

# 論文 軸方向鉄筋端部に定着体を取り付けた杭・柱・地中梁接合部に関する実験的検討（曲げ載荷試験）

井口 重信\*1・坂本 真紀\*2・滝沢 聡\*3

**要旨：** 鉄道用鉄筋コンクリートラーメン高架橋の杭・柱・地中梁接合部において、杭と柱の軸方向鉄筋端部に定着体を取り付け、さらにその周囲を鋼管で拘束することで、両者の定着長を短くすることを提案した。杭、柱およびその接合部を模した梁試験体を製作し曲げ載荷試験を実施した。その結果、接合部の引張領域において、杭と柱の軸方向鉄筋の定着体相互に挟まれる部分にせん断破壊面が生じて最大荷重に至ることが確認された。また、その最大荷重は、筆者らの既往の研究成果である定着体相互に挟まれる部分のせん断応力に関する提案式と、推定されるせん断破壊面積の積により評価できることが分かった。

**キーワード：** 接合部, 定着体, せん断耐力, 拘束

## 1. はじめに

鉄道用ラーメン高架橋の杭・柱・地中梁の接合部においては、杭と柱の軸方向鉄筋の定着を確保するために十分な高さの地中梁を設ける必要がある。しかし、地下水の高い地域では、地下水位以下での施工部分を少なくするために地中梁高さを小さくしたいというニーズがある。他方で、近年の耐震設計で想定すべき地震力の増大に伴って、杭や柱に配置すべき軸方向鉄筋量が増え、太径化する傾向にある。そのため、必要な定着長を確保するため地中梁高さを高くしなければならない場合がある。

そこで、筆者らは、一般的に用いられる定着方法である軸方向鉄筋端部のフックに変えて、**図-1(a)**に示すように杭および柱軸方向鉄筋それぞれの端部に機械式定着体を設け、その周囲を鋼管等で拘束することで定着長を短くする方法を提案した。筆者らは、本稿の前段で、**図-1(b)**に示す、接合部のみをモデル化した要素試験を実施した<sup>1)</sup>。要素試験では、接合部周囲のコンクリートなどは省き、また杭と柱の軸方向鉄筋部分についても省略し、定着体部分のみを載荷支点および支持点として残した円柱試験体に対して、全鉄筋に引張軸力が作用する場合を想定して静的載荷により耐力の評価を行った (**図-2(a)**)。その結果、**図-2(b)**および**(c)**に示すような載荷支点から支持点を結ぶ円錐台状の破壊形態となり、そのせん断面の最大せん断応力  $\tau_{maxcal}$  は、式(1)および式(2)により評価できることが分かった。

$t/R_1 < 0.022$  の場合；

$$\tau_{maxcal} = f'_c{}^{2/3} \cdot (a/L)^{-1.166} \cdot (1000/L)^{0.45} \cdot \{4.53 \cdot (t/R_1) + 0.0538\} \quad (1)$$

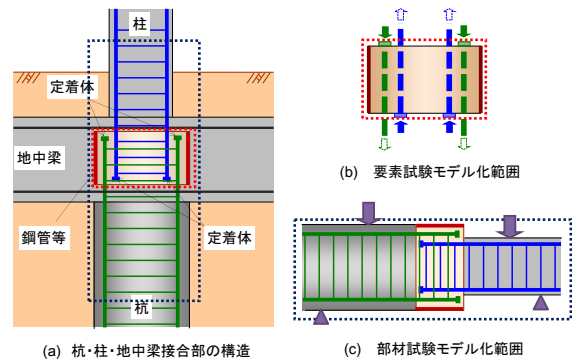


図-1 対象構造とモデル化範囲

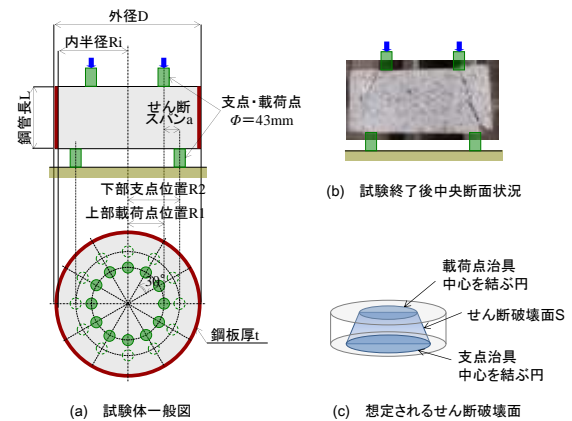


図-2 要素試験の試験体一般図と破壊状況

$0.022 \leq t/R_1$  の場合；

$$\tau_{maxcal} = 0.154 f'_c{}^{2/3} \cdot (a/L)^{-1.166} \cdot (1000/L)^{0.45} \quad (2)$$

ここに、t：鋼管板厚(mm)

$R_1$ ：鋼管内半径(mm)

$f'_c$ ：コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

\*1 東日本旅客鉄道(株) 建設工事事務所構造技術センター 工修 (正会員)

\*2 鹿島建設(株) 関東支店 土木部 (正会員)

\*3 東日本旅客鉄道(株) 上信越工事事務所工事管理室 副課長 工修 (正会員)

表－1 試験体諸元と材料試験結果

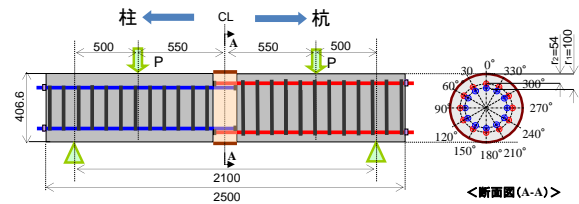
試験体名称	試験体諸元											材料試験結果					
	外径 D (mm)	内半径 Ri (mm)	鋼管板厚 t (mm)	t/Ri	軸方向鉄筋付着の有無	鋼管長 L (mm)	載荷点スパン (mm)	支点スパン (mm)	芯かぶり (柱) r <sub>1</sub> (mm)	芯かぶり (杭) r <sub>2</sub> (mm)	せん断スパン a=r <sub>1</sub> -r <sub>2</sub> (mm)	せん断スパン比 a/L	コンクリート圧縮強度 f <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	軸方向鉄筋降伏応力 σ <sub>sy</sub> * (N/mm <sup>2</sup> )	軸方向鉄筋降伏ひずみ ε <sub>sy</sub> * (μ)	鋼管降伏応力 σ <sub>sy</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	鋼管降伏ひずみ ε <sub>sy</sub> (μ)
M-1	406.6	203.3	0	0.000	無し	220	1100	2100	100	54	46	0.21	32.5	930	4792	-	-
M-2	406.6	196.9	6.4	0.033	無し	220	1100	2100	100	54	46	0.21	33.1	930	4792	389	2174
M-3	406.6	196.9	6.4	0.033	無し	330	1100	2100	100	54	46	0.14	22.3	930	4792	389	2174
M-4	406.6	196.9	6.4	0.033	無し	110	1100	2100	100	54	46	0.42	24.6	930	4792	389	2174
M-5	558.8	273.0	6.4	0.023	無し	220	1100	2100	100	54	46	0.21	22.3	930	4792	358	2814
M-6	558.8	273.0	6.4	0.023	無し	220	1100	2100	150	54	96	0.44	24.6	930	4792	358	2814
M-7	558.8	273.0	6.4	0.023	無し	220	1100	2100	175	54	121	0.55	25.0	902	4619	358	2814
M-8	558.8	273.0	6.4	0.023	無し	330	800	2100	124	54	70	0.21	22.0	902	4619	358	2814
M-9	406.6	200.1	3.2	0.016	無し	220	1100	2100	100	54	46	0.21	21.1	902	4619	227	1851
M-10	406.6	190.6	12.7	0.067	無し	220	1100	2100	100	54	46	0.21	25.0	902	4619	358	2814
M-11	406.6	203.3	0	0.000	有り	220	800	2100	100	54	46	0.21	23.6	980	4456	-	-
M-12	406.6	200.1	3.2	0.016	有り	220	800	2100	100	54	46	0.21	19.5	980	4456	227	1851

※軸方向鉄筋の降伏ひずみおよび降伏応力については、0.2%のオフセット降伏点から求めた。

a：載荷支点と支持点の水平距離(mm)

L：鋼管長(mm)

本検討では、実構造物の荷重状態を想定し、接合部のほか、連続する柱と杭部材もモデル化し(図-1(c))、断面内に曲げモーメントによる引張応力と圧縮応力が生じる状態を再現して、耐力の評価を行ったので以下にその概要を記す。



図－3 部材試験体一般図(M-2)

## 2. 試験概要

### 2.1 試験体

試験体の諸元を表-1に、M-2試験体の形状を図-3に示す。なお、表-1には、後述する材料試験結果も合わせて示す。

試験体は、鉄道用鉄筋コンクリートラーメン高架橋の杭、柱とその接合部を模した梁形状とした。接合部につながる地中梁や周囲の杭受け台等については省略し、簡略化した試験方法とした。試験体中央部が杭と柱の接合部を現し、杭と柱の軸方向鉄筋が一定の定着長を有して定着され、その周囲を鋼管で囲まれた形状となっている。接合部側の軸方向鉄筋の端部にはD22鉄筋用の定着体を模した対角寸法51mmの六角ナットを取り付けた。試験体端部側の軸方向鉄筋端部にも同様に六角ナットを取り付け、さらに試験体端部に鉄板を配置することで支圧破壊を防いだ。試験体は、杭および柱の軸方向鉄筋には高強度鉄筋SBPD1080/1230のD22を用いて、杭や柱の軸方向鉄筋の降伏で最大耐力とならず、接合部の定着部で損傷するように設計した。また、M-11、M-12以外の試験体については、接合部の軸方向鉄筋の周囲にシーブ管を配置し、コンクリートと鉄筋の付着力による耐力増加を除いて接合部耐力への影響を排除した。

主なパラメータは鋼管による拘束効果を把握するため、鋼管径D、鋼管板厚t、鋼管長L、柱軸方向鉄筋と杭軸方向鉄筋との中心間距離a、接合部での軸方向鉄筋の付着の有無である。



図－4 試験状況

使用材料の材料試験結果を表-1に示す。コンクリートの圧縮強度は載荷試験当日のものであり、鋼管および軸方向鉄筋の引張降伏強度については、試験体に用いたものと同ロッドのテストピース3本ずつで引張試験を行った結果の平均値である。鋼管は板厚3.2mmのものについてはSS400の平鋼板を管状に加工して用い、板厚が6.4mm、12.7mmのものについてはSTK400の既成形鋼を用いた。

### 2.2 試験方法と計測項目

試験状況を図-4に示す。試験は対称2点載荷の静的曲げ載荷で行った。実構造物における柱と梁の接合部では曲げモーメントとせん断力の両方が作用する部分となるが、本試験では接合部を等曲げ区間に置いて、曲げモーメントによって加わる軸方向鉄筋の引張力による軸方向鉄筋端部の定着破壊を想定して試験を行った。

主な計測項目は、載荷荷重と試験体の鉛直変位、軸方向鉄筋および鋼管の外側表面に貼付したワイヤーストレインゲージによるひずみである。

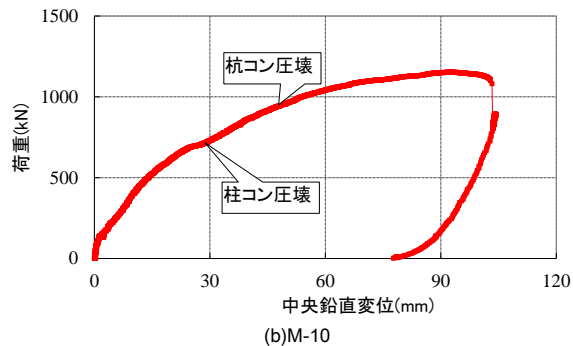
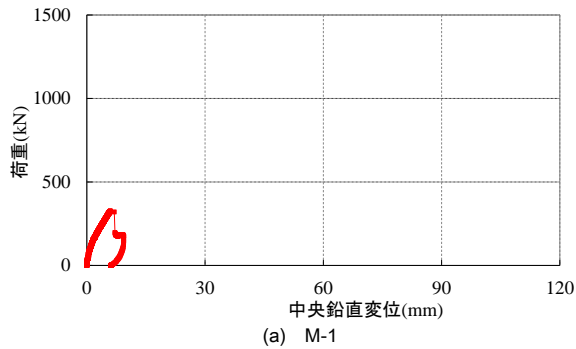


図-5 荷重－中央鉛直変位関係

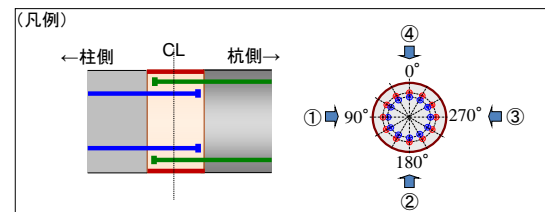


(a) M-1



(b) M-10

図-6 試験終了後の全景



### 3. 試験結果

#### 3.1 荷重－変位関係と損傷過程

M-1およびM-10の荷重と中央鉛直変位の関係を図-5に、試験終了後の全体の状況を図-6に示す。また、M-10およびM-12の試験終了後に接合部の鋼管を撤去した後の接合部の状況を図-7に示す。M-1およびM-10は鋼管の有無が異なるパラメーターであり、M-10およびM-12は鋼管板厚および鉄筋の付着の有無が異なるパラメーターの試験体である。

M-1では、載荷初期に等曲げ区間に梁下面から上方へ伸びる曲げひび割れが発生した。特に、接合部の両端付近の梁下面から上方へ伸びる曲げひび割れが顕著に進展した。その後、最大荷重付近に達すると、接合部の柱側端部付近から生じた曲げひび割れが、図-7の凡例に示す90°と270°付近で軸方向に向きを変えて割裂ひび割れとなって進展し、急激に荷重が低下した。また、梁下面の180°付近でも割裂ひび割れが生じていた。

M-10では、載荷初期に等曲げ区間に曲げひび割れが発生し、接合部両端の曲げひび割れが顕著に進展しひび割れ幅も増大していった。その後、接合部両端の梁上面にコンクリートの圧縮破壊が生じた。その後も接合部端部のひび割れ幅は大きくなり続け、鋼管端部の上面付近で降伏したのち軸方向鉄筋の抜け出しが発生し荷重が低下し始めた。試験終了後の接合部の状況を見ると、柱側の接合部端部付近に生じた曲げひび割れが鋼板補強部の120°および240°付近で梁軸方向に伸び、割裂ひび割れ

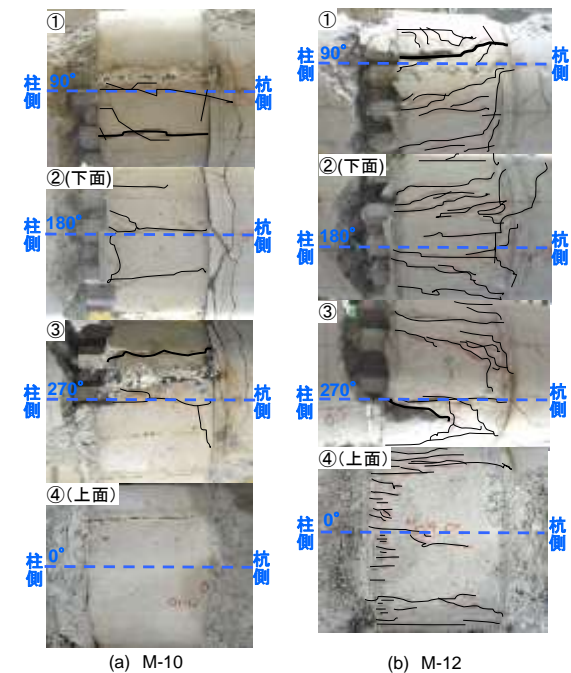


図-7 試験終了後（鋼管撤去後）の接合部の状況

と連続していた。

M-12では、試験終了時に接合部のひび割れ状況を見ると、軸方向鉄筋に付着があるM-12では、付着がないM-10に比べてひび割れが分散する傾向があったが、付着部分から生じるようなひび割れなどは見られず、その他の傾向は付着の有無にかかわらず同様であった。

#### 3.2 最大荷重

##### (1) 最大曲げモーメント

最大曲げモーメントの試験結果を表-2に示す。表-2には材料試験結果から求まる杭側および柱側断面の終局曲げモーメントの計算値も示す。終局曲げモーメントの計算値は、断面内の平面保持を仮定し、圧縮縁のコンクリートのひずみが  $3500\mu$  に達するときの曲げモーメントとして円形断面で算出した。

最大曲げモーメントの試験結果  $M_{max}$  は、柱や杭の終局曲げモーメントの計算値  $M_{uc}$ 、 $M_{upile}$  との関連性は見られず、最大曲げモーメントと杭や柱の終局曲げモーメントとの関連性は低いと考えられる。

### (2) $t/Ri$ 、 $a/L$ と $M_{max}$ との関係

最大曲げモーメントの試験結果  $M_{max}$  と、鋼管板厚  $t$  と鋼管内半径  $Ri$  の比  $t/Ri$  の関係を図-8に、軸方向鉄筋中心間隔  $a$  と鋼管長  $L$  の比  $a/L$  との関係を図-9に示す。なお、いずれもコンクリート強度  $f_c$  の影響を除去して比較するため、最大曲げモーメント  $M_{max}$  を  $f_c$  の  $2/3$  乗で除した値で比較している。また、図-8では  $t/Ri$ 、図-9では  $a/L$  以外のパラメーターについては同一の試験体のみで比較を行った。

図-8より、 $t/Ri$  が大きいほど最大曲げモーメント  $M_{max}$  は大きくなる傾向があり、 $t/Ri$  が大きくなるほど増加傾向が緩やかになる傾向があった。これは、鋼管板厚  $t$  が大きくなるほど、もしくは外径  $D$  が小さくなるほど鋼管による拘束効果が大きくなり、鋼管の拘束効果にも一定の限界値があると推察される。この傾向は、要素試験の結果<sup>1)</sup>と同様となった。

図-9より、 $a/L$  が大きいほど最大曲げモーメント  $M_{max}$  は小さくなる傾向となり、これも要素試験の結果<sup>1)</sup>と同様であった。これは、杭と柱の定着体で挟まれるコンクリート部分でせん断破壊が生じていると仮定すれば、せん断スパン比に相当する  $a/L$  が大きいほど耐力が大きくなる結果となり、一般的なせん断耐力評価式の傾向と同じであった。

### (3) 軸方向鉄筋の定着の影響

接合部での軸方向鉄筋の定着の有無のみを変えた試験体の最大曲げモーメント  $M_{max}$  の比較を図-10に示す。軸方向鉄筋の付着がある場合には、付着がない場合に比べて、最大曲げモーメントが大きくなる傾向があった。これらのことから、軸方向鉄筋の定着を無視した試験により接合部の耐力を評価することは、安全側の評価になっていることが分かる。

### 3.3 鋼管周方向ひずみ

最大荷重時における M-10 試験体の鋼管の周方向に発生するひずみの分布を図-11に示す。計測位置により差があるものの、杭側から柱側へ向けて鋼管の周方向ひずみは大きくなる傾向があった。この傾向は他の試験体にも共通しており、文献1に示す全鉄筋に引張軸力が作用

表-2 最大曲げモーメントの試験結果と計算値

試験体名称	試験値		計算値	
	最大荷重 $P_{max}$ (kN)	最大曲げモーメント $M_{max}$ (kN・m)	柱の終局曲げモーメント $M_{ucolumn}$ (kN・m)	杭の終局曲げモーメント $M_{upile}$ (kN・m)
M-1	324.7	81	218	277
M-2	1216	304	218	277
M-3	1149	287	168	215
M-4	699	175	188	240
M-5	1936	484	420	493
M-6	1486	371	386	546
M-7	1130	283	264	536
M-8	1436	467	381	487
M-9	858	214	160	207
M-10	1153	288	184	236
M-11	249	81	241	306
M-12	804	261	185	237

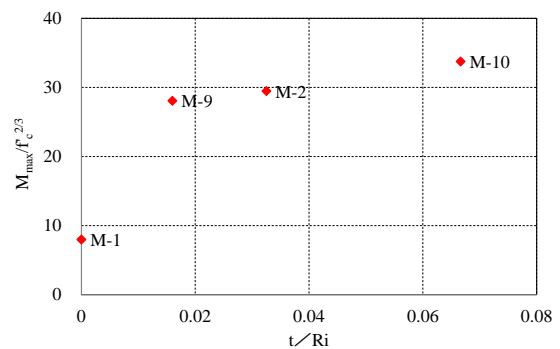


図-8 最大曲げモーメント  $M_{max}$  と  $t/Ri$  の関係

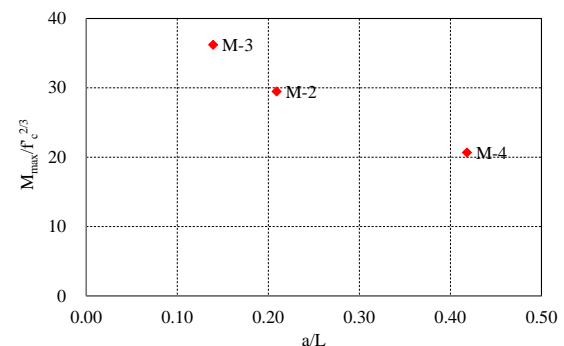


図-9 最大曲げモーメント  $M_{max}$  と  $a/L$  の関係

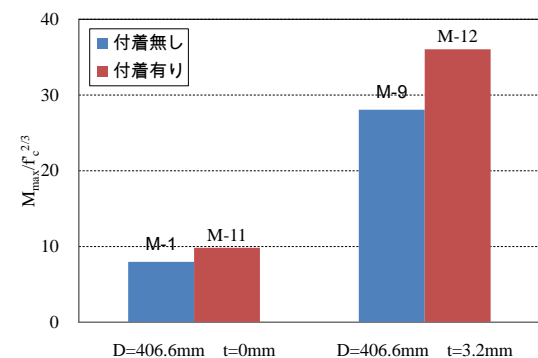


図-10 軸方向鉄筋の付着有無による  $M_{max}$  の比較

したときの鋼管で囲まれ定着体同士で挟まれたコンクリートのせん断耐力の傾向とも同様な結果となった。

### 3.4 軸方向鉄筋ひずみ

最大荷重時における M-10 試験体の梁中央断面での軸方向鉄筋ひずみの分布を図-12 に示す。図-12 より、圧縮縁から約 142mm の位置で梁中央断面の軸方向ひずみは 0 になると想定され、この位置が中立軸位置だと思われる。また、この位置は、試験終了後の鋼管撤去後に接合部付近で観察された割裂ひび割れの位置とほぼ一致しており、この傾向は他の試験体にも共通していた。

## 4. 考察

### 4.1 最大荷重時の損傷状況の分析

3.3 および 3.4 に示す鋼板の周方向ひずみや軸方向鉄筋のひずみ分布の結果から、最大荷重付近では、中立軸位置付近に割裂ひび割れが発生し、その割裂ひび割れより下縁側のかぶりコンクリートが軸方向鉄筋より外側へ押し出され、図-13 に示すようなせん断破壊面が生じて荷重が低下するものと推測される。文献 1 に示す、全鉄筋に引張軸力が作用した場合の鋼管で囲まれ定着体同士で挟まれたコンクリートの場合には、全周で円錐台状のせん断破壊面が確認されたが、本試験の範囲では梁下面の引張応力範囲においてのみ円錐台状のせん断破壊面が生じ中立軸位置付近で試験体表面へひび割れが解放されて割裂ひび割れが生じるものと思われる。

### 4.2 最大荷重の評価

最大荷重が、図-13 で想定したせん断破壊面に作用するせん断耐力により決まるものと想定して、以下で最大荷重の評価を試みる。

#### (1)作用せん断力

最大荷重時における軸方向鉄筋ひずみ値より、各軸方向鉄筋に発生している引張力が推定できる。この合力が図-13 のせん断破壊面に作用する作用せん断力の試験値  $P_{exp}$  と考えらる。 $P_{exp}$  を表-3 に示す。なお、表-3 には後述するせん断耐力  $P_{cal}$  も示す。

#### (2)せん断耐力

文献 1 より、全軸方向鉄筋に引張力が発生した場合の定着体で挟まれる部分のせん断破壊面に発生するせん断応力  $\tau_{cal}$  については、鋼管による拘束の影響を考慮して、式(1)および式(2)で評価できる。式(1)および式(2)より求まるせん断応力  $\tau_{cal}$  と、図-13 のせん断破壊面の面積  $S$  との積から、せん断耐力の計算値  $P_{cal}$  が算出できる。 $P_{cal}$  の算出結果を表-3 に示す。

表-3 より、M-4 のように補強長が短いものについて計算値が過小となり、M-3 や M-8 のように補強長が長いものについては計算値が過大となる傾向はあるが、平均すると  $P_{exp}$  は  $P_{cal}$  の 0.86 倍となり、概ね試験結果を妥当に評価しているものと考えられる。

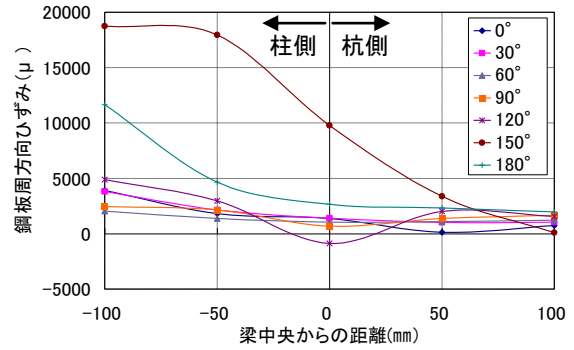


図-11 鋼管周方向ひずみの分布 (M-10)

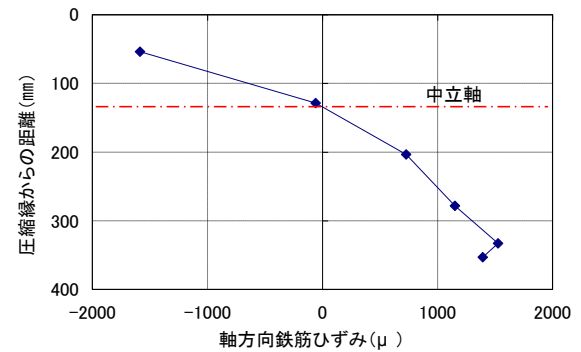


図-12 軸方向鉄筋のひずみ分布 (M-10)

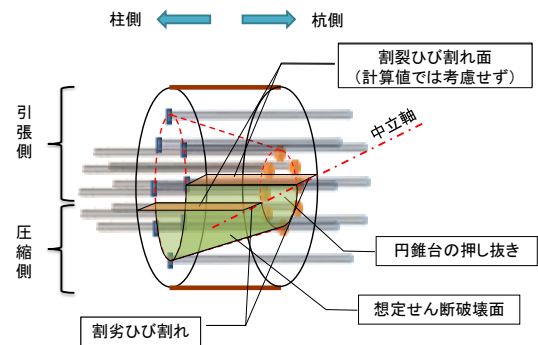


図-13 想定されるせん断破壊面

表-3 せん断応力の試験値と計算値

試験体名称	中立軸位置 (mm)	軸方向鉄筋に作用する引張力の合計 $P_{exp}$ (kN)	せん断応力の計算値 $\tau_{cal}$ (N/mm <sup>2</sup> )	想定されるせん断面積 $S$ (mm <sup>2</sup> )	せん断耐力の計算値 $P_{cal}$ (kN)	$P_{exp}/P_{cal}$
M-2	108	1782	18.0	115804	2084	0.86
M-3	118	1490	18.1	168343	3053	0.49
M-4	127	850	9.3	58999	548	1.55
M-5	145	1841	13.8	149418	2069	0.89
M-6	169	870	6.5	181903	1180	0.74
M-7	155	797	5.1	202229	1024	0.78
M-8	194	1624	11.2	225821	2535	0.64
M-9	132	993	10.9	110841	1207	0.82
M-10	142	1473	14.9	102133	1522	0.97

## 5. まとめ

杭・柱の軸方向鉄筋端部に定着体を取り付け、その周囲を鋼管で拘束することで定着長を短くする構造について縮小模型を用いた曲げ載荷試験により検討した。その結果、次のことが分かった。

- ① 杭と柱の軸方向鉄筋の端部に取り付けた定着体の周囲を鋼管で拘束することで、鋼管による拘束がない場合に比べて接合部の耐力が向上し、安定した破壊形態となった。
- ② 本構造での接合部の耐力は、引張領域における定着体相互の間に生じるせん断ひび割れにより決まるものと考えられる。
- ③ せん断ひび割れ面の最大せん断応力に、文献1に示すせん断応力の計算値を用い、せん断破壊面の面積に乗ずることで、最大せん断力のある程度推定でき

る。なお、本検討では、接合部での軸方向鉄筋の付着を除去した試験体で最大耐力の評価を行っており、安全側の評価となっている。

#### 参考文献

- 1) 井口重信, 坂本真紀, 滝沢 聡: 軸方向鉄筋端部に定着体を取り付けた杭・柱・地中梁接合部に関する実験的検討, コンクリート工学年次論集, Vol.34, No.2, pp.319-324, 2012