

# 論文 低環境負荷を考慮した摩擦接合型機械式定着具を用いた RC 柱の変形性能に関する研究

松家 武樹<sup>\*1</sup>・高橋 直伸<sup>\*2</sup>・鈴木 基行<sup>\*3</sup>・堺 孝司<sup>\*4</sup>

**要旨：**本研究は異形鉄筋の先端部に円形の定着板を摩擦接合した機械式定着具を有する環境配慮鉄筋を、鉄筋コンクリート柱の中間帯鉄筋として用いた場合の環境負荷量を算出し、両端フックの重ね継手配筋との比較を行い、環境負荷低減効果について検討した。さらに、その機械式定着鉄筋を用いた鉄筋コンクリート柱の変形性能についても検討した。その結果、摩擦接合型機械式定着鉄筋の利用は、両端フックの重ね継手配筋に比べ、最大約 50%の CO<sub>2</sub> 排出量を低減させること、およびその機械式定着鉄筋を用いた鉄筋コンクリート柱の変形性能は、両端フック鉄筋の場合と同等程度の変形性能を有していることが明らかとなった。

**キーワード：**機械式定着、摩擦接合、CO<sub>2</sub> 排出量、変形性能、中間帯鉄筋

## 1. はじめに

我が国の建設セクターで消費される資源およびエネルギー量は膨大<sup>1)</sup>であり、それらに起因する地球温暖化問題は極めて深刻である。北海道洞爺湖で開催された G8 サミットでは「2050 年までに、1990 年比で温暖化ガス排出量を 50%削減する長期目標を、世界レベルで共有するよう求める」ことで合意された。このようなことから、建設セクターおよびコンクリートセクターも、これまで要求されてきた材料性能および力学性能に加え、環境性能も性能評価の一つのインデックスとして考慮することが重要になってきている。2005 年には、土木学会よりコンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)<sup>2)</sup>が発刊されている。

一方、土木学会では「鉄筋定着・継手指針[2007 年版]<sup>3)</sup>が発刊された。従来の鉄筋継手指針<sup>4)</sup>は見直され、新たに機械式定着などの鉄筋の定着に関する最新の技術的事項が加えられている。機械式定着鉄筋は両端フックの重ね継手配筋に替わって使用することで施工の合理化につながる<sup>5)</sup>と同時に、鉄筋の量も少なくなり<sup>6)</sup>、環境負荷低減に寄与する。

著者らは、標準フックの代替として、異形鉄筋の先端部に円形の定着板を接合させた、写真-1 に示す機械式定着鉄筋を開発している。機械式定着鉄筋は両端フックの重ね継手配筋に比して鉄筋量は少なくなるが、定着板の製造や運搬、および摩擦接合による加工などが付加されるため消費エネルギー量は増大する。

一方、これまで機械式定着鉄筋は軸方向鉄筋としての定着性能に関する検討を行い、本技術の評定を取得している<sup>7)</sup>が、せん断補強筋や中間帯鉄筋である横方向鉄筋の

定着性能に関する検討<sup>8)</sup>は十分に行われていない。

そこで本研究では、仮想モデル部材構造物に必要な機械式定着鉄筋の製造および運搬ならびに加工までの CO<sub>2</sub> 排出量を算出し、両端フックの重ね継手配筋との比較を行い、機械式定着鉄筋を利用することによる CO<sub>2</sub> 排出量の低減効果について明らかにすると共に、機械式定着鉄筋を中間帯鉄筋として用いた鉄筋コンクリート(以下、RC と略記)柱の正負交番繰返し載荷試験を実施し、一般的に用いられている両端が半円形フックを設けた鉄筋(以下、フック鉄筋と略記)を中間帯鉄筋として用いた場合との比較を行い、機械式定着鉄筋が RC 柱の変形性能に及ぼす影響について明らかにする。

## 2. 機械式定着鉄筋の概要

### 2.1 機械式定着鉄筋の製造方法

鉄筋の端部に定着板を接合させる方法は、鉄筋の端部に定着板を所定の圧力で押しえながら数秒間、高速回転させ、その摩擦熱により圧接(以下、摩擦接合と略記)するものである。図-1 に、摩擦接合に必要なとされる電流量と経過時間の関係を示す。後述する CO<sub>2</sub> 排出量を算定する際に必要となる電力量は、安定した電流量の値に電圧と摩擦接合時間を乗じて算出している。

### 2.2 材料仕様

本研究で使用した鉄筋の材質は全て SD490 の高強度鉄筋である。表-1 に、各鉄筋径に使用する定着板の寸法と摩擦接合した際に発生するバリの寸法などを示す。鉄筋端部に取り付ける定着板の直径および厚さは、鉄筋径の約 2.5φ および 0.8φ である。なお、定着板の材質は非調質高強度鋼である。

\*1 (株)間組 技術・環境本部 技術研究所 博士(工学) (正会員)

\*2 (株)伊藤製鐵所 技術サービス部

\*3 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 工博 (正会員)

\*4 香川大学 工学部 安全システム建設工学科 工博 (正会員)

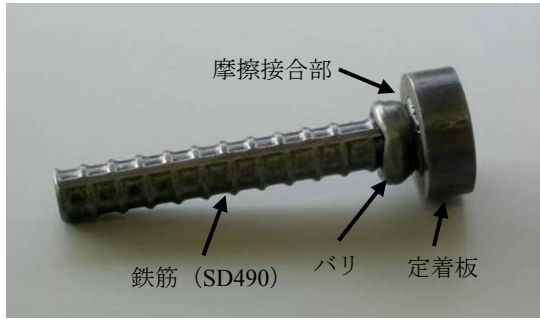


写真-1 機械式定着鉄筋

本研究では、機械式定着鉄筋を RC 柱の中間帯鉄筋として使用することを考えていることから、後述する CO<sub>2</sub> 排出量の算出の際には、現実的に使用される D13 から D22 までの鉄筋を対象とすることとした。

### 3. 環境評価

本研究ではインベントリデータが整備されている CO<sub>2</sub> 排出量を算出の対象にしている。インベントリデータは、「コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)」<sup>2)</sup>より引用した。本研究で使用する電炉鉄筋製造、電力および 4t トラックの CO<sub>2</sub> 排出原単位は、それぞれ 767.4kg, 0.407kg および 0.153kg を用いた。

#### 3.1 環境負荷量の算出方法

##### (1) 物質フロー

図-2 に、フック鉄筋と機械式定着鉄筋を現場まで運搬するまでの物質フローを示す。フック鉄筋は一つの工場で製造および加工されており、その工場から現場まで直接運搬される。一方、機械式定着鉄筋の先端に接合させる定着板は、先ず円形の棒鋼を工場で製造し、その棒鋼を所定の寸法に切断するために別の工場へ運搬される。仕上がった定着板はさらに別の工場へ運搬され摩擦接合が行われる。本研究では、同図の破線で囲まれる区間を評価の対象にしている。詳述すると、フック鉄筋では、鉄筋の製造、鉄筋の切断、および鉄筋端部の曲げ加工を考慮している。一方、機械式定着鉄筋では、鉄筋および定着板の製造と切断、定着板の運搬、鉄筋端部の曲げ加工および摩擦接合加工を考慮している。なお、鉄筋の工

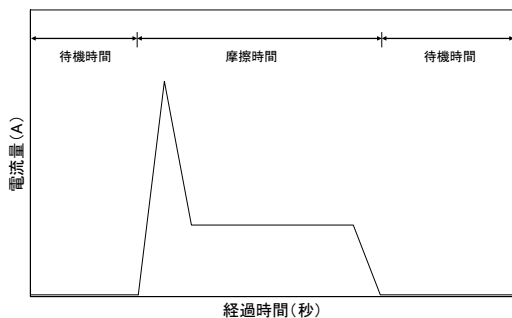


図-1 電流量と経過時間の関係

表-1 機械式定着鉄筋の材料仕様

呼び径	定着板の直径	定着板の厚み	バリの直径	定着板の直径	定着板の厚み
	(mm)	(mm)		鉄筋径	鉄筋径
D13	32	11	21	2.52	0.87
D16	40	13	26	2.52	0.82
D19	50	16	31	2.62	0.84
D22	55	18	36	2.48	0.81
D25	60	20	41	2.36	0.79
D29	75	24	45	2.62	0.84
D32	80	26	50	2.52	0.82
D35	85	28	55	2.44	0.80
D38	95	31	60	2.49	0.81
D41	100	33	67	2.42	0.80
D51	125	41	-	2.46	0.81

場内での場内運搬は考慮していない。

##### (2) 仮想モデル部材

図-3 に、仮想モデル部材構造物に配置する鉄筋の状況を示す。中間帯鉄筋を配する部材断面方向長さ(以下、配筋方向長さとして略記)は 500mm, 1500mm および 2000mm の3種類、帯鉄筋のかぶりは 50mm と仮定し、フック鉄筋および機械式定着鉄筋の鉄筋量を算出している。フック鉄筋の一部は重ね継手配筋を行うものとする。重ね継手の定着長は式(1)より算出した。

$$l_d = \frac{f_{yd}}{4f_{bod}} \phi \quad (1)$$

ここに、

$l_d$  : 鉄筋の基本定着長 (mm)

$f_{yd}$  : 鉄筋の設計引張降伏強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f_{bod}$  : コンクリートの設計付着強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$$f_{bod} = 0.28 f_{ck}'^{2/3}$$

$f_{ck}'$  : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\phi$  : 鉄筋径

である。鉄筋は SD490 を使用しているものとする。曲げ内半径は  $3\phi$  となる。コンクリートの圧縮強度は 24.0N/mm<sup>2</sup> とする。表-2 に、配筋方向長さが 2000mm の場合における中間帯鉄筋を 1 箇所設置するにあたり必

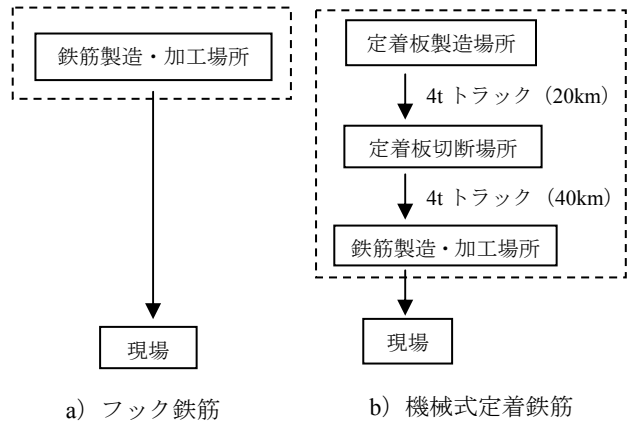


図-2 物質フロー

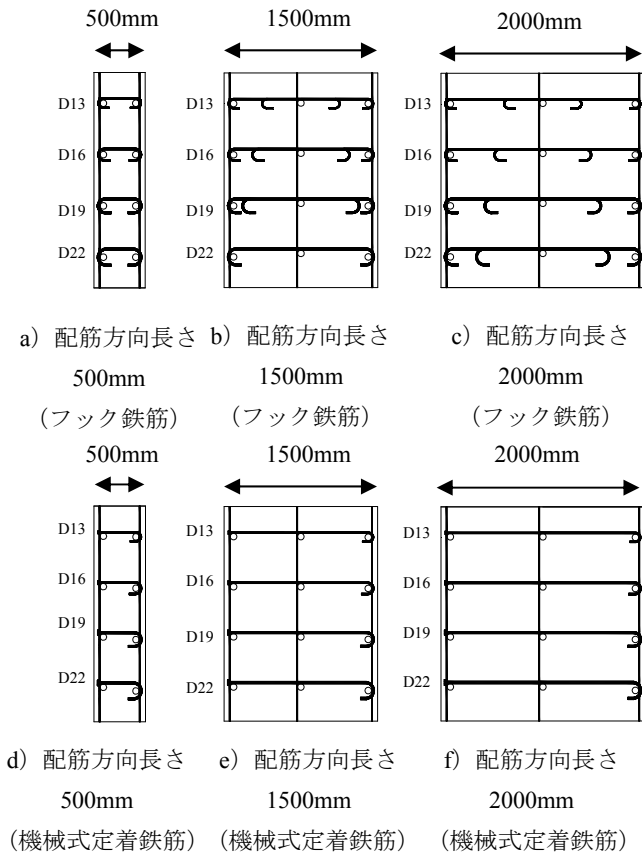


図-3 鉄筋の配置

要な鉄筋量の一例を示す。1箇所設置するにあたり、機械式定着鉄筋の総量はフック鉄筋に比して、36.2%から46.9%の鉄筋量を削減できる。一方、重ね継手を設けない配筋方向長さが500mmの場合、機械式定着鉄筋の総量はフック鉄筋に比して14.6%から18.0%の鉄筋量を削減できる。

### 3.2 CO<sub>2</sub> 排出量

図-4に、フック鉄筋および機械式定着鉄筋のCO<sub>2</sub>排出量を示す。何れの鉄筋径においても、機械式定着鉄筋はフック鉄筋に比して、CO<sub>2</sub>量を低減できる結果となった。特に、鉄筋径が大きくなるに従い、その差は顕著となる。これは鉄筋径が大きくなるに従い重ね継手長が長くなり、使用する鉄筋量が増大するためである。配筋方向長さが2000mmの場合の機械式定着鉄筋のCO<sub>2</sub>排出量は、フック鉄筋に比して、35.4%から46.5%の削減効果がある。一方、重ね継手を設けない配筋方向長さが500mmの場合の機械式定着鉄筋のCO<sub>2</sub>排出量は、フック鉄筋に比して、

表-2 1箇所あたりの鉄筋量  
(配筋方向長さ 2000mm の場合)

呼び径	フック鉄筋			機械式定着鉄筋		
	重ね継手長 (mm)	定着長 (mm)	曲げ内半径	鉄筋量 (kg)	定着板量 (kg)	総鉄筋量 (kg)
D13	668	60	3φ	3.35	1.57	1.64
D16	836	64		5.77	2.52	2.65
D19	1004	76		9.12	3.73	3.98
D22	1167	89		13.17	5.13	3.94
				13.17	5.13	3.94

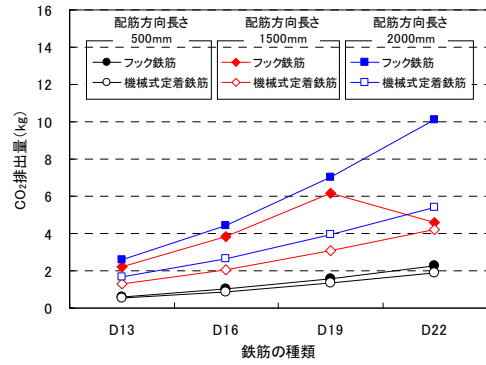


図-4 CO<sub>2</sub> 排出量

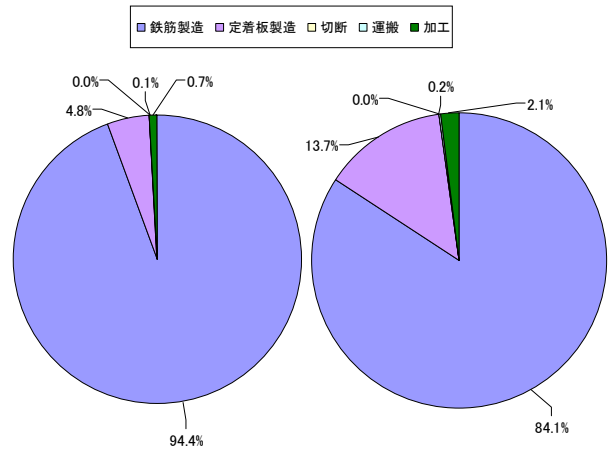


図-5 機械式定着鉄筋のCO<sub>2</sub>排出量の内訳(D22のケース)

12.0%から16.4%の削減効果がある。前述した鉄筋の削減量を鑑みると、CO<sub>2</sub>排出量の削減は鉄筋量の低減に依存している。配筋方向長さが1500mmのD19の場合には機械式定着鉄筋とフック鉄筋の差が最大となり、その削減率は49.7%であった。なお、配筋方向長さが1500mmのD22のフック鉄筋は、重ね継手を設けていないため、機械式定着鉄筋とのその差が著しく小さくなっている。

図-5には、配筋方向長さが2000mmおよび500mmのD22の場合における機械式定着鉄筋のCO<sub>2</sub>排出量の内訳を示す。機械式定着鉄筋は、鉄筋製造および定着板製造の際に、CO<sub>2</sub>が最も排出されることがわかる。なお、本試算の定着板の摩擦接合および鉄筋端部の曲げ加工によるCO<sub>2</sub>の排出量は、全体の4.0%未満であった。フック鉄筋の各工程によるCO<sub>2</sub>の排出量の内訳は、製造段階が大きなウェイトを占めており、製造段階以外で排出されるCO<sub>2</sub>量は、全体の1.4%未満である。

表-3 試験体の諸元

試験体名	断面 (mm)	高さ (mm)	軸方向鉄筋	軸方向鉄筋比 (%)	帯鉄筋	帯鉄筋比 (%)
フック鉄筋	500×1200	1800	30-D16	1.993	D13@100	0.211
機械式定着鉄筋						

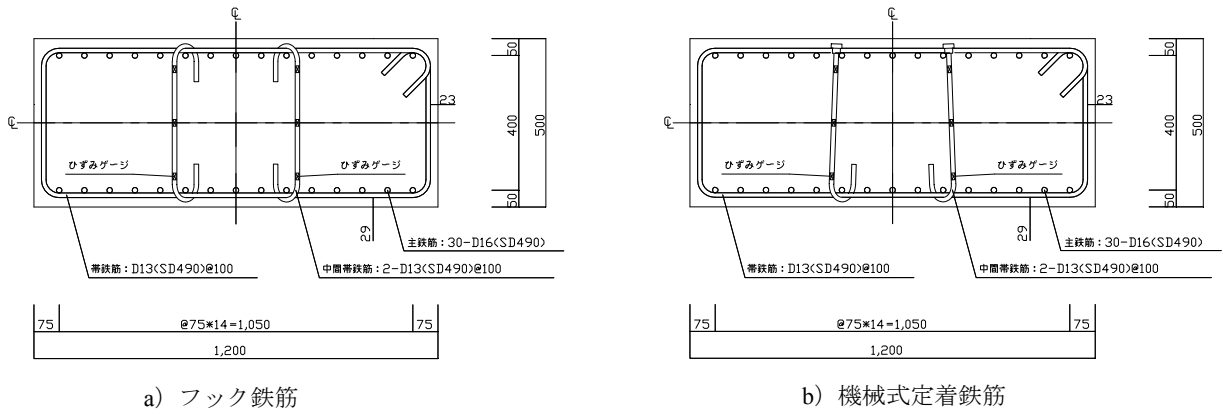


図-6 断面寸法

#### 4. RC 柱の正負交番繰返し載荷試験

本実験では、前記図-3 に示す部材断面方向長さが 500mm に相当する試験体を想定して、機械式定着鉄筋を中間帯鉄筋として用いた RC 柱の変形性能について明らかにすることとした。なお、本実験における中間帯鉄筋に用いた機械式定着鉄筋の鉄筋量および CO<sub>2</sub> 排出量は、フック鉄筋に比して 14.1% および 11.6% の削減効果がある。

##### 4.1 試験体

###### (1) 形状寸法および諸元

本実験で使用した試験体の諸元を表-3 に示す。図-6 および図-7 には、試験体の断面寸法および、試験体の形状寸法と配筋状況を示す。試験体の断面は、500×1200mm の矩形断面である。配筋は、軸方向鉄筋を 30-D16 とし、帯鉄筋は D13@100 とした。中間帯鉄筋は、フック鉄筋と機械式定着鉄筋の 2 種類である。

###### (2) 鉄筋およびコンクリートの材料特性

表-4 に、鉄筋の材料特性を示す。本実験に用いた鉄筋の材質は、全て SD490 の高強度鉄筋である。コンクリートの水セメント比は 67.5% とした。試験材齢時におけるフック鉄筋および機械式定着鉄筋を用いた柱部材のコンクリートの圧縮強度は、25.0 および 28.4N/mm<sup>2</sup> である。

##### 4.2 載荷方法および測定項目

図-8 に、RC 柱の正負交番繰返し載荷試験の状況を示す。試験体は反力床に PC 鋼棒で固定している。試験体の上部には 600kN の軸圧縮力を載荷させている。これは軸方向応力度で 1.0N/mm<sup>2</sup> に相当する。

水平載荷は変位制御により正負交番繰返し載荷を行った。せん断スパン比は 4.0 である。正負それぞれの載荷で引張側の軸方向鉄筋が降伏ひずみに達した変位を降伏変位 (1δ<sub>y</sub>) とし、以降、軸方向鉄筋の降伏変位の整数倍 1δ<sub>y</sub> から 10δ<sub>y</sub> を目標に各 3 回ずつ載荷を行ったが、試験体の耐力が著しく低下した 8δ<sub>y</sub> で載荷を終

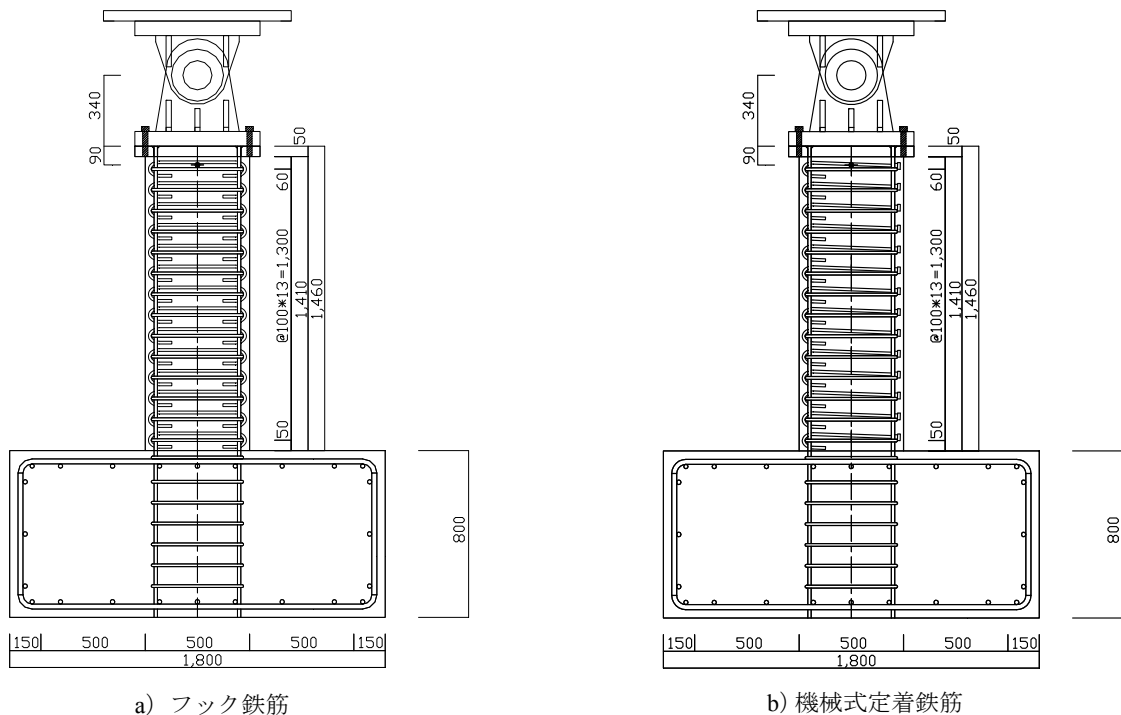


図-7 試験体の形状寸法および配筋状況

表-4 鉄筋の材料特性

呼び径	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏ひずみ (μ)	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
D13	492	2642	19.1	639
D16	535	2807	19.3	709

了した。なお、正側および負側ともに、 $1\delta y$  を 10.8mm とした。

計測項目は、各荷重段階における水平荷重、および柱部材の頭部から 90mm の位置における水平変位、ならびに前記図-6 に示す位置の中間帯鉄筋のひずみである。中間帯鉄筋のひずみは、柱部材の基部から 50mm、150mm、250mm および 350mm の位置を計測した。

### 4.3 実験結果および考察

#### (1) 試験体の損傷状況

写真-2 に、 $8\delta y$  の荷重終了時点における各試験体の損傷状況を示す。何れの試験体においてもコンクリートの損傷に大きな差異はなく、 $1\delta y$  に至る以前に曲げひび割れが発生し、 $6\delta y$  の 2 サイクル目の時点で、かぶりコンクリートの剥離が生じた。主鉄筋の破断本数はフック鉄筋試験体の正側は 3 本、負側は 11 本であり、機械式定着鉄筋試験体の正側は 2 本、負側は 6 本であった。柱基部から 50mm、100mm および 150mm に位置する機械式定着鉄筋の定着板は、最終的に帯鉄筋から全て外れている。

#### (2) 水平荷重—水平変位

図-9 に、各試験体の水平荷重と水平変位の履歴曲線を示す。同図には、軸方向鉄筋が破断した水平変位も併せて示す。前述したコンクリートの剥離および軸方向鉄筋の破断は、ほぼ同程度の水平変位で始まり、耐力の低下の割合も同程度であることがわかる。図-10 には、各荷重ステップの 1 サイクル目における水平荷重と水平変位の包絡線を示す。同図には、土木学会コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>に示されている、載荷荷重が降伏荷重を下回らない最大の変位を終局変位とし、その点をプロットしている。水平耐力の低下が生じる終局変位は何れの試験体も約 65mm であり、ほぼ同等である。終局変位以降もフック鉄筋と機械式定着鉄筋を用いた試験体は、同様の挙動を示しており、機械式定着鉄筋の拘束効果がフック鉄筋とほぼ同等であるといえる。

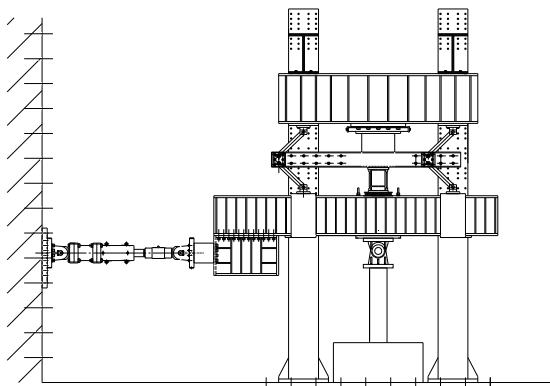
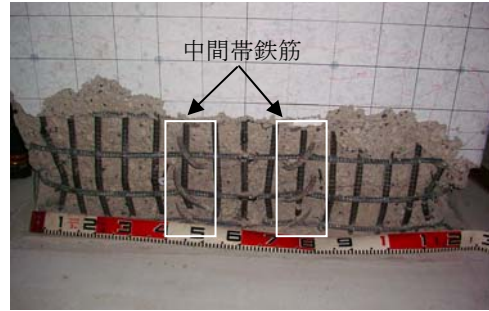
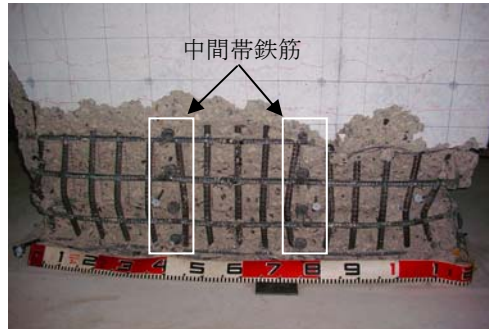


図-8 試験状況



a) フック鉄筋



b) 機械式定着鉄筋

写真-2 損傷状況

ク鉄筋と機械式定着鉄筋を用いた試験体は、同様の挙動を示しており、機械式定着鉄筋の拘束効果がフック鉄筋とほぼ同等であるといえる。

#### (3) エネルギー吸収性能

図-11 に、各荷重ステップの履歴吸収エネルギーを示す。同図に示す履歴吸収エネルギーは、各荷重ステップのうち 1 サイクル目の吸収エネルギーを関化したものである。塑性率は水平変位量と降伏水平変位量の比である。いずれの試験体でも履歴吸収エネルギーはほぼ同じであることがわかる。試験体の損傷状況で前述した通り、機械式定着鉄筋は最終的に帯鉄筋から外れていたが、結果的に同程度の性能を有している。これは、機械式定着鉄筋の定着板がコンクリートに埋め込まれていたため、コンクリートの横方向の変形を抑制し、そのことが変形性

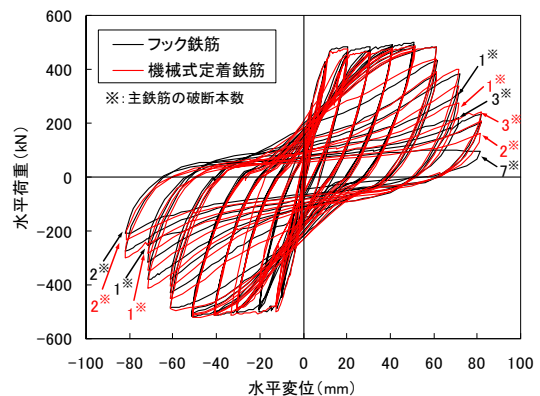


図-9 水平荷重—水平変位履歴曲線

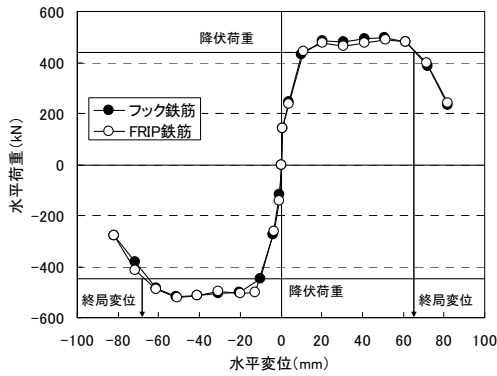


図-10 水平荷重—水平変位の包絡線

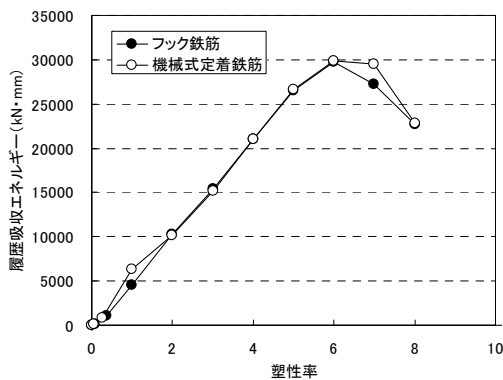
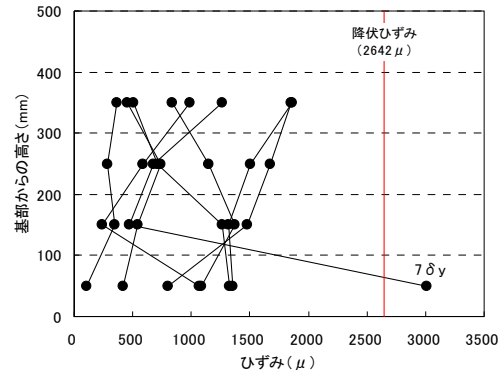
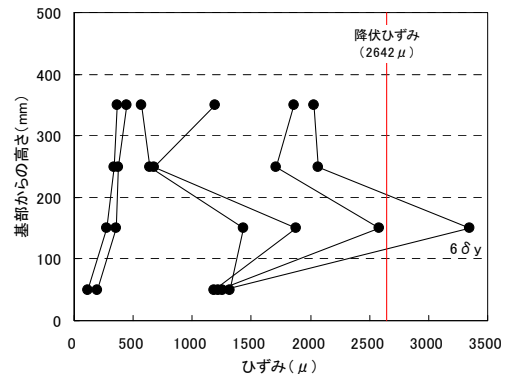


図-11 履歴吸収エネルギーと塑性率の関係



a) フック鉄筋



b) 機械式定着鉄筋

図-12 中間帯鉄筋のひずみ分布

能に寄与したと考えられる。

#### (4) 中間帯鉄筋のひずみ

図-12に、各载荷ステップの1サイクル目で中間帯鉄筋に生じた最大の鉄筋ひずみを、柱部材の基部から高さ方向に沿ったひずみ分布を示す。なお、本実験で使用した中間帯鉄筋の降伏ひずみは、 $2642\mu$ である。中間帯鉄筋に使用したフック鉄筋および機械式定着鉄筋のひずみは、それぞれ $7\delta_y$ および $6\delta_y$ で降伏していることがわかる。このことは何れの中間帯鉄筋も十分な拘束効果があることを示唆するものである。

### 5. まとめ

本研究の結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 機械式定着鉄筋の利用は、両端フックの重ね継手配筋に比して、 $\text{CO}_2$ 排出量を最大約50%低減できる。
- (2) 鉄筋に定着板を取り付けるための摩擦接合および曲げ加工による $\text{CO}_2$ 排出量は、全体の4.0%未満である。
- (3) 機械式定着鉄筋を用いた試験体の損傷の程度および変形性能ならびに吸収エネルギー性能は、一般的に用いられているフック鉄筋の場合と同等である。
- (4) 中間帯鉄筋に用いる機械式定着鉄筋は、フック鉄筋の場合と同程度のコンクリート拘束効果がある。

### 謝辞

日東制機(株)の背尾直彦氏には、摩擦接合技術につ

いて貴重なご意見を賜った。ここに深甚の謝意を表する。

### 参考文献

- 1) 漆崎昇, 水野稔, 下田吉之, 酒井寛二: 産業連関表を利用した建築業の環境負荷推定, 日本建築学会計画系論文集, No.549, pp.75-82, 2001.11.
- 2) 土木学会: コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案), コンクリートライブラリー125, 2005.
- 3) 土木学会: 鉄筋定着・継手指針, コンクリートライブラリー128, 2007.
- 4) 土木学会: 鉄筋定着・継手指針, コンクリートライブラリー49, 1982.
- 5) 土木学会: 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー126, 2007.
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の環境配慮施工指針(案)・同解説, 2008.
- 7) 財団法人日本建築総合試験所: 建築技術性能証明評価概要報告書「FRIP定着工法」, 2004.
- 8) 松家武樹, 鈴木基行, 村上祐治, 高橋直伸, 塩屋俊幸: 摩擦接合型機械式定着鉄筋の定着性能に関する研究, 土木学会第63回年次学術講演会, pp.1111-1112, 2008.
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2007.