

報告 多軸複合応力を受ける鉄筋コンクリート造柱梁接合部のベンチマークテスト

塩原 等^{*1}・岡田 浩一^{*2}・楠原 文雄^{*3}

要旨：柱梁接合部の耐震設計法と非線形有限要素解析法の信頼性検証のためのブラインド解析用データを提供する。実験は 1/2 スケールの鉄筋コンクリート柱梁接合部 5 体について、地震荷重時の繰り返し応力と種々の境界条件に対応した静的漸増振幅加力である。試験体の材料特性、寸法、形状、計測方法、加力履歴等のブラインド解析に必要なデータと既往の手法による事前解析の結果について述べる。

キーワード：柱梁接合部，ベンチマーク実験，境界条件，切削鉄筋，測定方法

1. はじめに

現行の鉄筋コンクリート造柱梁接合部の耐震設計は、その多くが過去の実験による経験式によって構成されており、理論的なモデルの開発が必要である。そのためには、一つの実験に対して実験担当者のみが担当するのではなく、多くの研究者が様々な解析を行い、検討できる環境が重要である。

そこで本報では、各種モデルの信頼性検証のためのブラインド解析用データを提供する。以下では、解析に必要な試験体の材料特性、寸法、形状、計測方法、加力履歴等の詳細を示し、事

前に行った従来の手法による解析結果について述べる。

2. 実験計画

2.1 試験体概要

試験体は、A シリーズ 3 体 (A1, A2, A3), B シリーズ 2 体 (B1, B2) である。A シリーズは、形状・配筋が同一で、加力方法のみが異なる。B シリーズは配筋・加力方法が同一で、形状のみが異なる。加力方法は、境界条件を変えることにより十字型・ト型・L 字型加力を行う。試験体の諸元を表 - 1 に、配筋図を図 - 1 に、試験体別の加力方法を図 - 2 にそれぞれ示す。試験体の設

表 - 1 試験体諸元

試験体	A1	A2	A3	B1	B2
加力方法	十字型加力	ト型加力	L字型加力	ト型加力	ト型加力
コンクリート強度	28.3 [MPa]				
軸力	216 [kN]				
反曲点間長さ	梁 : 2700 [mm] 柱 : 1470 [mm]				
梁	断面(幅×せい)	300×300 [mm ²]			
	主筋	16-D13-SD390 (fy=456 [MPa])		20-D13-SD390 (fy=456 [MPa])	
	引張鉄筋比	1.20 [%]		1.54 [%]	
	あばら筋比	0.43 [%]			
柱	断面(幅×せい)	300×300 [mm ²]			
	主筋	16-D13-SD345 (fy=357 [MPa])		8-D13-SD345 (fy=357 [MPa])	
	引張鉄筋比	1.18 [%]		0.40 [%]	
	帯筋比	0.43 [%]			
接合部	横補強筋	3-D6-SD295 (fy=326 [MPa])			
	横補強筋比	0.33 [%]			

*1 東京大学 工学系研究科建築学専攻助教授 工博 (正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 修士課程 (正会員)

*3 東京大学 工学系研究科建築学専攻助手 工修 (正会員)

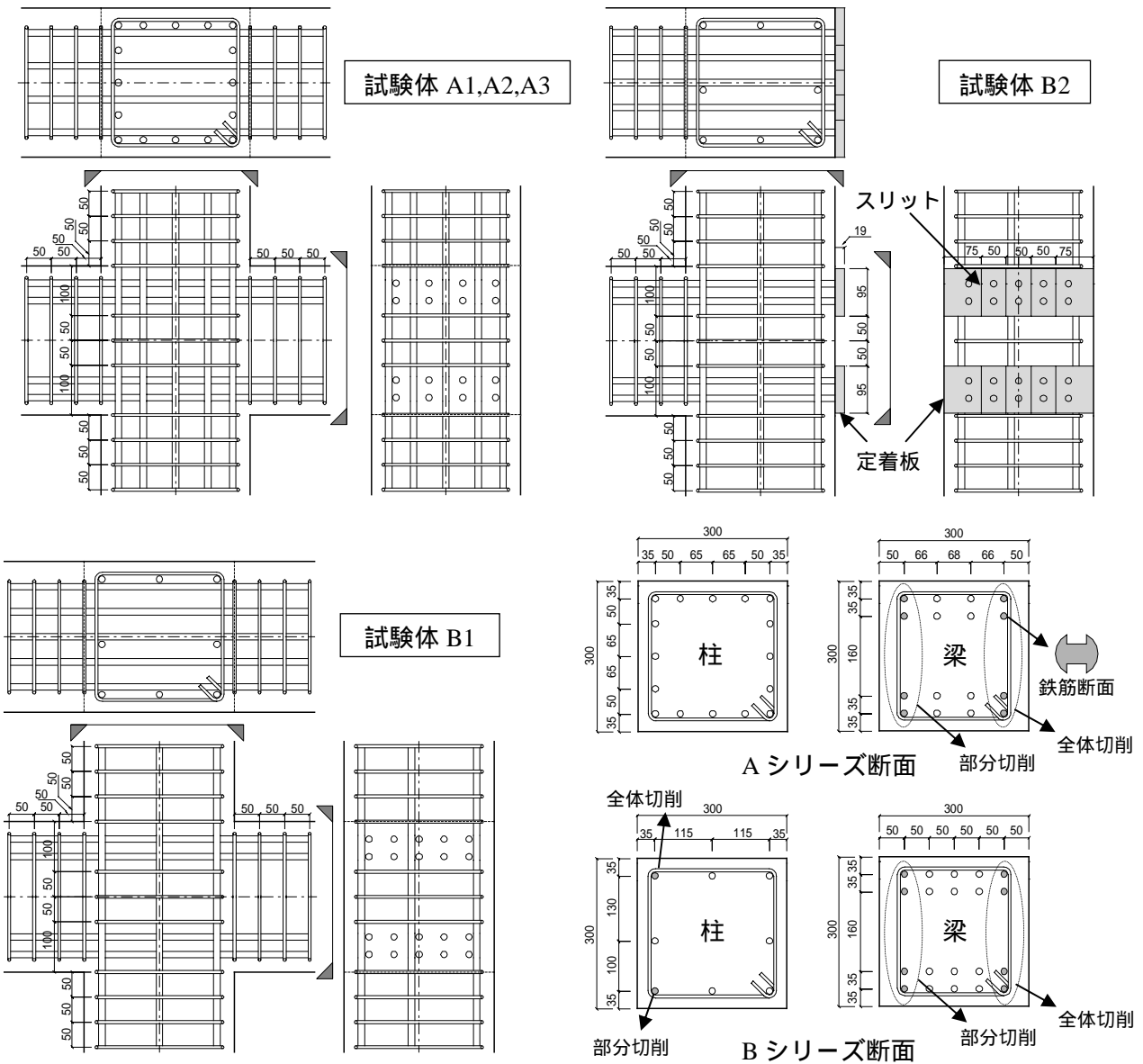


図 - 1 配筋図 [mm]

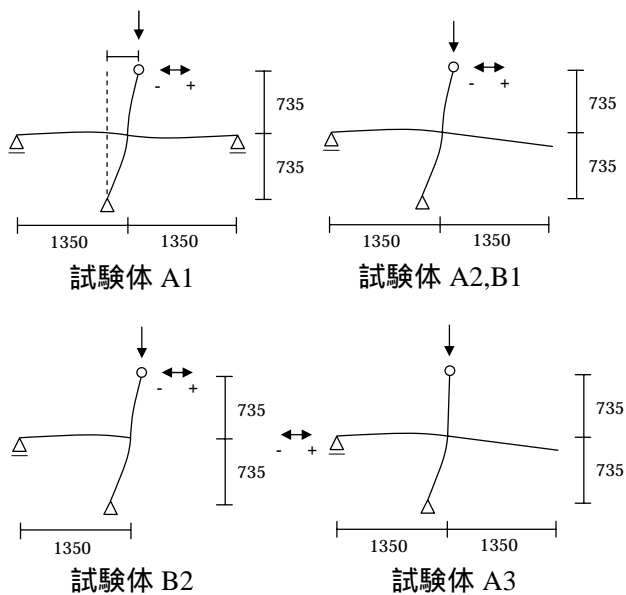


図 - 2 試験体別加力方法 [mm]

計は靱性保証指針¹⁾を基にし、Aシリーズは十字型加力の場合の余裕度（接合部せん断強度 / 梁の終局時接合部入力せん断応力度）が 0.85 になること及び柱が梁より先行して破壊しないように終局時の余裕度（柱の曲げ強度 / 梁の曲げ強度）を 1.3 とすることを条件として行った。Bシリーズは、Aシリーズの配筋から梁の鉄筋を増やし、柱の鉄筋を減らしながら余裕度（接合部せん断強度 / 梁の終局時接合部入力せん断応力度）が試験体 A1 とほぼ同じになるようにした。また、軸力はすべて軸力比 0.1 を条件とした。定着板は、鉄製で梁主筋と溶接し、鉄筋の拘束を避けるためにスリットを設けた。

表 - 2 コンクリート配合表

水セメント比 [%]	セメント [kg/m ³]	粗骨材最大寸法 [mm]	細骨材率 [%]	混和材 [kg/m ³]	空気量 [%]	スラブ [cm]
64.0	286	13	51.0	3.06	4.2	17.5

表 - 3 コンクリート材料特性

ヤング係数 [GPa]	圧縮強度 [MPa]	最大荷重時歪 [μ]	引張強度 [MPa]
25.9	28.3	1895	2.67

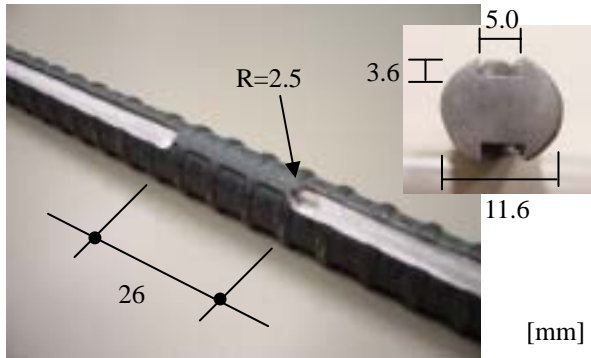


写真 - 1 切削鉄筋

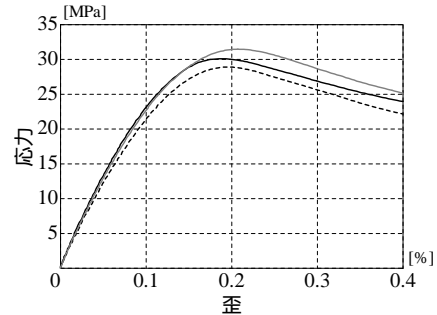


図 - 3 コンクリートの応力 - 歪関係

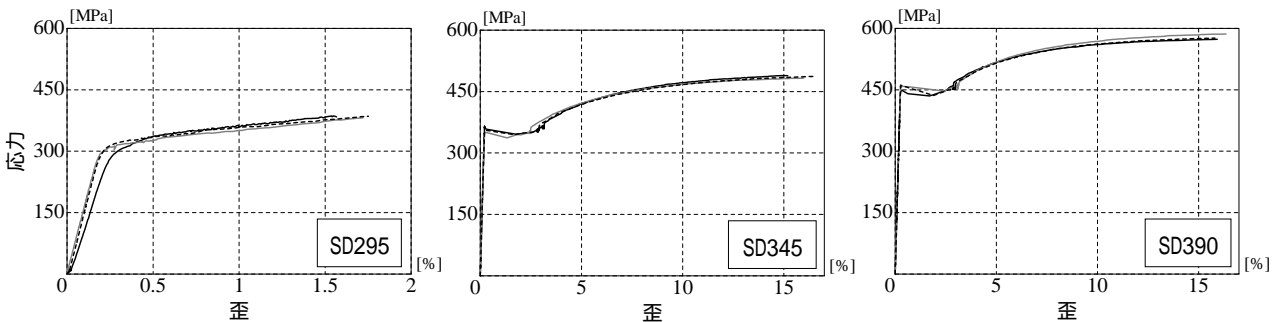


図 - 4 鉄筋の応力 - 歪関係

表 - 4 鉄筋材料特性

	ヤング係数 [GPa]	降伏強度 [MPa]	降伏歪 [μ]	引張強度 [MPa]
D13-SD345	176	357	2129	493
D13-SD390	176	456	2841	582
D6-SD295	151	326	4126	488

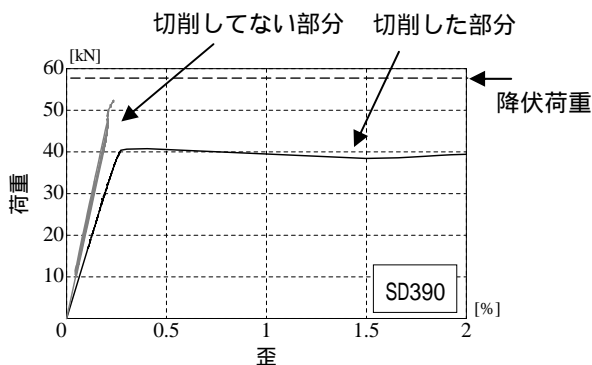


図 - 5 切削鉄筋の荷重 - 歪関係

主筋の降伏後における応力を測定するため、一部の主筋を切削加工した。写真 - 1 に示すように加工し、切削した面積は鉄筋断面積の 29% (梁

主筋) , 25% (柱主筋) である。切削加工には、歪を計測する部分は残す部分切削と、全体にわたって切削する全体切削の 2 種類を準備した。降伏後の応力 σ の算出方法は、以下の式による。

$$\sigma = \frac{E\varepsilon}{0.71} \text{ (梁主筋)} \quad \sigma = \frac{E\varepsilon}{0.75} \text{ (柱主筋)} \quad (1)$$

E : ヤング係数

ε : 部分切削鉄筋の残した部分の歪

2.2 材料特性

コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いて呼び強度を 24MPa とし、全ての試験体に同じコンクリートを打設した。コンクリートの打設は、2004 年 9 月 18 日に行い、打設向きは平打ちで、打設面がひび割れ観察面 (試験体東面) とした。コンクリートの配合を表 - 2 に、材料特性を表 - 3 に、応力 - 歪関係を図 - 3 に示す。コンクリートのヤング係数は、1/3 強度割線剛性とし、材料試験には現場封緘養生した 100 ×

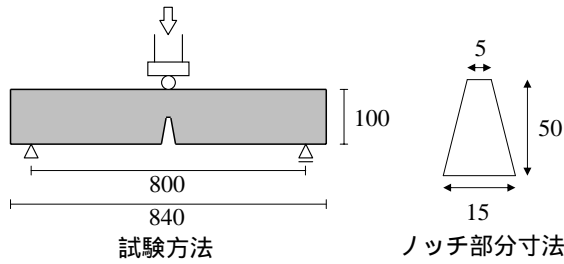


図 - 6 曲げ引張試験方法 [mm]

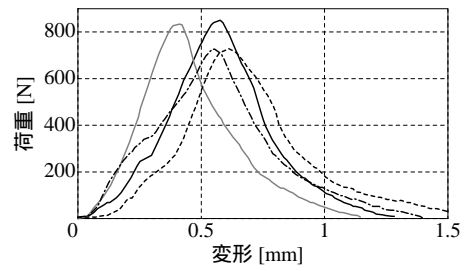


図 - 7 荷重 - 変形関係

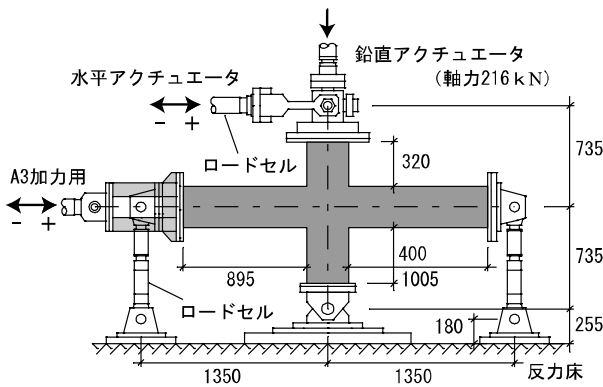


図 - 8 加力装置図 [mm]

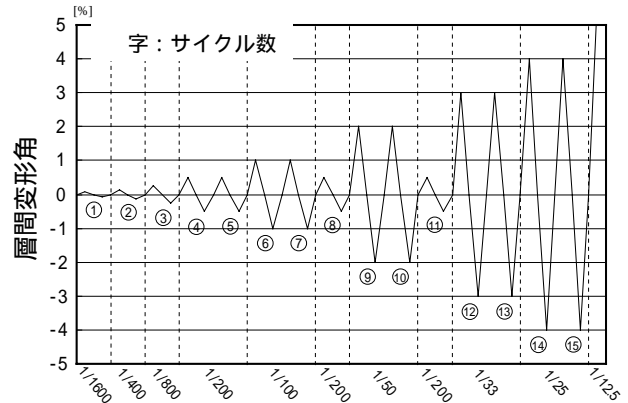


図 - 10 加力履歴図

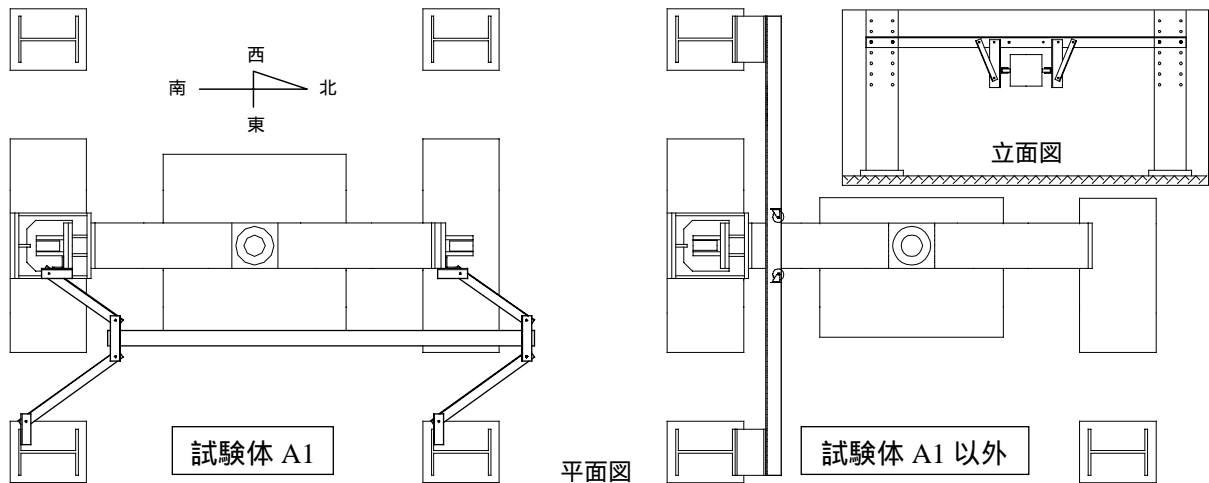


図 - 9 フレーム図

200mm のシリンダーを用いた。

鉄筋の材料特性を表 - 4 に、応力 - 歪関係を図 - 4 に、切削鉄筋の荷重 - 歪関係を図 - 5 に示す。鉄筋のヤング係数は、初期剛性とした。せん断補強筋に用いた D6-SD295 は、応力 - 歪関係において明瞭な降伏点を示さなかったため、0.2% オフセットによる値を降伏点とした。

コンクリートの曲げ引張試験方法²⁾を図 - 6 に示す。供試体の断面は 100×100mm で、室温 20℃、湿度 60% において水中養生を行った。荷重と供試体中央のたわみとの関係を図 - 7 に示し、試験

表 - 5 曲げ引張試験結果

	供試体 1	供試体 2	供試体 3	供試体 4	平均
G_F [N/m]	119.6	107.2	123.1	134.0	121.0
W_0 [N/m]	0.387	0.337	0.375	0.377	0.369
m [kg]	18.4	18.4	18.2	18.0	18.3
δ_0 [mm]	1.28	1.15	1.40	1.65	1.37
A_{lig} [mm ²]	5171	5075	5080	4985	5078

結果を表 - 5 に示す。破壊エネルギー G_F ²⁾は、以下の式により算出した。

$$G_F = \frac{(W_0 - mg\delta_0)}{A_{lig}} \quad (2)$$

W_0 : 仕事量 m : 重量 g : 重力加速度

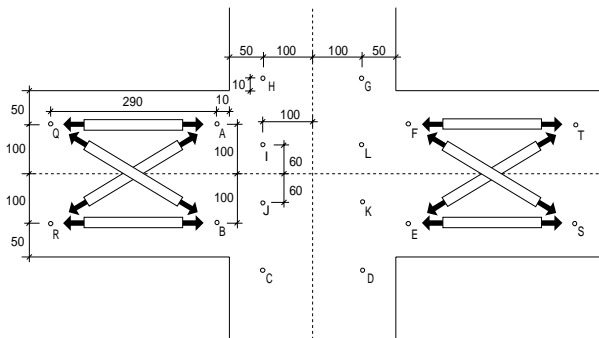


図 - 11 インサート位置図 [mm]

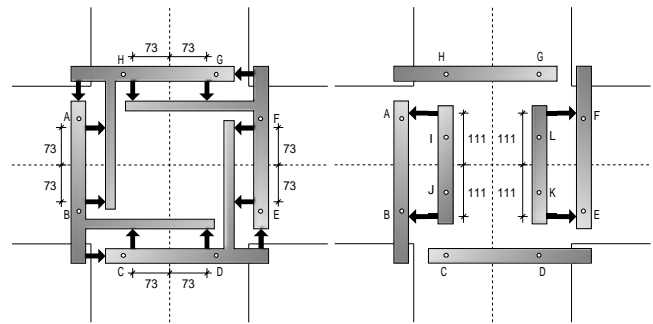


図 - 12 接合部測定図 [mm]

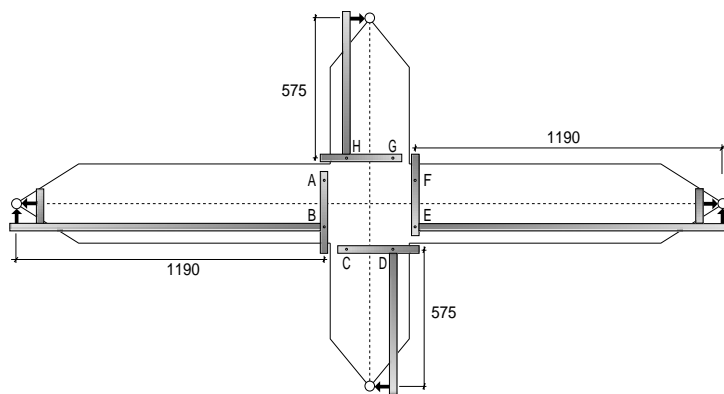


図 - 13 測定全体図 [mm]

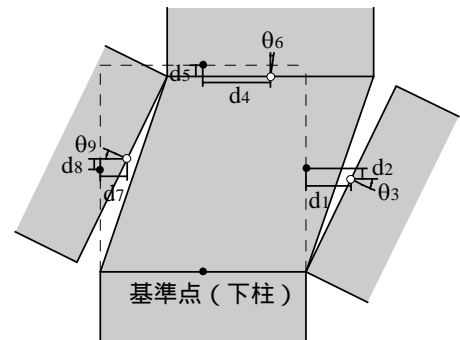


図 - 14 接合部変形図

δ_0 : 最終時のたわみ A_{lig} : 破壊断面積

2.3 加力方法

加力装置を図 - 8 に示す。十字型加力の試験体では、柱頭ピン支持、柱脚ピン支持、梁端ピン・ローラー支持とし、ト型加力の試験体では、北側の梁端を自由端とし、L字型加力の試験体では、北側の梁端を自由端かつ南側の梁端で加力を行った。柱頭及び柱脚をボルトで締め、圧縮軸力 (216kN) を加えた後、梁端を接続して载荷を行った。軸力を保持しつつ、水平方向のアクチュエーターで変位制御静的漸増振幅繰返し加力を行った。また、試験体の捩れを拘束するためのフレームを図 - 9 に示す。

ここで、層間変形角とは水平アクチュエーターのストローク (図 - 2 参照) を柱頭のピンから柱脚のピンまでの距離 (1470mm) で除した値とする。加力履歴は図 - 10 に示すように、試験体の層間変形角 1/1600 (0.0625%) から 1/25 (4%) まで漸増振幅繰返し加力を行い、その後 1/12.5 (8%) まで正加力を行った。層間変形角 1/200 以降では、同振幅での耐力低下を調べるため同

振幅で正負 2 回ずつ繰り返した。加力を行った日は、材齢 67 日に試験体 A1, 材齢 80 日に試験体 A2, 材齢 139 日に試験体 A3, 材齢 84 日に試験体 B1, 材齢 89 日に試験体 B2 である。

2.4 測定方法

ひび割れ観察は試験体東面で行い、測定フレームの取付けは試験体西面で行った。変形の計測は、アルミ製の計測フレームを試験体に組み込んだインサートからねじ棒を立てて取り付け、計測フレームの各所に変位計を取り付けて測定した。インサート位置を図 - 11 に示す。インサート位置は、左右対称である。層間変形の計測に関して、試験体 A3 では梁の中心位置での変形とした。

接合部の変形を計測するにあたり、柱端と梁端の水平・鉛直・回転の変位方向 12 自由度を測定するために、図 - 12 の左側に示すような計測を行った。図 - 12 の右側に示した図は、梁端部の開きを測定するものである。梁・柱のたわみ及び梁の伸縮の測定は図 - 13 に示し、梁端部の測定は図 - 11 中に示した。図 - 14 に示すように下柱を基準とし、残りの 9 自由度を設定した。

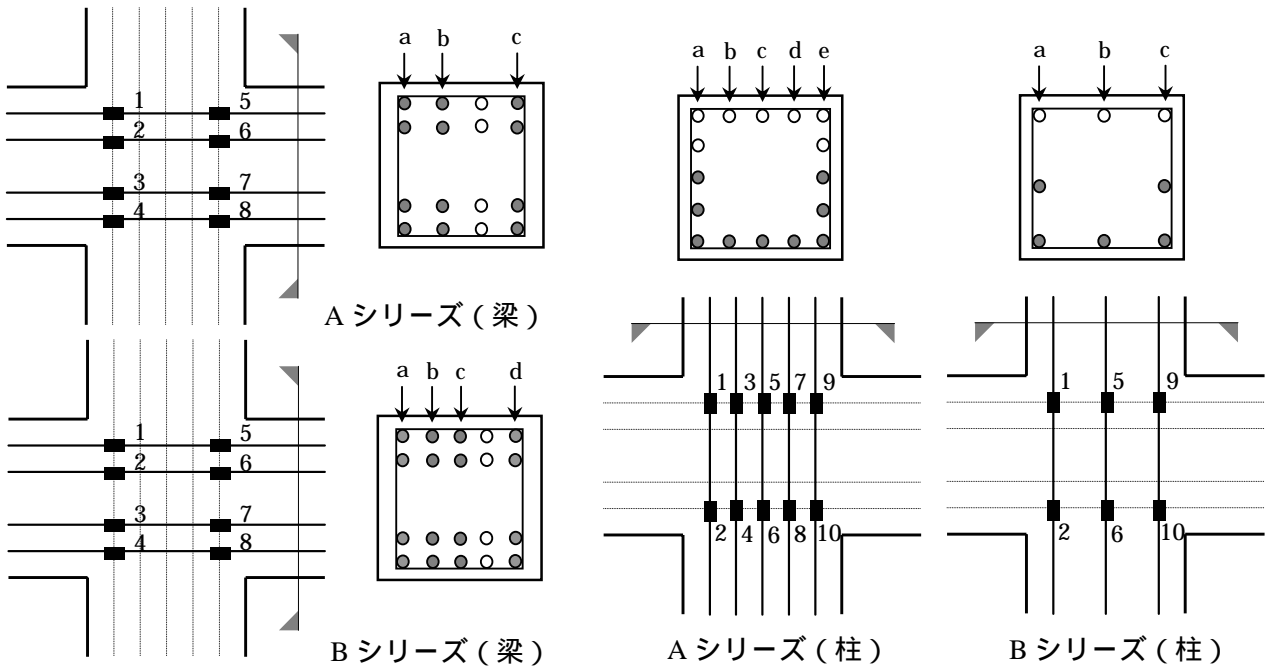


図 - 15 歪ゲージ位置図

表 - 6 強度計算結果

梁・柱曲げ強度		M_y	M_u	$M_u(\text{柱}) / M_u(\text{梁})$	
		[kNm]	[kNm]		
A1	梁	89.5	97.8	1.15	
	柱	99.3	112.6		
A2	梁	89.5	97.8	2.30	
	柱	99.3	112.6		
A3	閉じる	梁	103.0	1.07	
		柱	106.2		120.5
	開く	梁	78.7	86.1	1.23
		柱	93.0	105.5	
B1,B2	梁	110.2	120.9	1.19	
	柱	65.2	71.9		

接合部せん断強度	V_{jy}	V_{jp}	V_{ju}	V_{ju} / V_{jp}
	[kN]	[kN]	[kN]	
A1	596	662	635	0.96
A2	298	331	445	1.34
A3	閉じる	366	406	0.63
	開く	246	274	
B1,B2	385	429	445	1.04

V_{jy} : 梁曲げ降伏時の接合部設計用せん断力

V_{jp} : 梁曲げ終局時の接合部設計用せん断力

V_{ju} : 接合部せん断強度

歪ゲージの位置を図 - 15 に示す。●印の鉄筋にゲージが貼ってあり、数字と英文字との組み合わせで位置を表現している。ただし、A シリーズ(梁)の b 列及び B シリーズ(梁)の b,c 列で、数字の 5~8 の所には貼っていない。

3. 強度計算

従来の手法を用いて、試験体の強度計算を行った。梁及び柱の曲げ強度は、平面保持を仮定した断面解析により算出した。接合部のせん断強度は、靱性保証指針に基づき算出した。それぞれの強度の計算結果を表 - 6 に示す。

4. まとめ

本報では、鉄筋コンクリート柱梁接合部の設計及び解析法検証のためのブラインド解析用デ

ータ³⁾を提供した。本実験結果は、2005 年度末を目安に公開し、次回の JCI 大会に投稿する予定である。

参考文献

- 1) 日本建築学会: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, 1999.8
- 2) RILEM Draft Recommendation(50-FMC):Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams, Materials and Structures, Vol.18, No.106, pp.285, 1985
- 3) <http://www.rcs.arch.t.u-tokyo.ac.jp/shiohara/benchmark/index.html>

謝辞 本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(B)(2)(課題番号 15360291, 研究代表者: 塩原等)により行われた。