

# 論文 同一断面に機械式継手を用いたプレキャスト部材接合部の曲げ挙動に関する研究

櫻庭 浩樹\*1・古賀 裕久\*2・高松 芳徳\*3・井上 幸一\*4

**要旨：**本研究では、同一断面に機械式継手を集中させて配置したプレキャスト部材接合部の曲げ挙動を確認するため、曲げ載荷実験を実施した。その結果、静的耐力および剛性は、同一断面に機械式継手を配置した場合でも、試験条件によらず、設計で想定される算定値以上であった。一方、ひび割れ性状は、鉄筋中心間隔が狭い場合、同一断面に機械式継手を用いた試験体と継手の無い試験体で異なり、継手を用いた試験体では、設計で想定される曲げひび割れ幅よりも大きくなった。

**キーワード：**機械式継手、同一断面、静的耐力、剛性、曲げひび割れ幅

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の建設における生産性向上が重要な検討課題となっており、プレキャスト（以下、PCa）部材のさらなる活用が期待されている。PCa 部材が大型化した場合には、例えば、図-1 のように、複数の PCa 部材を機械式継手で接合することがある。このとき、生産性向上の観点からは、同一断面に機械式継手を集中させて配置することが望ましい。

同一断面に機械式継手を集中させる場合、継手部が構造上の弱点にならないように特に配慮が必要である。機械式継手は、継手単体としての強度試験などで母材以上の強度が確認されており、適切に施工されていれば静的耐力に及ぼす影響は小さいと考えられる。一方、同一断面に継手を配置すると、局所的に部材の曲げ剛性が変わり、その影響でひび割れ性状等に影響が生じるおそれがある。

そこで、本研究では、同一断面に機械式継手を配置したプレキャスト部材接合部の曲げ載荷実験を行った。機械式継手の種類および鉄筋中心間隔を変更した試験体の曲げ載荷実験を行い、継手が無い場合と比較することで、同一断面に配置した機械式継手が静的耐力、剛性、ひび割れ性状に及ぼす影響を検討した。

## 2. 機械式継手単体の性能評価

### 2.1 概要

曲げ載荷実験の試験体に用いた機械式継手を表-1 に示す。PCa 部材同士の接合を想定したモルタル充てん継手（G1, G2）、PCa 部材と現場打ちコンクリート部との接合を想定したねじふし鉄筋継手（T1, T2）を用いた。曲げ載荷試験の実施にあたっては、標準的な機械式継手

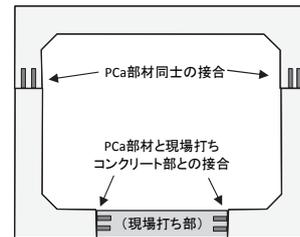


図-1 機械式継手を用いたプレキャスト部材の例

表-1 試験体に用いた機械式継手

寸法/ 等級	モルタル充てん継手		ねじふし鉄筋継手	
	G1	G2	T1	T2
外径(mm)	63	60	47.4	48
長さ(mm)	415	350	168	308
等級	SA	A	A	A

※鉄筋径 D29 の場合

単体の性能を把握した上で、性能の異なる複数の継手を比較することが必要と考えた。また、継手単体の力学的性能が高いものは外径や長さが大きくなっている場合があり、ひび割れ性状に影響を及ぼすことも考えられるため、継手の外形や長さが大きい／小さいものが比較できるように選定した。

表-1 の機械式継手単体の性能を明らかにするため、D29-SD345 の鉄筋を用いて、鉄筋定着・継手指針(2007年)に準拠し、一方向引張試験を行った<sup>2)</sup>。G1 には等級 SA 級を満たすために竹節鉄筋を用い、その他にはねじ節鉄筋を用いた。

モルタル充てん継手およびねじふし鉄筋継手のグラウトは、それぞれ、無収縮性高強度モルタルおよびエポキシ樹脂系接着剤とした。グラウトの養生条件は、モルタル充てん継手は 20℃で 27 日以上、ねじふし鉄筋継手は 20℃で 7 日以上とした。試験体数は、各 3 体とした。

\*1(国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 研究員 博士(工学) (正会員)

\*2(国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 上席研究員 博士(工学) (正会員)

\*3(一社) 道路プレキャストコンクリート製品技術協会 技術委員会 指針部会カルバート工分科会長

\*4(一社) 道路プレキャストコンクリート製品技術協会 技術委員会 指針部会長

## 2.2 試験結果と考察

一方方向引張試験結果と性能判定基準値を表-2 に示す。試験結果より、強度、剛性、伸び能力およびすべり量については、各機械式継手の仕様の通り、G1 は鉄筋定着・継手指針(2007)に規定される SA 級、その他は同指針に規定される A 級を満たしていることを確認した。

強度は、いずれも SD345 の規格強度以上であった。剛性の比は、T1 で 1 を下回り (母材鉄筋の割線剛性よりも小さい)、相対的に小さい値を示した。これは、T1 のカプラーが比較的短いためと考えられる。伸び能力は、A 級基準値は満たしているものの、相対的に G2 が小さい値を示した。G2 以外は母材鉄筋が破断したが、G2 は鉄筋の抜け出しが生じたためと考えられる。すべり量は、0.04~0.08mm の範囲で、基準値に対して約 13~27%といずれも基準値より顕著に小さかった。

## 3. PCa 部材の曲げ載荷実験方法

### 3.1 試験体

試験体は、機械式継手を用いて 2 つの RC 部材を接合したものと継手のない一体のものを製作し、両者の挙動を比較した。機械式継手を用いた試験体の配筋状況の例を図-2 に示す。試験体の寸法は、PCa ボックスカルバートの断面を想定し、幅 680mm、高さ 400mm、長さ 8000mm とした。試験体の条件は、表-3 に示すものとし、機械式継手の種類および鉄筋中心間隔を変更した。鉄筋中心間隔は、160mm が標準値である。なお、配筋量の増減で変化させたため、狭いほど引張鉄筋比が大きくなる。軸方向鉄筋には SD345 を用い、鉄筋径は圧縮側を D22、引張側を D29 とした。鉄筋は、継手単体試験と同様に、G1 には竹節鉄筋を用い、その他にはねじ節鉄筋を用いた。なお、等曲げモーメント区間となる範囲は、曲げひび割れの発生位置に影響を及ぼさないように、スターラップを配置しなかった。

コンクリートは、呼び強度 40、スランプ 18cm、粗骨材の最大寸法 20mm のレディミクストコンクリート (表-4) とした。打設の 3 日後に脱型し、14 日以上気中で養生してから実験に供した。なお、曲げ載荷実験の実施日に合わせて圧縮試験を行った結果、圧縮強度 60.4~70.2N/mm<sup>2</sup>、弾性係数 27.3~31.2kN/mm<sup>2</sup>、材齢 21~42 日 (気中養生) であった。

機械式継手の配置状況の例を図-3 に示す。機械式継手は、片側の RC 部材に集中させて配置した。モルタル充てん継手を用いた試験体は、スパン中央部に幅 20mm 程度の目地を有しており、左右の部材を製作した後に、モルタル充てん継手及び目地部をグラウトで充填して一体化させた。ねじふし鉄筋継手を用いた試験体は、コンクリートの打設を 2 回に分けて製作した。先に打設した

表-2 一方方向引張試験結果と性能判定基準値

一方方向引張試験結果				
継手種類	強度 $f_j$ (N/mm <sup>2</sup> )	剛性の比 $E_{0.95f_j}$	伸び能力 $\epsilon_u$	すべり量 $\delta_s$ (mm)
G1	581	1.24	0.065	0.080
G2	525	1.29	0.031	0.040
T1	571	0.85	0.082	0.072
T2	575	1.28	0.053	0.044
性能判定基準値				
等級	強度 $f_j$ (N/mm <sup>2</sup> )	剛性の比 $E_{0.95f_j}$	伸び能力 $\epsilon_u$	すべり量 $\delta_s$ (mm)
SA	490	0.9	0.04	0.3
A		0.7	0.02	

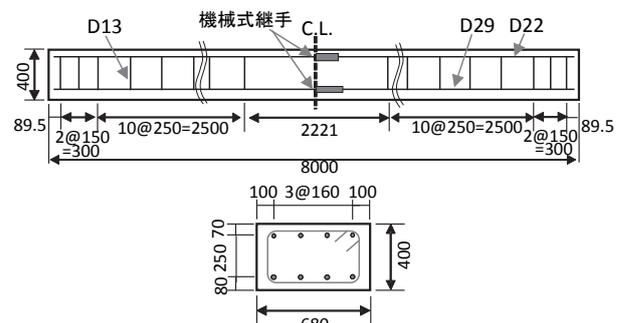


図-2 機械式継手を用いた試験体の配筋状況の例

表-3 試験体の条件

No.	機械式継手の種類	鉄筋中心間隔 (mm)	引張鉄筋比 (%)
1	継手なし(竹節鉄筋)	90	1.8
2	継手なし(竹節鉄筋)	160	1.2
3	継手なし(ねじ節鉄筋)	160	1.2
4	継手なし(竹節鉄筋)	240	0.9
5	G1(竹節鉄筋)	90	1.8
6		160	1.2
7		240	0.9
8	G2(ねじ節鉄筋)	160	1.2
9	T1(ねじ節鉄筋)	90	1.8
10		160	1.2
11		240	0.9
12	T2(ねじ節鉄筋)	160	1.2

表-4 コンクリートの配合

W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
38.5	4.5	41.4	172	447	684	1001

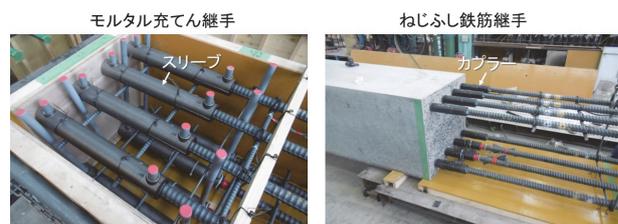


図-3 機械式継手の配置状況の例

コンクリートの硬化後に鉄筋を接合し、その後コンクリートを打設した。

### 3.2 荷重方法

荷重方法は、図-4 に示すように、せん断スパン長を 2500mm、等曲げモーメント区間を 2000mm とした 4 点曲げ荷重とした。たわみとひずみの測定位置の概要を図-5 に示す。たわみは、スパン中央の下面に変位計を設置して測定した。ひずみは、機械式継手を配置した／していない 4 断面を設定し、1 断面あたり 2 箇所（引張側鉄筋ひずみと圧縮縁コンクリートひずみ）を測定した。機械式継手を用いない試験体も同様の位置で測定した。

曲げひび割れ幅を測定するため、図-6 に示すように、検長 100mm のパイ型変位計を等曲げモーメント区間に 5 点設置した。既往研究 1),3) で機械式継手端部の曲げひび割れ幅が大きくなる場合があることが報告されているため、機械式継手の両端部にパイ型変位計を 3 点（スパン中央 1,2、機械式継手端部）設置した。残り 2 点は、機械式継手の両端部の隣に生じた曲げひび割れ（曲げスパン 1,2）を対象に設置した。スパン中央 1,2 は荷重前に、試験体下面に設置した。その他は、ひび割れ発生後、試験体側面に設置した。継手がない試験体は、機械式継手を用いた場合となるべく近い位置に生じた曲げひび割れを対象とした。なお、機械式継手を用いた試験体では概ね図-6 のように曲げひび割れが分布したが、継手がない試験体ではスパン中央のパイ型変位計の検長区間に曲げひび割れが生じない場合もあった。

荷重サイクルは、図-7 のように設定し、荷重ステップ毎に荷重を増減させた。まず、ひび割れが発生するまで荷重して除荷し、その後、いずれかの測定位置で鉄筋応力が 100N/mm<sup>2</sup> に達するまで荷重して除荷した。なお、鉄筋応力は、荷重中に測定した鉄筋ひずみに弾性係数（200kN/mm<sup>2</sup>）を乗じて推定し、目標値との差は 10N/mm<sup>2</sup> 程度の範囲であった。次に、鉄筋応力が 180N/mm<sup>2</sup> に達するまで荷重して除荷することを 3 回繰り返した。鉄筋応力が 300N/mm<sup>2</sup> および降伏応力の場合も同様とした。これらの鉄筋応力は、道路土工カルバート工指針において剛性カルバートの設計に用いられる許容応力等を参考に設定した<sup>4)</sup>。

最後に、圧壊が生じるまで荷重した。ただし、実験装置の制約上、スパン中央の鉛直変位が 200mm に到達した試験体については、その時点で荷重を終了した。

### 3.3 設計式との比較

曲げ荷重実験の結果が設計で想定される範囲であるかを確認するため、道路橋示方書Ⅲ編あるいはコンクリート標準示方書に示される算定式から得られる、破壊抵抗曲げモーメント、剛性、曲げひび割れ幅と実験結果を比較した。なお、3.1 節で述べた通り、圧縮強度は呼び強

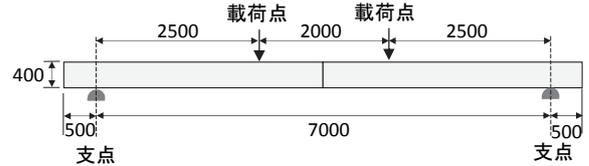


図-4 荷重方法

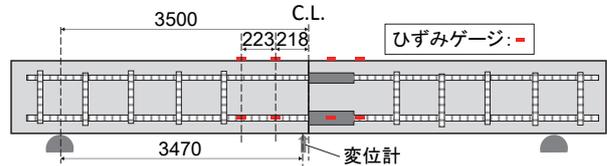


図-5 たわみとひずみの測定位置の概要

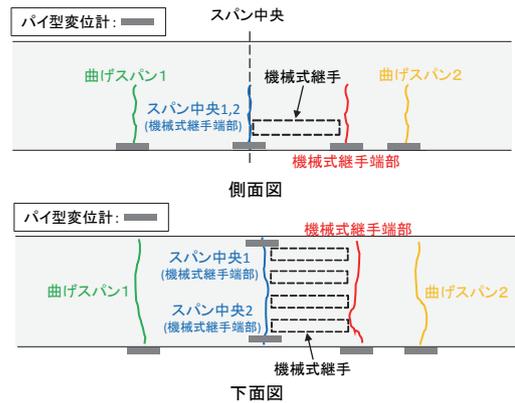


図-6 曲げひび割れ幅の測定位置の概要

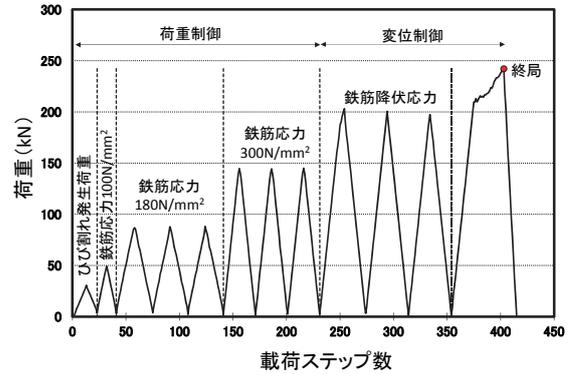


図-7 荷重サイクルの例

度を上回っているが、設計で想定される範囲であるかを検討するために、コンクリートの設計基準強度を 40N/mm<sup>2</sup> として算定した。

また、コンクリートの弾性係数を 31kN/mm<sup>2</sup>、引張強度を設計基準強度からの換算値（ $=0.23f_c^{2/3}$ ）とし、鋼材の材料特性値は道路橋示方書Ⅲ編に示される値を用いた。

静的耐力については、道路橋示方書Ⅲ編に示される規定に基づき、ファイバーモデルを用いて、破壊抵抗曲げモーメントの特性値を算定した。

剛性の算定値は、式(1)から求められる換算断面二次モーメント<sup>5)</sup>を用い、図-4 の荷重条件に対応する梁の微分方程式の解から得られるスパン中央たわみから求めた。

$$I_e = \left[ \left( \frac{M_{crd}}{M_{dmax}} \right)^3 I_g + \left\{ 1 - \left( \frac{M_{crd}}{M_{dmax}} \right)^3 \right\} I_{cr} \right] \quad (1)$$

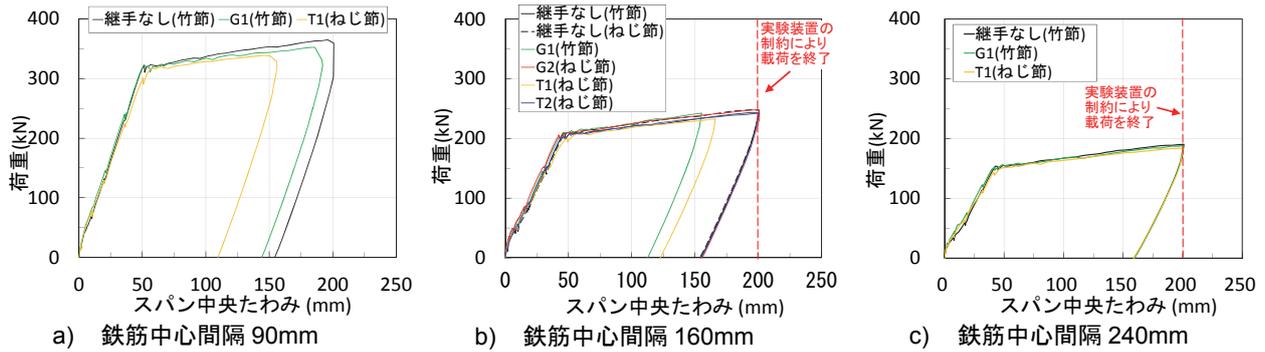


図-8 荷重-スパン中央たわみ関係（包絡線）

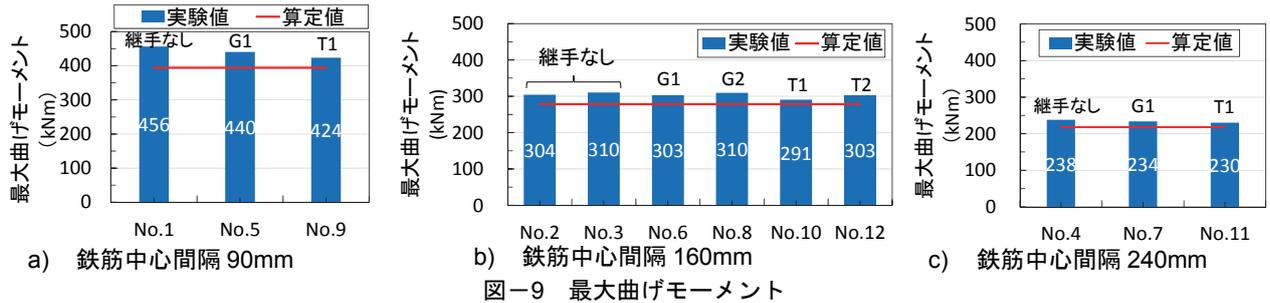


図-9 最大曲げモーメント

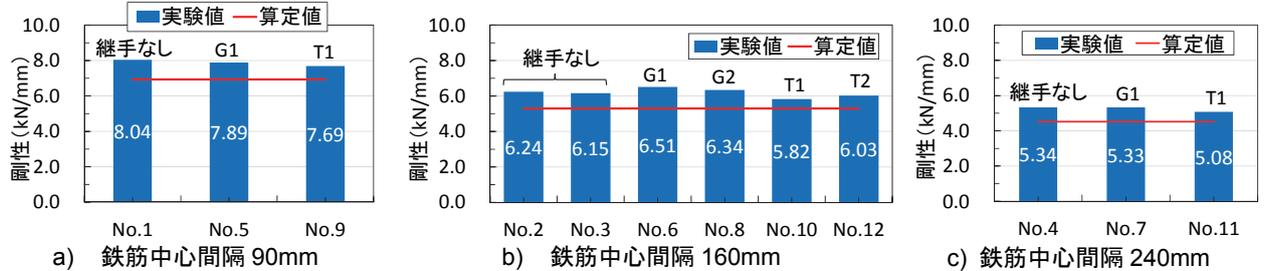


図-10 剛性

ここに、 $I_e$ ：換算断面二次モーメント、 $M_{crd}$ ：断面に曲げひび割れが発生する限界の曲げモーメント、 $M_{dmax}$ ：変位・変形算定時の設計曲げモーメントの最大値、 $I_g$ ：全断面の断面二次モーメント、 $I_{cr}$ ：引張応力を受けるコンクリートを除いた断面二次モーメント

なお、実験結果から得られる剛性は、荷重レベルにより異なるが、ここでは、鉄筋が降伏応力に達する1回目の荷重における荷重-スパン中央たわみ関係から、式(2)のように定義して求めた。

$$S = \frac{P_{ya} - P_{yb}}{u_{ya} - u_{yb}} \quad (2)$$

ここに、 $S$ ：剛性、 $P_{ya}$ ：降伏荷重の2/3倍、 $P_{yb}$ ：降伏荷重の1/3倍、 $u_{ya}$ ： $P_{ya}$ 時のスパン中央たわみ、 $u_{yb}$ ： $P_{yb}$ 時のスパン中央たわみ

曲げひび割れ幅は、コンクリート標準示方書に基づき、式(3)を用いて算定した<sup>5)</sup>。

$$w = 1.1k_1k_2k_3\{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left[ \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right] \quad (3)$$

ここに、 $w$ ：曲げひび割れ幅、 $k_1$ ：鋼材の表面形状が曲げひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数（異形=1.0）、 $k_2$ ：コンクリートの品質が曲げひび割れ幅に及ぼす影響（ $f'_c=40\text{N/mm}^2$ として算定）、 $k_3$ ：引張鋼材の段数の影響

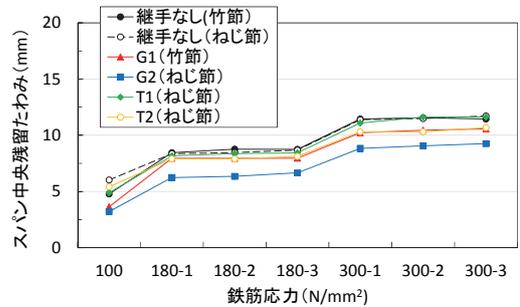


図-11 鉄筋中心間隔 160mm 試験体のスパン中央残留たわみ

を表す係数 (=1.0)、 $c$ ：かぶり、 $c_s$ ：鋼材の中心間隔、 $\phi$ ：鋼材径、 $\sigma_{se}$ ：鉄筋応力の増加量、 $\varepsilon'_{csd}$ ：コンクリートの収縮およびクリープ等による曲げひび割れ幅の増加を考慮するための数値 (=0として算定)、なお、鋼材径には母材鉄筋の直径、かぶりには母材鉄筋のかぶりをを用いて算定した。

#### 4. PCa 部材の曲げ荷重実験の結果と考察

##### 4.1 静的耐力

荷重-スパン中央たわみの関係を図-8に示す。なお、比較しやすいように包絡線を示している。鉄筋中心間隔 90mm ではいずれの試験体も圧壊が生じ、鉄筋中心間隔

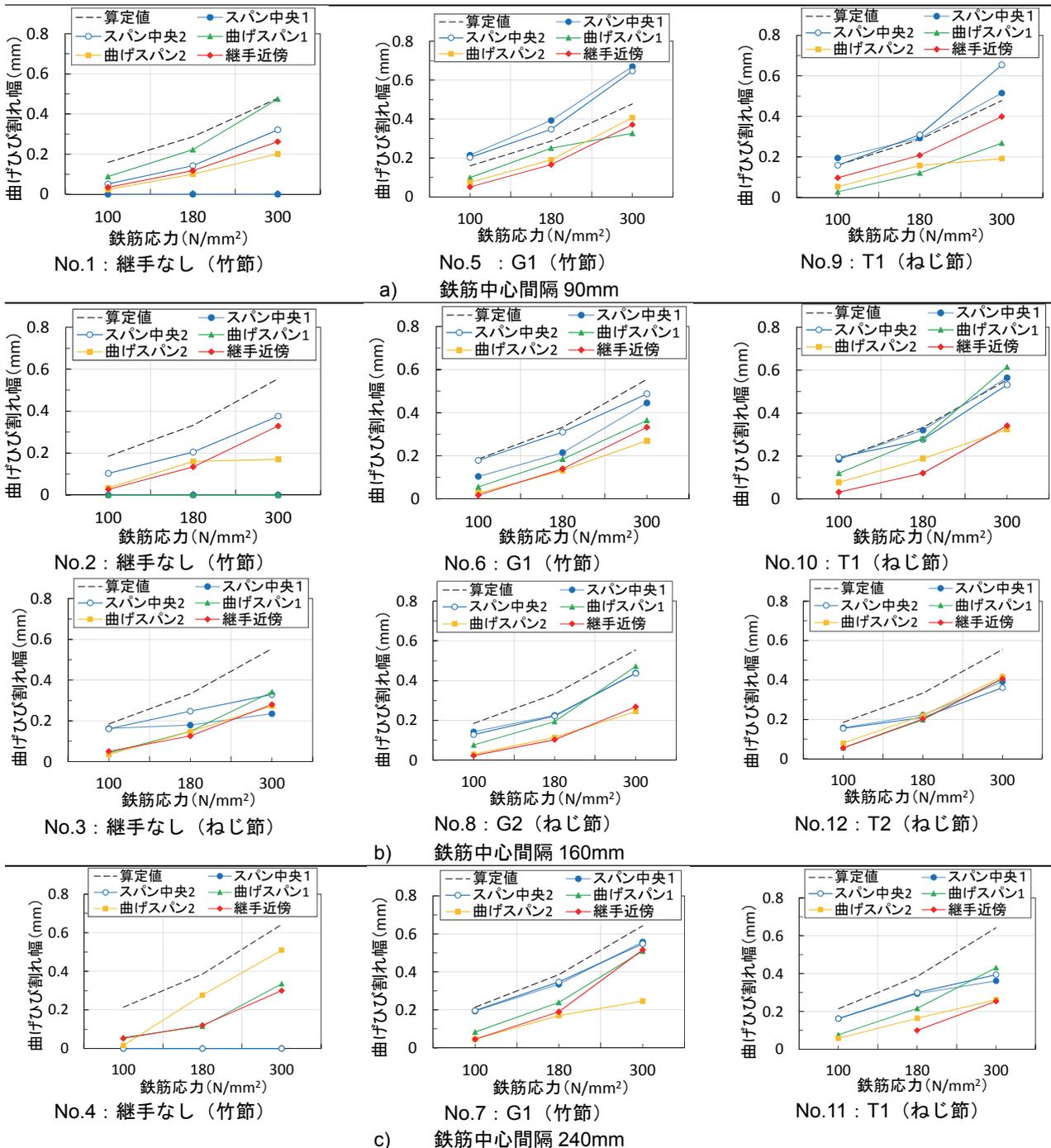


図-12 各鉄筋応力時における曲げひび割れ幅(パイ型変位計による測定値と式(3)による算定値)

160mm では G1 と T1 を用いた試験体で圧壊が生じて終局に至った。その他の試験体は、スパン中央たわみが 200mm に到達して载荷を終了した。なお、圧壊時または载荷終了時の引張鉄筋の最大ひずみは 0.016~0.022 の範囲であり、表-2 に示したいずれの機械式継手の伸び能力よりも小さい値であった。

最大曲げモーメントを図-9 に示す。図中には、破壊抵抗曲げモーメントの特性値を算定した結果も合わせて示す。機械式継手の有無や鉄筋中心間隔にかかわらず、いずれの試験体も算定値を上回る最大曲げモーメントを示した。本実験で用いた機械式継手は、母材鉄筋以上の

強度を有するものであるため、同一断面に配置しても、最大曲げモーメントに及ぼす影響が小さかったものと考えられる。既往研究 1),3)においても、試験体の静的耐力は、算定値以上であることが確認されており、同様な報告がなされている。なお、材料試験で得られたコンクリートの圧縮強度を用いて破壊抵抗曲げモーメントの特性値を算定した場合は、より測定値に近い結果が得られ、かつ、測定値は算定値に対して同等以上となった。

#### 4.2 変形挙動

式(2)で定義して求めた剛性の結果を図-10 に示す。図中には、式(1)を用いて剛性を算定した結果も合わせて

示す。機械式継手の有無や鉄筋中心間隔にかかわらず、いずれの試験体においても、剛性は算定値を上回っていた。また、2章において、継手単体の試験では、T1の剛性の比が比較的小さいことを述べたが、試験体全体のたわみから得られる剛性に及ぼす影響は明確でなかった。

図-11に鉄筋中心間隔160mm試験体のスパン中央残留たわみを示す。機械式継手を用いた試験体の残留たわみは、継手なし試験体と同程度以下であった。また、各鉄筋応力レベルで繰返し载荷しても残留たわみの顕著な増加は認められなかった。今回用いた機械式継手のすべり量(表-2)が小さいためと考えられる。なお、鉄筋中心間隔が90mmと240mmの場合も同様の傾向であった。

以上から、同一断面に機械式継手を用いた場合の影響は顕著ではなく、曲げに対して、設計で想定される静的耐力と剛性を有し、残留たわみも継手が無い場合と同程度であることを確認できた。

#### 4.3 ひび割れ性状

鉄筋応力が、100N/mm<sup>2</sup>、180N/mm<sup>2</sup>、300N/mm<sup>2</sup>時における曲げひび割れ幅の比較を図-12に示す。図中には式(3)を用いて算定した曲げひび割れ幅も合わせて示す。

鉄筋中心間隔を90mmとした場合、G1、T1を用いた試験体のスパン中央での曲げひび割れ幅が算定値を上回る結果となった(図-12a))。また、試験体の機械式継手部のひずみ分布(図-13)を見ると、G1とT1の継手部では、継手がない試験体と比較して、軸方向ひずみが小さかった。表-1に示したように機械式継手の寸法は鉄筋よりも大きいので、機械式継手を配置した区間の曲げ剛性が局所的に大きくなり、周囲の曲げひび割れ幅に影響を及ぼしたものと思われる。

鉄筋中心間隔を160mmとした場合、鉄筋応力300N/mm<sup>2</sup>時の曲げスパン1においてT1の曲げひび割れ幅が算定値をやや上回っているものの、その他はいずれの試験体も算定値と同程度以下であった。また、鉄筋中心間隔を240mmとした場合は、いずれの試験体も算定値を下回る曲げひび割れ幅であった。よって、これらの試験体の場合は、機械式継手の種類や形状によらず、継手がない試験体と同様に曲げひび割れ幅を算定できるものと考えられる。

以上の実験結果から、機械式継手を同一断面に集中させると局所的に曲げ剛性が高くなり、その影響で、継手がない場合と比較して曲げひび割れの幅が大きくなる場合があることが確認された。ただし、鉄筋中心間隔を160mm、240mmと大きくした場合は、継手がない試験体と同程度の曲げひび割れ幅であり、機械式継手を同一断面に集中させた影響は顕著ではないと考えられた。

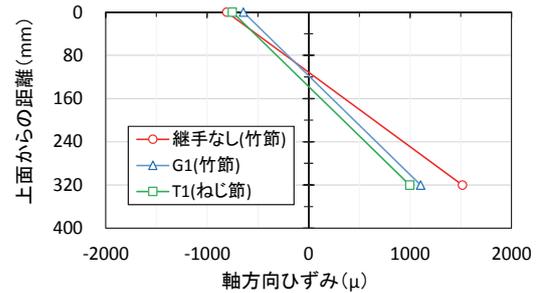


図-13 機械式継手部の鉄筋応力300N/mm<sup>2</sup>時軸方向ひずみ分布(鉄筋中心間隔90mm)

#### 5. まとめ

本研究では、同一断面に機械式継手を集中させて配置したPCa部材接合部の曲げ载荷実験を行い、機械式継手の種類および鉄筋中心間隔が、静的耐力、剛性およびひび割れ性状に及ぼす影響を検討した。

- 1) 機械式継手を用いた試験体の最大曲げモーメントは、機械式継手の種類および鉄筋中心間隔によらず、道路橋示方書Ⅲ編で示される破壊抵抗モーメントの特性値と同等以上であることを確認した。
- 2) 機械式鉄筋継手を用いた試験体の剛性は、荷重とスパン中央たわみの傾きから求められる算定値を指標として比較した結果、試験体の条件によらず、算定値と同等以上であることを確認した。また、残留たわみも継手のない試験体と同程度であった。
- 3) 機械式継手を用いた試験体の曲げひび割れ幅は、コンクリート標準示方書で示される曲げひび割れ幅算定式による算定値を指標として比較した結果、鉄筋中心間隔を狭くした場合に、算定値を上回る場合があることを確認した。

#### 参考文献

- 1) 大野拓也, Nguyen Dac Phuong, 睦好宏史, 牧剛史: 機械式鉄筋継手の性能がRC部材の力学的性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.589-594, 2013
- 2) 土木学会: 鉄筋定着・継手指針 [2007年版], pp.34-46, 2007
- 3) 安田瑛紀, 中村拓郎, 松本智夫, 二羽淳一郎: モルタル充填継手を同一断面に配置したRCはりの曲げ性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.595-600, 2016
- 4) 日本道路協会: 道路土工カルバート工指針, pp.48-95, 2010
- 5) 土木学会: 2017年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], pp.231-241, 2018