクリート造梁の構造設計とその技術的背景について，日本建築学会大会学術講演梗概集，No.23001，pp.1-4，2007.8