

高強度材料を用いた扁平梁－柱接合部の実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON WIDE BEAM-COLUMN JOINTS USING HIGH STRENGTH MATERIALS

石岡 拓*¹, 清水 隆*², 中村 匠*², 西村英一郎*¹

Taku ISHIOKA, Takashi SHIMIZU, Takumi NAKAMURA and Eiichirou NISHIMURA

In order to use indoor space effectively, it may be a wide beam of small depth. To compensate for the decline in structural performance, often the beam width is made larger than the column width. But the stress transfer mechanism of the frame including such wide beam is complicated, and there are many unknown points in structural performance. We conducted experiments on flat beams with higher seismic performance than before by using high strength materials and confirmed the structural performance of beam-column joints. This report reports its contents.

From the experimental results of wide beam-column joint partial structure using high strength material, it was found that the strain due to bending moment was smaller in the beam reinforcement bars placed outside the column than in the beam reinforcement bars fixed in the column. Therefore, by assuming the strain distribution of the beam bars placed outside the column, it was shown that the ultimate bending strength of wide beam can be evaluated on the safe side.

Keywords : *Wide Beam, Beam-Column Joint, High Strength Concrete, Reinforced Concrete*

扁平梁, 柱梁接合部, 高強度コンクリート, 鉄筋コンクリート

1. はじめに

室内空間の有効利用という観点から梁せいを低減する際に構造性能の低下を補うために、図 1 に示すように梁幅を柱幅よりも大きくすることがよく行われる。このような梁を一般に扁平梁や幅広梁、またはワイドビームと呼んでいる。扁平梁を含む架構の応力伝達機構は複雑であるため、これまで様々な実験が行われている^(例えぼ1)。最近では比較的高強度の材料を用いて従来よりも耐震性能を高めた扁平梁の開発が行われている^{2,3)}。

本報においても高強度材料を用いた扁平梁－柱接合部に関して構造実験を実施したので報告する。

2. 実験概要

2.1 実験計画

試験体は直交梁を有する扁平梁－柱接合部を模擬した十字形接合部 5 体、ト形 1 体、T 形 2 体の合計 8 体である。十字形接合部試験体の実験変数は端部ハンチによるヒンジロケーションの有無と材料強度、柱偏心の有無、梁せいの大きさである。ト形接合部試験体は標準試験体(No.1 試験体)と同様の部材断面、材料強度とし、柱梁接合部形状のみト形とした。T 形接合部試験体の実験変数は材料強度とした。試験体一覧を表 1 に示す。

2.2 試験体概要

試験体は直交梁を有する扁平梁－柱接合部を模擬した 1/2 縮小部分架構であり、十字形接合部試験体とト形接合部試験体は梁曲げ降

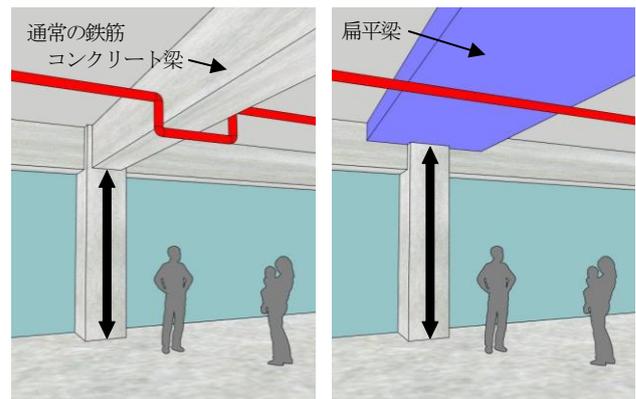


図 1 扁平梁による室内空間の有効利用例

伏先行型で計画し、T 形接合部試験体は柱曲げ降伏先行型として計画した。高強度材料の使用を標準とし、梁と柱の主筋には SD490、せん断補強筋には KSS785、コンクリート圧縮強度は 60N/mm²とした。比較のために実施した低強度材料の試験体においては、梁と柱の主筋には SD345、せん断補強筋には SD295A、コンクリート圧縮強度は 27N/mm²を用いた。

試験体形状を図 2 に示す。No.1 試験体と No.2 試験体は中柱を想定した直交梁付き十字形接合部とした。No.1 試験体は梁断面を 1200mm×200mm、梁主筋を 12-D16 とし、梁主筋を 6 本を柱内に、残り 6 本を柱外にそれぞれ通し配筋した。あばら筋は 6-D6@60 とした。梁の曲げ耐力向上及び梁交差部の損傷低減を目的として梁主

*1 戸田建設技術開発センター 修士 (工学)

*2 戸田建設構造成造設計部

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

Structural Design Department, TODA CORPORATION

表1 試験体一覧

試験体名	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	
実験変数	標準	端部ハンチ	ト形	低強度	柱偏心	梁せい大	T形	T形低強度	
計画時 σ_B (N/mm ²)	60			27	60		60	27	
柱	柱幅 (mm)	400			400		400		
	柱せい (mm)	400			400		400		
	主筋	16-D16 (SD490)		16-D16 (SD345)	16-D16 (SD490)		16-D16 (SD490)	16-D16 (SD345)	
	帯筋	4-D6@70 (KSS785)		4-6@70 (SD295A)	4-D6@70 (KSS785)		4-D6@70 (KSS785)	4-6@70 (SD295A)	
	軸力比	0.1			0.1		-		
梁	梁幅 (mm)	1200	1200	1200	1200	900	1200	1200	
	梁せい (mm)	200	200 (端部300)		200	200	300	200	
	梁幅/柱幅	3.0			3.0	2.25	3.0	3.0	
	主筋	12-D16 (SD490)		12-D16 (SD345)	10-D16 (SD490)	12-D16 (SD490)		12-D16 (SD490)	12-D16 (SD345)
	あばら筋	6-D6@60 (KSS785)		6-D6@60 (SD295A)	6-D6@60 (KSS785)		6-D6@60 (KSS785)	6-D6@60 (SD295A)	
	曲げ補強筋	4-D16 (SD490)		4-D16 (SD345)	3-D16 (SD490)	4-D16 (SD490)		4-D16 (SD345)	
直交梁	有り (鋼板拘束)			有り		有り			
架構形状	十字形		ト形	十字形			T形		

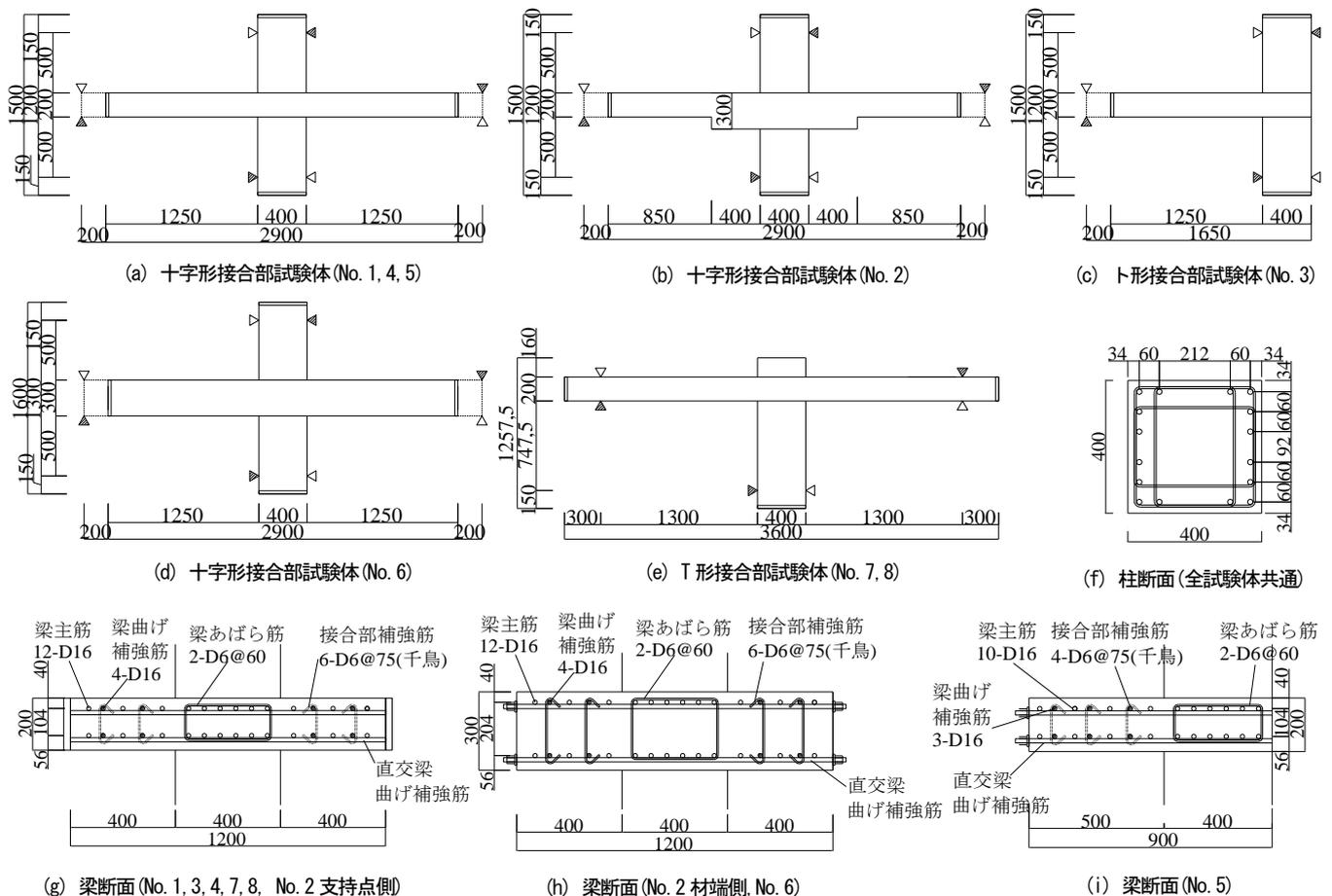


図2 試験体形状

筋に平行な曲げ補強筋 4-D16 を配置した。No.2 試験体は梁端から 400mm を垂直ハンチとして、梁主筋の降伏位置が梁端部から離れるように計画した。No.3 試験体の梁断面などはNo.1 試験体と同一であるが、外柱を想定してト形接合部とした。No.4 試験体は部材断面や配筋は基準試験体と同様にして、材料強度の影響を確認するために比較的低強度の材料を用いた。No.5 試験体は主に建物外周の骨組を想定して片側に扁平梁が張り出す形状とし、梁の張り出し長さを柱幅の 1.25 倍とした。No.6 試験体は梁せいによる影響を確認す

るために梁せいを基準試験体の 1.5 倍の 300mm とした。

T 形試験体は梁断面や配筋は基準試験体と同様にし、柱頭は梁上面から立上りを設けて、柱主筋を 180° 折曲げ定着した。定着長さは日本建築学会の「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」⁴⁾の必要定着長さを確保した。No.7 試験体は基準試験体と同様に高強度材料を用い、No.8 試験体はNo.4 試験体と同様に比較的低強度の材料を用いた。いずれの試験体においても梁の曲げ耐力向上及び梁交差部の損傷低減を目的として梁主筋に平行な曲げ補強筋を配置した。

表 2 材料試験結果
(a) コンクリート

	ヤング係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
No.1	35300	64.1	4.21
No.2	34200	62.5	4.11
No.3	35100	60.3	4.44
No.4	28400	30.5	2.60
No.5	39500	84.2	4.79
No.6	39900	89.6	5.23
No.7	37200	76.6	4.84
No.8	27100	31.9	3.03

(b) 鉄筋

	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	使用 試験体
D6(SD295A)	184000	440	545	No.4,8
D6(KSS785)	193000	892	1097	No.1,2,3
D6(KSS785)	191000	925	1147	No.5,6,7
D16(SD345)	191000	401	563	No.4,8
D16(SD490)	193000	545	728	No.1,2,3
D16(SD490)	187000	541	726	No.5,6,7

試験体で使用したコンクリートと鉄筋の材料試験結果を表-2 に示す。コンクリートの粗骨材は最大径 13mm として、試験体の縮尺に合わせた。

2.3 加力方法

実験における加力方法を図 3 に示す。図中には加力スケジュールも併記した。十字形接合部試験体と T 形接合部試験体の加力は鉛直ジャッキにより柱に軸力を軸力比 0.1 で載荷後、扁平梁反曲点位置を両端ピンの支持材で保持し、柱頂部の水平ジャッキで正負漸増繰り返し加力を行った。T 形接合部試験体は上下反転して柱頂部を加力する形式とした。扁平梁反曲点位置をピン・ローラーで支持し、柱の反力は梁端部に取り付けた油圧ジャッキにより保持した。加力は層間変形角 R で制御した。

3. 実験結果

3.1 破壊性状と荷重変形関係

代表的なひび割れ発生状況として、No.1 試験体と No.3 試験体、No.5 試験体の最終ひび割れ発生状況を図 4 に示す。また、十字形接合部試験体の荷重変形関係を図 5 に、T 形接合部試験体の荷重変形関係を図 6 にそれぞれ示す。十字形接合部試験体の荷重変形関係には、後述する梁の曲げひび割れ発生耐力および梁主筋のひずみ分布を考量した梁の終局曲げ耐力計算値を併記し、T 形接合部試験体の荷重変形関係には梁の曲げひび割れ発生耐力および柱の終局曲げ耐力計算値を併記した。

十字形試験体には載荷初期に梁端部に曲げひび割れが発生し、変形の増大とともに梁全面に広がった。柱側方に張り出した梁上面にねじりによる斜めひび割れが発生し、R=1/75~1/50rad で柱内を通る梁主筋が柱フェイス位置で引張降伏し始め、R=1/33~1/25rad で最大耐力に達した。

No.1 試験体は最大耐力以降、梁端部のコンクリート表面で圧壊が見られて徐々に耐力が低下した。最終的に柱コーナー部から梁交差

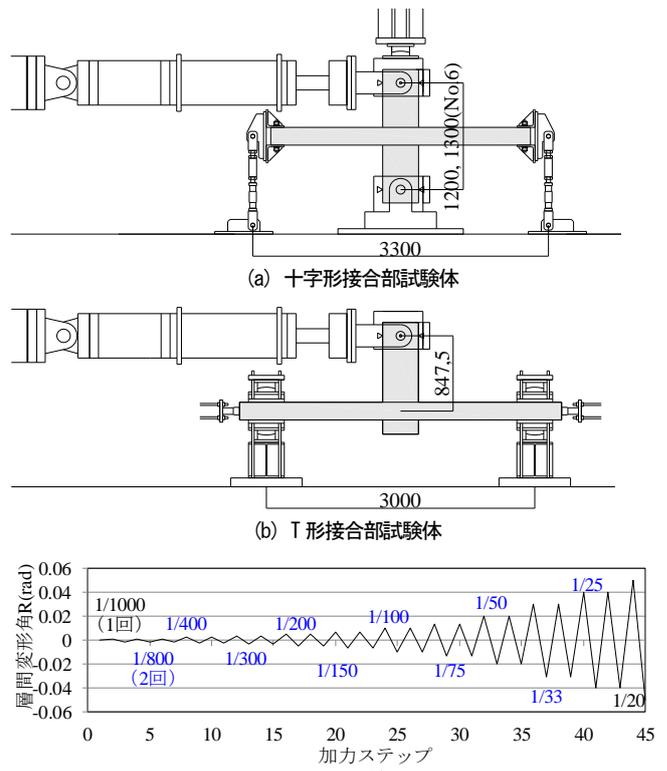


図 3 加力方法

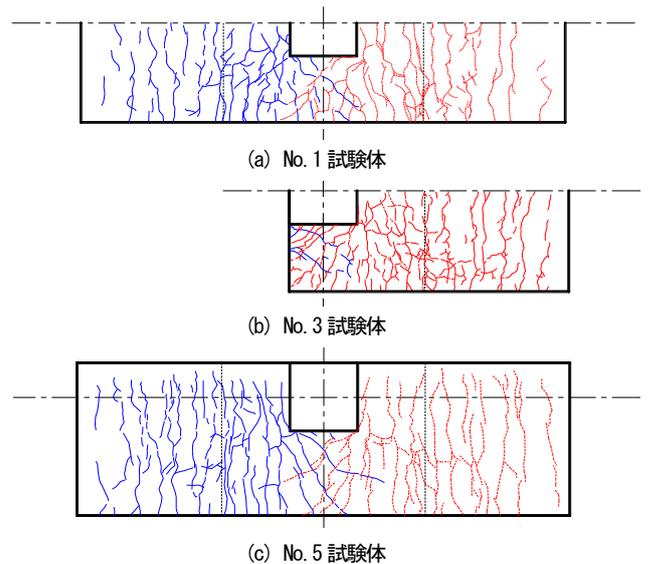


図 4 最終ひび割れ発生状況(青実線：正加力時、赤破線：負加力時)

部の入隅にかけて発生した斜めのひび割れが大きく拡幅した。No.2 試験体は R=1/800rad のサイクルで柱フェイス位置から 400mm 離れたハンチ端部の下面において曲げひび割れが発生した。その後梁全面に曲げひび割れが発生し、R=1/50rad のサイクルでハンチ端部において梁主筋全数が引張降伏し、R=1/33rad で最大耐力に達した。最終的にハンチ端部の曲げひび割れが大きく拡幅した。No.3 試験体は最終的に柱コーナー部から発生した斜めひび割れと柱フェイスから 400mm 離れた位置の曲げひび割れが大きく拡幅した。No.4 試験体と No.5 試験体においては最大耐力以降、梁端部のコンクリート

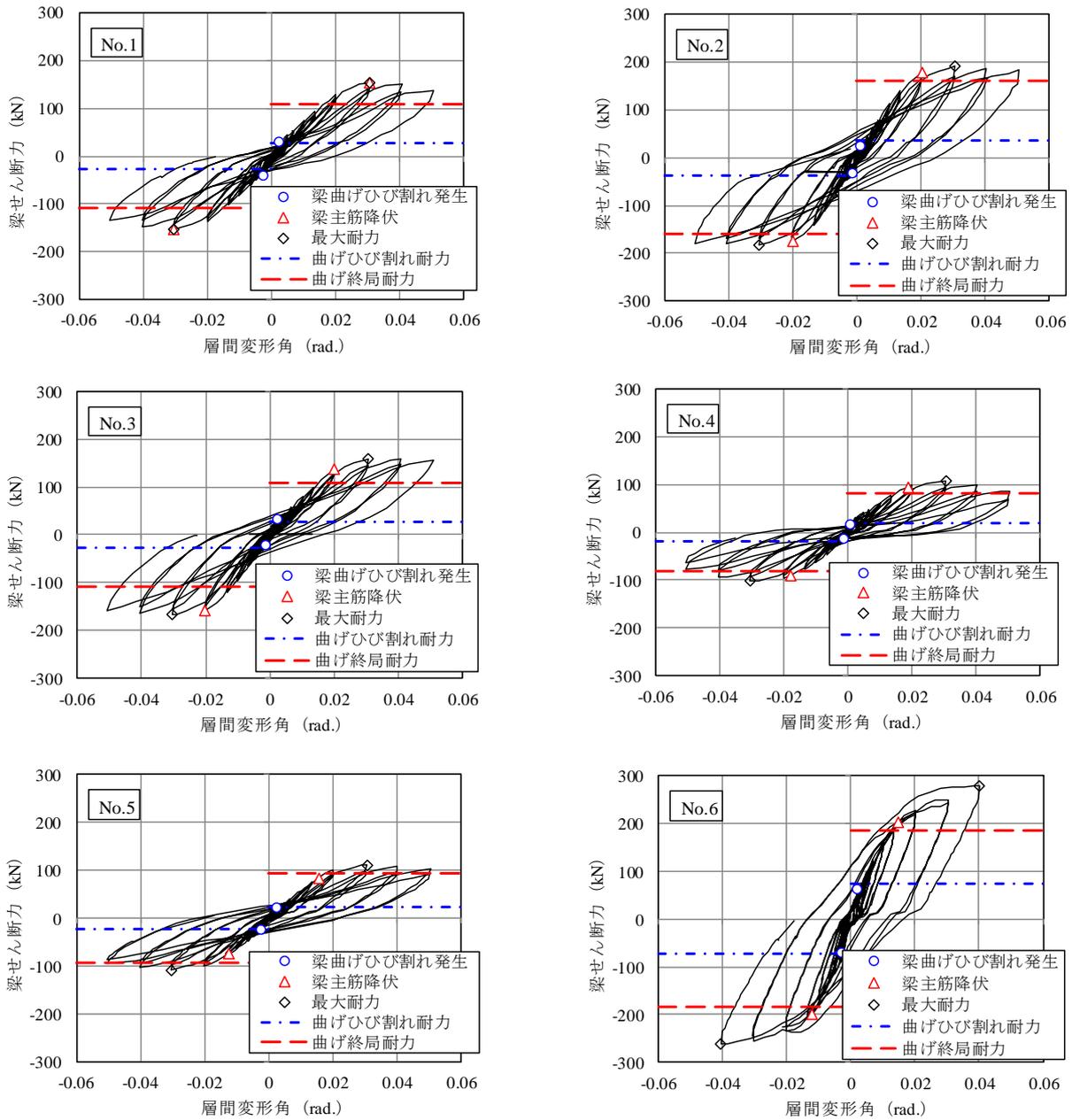


図5 荷重変形関係 (十字形接合部試験体)

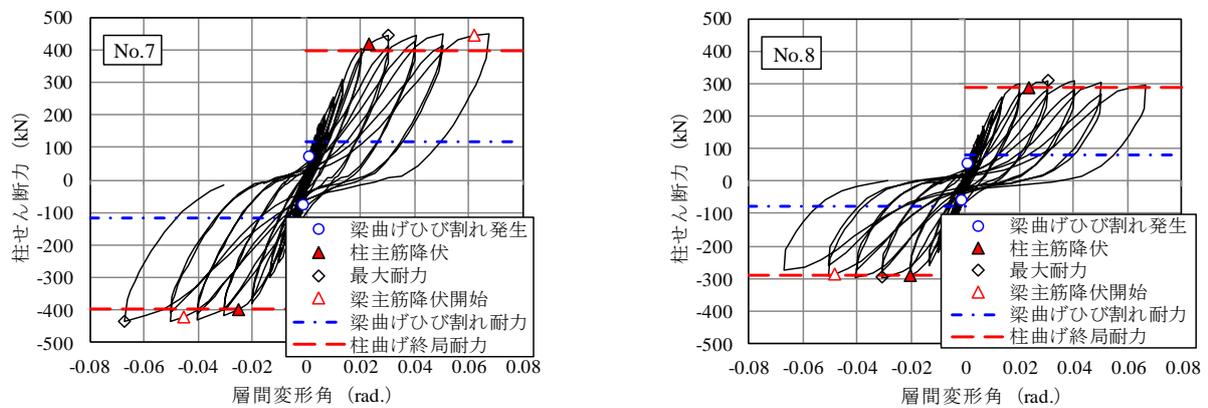


図6 荷重変形関係 (T形接合部試験体)

表面で圧壊が見られて徐々に耐力が低下した。No.6 試験体は $R=1/25\text{rad}$ で加力装置の不具合により実験を終了した。

T 形試験体は荷重初期に梁端部と柱端部に曲げひび割れが発生し、 $R=1/100\text{rad}$ で柱に曲げせん断ひび割れが発生した。 $R=1/33\text{rad}$ に向かうサイクルで柱主筋の一部が降伏し、 $R=1/33\text{rad}$ で柱コーナー一部が圧壊し最大耐力に達した。低強度の材料を用いた No.8 試験体の柱頭立上り部には $R=1/800\text{rad}$ から定着の影響とみられるひび割れが発生していたが、大きく拡幅することはなかった。

3.2 包絡線の比較

各試験体の荷重変形関係の包絡線を図-7 に示す。

(1) 接合部形状の影響

(No.1: 十字形, No.3: ト形, No.7: T 形・柱降伏)

柱梁接合部の形状が十字形とト形, T 形と異なっているが, 扁平梁の断面形状, 配筋が同一であるため, 初期剛性や第 2 剛性はほぼ同一であった。No.7 試験体は梁曲げ降伏する前に柱曲げ降伏したため, せん断力は頭打ちとなっている。

(2) 材料強度の影響

(No.1: 十字形高強度, No.4: 十字形低強度, No.7: T 形高強度, No.8: T 形低強度)

十字形試験体においても T 形試験体においても, 初期剛性はあまり変わらないが, 第 2 剛性および終局耐力において材料強度による差が表れている。

(3) 梁断面形状の影響 1

(No.1: 標準, No.2: 端部ハンチ, No.6: 梁せい 1.5 倍)

No.2 試験体は扁平梁端部のみ梁せいが 300mm となっており, その剛性と終局耐力は, 梁せいが 200mm である No.1 試験体と梁せいが 300mm である No.6 試験体の中間となっている。

(4) 梁断面形状の影響 2

(No.1: 標準, No.5: 柱偏心)

柱が偏心している No.5 試験体は, No.1 試験体に比べて扁平梁の幅が小さいため, 剛性および終局耐力ともに小さい結果となっている。

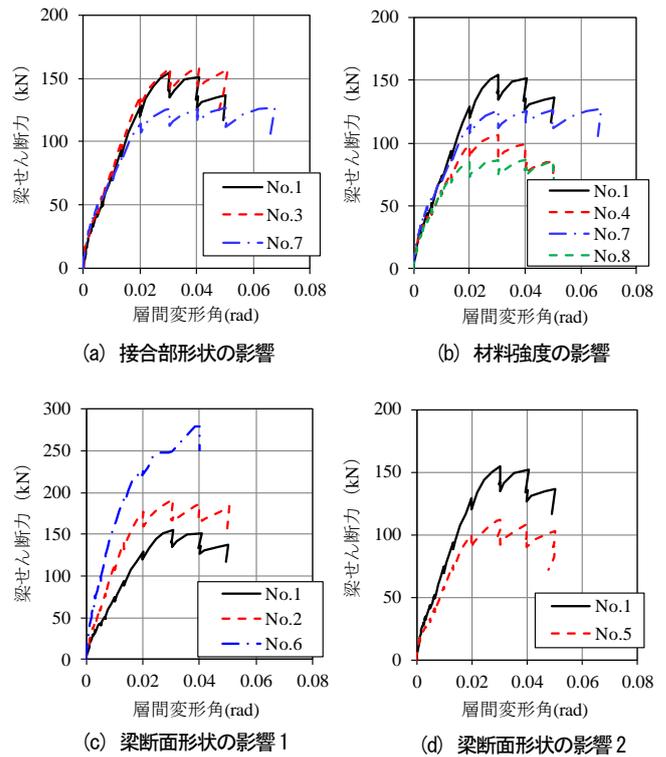


図 7 荷重変形包絡線の比較

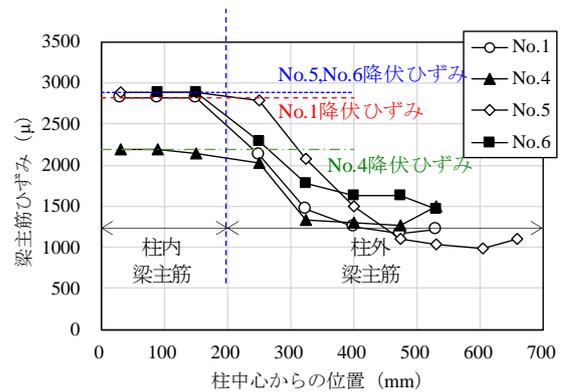


図 8 梁主筋ひずみの分布 ($R=1/50\text{rad}$)

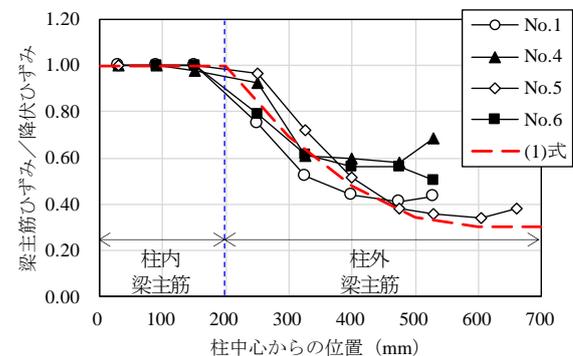


図 9 降伏ひずみで基準化した梁主筋ひずみの分布

3.3 梁主筋のひずみ分布

扁平梁材端で梁主筋が正加力時に曲げ降伏した 4 体の試験体に関して, 層間変形角 $R=1/50\text{rad}$ 時の梁主筋ひずみ分布を図 8 に示す。

いずれの試験体においても柱内に定着された梁主筋 (=柱内梁主筋) のひずみは一樣に降伏ひずみに達しているが, 柱外に配置された梁主筋 (=柱外梁主筋) のひずみは柱から離れるほど小さい値となっており, 降伏していない。これは柱外梁主筋に生じる曲げモーメントが柱から張り出した梁断面のねじれによって伝達されるためであり, 扁平梁の曲げ耐力を算出する際にすべての梁主筋が降伏したと仮定すると過大評価となる。

各梁主筋のひずみを降伏ひずみで除した結果を図 9 に示す。柱外梁主筋のひずみは, 柱から離れるほど小さくなり, 柱内梁主筋のひずみに対して端部では 0.3 倍程度に低下している。ここでは梁主筋のひずみ分布を降伏ひずみに対する比率 $\beta(x)$ で表現することにし, (1)式のように仮定した。柱内梁主筋に関しては降伏ひずみに達

していると考えて $\beta(x)=1$ とし, 柱外梁主筋に関しては柱中心からの距離 x の 2 次関数とした。

$$\left. \begin{aligned} \beta(x) &= 1.0 && (x < B_c/2) \\ \beta(x) &= 0.7 \left(\frac{x}{B_c} - \frac{3}{2} \right)^2 + 0.3 && (B_c/2 \leq x < 3B_c/2) \\ \beta(x) &= 0.3 && (3B_c/2 \leq x) \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、 $\beta(x)$: 梁主筋ひずみの降伏歪みに対する比率
 x : 柱中心からの距離, B_c : 柱幅

図-9 に(1)式による計算結果を併記した。(1)式は実験における梁主筋のひずみ分布の傾向を表現できている。

4. 構造性能の確認

4.1 曲げひび割れ発生耐力

扁平梁の曲げひび割れモーメントは下式で算出する。扁平梁材端で梁主筋が曲げ降伏した5体の試験体に関して、実験値と計算値の比較を図10に示す。

$$M_c = 0.56 \cdot \sqrt{\sigma_B} \cdot Z_e \quad (2)$$

ここで、 M_c : 曲げひび割れモーメント
 σ_B : コンクリートの圧縮強度
 Z_e : 鉄筋を考慮した断面係数

4.2 降伏時剛性低下率

扁平梁の降伏時剛性低下率は下式で算出する。式中の係数はヤング係数比と引張鉄筋比の積、せん断スパンと梁せいいの比、有効せいいと梁せいの比を変数として最小二乗法により本実験値にフィッティングするように算定した。扁平梁材端で梁主筋が曲げ降伏した5体の試験体に関して、実験値と計算値の比較を図-11に示す。

$$\alpha_y = \left(3.65 \cdot n \cdot p_t + 0.016 \frac{L}{D} \right) \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^2 \quad (3)$$

ここで、 α_y : 降伏時剛性低下率
 n : ヤング係数比, p_t : 引張鉄筋比
 L : せん断スパン, D : 梁せい
 d : 梁の有効せい

4.3 終局曲げ耐力

扁平梁の終局曲げ耐力は梁主筋のひずみ分布を考慮して下式で算出する。柱外梁主筋のひずみ分布を考慮するための係数は、柱外梁主筋が梁幅方向に等間隔で配筋されていると仮定して(1)式の $\beta(x)$ を $B_c/2$ から $3B_c/2$ の区間で積分して等価な面積を持つ k を算定した。

$$M_u = 0.9 \cdot (a_{tin} + k \cdot a_{tout}) \cdot \sigma_y \cdot d \quad (4)$$

ここで、 M_u : 終局曲げ耐力
 a_{tin} : 柱内梁主筋の引張鉄筋断面積
 a_{tout} : 柱外梁主筋の引張鉄筋断面積
 k : 柱外梁主筋のひずみ分布を考慮するための係数(=0.53)
 σ_y : 引張鉄筋の降伏強度, d : 梁の有効せい

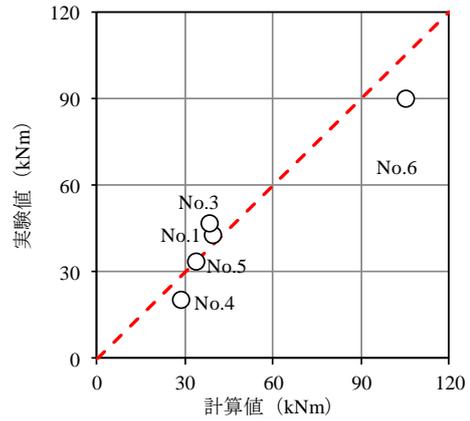


図10 曲げひび割れモーメント

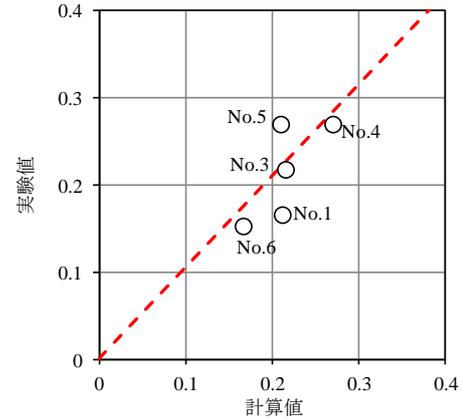


図11 降伏時剛性低下率

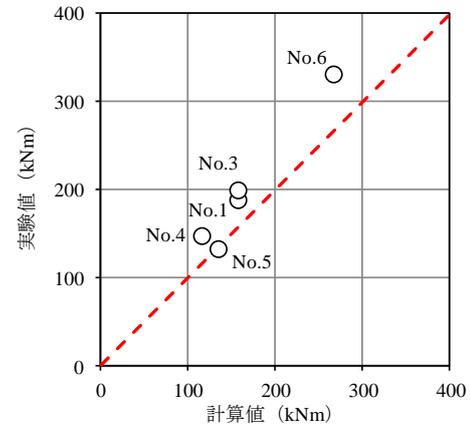


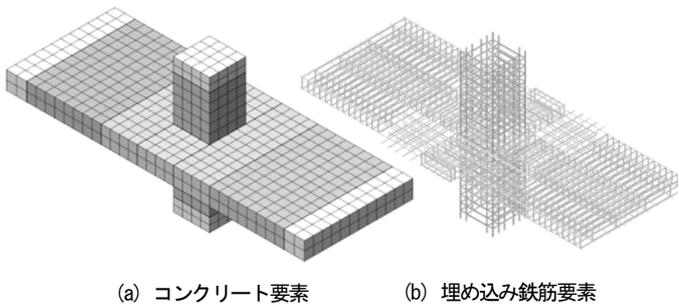
図12 終局曲げ耐力

終局曲げ耐力計算値と実験値を図12に示す。No.6試験体で若干過小評価となっているが、材端で梁主筋が曲げ降伏した5体の試験体に関して安全側に評価できている。

5. 有限要素解析

5.1 解析概要

解析モデルの形状を図13に示す。コンクリート要素は20節点ソリッド要素とし、鉄筋は埋め込み鉄筋要素で付着を考慮した。材料モデルとしては、コンクリートは全ひずみ固定ひび割れモデルを使用し、圧縮側は破壊エネルギーを考慮したバラボラ型曲線、引張側



(a) コンクリート要素 (b) 埋め込み鉄筋要素

図 13 解析モデル形状

の軟化曲線は破壊エネルギーを考慮した Hordijk モデル，せん断低減係数は $\beta=0.05$ で一定とした。材料強度は試験体の材料試験結果を用いた。

5.2 解析結果

扁平梁材端で梁主筋が曲げ降伏した 5 体の試験体に関して，解析を実施した。梁せん断力-水平変形関係を図 14 に示す。初期剛性は解析結果の方が若干高いが，各試験体の荷重変形関係の傾向をとらえている。

層間変形角 $R=33\text{rad}$ 時の扁平梁材端における梁主筋ひずみ分布を図 15 に示す。ひずみ分布は柱中心を軸として梁幅方向に左右対称であるため，片側のみ示した。各試験体において実験結果と解析結果は比較的良く対応し，No.1 試験体および No.3 試験体では柱中心から離れるほど線形に低下し，No.4 試験体および No.5 試験体，No.6 試験体では低下が頭打ちによる状況が解析結果においても示された。今後は本モデルを用いて各種変数の影響などを考察していきたい。

6. おわりに

高強度材料を用いた扁平梁-柱接合部部分架構の実験結果より，柱外に配置された梁主筋は柱内に定着された梁主筋よりも曲げモーメントによるひずみが小さいことが分かった，そのため，柱外に配置された梁主筋のひずみ分布を仮定することにより，扁平梁の曲げ耐力を安全側に評価することができることを示した。

参考文献

- 1) 佐藤則勝 他，幅広梁・柱部分架構の水平加力性状に関する実験研究（その 1～その 2），日本建築学会大会学術講演梗概集，中国，pp.415-418，1990.10
- 2) 西村康志郎 他，高強度材料を用いた鉄筋コンクリート扁平梁構法の開発研究，日本建築学会構造系論文集，第 73 巻，第 627 号，pp.827-834，2008.5
- 3) 平田延明 他，柱より幅の広い扁平梁柱接合部の構造性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，2014
- 4) 日本建築学会，鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2018

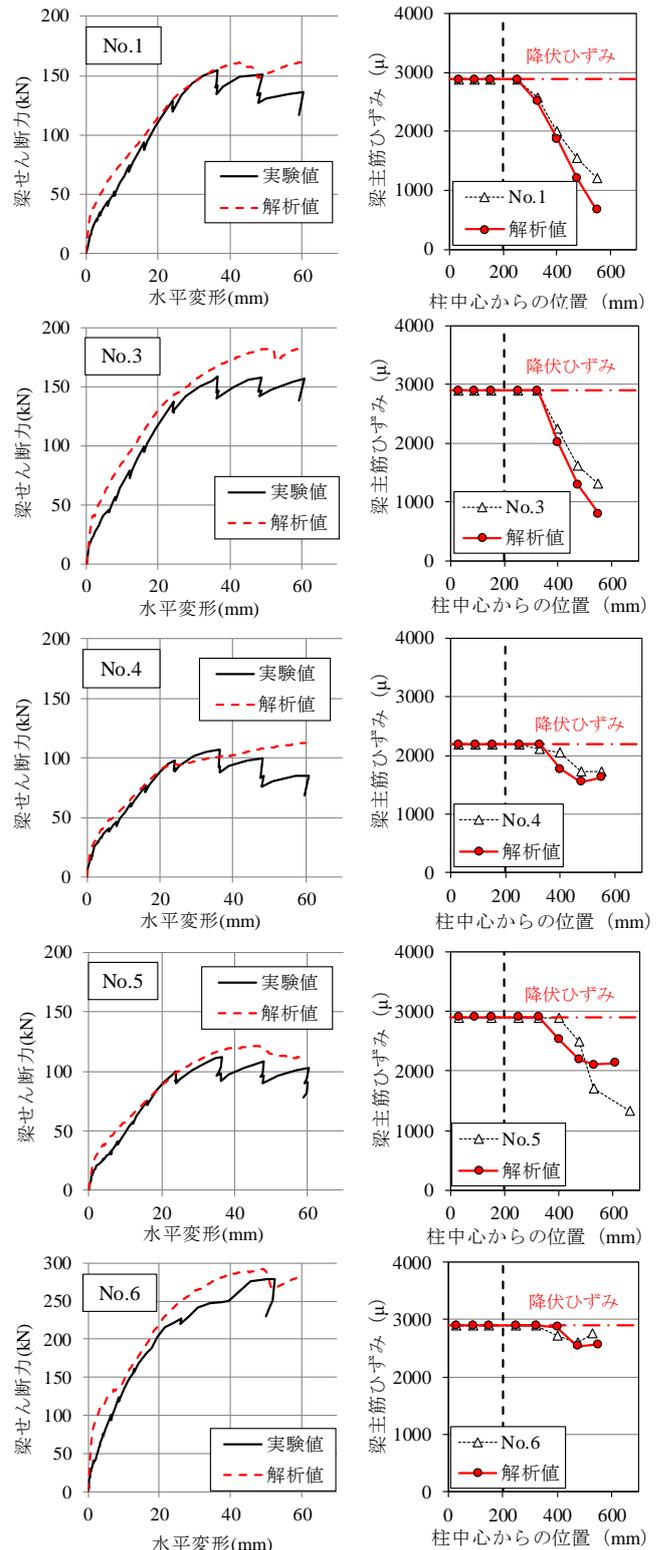


図 14 梁せん断力-水平変形関係

図 15 梁主筋ひずみ分布