

論文 機械式定着工法を用いた T 字形接合部の耐力と変形性能

沼田 卓也^{*1}・小杉 雅男^{*2}・隈澤 文俊^{*3}・大和田 義正^{*4}

要旨：柱頭柱主筋を機械式定着させた T 字形接合部が，在来型 180 度折り曲げフック定着させたものに比較し，耐力・変形性能・破壊性状など力学的諸性状において劣ることがないように，かんざし筋による接合部補強の可能性を実験的に検討した。かんざし筋は梁のせん断補強筋と同間隔で配筋した径の異なる 2 種類(梁のせん断補強筋比に換算して $p_w=0.21\%$, 0.85% に相当)で，いずれの場合も全体変形角にして 1/30rad.程度まで，最大耐力の 80%を維持した。しかし，機械式定着を用いる場合，ひび割れの発生・伸展の抑制に対して補強効果を得るには， $p_w=0.2\%$ 相当程度のかんざし筋の配筋が必要である。

キーワード：RC 造梁柱接合部，柱主筋機械式定着

1. はじめに

近年，RC 構造物の高層化に伴い，施工の合理化を可能とする機械式定着工法の施工例が増えつつある一方，中高層 RC 構造物のセットバックした部分の最上部梁・柱接合部に太径鉄筋を配筋した T 字形接合部の力学的性状についての研究報告はあまり多くないのが実情である。

これまでに，この様な T 字形接合部を想定した柱頭柱主筋の 180 度折り曲げフックによる在来型定着工法とプレート付ナットを設けた機械式定着工法の比較検討を目的とした加力実験が行われ¹⁾，その結果，在来型定着工法とは耐力・変形性能において差は見られないものの，機械式定着による接合部には特徴的な破壊状況が認められる。その破壊状況とは，柱主筋の押し込み時にプレート付近にひび割れが発生し，それが梁上端筋に沿って梁に伸展するというものである。

そこで，このプレート付ナットを柱頭柱主筋の定着に使用した T 字形接合部試験体の接合部をかんざし筋を用いて補強したシリーズに対する加力実験を実施した。

この実験はかんざし筋の径をパラメータとしており，機械式定着における力学諸性状の維持，かん

ざし筋を配筋することによる補強の有効性の検討を目的としている。

2. 試験体概要

試験体は中高層 RC 構造物の最上部梁・柱接合部を想定した縮尺約 2/3 の T 字形接合部 4 体で，柱頭曲げ降伏先行型である。試験体 TU-1 は柱主筋を在来型 180 度フック定着とし，残り 3 試験体は柱主筋を全てプレート付ナット定着とした TPN シリーズである。主筋の鉛直投影長さは試験体 TU-1 では $310\text{mm}(=19d_b)$ (d_b :公称直径)，TPN シリーズ試験体では梁せいの 3/4(300mm)²⁾とした。

また，試験体 TPN-2 ,TPN-3 は TU-1 の柱主筋

表 - 1 使用材料特性

鉄筋	降伏強度	引張強度	ヤング係数	伸び率
SD390	N/mm ²	N/mm ²	$\times 10^5 \text{N/mm}^2$	%
主筋	*1 441.5	662.2	1.91	23.2
D16	*2 447.1	657.8	1.94	17.7
せん断補強筋	*1 368.1	529.9	1.95	19.8
D10	*2 363.7	498.8	1.79	18.6
かんざし筋	*1 360.9	478.5	2.12	20.0
D13	*2 446.9	586.8	1.97	15.8
コンクリート	圧縮強度	ひずみ	ヤング係数	ポアソン比
Fc 30	N/mm ²	%	$\times 10^4 \text{N/mm}^2$	
	*1 28.1	0.20	2.66	0.16
	*2 26.9	0.16	2.89	0.19

注)*1 TU-1 ,TPN-1 ,*2 TPN-2 ,TPN-3
ひずみ 圧縮強度時ひずみ度

*1 芝浦工業大学大学院 建設工学専攻 修士課程 (正会員)
*2 (株)堀江建築工学研究所 工修
*3 芝浦工業大学 工学部建築工学科 助教授 工博 (正会員)
*4 芝浦工業大学 工学部建築工学科 助教授 工修 (正会員)

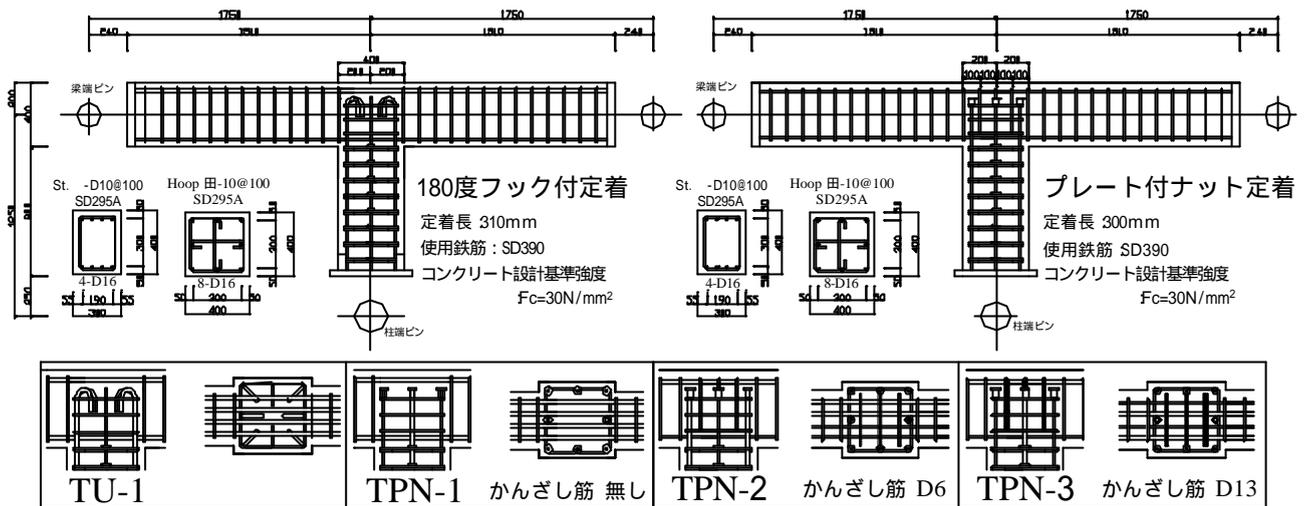


図 - 1 試験体の配筋および接合部の配筋詳細

定着を機械式定着とした TPN-1 の接合部をかんざし筋 D6 ,D13(梁のせん断補強筋比に換算して $p_w=0.21\%$, 0.85% に相当)をせん断補強筋と同間隔で配筋することによって補強している。表 - 1 に使用材料特性を、図 - 1 に各試験体の配筋状況と接合部配筋詳細を示す。

3. 実験方法

载荷には図 - 2 に示す試験装置を用いた。接合部の水平移動を拘束した状態で梁端に鉛直変位を強制し、両梁端ピン位置で支持された治具から計測した柱脚ピンの相対水平変位により全体変形角を定義した。

大変形時には梁端の上下方向の移動量が大きくなり、水平方向载荷用アクチュエータの軸線が接

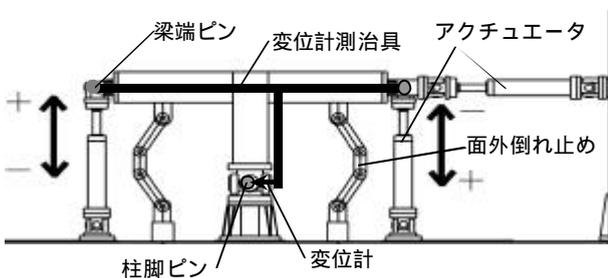


図 - 2 加力装置図

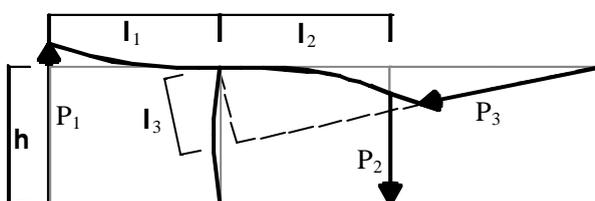


図 - 3 接合部の柱モーメントの概念図

合部の中心からずれることによって生じる付加モーメントの影響が無視できない(図 - 3 参照)ものとなるため、水平方向アクチュエータの荷重によるモーメント増分を加味し、式(1)により試験体耐力を定義する。

$$\left. \begin{aligned} \text{柱モーメント} \quad M &= P_1 I_1 + P_2 I_2 + P_3 I_3 \\ \text{柱せん断力} \quad Q &= M / h \end{aligned} \right\} (1)$$

(記号は図 - 3 参照)

なお、アクチュエータの軸線移動量の計測を試験体 TPN-3 についてのみ実施したため、このデータと全体変形角との関係を同様の変形性状を示した他の試験体にも適用し、耐力を算定した。

加力は全体変形角 $R=1/800\text{rad}$ で 1 回、 $1/400$ 、 $1/200$ 、 $1/133$ 、 $1/100$ 、 $1/67$ 、 $1/50$ および $1/25\text{rad}$ で各 2 回の正負繰返し载荷とした(図 - 4)。

接合部への埋込みボルトにより接合部のせん断変形、梁および柱の全体変形を、ひずみゲージにより主要鉄筋のひずみ度を測定した。

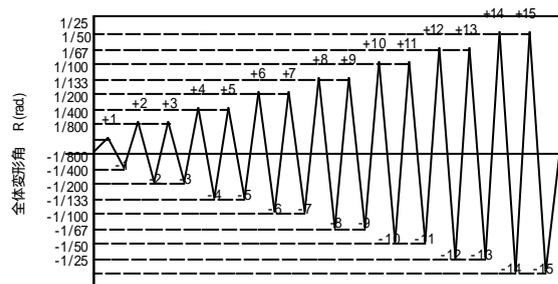


図 - 4 载荷スケジュール

表 - 2 ひび割れ状況

	TU-1	TPN-1	TPN-2	TPN-3
R=±1/200	・接合部せん断ひび割れ 発生	・接合部せん断ひび割れ 発生 ひび割れ 梁に伸展	・接合部せん断ひび割れ 発生 ひび割れ 梁に伸展	・接合部せん断ひび割れ 発生 ひび割れ 梁に伸展
R=±1/133	ひび割れ 梁に伸展 ひび割れ の上部に 45度のひび割れ? 発生 ひび割れ 梁に伸展	ひび割れ の上部に 45度のひび割れ? が発生 ひび割れ 梁に伸展	ひび割れ の上部に 45度のひび割れ? が発生 ひび割れ 梁に伸展	ひび割れ の上部に 45度のひび割れ? 発生 ひび割れ 梁に伸展
R=±1/100		ひび割れ さらに梁を伸展	ひび割れ がさらに梁を伸展	ひび割れ がさらに梁を伸展
R=±1/67	・柱曲り降伏 ・接合部ひび割れ集中	・柱曲り降伏 ひび割れ が繋がる ひび割れ さらに梁を伸展 接合部ひび割れ集中	・柱曲り降伏 ひび割れ が繋がる ひび割れ さらに梁を伸展 接合部ひび割れ集中	・柱曲り降伏 接合部ひび割れ集中
R=±1/50	ひび割れ さらに梁を伸展 ・接合部コンクリートに 若干のはらみ出し発生	・接合部せん断破壊 ・接合部コンクリートに 大きなはらみ出しが発生	・接合部せん断破壊 ・接合部コンクリートに はらみ出しが発生	・接合部せん断破壊 ひび割れ が繋がる ひび割れ さらに梁を伸展 ・接合部コンクリートに はらみ出しが発生
R=±1/25	・接合部せん断破壊	・接合部コンクリートが更ごら み出し、コンクリート一部剥離	・接合部コンクリートが更ごら み出し、コンクリート一部剥離	・接合部コンクリートが更ごら み出し、コンクリート一部剥離

4. 実験結果

4.1 試験体の破壊状況

各試験体のひび割れ状況を表 - 2 にまとめる。また、表中の丸数字に対応する全試験体共通のひび割れ模式図を図 - 5 に示す。

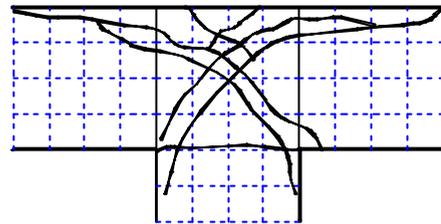


図 - 5 ひび割れの模式図

TPN シリーズではいずれの試験体においても、柱主筋の押し込み時にプレート付近にひび割れが発生し、それが と繋がり梁上端筋に沿って梁に 400mm 以上伸展した。TPN-3 では と が TPN-1 ,TPN-2 より2 サイクル遅れて発生・伸展したことが大きな相違点である。TU-1 では同位置にと を観測したが顕著には見られなかった。

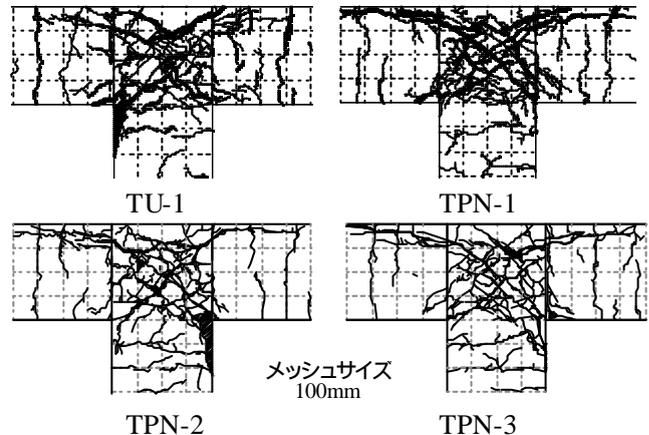


図 - 6 接合部最終ひび割れの状況

4.2 ひび割れ状況の比較

各試験体の最終ひび割れ状況を図 - 6 に示す。各試験体とも接合部中央部分にひび割れが集中しており、図 - 5 の と に対応するひび割れが梁上部で繋がった。

TPN シリーズではひび割れが梁の危険断面から梁上端筋に沿って 400 ~ 500mm 伸展している。そのため、梁上部のコンクリートは完全に浮き上がり、梁上端筋が露出した。

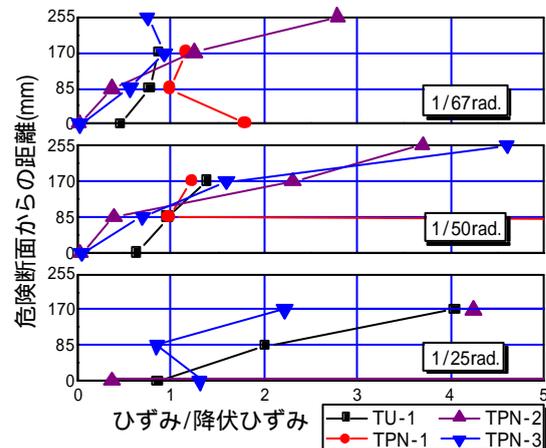


図 - 7 帯筋のひずみ分布

R=1/67 ,1/50 ,1/25rad.における帯筋のひずみ分布を図 - 7 に示す。横軸は各サイクルピーク時のひずみの値を降伏ひずみで基準化したものである。

4 試験体とも R=1/50rad.まではほぼ同程度のひずみであったが、R=1/25rad.では TPN-1 ,TPN-2 が

TU-1, TPN-3 に比べ非常に大きな値を示した。なお, 図 - 7 中に表記困難なほど大きな値であったために図から省いている。

また, TPN シリーズの接合部表面は $R=1/50\text{rad}$. 付近からコンクリートのはらみ出しが顕著となり, 最終サイクル($R=1/25\text{rad}$.)では, 接合部表面のコンクリートが一部剥離した。

4.3 試験体の諸耐力

実験から得られた各試験体の最大耐力と計算耐力を表 - 3 にまとめる。ここでは, 曲げ耐力を e 関数法, せん断耐力を靱性保証型耐震設計指針³⁾により算定した。

試験体最大耐力と柱曲げ計算耐力を比較すると, 最大耐力が若干上回っている。すべての試験体で, 接合部せん断耐力の計算値の $2/3$ 程度で最大耐力となり, 柱曲げ降伏後, 接合部のせん断破壊が確認された。

表 - 3 試験体の諸耐力 (単位: kN)

試験体	最大耐力	e関数法		靱性保証指針 ³⁾			
		曲げ耐力		せん断耐力			
		梁 ¹	柱 ²	梁	柱	接合部	
TU-1	+	109.9	200.6	94.3	307.7	453.2	168.1
	-	-112.8	-174.8	-94.3	-307.7	-453.2	-168.1
TPN-1	+	115.0	200.6	94.3	307.7	453.2	168.1
	-	-103.8	-177.0	-94.3	-307.7	-453.2	-168.1
TPN-2	+	123.3	198.4	92.8	299.2	440.2	163.0
	-	-114.0	-174.0	-92.8	-299.2	-440.2	-163.0
TPN-3	+	123.2	198.4	92.8	299.2	440.2	163.0
	-	-115.2	-174.2	-92.8	-299.2	-440.2	-163.0

注) 1 最大荷重時の軸力考慮, 2 中段筋降伏時

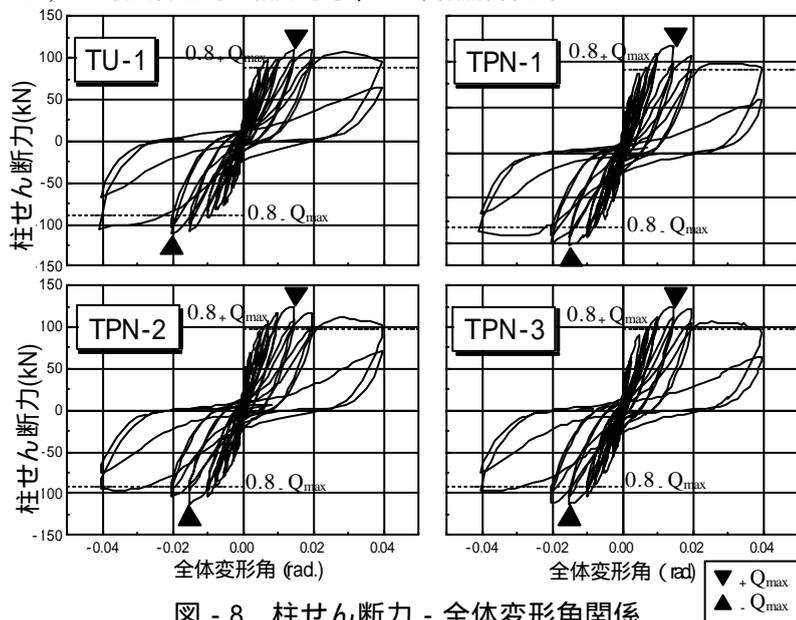


図 - 8 柱せん断力 - 全体変形角関係

4.4 柱せん断力と全体変形角の関係

各試験体の柱せん断力と全体変形角関係を図 - 8 に示す。

おおよそ最大耐力は $R=1/67\text{rad}$. で記録されたが, TU-1 の負側加力については $R=1/50\text{rad}$. で最大耐力となった。また, TPN-2, TPN-3 が TPN-1 の耐力を終始上回った。さらに, $R=1/50\text{rad}$. までは TU-1 の耐力をも上回り, 補強効果が見られた。

最大耐力後の靱性能の検討のために, 最大耐力から $R=1/25\text{rad}$. の 1 サイクル目のピーク時への耐力の低下率を a_1 , 2 サイクル目のピーク時への耐力の低下率を a_2 とし, 表 - 4 に示す。

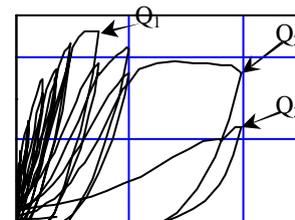
TU-1 は負側加力で最大耐力となったサイクルが TPN シリーズより 2 サイクル遅れたため, a_1 が特に小さな値になっている。

また, TU-1 は 1 サイクル目のピーク時への耐力低下率は TPN シリーズに比べ小さくなっているが, 繰り返しによる耐力低下は TPN シリーズに比べ顕著に表れ, 在来型定着と機械式定着とで異なる性状を示した。

各試験体とも負側加力では最大耐力の 80% の耐力を $R=1/25\text{rad}$. まで維持した。正側加力では TU-1, TPN-2 は $R=1/25\text{rad}$. まで維持したが, TPN-1, TPN-3 ではそれぞれ $R=1/26, 1/33\text{rad}$. までとなった。

表 - 4 耐力低下率 (単位: %)

	TU-1	TPN-1	TPN-2	TPN-3	
1	+	15.2	22.3	18.6	25.3
	-	5.3	13.8	15.4	15.5
2	+	42.5	49.8	44.1	48.6
	-	38.3	33.2	32.3	33.1



付図 耐力低下率の定義

$$a_i = \frac{Q_1 - Q_i}{Q_1} \times 100(\%)$$

($i=2,3$)

4.5 柱主筋のひずみ分布

柱主筋(図 - 9 の ~)のひずみ分布を図 - 10 に示す。横軸は各正側加力ピーク時のひずみの値を降伏ひずみで基準化したものである。縦軸の原点は柱頭の危険断面位置を表す。

各試験体とも危険断面位置においては $R=1/67$ rad. で降伏ひずみに達している。TPN シリーズでは、大変形時に危険断面から 120mm の位置でひずみの値が大きくなっているが、これは接合部のせん断ひび割れ位置と一致したためである。

4.6 梁主筋のひずみ分布

梁主筋(図 - 9 の ~)のひずみ分布を図 - 11 に示す。縦軸は各正側加力ピーク時のひずみの値を降伏ひずみで基準化したものである。横軸の原点は柱芯に対応する。

TU-1 ,TPN-1 ,TPN-2 は $R=1/50$ rad. で ,TPN-3 は $R=1/25$ rad. で降伏ひずみに達している。

また ,TPN-1 の と ,TPN-2 の と のゲージ

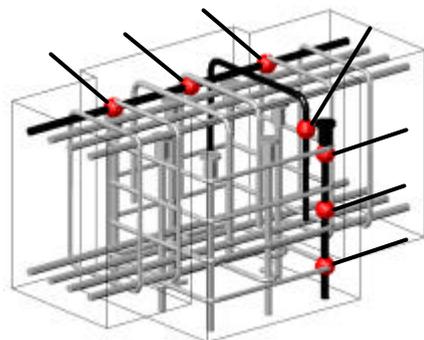


図 - 9 鉄筋のゲージ貼付位置

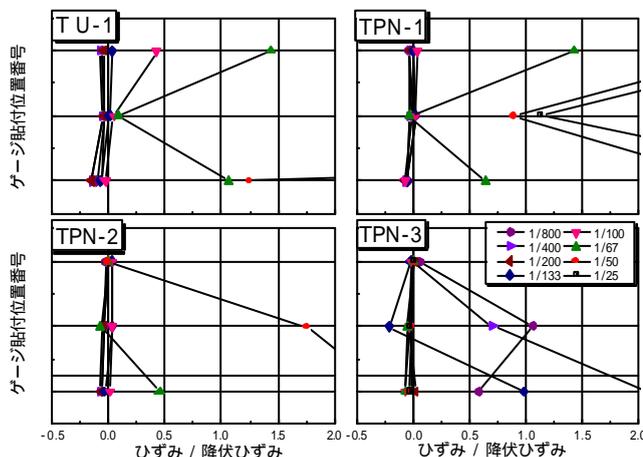


図 - 10 柱主筋のひずみ分布

ポイント(図 - 11 中の○の位置)では、ひずみの値がほぼ同じ大きさになっていることから、付着がほとんど失われているものと推察される。

4.7 かんざし筋のひずみの推移

かんざし筋(図 - 9 の ~)のひずみ分布の推移を図 - 12 に示す。横軸は各 + サイクルのピーク時のひずみの値を降伏ひずみで基準化したものである。

TPN-2 は $R=1/67$ rad. で ,TPN-3 は $R=1/25$ rad. で降伏している。

TPN-3 は $R=1/67$ rad. で降伏ひずみをわずかに超えているが、その後の挙動などから判断して降伏には至っていないと推察される。

ひずみから算出したかんざし筋の負担応力を比較すると、弾性範囲では断面積比と同様に太いかんざし筋が 4 倍大きく負担しているが、全体変形角が大きくなるにつれて、 $R=1/133$ rad. では 2 倍、 $R=1/100$ rad. では 1.5 倍と、その差が縮まってくる。

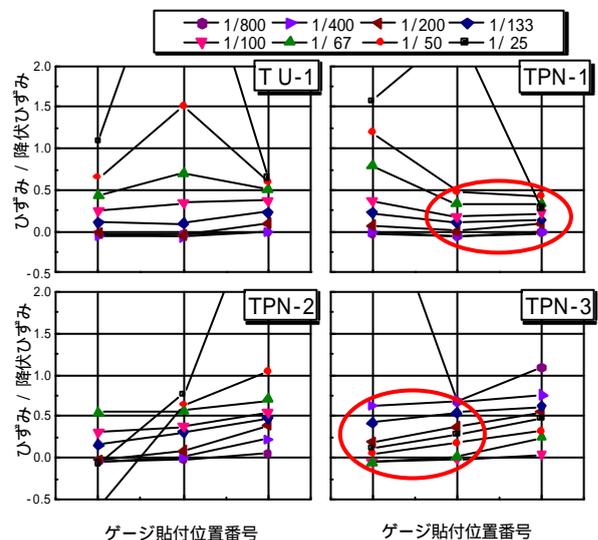


図 - 11 梁主筋のひずみ分布

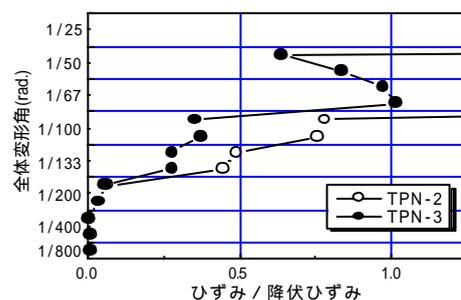


図 - 12 かんざし筋のひずみの推移

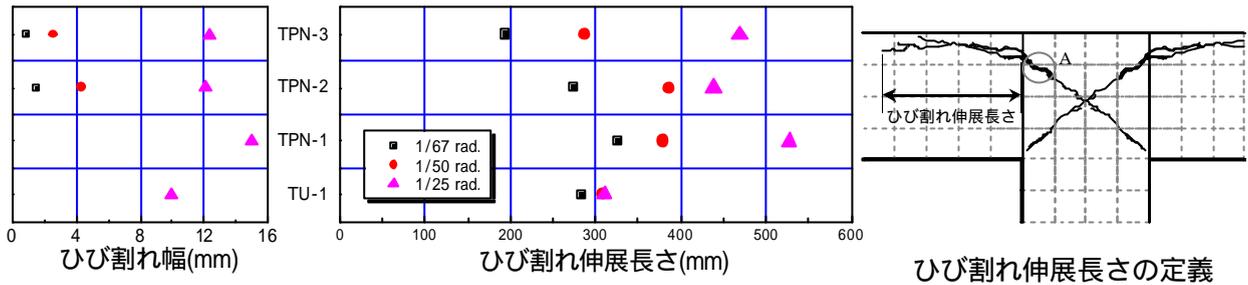


図 - 13 ひび割れ幅およびひび割れ伸展長さ

4.8 ひび割れ幅と伸展長さ

せん断ひび割れが梁に伸展する直前の接合部隅角部(図 - 13 の点 A)のひび割れ幅および梁上端筋に沿って伸展したひび割れ長さを図 - 13 に示す。但し, TU-1, TPN-1 のひび割れ幅は $R=1/67\text{rad.}$, $1/50\text{rad.}$ では測定していない。

点 A のひび割れ幅は, $R=1/50\text{rad.}$ までは TPN-3 が TPN-2 の約半分であり, かんざし筋の径による補強効果の違いが見られた。最終サイクル ($R=1/25\text{rad.}$) では, TU-1 に対して TPN-2, TPN-3 は 20% 増し, TPN-1 は 50% 増しとなり, かんざし筋の補強効果が確認された。

TU-1 のひび割れは $R=1/67\text{rad.}$ から $R=1/25\text{rad.}$ にかけて約 30mm の伸展長さにとどまったが, TPN シリーズでは約 200mm 以上伸展した。

かんざし筋による補強によって, 最終状況で TPN-1 に比べ約 70mm 伸展を抑制した。

5. まとめ

T 字形接合部の柱頭柱主筋の定着に在来型 180 度折り曲げフック定着工法と機械式定着工法による試験体 2 体と, 機械式定着工法を用いたものに梁のせん断補強筋と同間隔で径の異なるかんざし筋(梁のせん断補強筋に換算すると $p_w=0.21\%$, 0.85% に相当)により補強した試験体 2 体の計 4 体の加力実験を実施し, 得られた知見を以下にまとめる。

- かんざし筋を $p_w=0.2\%$ 相当程度とすることで, 柱主筋の押し込み時に発生するプレート付近のひび割れが梁上端筋に沿って梁に伸展するという特徴的な破壊状況に対して, 若干の補強効果を

得られたが, 十分な改善には至らなかった。

- かんざし筋を $p_w=0.85\%$ 相当程度配筋し補強することで, 全体変形角 $R=1/50\text{rad.}$ まで従来型の定着工法の耐力を上回った。
- 全ての試験体が $R=1/30\text{rad.}$ 程度まで, 最大耐力の 80% を維持した。

[謝辞]

本研究は, (財)日本建築防災協会に設置された機械式定着工法研究委員会(委員長:岡田恒男 芝浦工業大学教授(当時))の研究の一環として行われたものである。実験の計画実施にあたって委員の方々から貴重な助言と支援を頂いた。

載荷装置は独立行政法人建築研究所の三次元波浪振動試験装置を使用させていただき, その装置の制御, 実験データ計測など実験に際しては, (財)ベターリビングつくば建築試験センター 新藤健太博士に全面的にご協力を頂いた。

これら関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 大和田, 隈澤, 太田, 小杉, 新藤, 小曾根:「機械式定着金物を柱頭柱主筋の定着に使用した L 字形, T 字形接合部の耐力と変形性能」日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol. C-2, 構造, pp. 257-258, 2001.9.
- 2) 東京鉄鋼株式会社:「プレートナット設計施工指針」2002
- 3) 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.
- 4) 日本建築学会:「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」1999.11.