

論文 注入式あと施工梁主筋の定着性能に関する研究

井手 章太*1・姜 優子*2・毛井 崇博*3

要旨: 無機系および有機系注入式接着剤により、梁主筋を柱にあと施工定着した場合の曲げ定着性能について、ト型柱梁接合部を用いて実験で比較検討した。梁主筋を U 字型定着した一体打ちと比較して、同等の耐力・変形性能であったが、あと施工試験体は、柱梁接合部において損傷が大きくせん断変形も大きいことが確認された。また、柱際のへりあきを考慮して、定着長さを変えた部分要素試験を行った結果、基本平均付着強度は、建築学会各種合成構造設計指針式に比べて安全側であった。

キーワード: 注入式あと施工、梁主筋、柱梁接合部、定着性能、無機系樹脂、有機系樹脂

1. はじめに

近年、建築物の用途転換や保存再生するリノベーションやコンバージョンが行われている。さらに推進するためには、構造躯体そのものも対処する必要がある。その具体的な方法として、天井高さの増大や梁や柱の補強・撤去・増設等が考えられる。梁を増設(新設)する場合、梁のせん断設計は、コンクリート強度やせん断補強筋の増大等に対応は容易であるが、曲げ設計では梁主筋の柱または柱梁接合部への定着が大きな課題となる。

著者らは、注入式有機系接着剤を用いて、基礎に梁主筋(D13)をあと施工した場合の実験を行い、一体打ち試験体(U字型定着、定着長 $l=37d$, d :鉄筋径)と比較検討した結果、定着長 $20d$ (注入式なので、定着長 l =有効埋込長さ $le=20d$)では、一体打ち試験体と同等の耐力・変形性能であったが、定着長 $10d$ では、定着性能が不十分で変形性能が劣ることを確認している^{1),2)}。

本研究では、梁主筋を既存柱へ定着する場合を想定し、あと施工梁主筋を用いてト型柱梁接合部の性状を把握するための実験を行なった。施工の信頼性が高いミキシング式カートリッジ型の有機系および無機系の接着剤(樹脂)を用い、注入式で施工した。梁主筋の定着の場合、定着長を長く確保する必要があるために、カプセル式に比較して長く定着できる注入式を用いた。さらに、柱際の梁主筋定着のへりあきを考慮した部分要素実験を行い、無機系樹脂を用いて定着長さを $7\sim 20d$ に変化させて、耐力・変形性能およびひび割れ性状を調べた^{3),4)}。

2. ト型柱梁接合部における定着性能確認実験

2.1 試験体

各試験体の一覧を表-1、材料試験結果を表-2に示す。定着長さを $20d$ としたU字型定着の一体打ち試験体

[UJ-20d]と、柱中心線を超えた定着長さ $15d$ の有機系及び無機系樹脂を使用したあと施工試験体[AJ-O15d][AJ-I15d]の計3体の梁主筋定着性能と変形性能を比較検討した。試験体の形状および配筋図を図-1に示す。

表-1 試験体一覧

試験体名	施工方法	定着方法	定着長さ le
UJ-20d	柱梁一体打ち	U字型定着	20d (250mm)
AJ-O15d	あと施工(有機系)	直線定着	15d (195mm)
AJ-I15d	あと施工(無機系)		

表-2 材料試験結果 [N/mm²]

コンクリート	部位		圧縮強度	引張強度
	一体打ち	柱・梁	27.5	2.59
あと施工	柱			
接着剤	種類		圧縮強度	試験方法
	有機系接着剤		109.0*	JIS K 7181
	無機系接着剤		46.0	JIS A 1108
鉄筋	種別	用途	降伏強度	引張強度
	D13 (SD295)	柱主筋	323	462
	D13 (SD345)	梁主筋	347	501
	D6 (SD295)	帯筋	277	401
あばら筋		277	501	

*カタログ値

一体打ち試験体[UJ-20d]は、柱を梁側から、梁を小口面から打設した。あと施工試験体[AJ-O15d]、[AJ-I15d]は、同様に柱を梁側から打設した後、[AJ-O15d]は材齢8日で穿孔($\phi 16$)し、エポキシ系樹脂を用いて梁主筋を定着させ、[AJ-I15d]は材齢13日で穿孔($\phi 20$)し、特殊モルタルを用いて梁主筋を定着させた。その後、梁の型枠を設置し、両試験体の梁の打設は、材齢26日に梁小口面から行った。

2.2 加力および測定方法

加力装置および変位計取付概要を図-2に示す。曲げ破

*1 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻 (学生会員)

*2 北九州市立大学 建築デザイン学科 EA (正会員)

*3 九州工業大学大学院 建設社会工学科教授 博士 (正会員)

壊先行になるように加力高さを 600mm とした。柱梁接合部におけるコア内部にパイ型変位計を対角線上に取り付け、柱梁接合部のせん断ひずみ γ_d を測定した。図-3 にパイ型変位計取付位置詳細を示す。パイ型変位計は、U字型定着折り曲げ部内と柱主筋間で測定した。図-4 に接合部のせん断力 V_{ju} とせん断ひずみ γ_a を示す。

加力は正負交番载荷で、 $\pm 3\text{kN}$ 加力をした後、部材角 $R = \pm 0.5/1000\text{rad}$ で繰り返し载荷を行い、部材角 $R = \pm 1, \pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 12/1000\text{rad}$ で各々2回ずつ繰り返し载荷を行った。その後、正方向に $R = 20/1000\text{rad}$ まで加力し除荷した後、正方向に $R = 40/1000\text{rad}$ まで载荷し実験を終了した。

軸力 N が大きい時よりも小さい時の方が定着性能が

厳しいことが予想されることと、試験体の設置も考慮し、軸力は $50\text{kN}(N/bD = 0.56\text{N/mm}^2)$ に設定した。

加力点高さ位置(柱芯より $L = 750\text{mm}$)で両側面の2ヶ所で全体変形 δ を測定した。全体変形 δ を L で除した値を試験体の部材角 R とした。更に、梁端部から 50, 150, 300mm の位置で N 面と S 面で各区間の伸び出し量と相対変形量を測定した。

2.3 荷重 P-部材角 R 関係および破壊経過

実験で得られた各試験体の荷重 P-部材角 R 関係を図-5 に、各試験体の包絡線の比較を図-6 に示す。各試験体の正側载荷時での W 面の最終破壊性状を写真-1 に示す。

初期剛性は、[UJ-20d] よりも [AJ-O15d], [AJ-I15d]

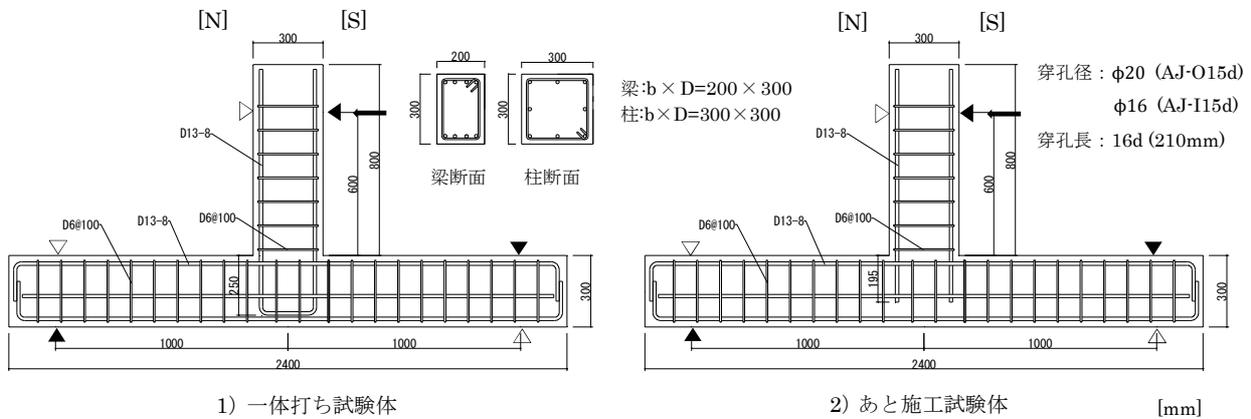


図-1 試験体形状寸法

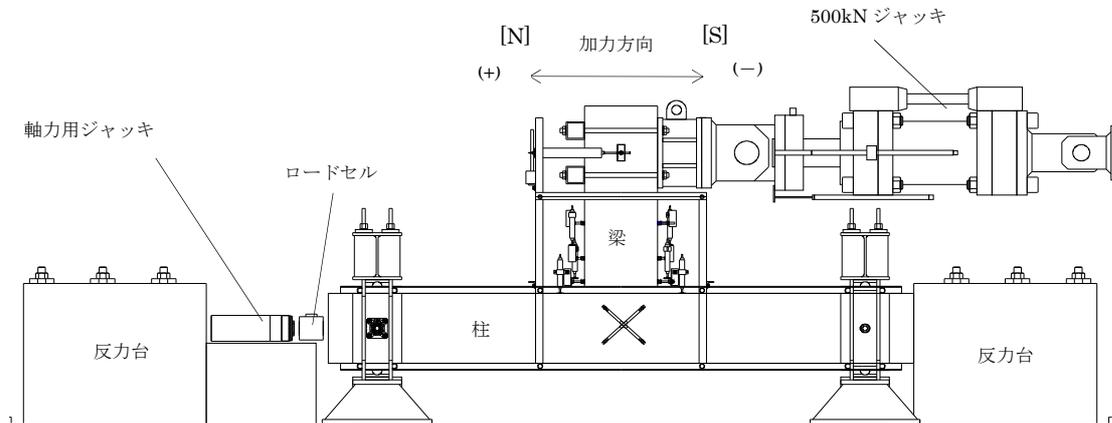


図-2 加力装置および変位計取付概要

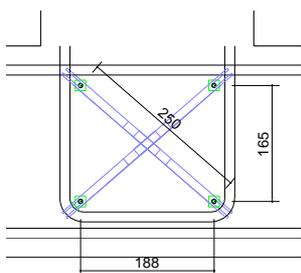


図-3 パイ型変位計取付位置詳細

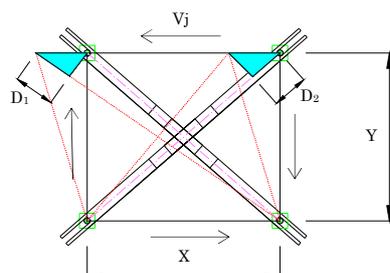


図-4 接合部せん断力とせん断ひずみ

・接合部せん断力 V_j

$$V_j = T - V_c$$

ここで

$$V_c = 2(M_b L / L) / 2H$$

$$T = M_b / j$$

L : 梁スパン長さ(750mm)

L : 梁内法長さ(600mm)

M_b : 梁端部曲げモーメント

H : 梁中央から柱反力点

までの長さ(1000mm)

・せん断ひずみ γ_a

$$\gamma_a = \sqrt{(X^2 + Y^2) / 2XY} * (D_1 + D_2)$$

ここで

X : 変位計取付間水平距離

(188mm)

Y : 変位計取付間鉛直距離

(165mm)

D_1, D_2 : パイゲージから

得た斜め変位

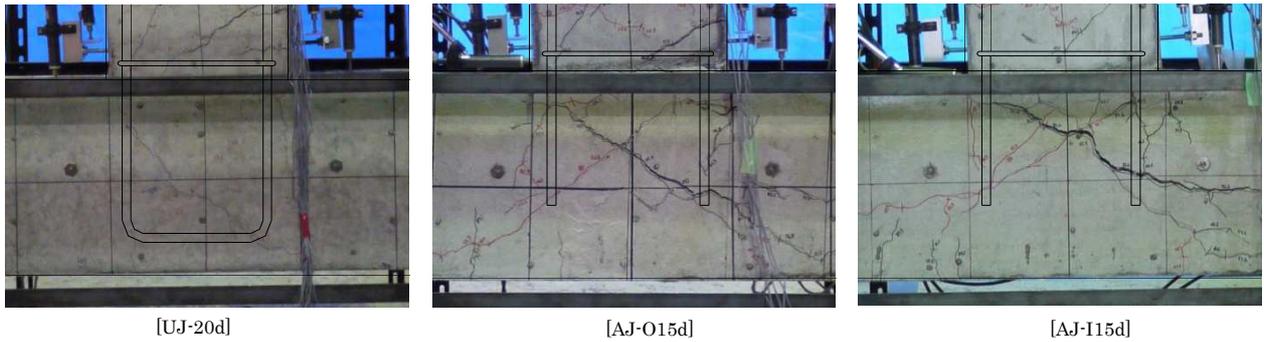


写真-1 最終破壊状況 (R = 40 / 1000 rad)

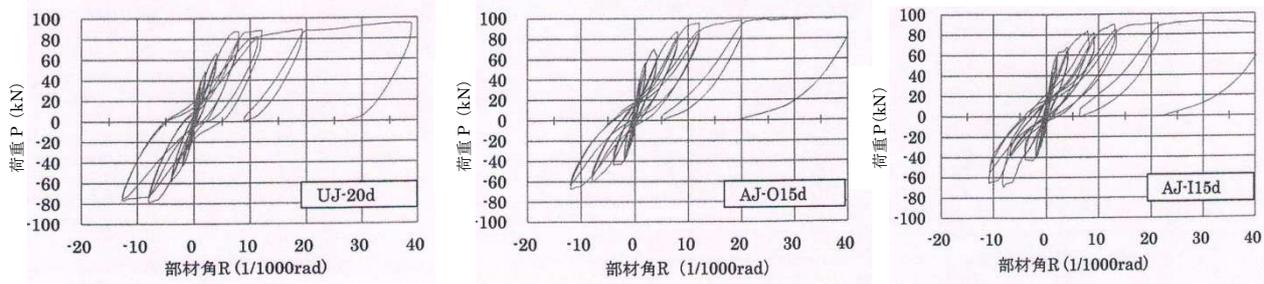


図-5 荷重 P—部材角 R 関係

の方が高かった。しかし、[AJ-O15d] および[AJ-I15d] では、柱部と接合部のひび割れの増加に伴い、4.0~8.0 /1000 rad にかけて、剛性の低下がみられた。

[UJ-20d], [AJ-O15d], [AJ-I15d] は、3体共にほぼ同様の破壊経過を示した。梁部曲げひび割れ(P=38.1~43.3kN)、梁部せん断ひび割れ(P=44.1~67.5kN)、柱の曲げひび割れ(P=40.4~65.9kN)、接合部せん断ひび割れ(P=65.9~86.6kN)の順に発生した。梁主筋が降伏(P=80.5~87.1kN)した後、梁が曲げ破壊して最大荷重(P=92.9~100.3kN)となった。柱梁接合部の学会式によるせん断耐力⁵⁾時の梁荷重は、137.4kNであることや、荷重変位曲線からも曲げ破壊したと推定される。なお、各強度は、接合部せん断ひび割れを除いて一体打ち試験体の方が低い。

2.4 接合部の破壊性状とせん断ひずみ

各試験体の正加力時の接合部せん断力 V_j とせん断ひずみ γ_d の関係を図-7 に示す。

写真-1 に示す柱梁接合部のひび割れ状況からもわかるように、[UJ-20d] はせん断ひび割れ

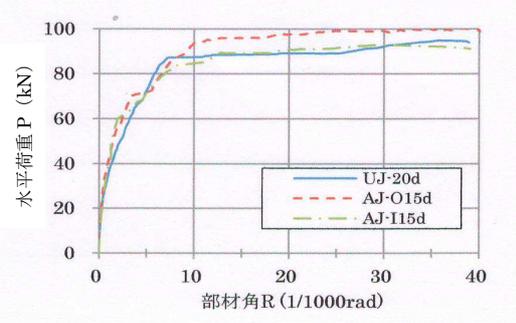


図-6 各試験体の包絡線

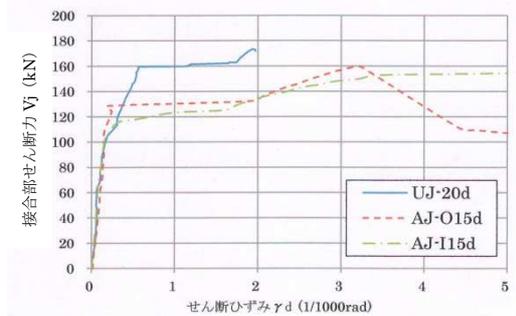


図-7 接合部せん断耐力 V_j —せん断ひずみ γ_d 関係

表-3 諸強度の実験値と算定値の比較

発生ひび割れ		UJ-20d				AJ-O15d				AJ-I15d			
		実験値		算定値		比率		実験値		算定値		比率	
		荷重 P kN	部材角 R 1/1000 rad	荷重 P kN _o	P/P _o	荷重 P kN	部材角 R 1/1000 rad	荷重 P _o kN	P/P _o	荷重 P kN	部材角 R 1/1000 rad	荷重 P _o kN	P/P _o
梁	曲げひび割れ nP_{Mer}	38.1	1.13	29.6	1.29	41.1	1.03	29.1	1.41	43.3	1.21	29.1	1.49
	せん断ひび割れ nP_{Qcr}	44.1	1.98	58.9	0.75	59.1	3.97	58.0	1.02	67.5	4.03	58.0	1.16
	曲げ降伏荷重 nP_{My}	80.5	5.95	75.3	1.07	87.1	8.05	75.3	1.16	81.5	7.40	75.3	1.08
柱	曲げひび割れ cP_{Mer}	55.1	2.72	46.3	1.19	65.9	4.01	46.3	1.42	40.4	1.01	46.3	0.87
	せん断ひび割れ P_{jc}	86.6	8.01	46.4	1.87	65.9	4.01	46.4	1.42	67.5	4.03	46.4	1.45
接合部	せん断耐力 P_{ju}	-	-	137.4	-	-	-	137.4	-	-	-	137.4	-
	最大荷重 P_{max}	94.9	35.6	98.6	0.96	100.3	38.45	98.6	1.02	92.9	30.12	98.6	0.94

付着耐力 p_{a3} は、終局耐力として低減係数 $\phi=1.0$ で求めた。試験体[A13-7d, 10d, 15d]では定着筋が降伏せずに変位 $\delta=0.6\sim 2\text{mm}$ において最大荷重に達し付着破壊を生じた。[A13-20d]は、降伏耐力 $p_{a1}=98.8\text{kN}$ に達した後も荷重は増加し続けた。[A13-20d-L]は変位 $\delta=4\text{mm}$ で最大荷重に達し付着破壊となったが、[A13-20d-R]はその後荷重は増加し、定着筋破断の恐れがあったため $P=110\text{kN}$ において加力を中止した。各試験体(10d, 15d, 20d)とも最大荷重 P_{max} が学会式 7) の付着耐力 p_{a3} (表-5 脚注参照) を上回っている。

3.4 破壊性状

代表的な[A13-10d-R], [A13-15d-L], [A13-20d-L] の3体について、最終破壊時におけるひび割れ破壊性状を図-10 に示す。

[A13-10d-R] 最大荷重 $P_{\text{max}}=43.5\text{kN}$ ($\delta=0.62\text{mm}$) において定着筋より放射状にひび割れが発生した (①)。その後、 $P=35.8\text{kN}$ ($\delta=1.21\text{mm}$) において側面横ひび割れ (②) が発生し、定着筋の抜け出し増加が見られ付着破壊に至った。なお、最大荷重時の放射状ひび割れの最大幅は 0.1mm であった。

[A13-15d-L] 荷重 $P=57.0\text{kN}$ ($\delta=1.49\text{mm}$) において放射状初ひび割れが発生した (①)。その後、放射状ひび割れが順次発生し、最大荷重 $P_{\text{max}}=73.6\text{kN}$ において側面横ひび割れ (②) が発生した。徐々に荷重および変位の減少が見られ付着破壊に至った。最大荷重時の放射状ひび割れの最大幅は 0.6mm であった。

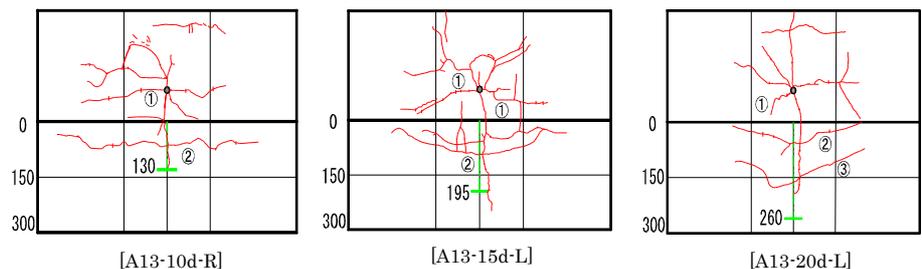
[A13-20d-L] 荷重 $P=48.1\text{kN}$ ($\delta=1.04\text{mm}$) において放射状初ひび割れが発生した (①)。その後、 $P=72.0\text{kN}$ ($\delta=1.50\text{mm}$) まで放射状ひび割れが順次発生した。この時の放射状ひび割れの最大幅は 0.1mm であった。その後、 $P=84.3\text{kN}$ において側面横ひび割れ (②) が発生し、定着筋が降伏点に達した。最大荷重 $P_{\text{max}}=104.5\text{kN}$ において、側面深さ 150mm 近傍でさらに側面横ひび割れ (③) が発生した。

3.5 付着強度の比較

表-5 に実験値で得られた付着強度と算定値の比較を示す。同表においては、学会式 7) に準じて強度算定用埋込み長さ l_{ce} ($=l_e - 2d$) と有効埋込み長さ l_e で求めた

付着強度 τ_a , τ_{a1} を求めている学会式 7) に示されている接着系アンカーの基本平均付着強度 τ_{bavg} は注入式/無機系が示されていないので、有機系の $\tau_{\text{bavg}}=7\sqrt{(\sigma_B/21)}$ (σ_B : コンクリート圧縮強度) を用いて算定した。

あと施工アンカー打設位



置では、10d 試験体においては、[U]と[D]の τ_a は倍半分の差があるが、15d 試験体では、約 20% ほどの差であった。定着長が短い場合は、コンクリートの打設方向の影響を受けやすいことが推定される。へりあきあり試験体

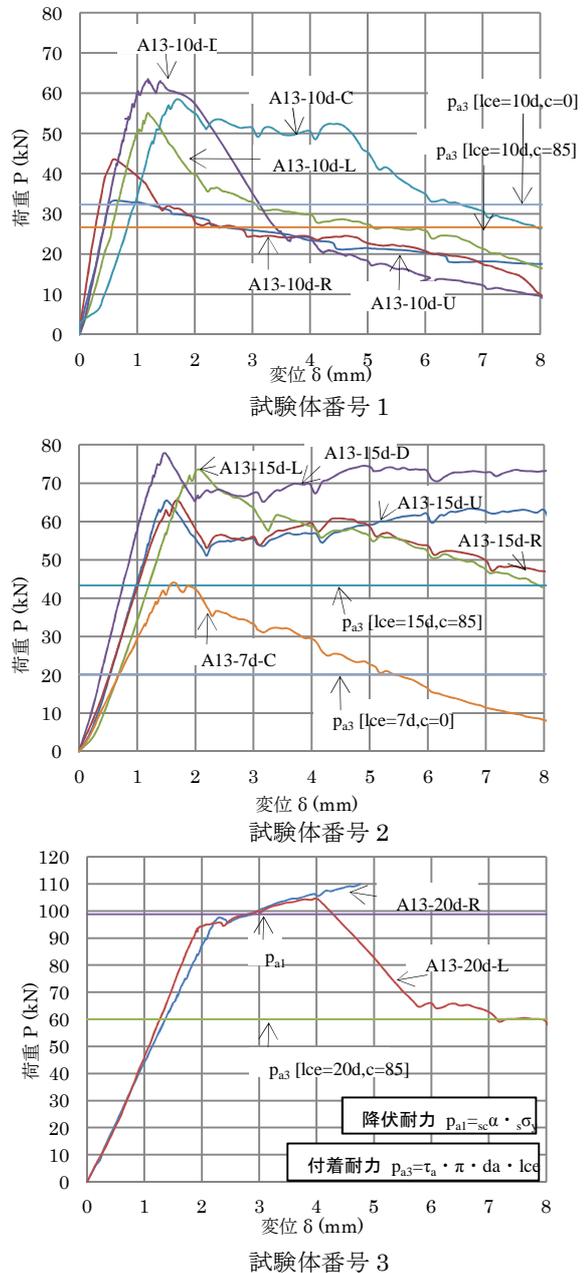


図-11 荷重 P-変位 δ 関係

図-12 ひび割れ破壊性状

表-5 実験値と算定値の比較

試験体名	実験値						へりあきを考慮した 基本平均付着強度 $\tau_{bavg} = \tau_a / \alpha_1$ N/mm ²		算定値				
	最大荷重 Pmax kN	変位 δ mm	付着強度 $\tau_a * 1$ N/mm ²	付着強度 $\tau_a * 2$ N/mm ²			付着強度 τ_a N/mm ²	付着耐力 pa3 kN	降伏耐力 pa1 kN	Pmax Pa3			
A13-7d-C	44.0	1.648	16.6	16.6	11.8	11.8	16.6	16.6	7.6	20.2	98.8	2.18	2.18
A13-10d-C	58.5	1.693	13.8	13.8	11.0	11.0	13.8	13.8		32.2		1.81	1.81
A13-10d-U	33.2	0.569	7.8	11.5 (平均)	6.3	9.2 (平均)	9.4	13.9 (平均)	6.3	26.7	98.8	1.24	1.83 (平均)
A13-10d-R	43.5	0.618	10.2		8.2		12.4						
A13-10d-L	55.0	1.176	12.9		10.3		15.7						
A13-10d-D	63.5	1.188	15.0		12.0		18.1						
A13-15d-U	65.5	1.504	9.5		8.2		11.5						
A13-15d-R	65.5	1.671	9.5	8.2	8.9	11.5	12.4	12.4 (平均)	43.3	98.8	1.51	1.62 (平均)	
A13-15d-L	73.6	2.059	10.7	9.2	12.9								
A13-15d-D	77.8	1.459	11.3	9.8	13.6								
A13-20d-R	110.0	4.763	11.5	11.2	10.3	10.1	13.9	13.6	60.0	98.8	1.83	1.79	
A13-20d-L	104.5	4.013	10.9	9.8	9.8	10.1	13.2	13.2			1.74	1.74	

実験値付着強度計算式
*1: $\tau_a = Pmax / (\pi \cdot d \cdot lce)$
*2: $\tau_a = Pmax / (\pi \cdot d \cdot l_e)$
 $\tau_{bavg} = \tau_a / \alpha_1$
($\alpha_1 = 0.827$)

日本建築学会「各種合成構造設計指針・同解説」各種アンカーボルト設計指針(注入方式/有機系)⁷⁾
 $pa_3 = \tau_a \cdot \pi \cdot d \cdot lce$ $pa_1 = \sigma_y \cdot s_0$
pa3: 接着系アンカーボルト付着耐力(kN)
pa1: 接着系アンカーボルト降伏耐力(kN)
 s_0 : アンカーボルト断面積(mm²)
 σ_y : アンカーボルト規格降伏点強度(N/mm²)

$\tau_{bavg} = 7 \sqrt{\sigma_B / 21}$
 $\tau_a = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \tau_{bavg}$
 $\alpha_1 = 0.5(c/l_e) + 0.5 = 0.827$ ($l_e \geq 10d, l_e = 10d$)
 $\alpha_2 = \alpha_3 = 1.00$

τ_{bavg} : 基本平均付着強度 (N/mm²)
 τ_a : 付着強度 (N/mm²)
 α_n : へりあきによる付着強度の低減係数
d: アンカーボルト径 (mm)
lce: 強度算定用埋込み長さ lce = l_e - 2d (mm)

(c=85)において、へりあきを考慮して求めた平均付着応力度 $\tau_{bavg} = \tau_a / \alpha_1$ は総じて 14.1N/mm² (8.7~16.8√(σB/21)) であり、学会の基本平均付着強度よりも大きな値を示した。学会の算定式 pa3 に対して、実験値は 1.2~2.4 倍であり、学会式⁷⁾ は安全側の評価であった。なお、ト形柱梁接合部における鉄筋 1 本の降伏耐力は、44.0kN であり、15d 以上の試験体においては、放射状初ひび割れ荷重 48.1kN よりも小さかった。放射状初ひび割れ荷重から鉄筋の降伏荷重を求めると、 $\sigma_y = 378$ N/mm² であり、一般の鉄筋では、降伏していることがわかる。

15d 定着した無機系ト形柱梁接合部試験体では、曲げ降伏荷重算定値 Py=81.5kN に対して、接合部せん断ひび割れ発生荷重 (Pjc=67.5kN) の方が低く、部分要素実験で十分な定着強度があっても実際の部材に適用する場合、ひび割れ性状については、注意が必要である。

4. まとめ

(1) ト形柱梁接合部試験において、一体打ち U 字型定着試験体と接着系あと施工梁主筋 (15d 定着) を用いた試験体では、耐力および変形性能に大きな相違は見られなかった。あと施工梁主筋の抜け出しも特に見られなかった。ただし、接着系あと施工梁主筋の付着強度が高いためもあり、一体打ちに比べて接合部のせん断ひび割れが早く発生し、接合部の損傷・せん断変形が大きかった。

(2) 注入式無機系部分要素試験より、学会式⁷⁾ における注入式有機系基本平均付着応力 τ_{bavg} に対して、定着長 15d では 1.5~1.8 倍であり、安全側の評価であった。埋

込み長さが長ければ、埋込み位置による付着耐力のばらつきが少ないことから、十分な埋込み長さが必要ながわかる。

(3) 部分要素試験体では、定着長 15d 以上あれば、一般の鉄筋が降伏する前にひび割れが発生することはなかったが、ト型接合部試験体では、鉄筋が曲げ降伏する前に柱梁接合部にひび割れが発生した。部分要素試験から実際の部材に適用する場合には、ひび割れ性状が違うことに注意が必要である。

謝辞 樹脂系あと施工アンカーに関しては、HILTI(株) および住友大阪セメント(株) に御協力頂いた。本研究において、修了生の浦田義大氏、卒業生の佐々木雄規氏、山口隼人氏から御協力頂いた。

参考文献

- 1) 黒木康平, 浦田義大, 毛井崇博: あと施工梁主筋の定着に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 50 号構造系, pp.489-492, 2011.3
- 2) 浦田義大, 毛井崇博: あと施工梁主筋の定着に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 構造IV, pp.633-634, 2011.8
- 3) 佐々木雄規, 加藤航, 井手章太, 姜優子, 毛井崇博: あと施工梁主筋の柱定着性能に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 52 号構造系, pp.513-516, 2013.3
- 4) 山口隼人, 井手章太, 毛井崇博: 無機系あと施工アンカーのへりあきを考慮した付着強度に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 52 号構造系, pp.509-512, 2013.3
- 5) 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, 2008.6
- 6) 日本建築学会: RC 構造計算規準・同解説, 2010.2
- 7) 日本建築学会: 各種合成構造設計指針・同解説, 第 4 編各種アンカーボルト設計指針, 2010.11