

露出型柱脚における機械式定着の構造性能に関する実験的研究

市岡 大幸
Daiko Ichioka

概 要

3階建以下を対象とした重量鉄骨ラーメン構造において、外形400mm角のコンパクトな露出型柱脚を開発している。この露出形柱脚は、機械式定着を用いた基礎梁主筋としており、その定着耐力確認を目的とし、基礎梁と鉄骨柱からなるL形試験体の繰り返し載荷試験を行った。

結果として、以下の2点を明らかにすることができた。

- ①露出型柱脚での機械式定着について、靱性指針式(正加力 $\kappa_u=0.6$ 、負加力 $\kappa_u=0.4$)で概ね安全側に評価できること。
- ②柱脚底80mm下方突出により、横補強筋比 $P_{wjh}=0.40\sim 0.84\%$ 、せん断余裕度 $\lambda_p=0.69\sim 0.87$ の場合において、梁および柱脚耐力を上回る耐力が期待できること。

Experimental Study on Structural Capacity of Mechanical Rebar Anchorage in Exposed Column Base

Abstract

We are developing a compact exposed column base with an outer diameter of 400 mm square for heavy steel rigid-frame structures of three stories or fewer. This exposed column base is the main reinforcement of the foundation beam using mechanical anchoring, and a repeated loading test was conducted on an L-shaped specimen consisting of a foundation beam and a steel frame column for the purpose of confirming the anchoring strength.

As a result, we were able to clarify the following two points.

- (1) Mechanical anchorage on exposed column bases can be evaluated on the safe side using the toughness guideline formula (positive applied force $\kappa_u = 0.6$, negative applied force $\kappa_u = 0.4$).
- (2) By protruding 80 mm downward from the bottom of the column base, when the ratio of lateral reinforcement is $P_{wjh} = 0.40$ to 0.84% and the shear margin is $\lambda_p = 0.69$ to 0.87 , a yield strength exceeding that of the beam and column base can be expected.

キーワード：露出型柱脚，機械式定着，基礎梁

1. はじめに

3階建以下を対象とした重量鉄骨ラーメン構造の外形400mm角と比較的コンパクトな露出型柱脚について、機械式定着を用いた基礎梁主筋の定着耐力確認を目的とし、基礎梁と柱からなるL形試験体の繰り返し載荷試験を行う。

露出型柱脚部の基礎梁主筋に機械式定着を適用することは一般的に少ないが、小さい柱脚での納まりと施工性に配慮し、採用した。構造上の特徴としては、鉄筋コンクリート造最上階を180°反転した形状と見なすことができる。一般的な鉄筋コンクリート造(以下、RC造と呼ぶ)の最上階L字部の梁主筋の定着は、L形定着筋を用い、仕口部には上部拘束筋としてかんざし筋を配置する²⁾。地震時において、柱梁接合パネル部にはせん断力が作用するが、**図1**に示すように基礎梁主筋による水平力、柱主筋の鉛直力、そして、斜め方向の圧縮束によるコンクリートが負担する力が釣り合う必要がある。また、柱梁のL字が閉じる方向のときには梁上端主筋の定着部と柱主筋は、重ね継手と同様の応力伝達がなされ、鉄筋軸力が効果的に伝達される。

RC造最上階において梁主筋を機械式定着としたときには、梁上端主筋と柱主筋との効率的な応力伝達は見込めず、パネルのせん断抵抗による斜め圧縮束に対する拘束力は主筋L字定着時と比較して小さくなり、定着耐力と変形能力は低下する。その対策として、かんざし筋を梁主筋先端や梁仕口部付近に配置することも一般的であるが、特に柱上部を突出させ、柱主筋を外定着とすることで、斜張力に対する柱主筋の拘束効果が大きくなり、耐力と変形能力が改善できることが報告されている³⁾⁻⁶⁾。基礎梁と露出型柱脚部においても、柱脚を下部突出として

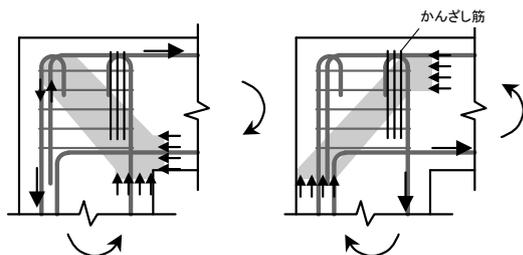


図1 最上階RC造柱梁接合部配筋例

アンカーボルトを梁下端筋よりも下で定着することで、同様の効果が期待できると推察される。しかし、柱脚の下部突出は周りとの段差が生じ、地業時の掘削や転圧のしにくさなど、施工上の問題点が多い。よって、下部突出量や定着部拘束筋は納まり上最小限とする必要がある。本試験では、パラメータとして、①梁せい600mm、400mm、②下部突出の有無、③横補強筋比、④かんざし筋に相当する梁主筋先端のJ形筋の有無、そして、⑤アンカーボルト先端の定着板(アンカーPL)の有無の5つを設定した。

2. 実験概要

試験体は**表1**に示す1シリーズおよび2シリーズの8種類各1体ずつである。試験体仕様を**表2**に示す。柱は角形鋼管 $\square 150 \times 150 \times 12(16)$ 、そして、露出型柱脚は外形 $400 \times 400 \text{mm}$ で高さ600mmとした。基礎梁せいは2種類で、600mmせい(以降、H600と呼ぶ)と400mmせい(以降、H400と呼ぶ)である。H600梁は1、2シリーズともに同じ断面で $600 \times 280 \text{mm}$ 、主筋4-D19(SD345)2段配筋である。H400試験体は、1シリーズでは断面 $400 \times 400 \text{mm}$ 、2シリーズでは $400 \times 280 \text{mm}$ で、ともに主筋3-D22(SD345)である。**図2**に試験体配筋を示す。基礎梁主筋は柱脚仕口部と同径のTヘッド工法鉄筋と重ね継手で接合している。定着長さは315mm(D19:16.6d, D22:14.3d)で柱脚アンカーボルトよりも奥に定着板を配置した。柱脚アンカーボルトは異形鉄筋に転造ネジ加工を施した。1シリーズの梁せいH400試験体のみ柱脚の標準仕様のネジ径M30(D32(SD390))で、その他試験体は梁定着耐力を確認するためM36(D38(SD390))とした。ネジ径M36のM30との耐力比は1.45倍である。

表1 試験体一覧

試験体	横補強筋	横補強筋比 P _{jwh} (%)	定着部 拘束筋	J形補強筋	アンカー PL
1シリーズ	H600_0DN(1)	4-D13 (SD295)	0.72	2-D13 (SD295)	有
	H600_80DN(1)				
	H400_0DN(1)	2-D13 (SD295)	0.84		
	H400_80DN(1)				
2シリーズ	H600_0DN(2)	4-D10 (SD295)	0.40	2-D10 (SD295)	有
	H600_80DN(2)				無
	H400_0DN(2)	2-D10 (SD295)	0.48		有
	H400_80DN(2)				無

表 2 試験体仕様

試験体	H600		H400	
	1シリーズ	2シリーズ	1シリーズ	2シリーズ
基礎梁				
基礎せい	600mm		400mm	
基礎幅	280mm		400mm	280mm
主筋	4-D19(2段配筋)(SD345)		3-D22 (SD345)	
あばら筋	D13(SD295) 150mm間隔			
定着筋	Tヘッド工法鉄筋 D19(SD345)		Tヘッド工法鉄筋 D22(SD345)	
定着長さ	315mm(0.78Dc)		(2本:315mm, 1本:300mm)	
柱脚				
外形	400mm×400mm			
縦方向筋	4-D13(SD295)			
アンカーボルト	D38(SD390) M36	D32(SD390) M30	D38(SD390) M36	
ベースプレート	PL36x300x300(SN490B)			
柱				
柱断面	□150x150x16(BSH325)		□150x150x12(BCR295)	

柱脚縦筋は D13, 横補強筋は 1 シリーズ D13, 2 シリーズ D10 である。それぞれの横補強筋比は, 表 1 に示すように 1 シリーズは 0.72% と 0.84%, 2 シリーズは 0.40% と 0.48% とである。柱脚部の縦筋 D13(SD295) と横補強筋は交差部をスポット溶接した溶接鉄筋で, その溶接強度は鉄筋軸力が降伏応力 σ_y 以上となることを保証するため, 縦筋の端部フックは設けていない。

柱脚下部突出寸法は 0mm と 80mm (以降, それぞれ 0DN, 80DN と呼ぶ) の 2 種類で, 図 2 に示すように 400mm 角の柱脚断面のまま 80mm 下方に柱脚断面を伸長した。試験体は, 1 シリーズと 2 シリーズそれぞれに, 梁断面 H600 と H400 の 0DN と 80DN を用意し, 計 8 体である(表 2)。80DN 試験体のアンカーボルトは 1 シリーズ 85mm, 2 シリーズ 80mm 伸長し, 微突出ながら外定着としている。

補強の仕様として, 1 シリーズ全ての試験体で下端筋先端に D13 J 形筋(ステッキ筋) L=380mm を取付けた。横補強筋の定着部拘束筋は, 0DN 試験体は最下部を 2 本束ねとし, 80DN 試験体は 2 本を 80mm 間隔で配置した。図 2 に示すように 2 シリーズでは 0DN 試験体の補強として, 梁に近い 2 本のアンカーボルトの定着板上面に, 補強プレート(以降, アンカー PL と呼ぶ)を取り付けた。これは L 型試験体が開く側の負荷荷時に, 圧縮束による力をアンカーボルトが効果的に負担できるようにする目的のものである。基礎梁で下から挿すかんざし筋の施工が難しいため, 補強方法の一つとして試みた。

試験方法は図 3 に示す通り, L 字試験体を 90°傾けてセットし, 柱頭は 3 方向クレビスを介して水平ジ

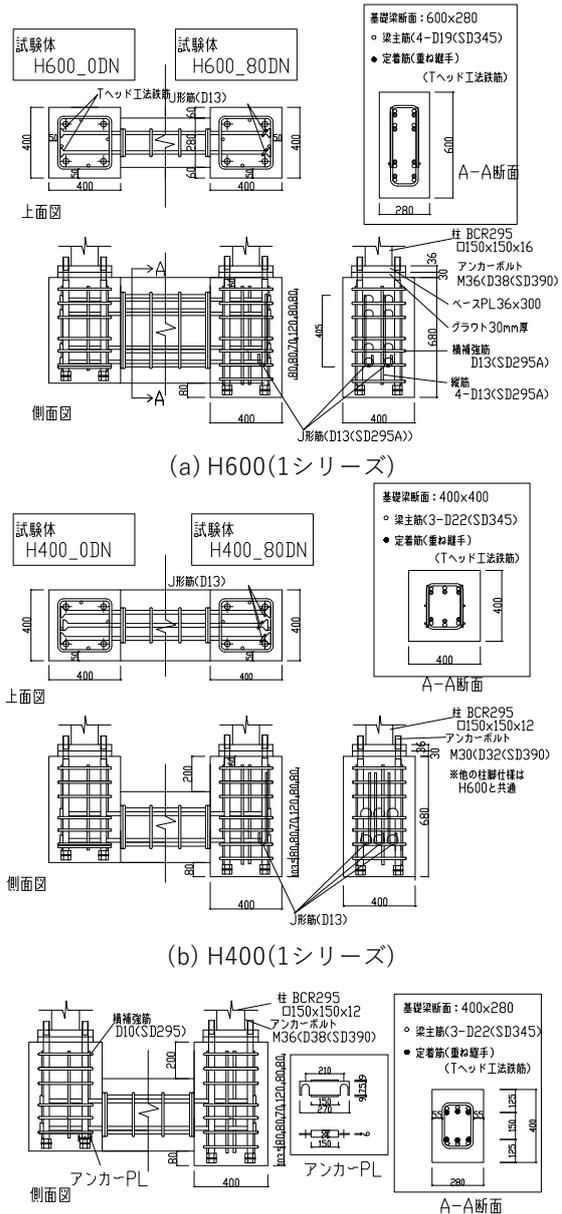


図 2 試験体配筋

表 3 コンクリートの機械的性質

試験体	コンクリート		ベースモルタル	
	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
1シリーズ	H600	29.6	50.9	2.6
	H400		52.4	2.2
2シリーズ	H600	28.0	66.1	2.7
	H400		70	2.6

ヤッキと鉛直ジャッキで支持し, 梁端をクレビスでピン固定とした。載荷は柱頭の水平ジャッキの押し側を正加力として正負交番繰り返し載荷を行った。本試験は柱脚部の定着耐力の確認であるため, 柱脚底部で反力を受けることを嫌い, このような載荷方法をとった。制御は 2 シリーズでは柱頭と梁端のク

レベスを結ぶ斜め変位から層間変形角 R を算出し、層間変形角 $R=5,10,20,30,40(\times 10^{-3}\text{rad})$ を2サイクルずつ繰り返した。1シリーズは柱脚回転角で制御したが、梁側の変形もあり制御がうまくいかなかったため、層間変形角の包絡線で、2シリーズの結果と合わせて示す。

表3にコンクリートの機械的性質を示し、表4に鉄筋および鋼材の機械的性質を示す。

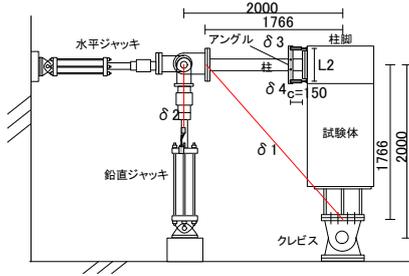


図3 試験方法

表4 鉄筋および鋼材の機械的性質

試験体 シリーズ	部位	試験体	材料	降伏点		仕様
				σ_y N/mm ²	σ_u N/mm ²	
1 シリーズ	アンカーボルト	H600(1)	D38 (SD390)	433	619	M36 転造
		H400(1)	D32 (SD390)	444	624	M30 転造
	Tヘッド工法鉄筋 (梁主筋)	H600(1)	D19(SD345)	392	589	—
		H400(1)	D22(SD345)	370	571	—
	柱脚部横補強筋	共通	D13(SD295)	352	496	溶接鉄筋 (全強)
	柱脚部縦筋	共通	D13(SD295)	352	496	溶接鉄筋 (全強)
	柱口150°×12	H400シリーズ	BCR295	439	474	—
柱口150°×16	H600シリーズ	BSH325	—	—	—	
ベースプレート	共通	SN490B	405	534	PL36×300 ²	
2 シリーズ	アンカーボルト	共通	D38 (SD390)	433	619	M36 転造
		H600(2)	D19(SD345)	373	566	—
	Tヘッド工法鉄筋 (梁主筋)	H400(2)	D22(SD345)	387	580	—
		共通	D10(SD295)	367	512	溶接鉄筋 (全強)
	柱脚部横補強筋	共通	D13(SD295)	350	487	—
	柱脚部縦筋	共通	D13(SD295)	350	487	—
	柱口150°×12	H400(2)	BCR295	406	497	—
柱口150°×16	H600(2)	BSH325	374	544	—	
ベースプレート	共通	SN490B	367	516	PL32×300 ²	

3. 実験結果

表5に試験結果一覧、図4にせん断力-層間変形角関係 (Q_c-R 関係) をそれぞれ示し、最終破壊状況を写真1,2に示す。

破壊形式は表5に示すように、H600試験体では、概ね柱脚アンカーボルト降伏後に最外縁梁主筋の降伏が確認され、最終的にせん断破壊で荷重低下に至った。ただし、2段筋内側の主筋は降伏に至らなかった。試験体 H600_0DN(1)は H600 試験体で唯一主筋降伏に至っていない。試験体 H600(2)の2体は、アンカーボルトと梁主筋の降伏がほぼ同時に起こり、正加力 0.04rad 以降にせん断ひび割れが大きく

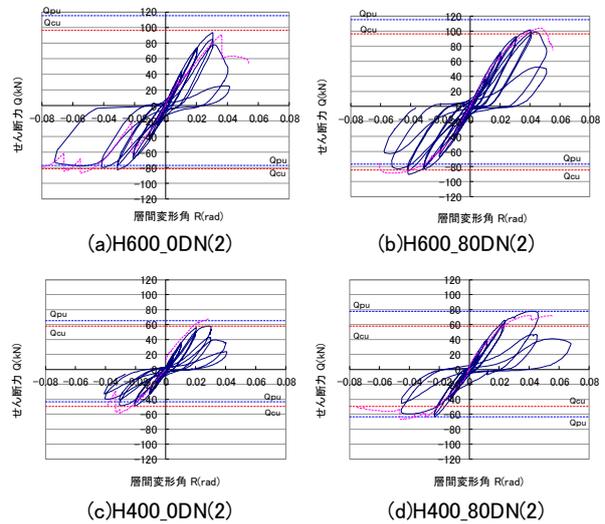


図4 せん断力-層間変形角関係 (Q_c-R 関係)

表5 試験結果一覧

試験体		(計算値(材料実強度))				(実験値)		eQ_{max}/Q_{cu}	$eQ_{max}比$ (80DN/0DN)	eQ_{max}/Q_{cu}	最大耐力比 (2シリーズ /1シリーズ)	最大層間 変形角 R_{80} (rad)	破壊モード ※3
		せん断余裕度 $\lambda p = Q_{pu}/Q_{cu}$	Q_{cu} ※1 (kN)	柱脚耐力 cQ_{cu} ※2 (kN)	梁耐力 cQ_{cu} ※3 (kN)	パネル 耐力 Q_{pu} ※4 (kN)	柱せん断力 eQ_{max} (kN)						
H600_0DN(1)	正加力	1.16	98.4	98.4	105.8	113.9	91.2	0.93	0.93	/	(計測不良)	CY→PU	
	負加力	0.92	-82.5	-86.3	-82.5	-75.9	-87.3	1.06					
H600_80DN(1)	正加力	1.23	98.4	98.4	105.8	121.5	103.9	1.06	1.14	1.06	0.05	CY→BY→ PU	
	負加力	0.98	-82.5	-86.3	-82.5	-81.0	-88.7	1.08	1.02	1.08	-0.06		
H400_0DN(1)	正加力	1.33	56.9	79.4	56.9	76.0	67.7	1.19	1.19	/	-0.07	BY→CY→ PU	
	負加力	1.02	-49.5	-69.0	-49.5	-50.7	-58.8	1.19					
H400_80DN(1)	正加力	1.41	56.9	79.4	56.9	80.4	72.6	1.27	1.07	1.27	-0.05	PU	
	負加力	1.08	-49.5	-69.0	-49.5	-53.6	-66.7	1.35	1.13	1.35			
H600_0DN(2)	正加力	1.20	96.5	96.5	104.3	115.3	93.4	0.97	0.97	/	0.04	CY→BY →PU	
	負加力	0.94	-81.4	-84.7	-81.4	-76.9	-82.7	1.02					
H600_80DN(2)	正加力	1.20	96.5	96.5	104.3	115.3	101.8	1.05	1.09	1.05	0.98	0.04	
	負加力	0.94	-81.4	-84.7	-81.4	-76.9	-90.3	1.11	1.09	1.11	-0.05		
H400_0DN(2)	正加力	1.12	58.0	103.1	58.0	64.9	57.7	1.00	1.00	/	0.85	BY→PU	
	負加力	0.87	-49.6	-89.8	-49.6	-43.3	-48.9	0.99					
H400_80DN(2)	正加力	1.12	58.0	103.1	58.0	64.9	77.8	1.34	1.35	1.34	1.07	0.04	
	負加力	0.87	-49.6	-89.8	-49.6	-43.3	-63.6	1.28	1.30	1.28	-0.04		

※1 $Q_{cu} = \min\{Q_{cu}, Q_{pu}\}$ ※2 $M_u = T_u \cdot d_t + \frac{T_u \cdot D}{2} (1 - \frac{T_u}{N_u})$ 接合部終局耐力: $V_{ju} = \kappa \times \phi \times F_j \times b_j \times D_j$ 正加力: $\kappa_u = 0.6$, 負加力: $\kappa_u = 0.4$ 3)
 ※3 $M_u = 0.9 \cdot d \cdot A \cdot \sigma_y$ 文献3ではd.t.g.lは鉄筋重心間距離であるが、基礎梁はかぶりが大きく ($\phi=0.85$, $b_j=340\text{mm}$ (梁280幅), $D_j=梁318\text{mm}$, $Ab1t=532\text{mm}$ (0DN), 612mm (80DN)) 値が乖離するため0.9dとした。
 ※4 $Q_{pu} = \min\{Q_{puh}, Q_{puv}\}$ ※5 CY:柱脚アンカーボルト降伏, BY:基礎梁主筋降伏, PU:接合部せん断破壊

開き、耐力低下に至った。H400 試験体では梁主筋降伏後、柱脚 M30 アンカーボルト(1 シリーズ)は降伏し、M36 アンカーボルト(2 シリーズ)は弾性であった。

最終的にパネルせん断破壊により、荷重低下に至った。試験体 2 シリーズの H400 試験体 2 体は正加力時の斜めひび割れが大きく開き、耐力低下に至った。また、負荷荷時には、柱脚と梁の圧縮側を繋ぐような円弧状のひび割れが卓越した。

表 5 に示すように、最大耐力 eQ_{max} については、0DN 試験体で柱脚と梁終局耐力の下限值 Q_{cu} を下回る傾向にあり、80DN 試験体についてはすべて Q_{cu} を上回った。80mmDN 試験体と 0DN 試験体の最大せん断耐力 eQ_{max} の比率 (eQ_{max} 比=80DN/0DN) を比較すると、1 シリーズでは 1.02~1.14、2 シリーズでは 1.09~1.35 と耐力は大きくなっており、80mmDN の下方突出による効果が確認された。ただし、H400_80DN(2)の耐力が 1 シリーズと比べて約 3 割大きいことについては、試験体 H400_0DN(2)の最大耐力が試験体 H400_0DN(1)と比べて正負加力時にそれぞれ 15%、17%低下していることによる。これは、2 シリーズでは横補強筋比が 1 シリーズよりも小さく、J 形筋もないためである。一方で試験体 H400_80DN(2)は H400_80DN(1)と比べて正負荷で 1.07、0.95 とほぼ同等であったことから、横補強筋比の影響は 80mmDN の効果により補われている。H400_0DN(2)に取付けたアンカー PL の明確な効果は確認できなかった。

図 5 に eQ_{max}/Q_{cu} とせん断余裕度 λ_p の関係を示す。文献 3 では j_{lg} を主筋重心間距離としているが、本試験体は基礎梁を対象としておりかぶり厚が大きいいため、 j_{lg} を主筋重心間距離とすると Q_{cu} を過小評価してしまうため、ここでは j_{lg} を $0.9d$ とした。図 5 より、靱性指針式に文献 3 の接合部係数(正加力 $\kappa_a=0.6$ 、負加力 $\kappa_a=0.4$)を適用し、概ね安全側に評価できている。

以上より、柱脚を 80mm 下方突出とすることで、 Q_{cu} 以上の定着耐力が確保されることが確認できた。

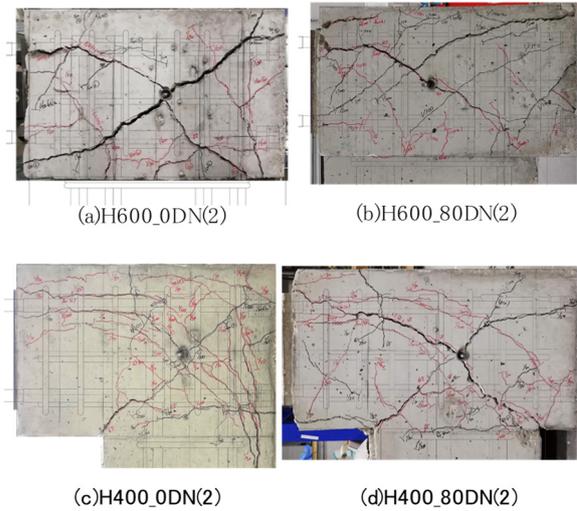


写真 1 最終破壊状況(1 シリーズ)

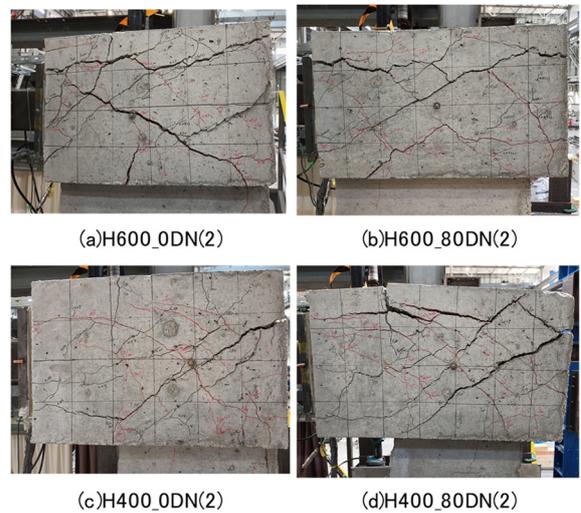


写真 2 最終破壊状況(2 シリーズ)

変形能力について、表 5 に最大耐力の 80%低下時変形角 R_{80} を示す。また、図 6 に耐力が eQ_{max} の 8 割に下がったときの限界層間変形角 R_{80} とせん断余裕度 λ_p との関係 ($R_{80}-\lambda_p$ 関係)を示し、図 7 に R_{80} と横補強筋比 P_{wjh} ($R_{80}-P_{wjh}$ 関係)との関係を示す。試験においては、正加力時に荷重低下に至らず、負加力時に破壊している試験体もあることから、負加力時に着目する。表 5 より、1 シリーズ、2 シリーズそれぞれの 0DN 試験体と 80DN 試験体を比較すると、80DN 試験体が 1 サイクル程度変形能力が大きい傾向にある。一方で、図 7 においては R_{80} とせん断余裕度 λ_p との間には明確な相関はみられなかった。 R_{80} と横補強筋比 P_{wjh} との関係については、負加力時に横補強筋比に比例して R_{80} が大きくなる傾向が

見られ、H400 試験体の 2 シリーズと 1 シリーズの平均値と比較すると、 -0.035rad から -0.059rad へ 1.67 倍に改善した。

4. まとめ

- (1) 露出型柱脚での機械式定着についても、靱性指針式(正加力 $\kappa_u=0.6$ 、負加力 $\kappa_u=0.4$)で、概ね安全側に評価できる。
- (2) 柱脚底 80mm 下方突出により、横補強筋比 $P_{wjh}=0.40\sim 0.84\%$ 、せん断余裕度 $\lambda_p=0.78\sim 1.41$ の場合において、梁および柱脚耐力を上回る耐力が期待できる。

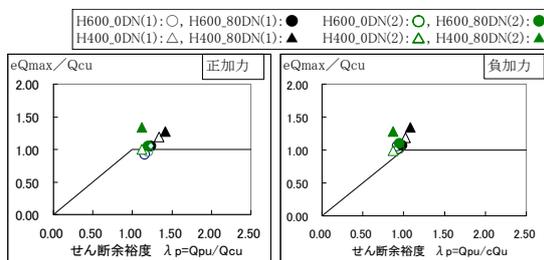


図 5 $Q_{max}/Q_{cu} - \lambda_p$ 関係

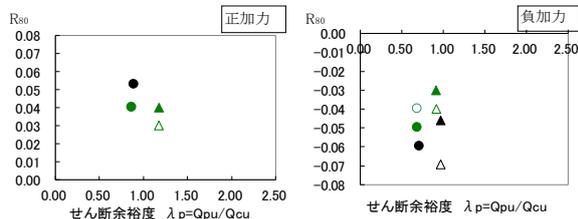


図 6 $R_{80} - \lambda_p$ 関係

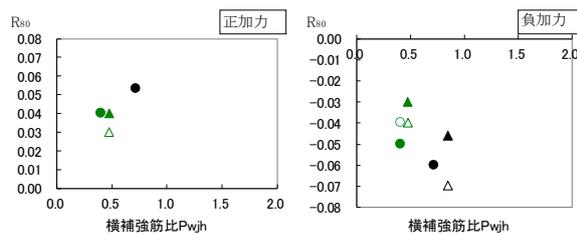


図 7 $R_{80} -$ 横補強筋比 P_{wjh} 関係

今後の課題として、施工性の観点から柱脚底を突出させない工法に改善していきたい。

謝辞

本研究にあたり、柱脚の開発について神戸大学大谷先生および研究室の方々には多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2018
- 2) 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
- 3) 益尾 潔, 井上寿也, 岡村信也: 機械式定着工法による RC 造 T 形および L 形柱梁接合部の終局耐力に関する設計条件, 日本建築学会構造系論文集 590 号, pp. 95-102, 2005 年 4 月
- 4) 益尾 潔, 堂下 航, 足立 将人, 田川 浩之: 機械式柱主筋外定着方式による最上階 RC 造 L 形接合部の構造性能, 日本建築学会構造系論文集 697 号, pp. 411-418, 2014 年 3 月
- 5) 田川 浩之, 堂下 航, 足立 将人 他: 機械式柱主筋・外定着による RC 造最上階 T 形, L 形柱梁接合部の実験, GBRC vol.36, No.1, pp.32-39, 2011.1
- 6) 益尾 潔, 足立 将人: 機械式定着による柱主筋定着耐力ならびに T 形, L 形部分架構の変形性能, コンクリート工学年次論文集, pp.343-348, vol.36, No.2, 2009

執筆者紹介



市岡 大幸
博士 (工学)

skye3 はまだ発展途上だと考えているので、特に現場が楽になるような改善改良に努めていきたい。