

論文 SRC 造耐震壁の壁筋の定着強度に及ぼす定着方法の影響

戸澤 知仁^{*1}・小野里 憲一^{*2}

要旨：SRC 造の耐震壁の配筋をする際、壁筋の定着は耐震壁を囲む柱や梁に内蔵される鉄骨に干渉するため、鉄骨の手前で折曲げるなどの方法で配筋される。本研究はそのような壁筋の定着方法について7種類の実験を行い、定着強度の違いを調べた。その結果、仕口付近で鉄筋の傾斜角度を大きくすると定着強度が低下すること、鉄骨の手前で90°に折曲げる方法では直線定着させた場合と比較して65%程度の強度しか得られない等の結果を得た。

キーワード：鉄骨鉄筋コンクリート造，耐震壁，定着方法

1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート造（SRC 造）建築物の耐震壁は、壁筋の定着部が壁板を囲む柱や梁に内蔵される鉄骨に干渉するため、壁筋を鉄骨の手前で折曲げるなどの方法で配筋される場合が多い。しかし、定着部における鉄筋の折曲げ方法によって定着強度がどのように変化するかは明らかでない。

近年では、鉄筋の定着に関するこれまでの研究成果¹⁾から、鉄筋の定着力は仕口断面から折曲げ部までで多くの力が伝達されるため、折曲げ先端部（余長）の長さは鉄筋径 d の 10~12 倍程度あればそれ以上長くしても定着強度が高くなるということが認められている。そのため、日本建築学会規準等²⁾⁻⁵⁾において、定着に関する見直しが行われた。このような考え方にもとづくと、SRC 造の耐震壁の壁筋はこれまで行われてきたように柱・梁に内蔵された鉄骨の手前で折曲げて定着した場合、十分な定着強度が得られない可能性がある。また壁筋を鉄骨の手前で折曲げる方法以外にも、壁筋と鉄骨の干渉を回避する方法は複数ある⁵⁾が、それぞれがどのような性能を有しているか比較した実験的資料はこれまでになかった。そこで本研究は、様々な壁筋の定着方法について実験を行い、定着強度の違いを調べることを目的としている。

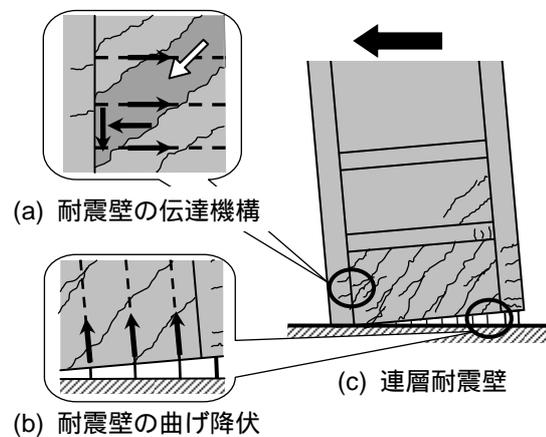


図 - 1 耐震壁

2. 実験計画

耐震壁の壁板と柱・梁の仕口では、図 - 1(a)に示すように壁板のコンクリートが仕口面に対してせん断力と圧縮力を伝達し、その内部で鉄筋が引張力を負担するという複雑な伝達機構を持つとされている⁶⁾。しかし、図 - 1(a)に示すような仕口部の定着に関する研究はあまり進んでおらず、このような仕口では鉄筋の定着が必要でないとする意見⁵⁾もある。本研究はこのような仕口に関しては今後の研究課題として、図 - 1(b)に示すような単純に壁筋が引張力のみを負担する場合を対象とした実験を行った。耐震壁における図 - 1(b)のような定着は、図 - 1(c)のように連層耐震壁の最下層で耐震壁が曲げ降伏する場合の壁縦筋の定着が想定される。

*1 工学院大学 工学研究科 建築学専攻（正会員）

*2 工学院大学 工学部建築都市デザイン学科准教授 博士（工学）（正会員）

2.1 試験体

(1) 試験体の形状

試験体は図 - 2 に示すように下端部を SRC 梁に固定した片持ち壁となっており，上端部に水平力を加えて壁面内方向に曲げモーメントが作用させられる。各々の試験体は壁縦筋の SRC 梁への定着方法を除けば，形状，配筋，および鉄骨などは全て共通である。壁板の厚さは 180mm，縦筋は D13@150 ダブル ($p_s=0.94\%$) であり，実際の建築物の耐震壁に使用されることのある壁厚と配筋である。全体の形状は，試験体が片持ち壁の下端部（仕口断面）で壁縦筋の引張降伏が先行するよう設計されている。壁縦筋の定着強度は試験体の上端に加えることのできる水平力で測られ，その水平力から計算される仕口断面での曲げモーメントの大きさを検討する。

(2) 定着方法の種類

試験体数は図 - 3 に示すように(a)～(g)の 7 種類の縦筋の定着方法について各 1 体，計 7 体とした。それぞれの定着方法の特徴は次の通りで，(a)と(d)を除けば実際に行われている配筋方法である。

- (a) フランジ突き当り型：最も簡便な配筋で，壁筋を鉄骨面の手前で止める方法である。
- (b) 90°折曲げ型：鉄骨面の手前で壁筋を 90°に折曲げ，先端の余長部を含む総長で必要定着長さ(35d)を確保する方法である。
- (c) フランジ迂回型：鉄筋をできるだけ緩やかに曲げ，鉄骨を迂回して配筋する方法である。壁筋の折曲げ部分の内側には壁筋と同径の直交筋を配筋している。
- (d) フック引掛け型：壁筋に 180°フックを付け，

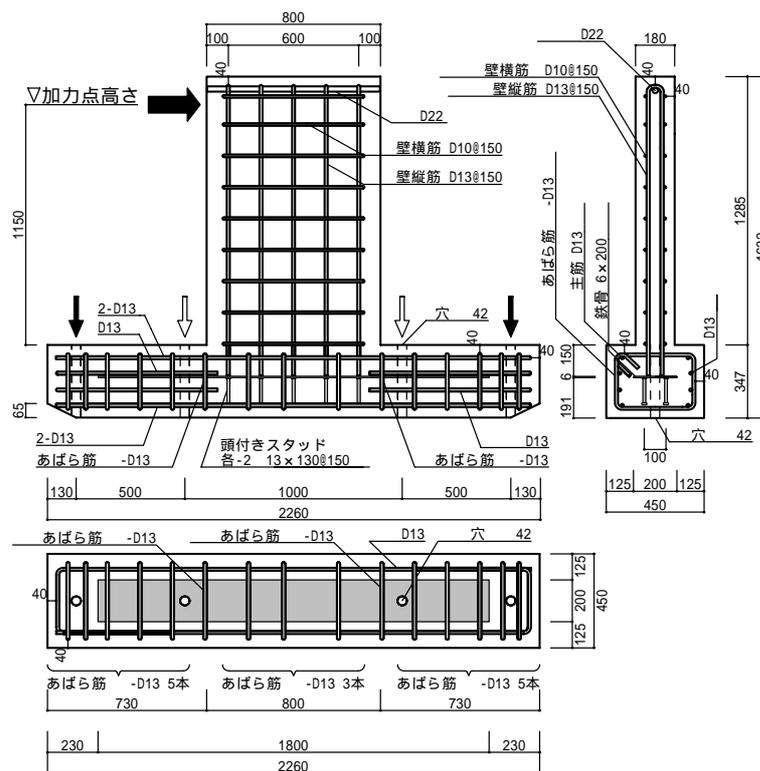


図 - 2 試験体配筋図(フランジ突き当り型)

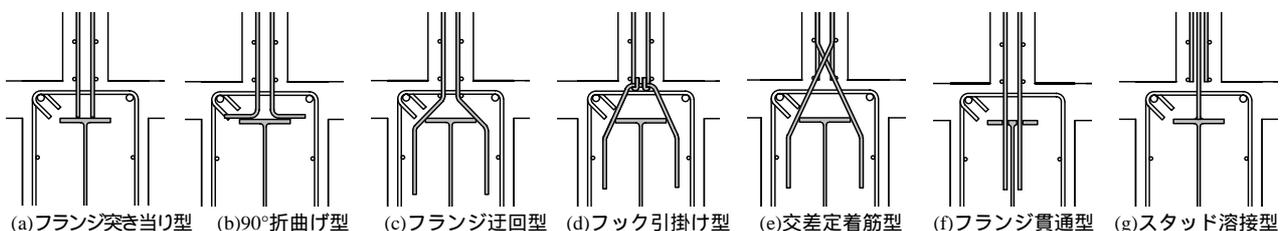


図 - 3 実験を行う定着方法

定着部の鉄筋に引掛ける方法である。

- (e)交差定着筋型：壁と梁の接合部に X 形に交差する定着筋を配筋する方法で、(c)の折曲げ角度より定着筋の角度が小さくなる。
- (f)フランジ貫通型：干渉する鉄骨フランジに鉄筋貫通孔を設け、この孔に壁筋を通し配筋する方法である。
- (g)スタッド溶接型：異形棒鋼スタッドを鉄骨に溶接し、壁筋と異形棒鋼スタッドを重ね継手で配筋する方法である。

なお、試験体(c), (d), (e), (f)の梁への定着長さは仕口面からの投影定着長さを $26d$ とし、文献 2)の必要定着長さ以上を確保している。

(3) SRC 梁

既往の実験⁷⁾によれば、縦筋を定着されるコンクリートが健全でひび割れが無い場合、鉄筋の定着長さは $10d$ 程度あれば鉄筋の付着強度が鉄筋の引張降伏強度を上回ることが知られている。仮に本実験において SRC 梁にひび割れが生じていない場合、計画した大半の定着方法で十分な定着力を得ることができると予想される。この場合、定着方法による違いはあらわれない。しかし、耐震壁に関する多くの実験から⁸⁾、耐震壁の破壊経過は 壁板のひび割れの発生 柱・梁フレームのひび割れの発生 壁板の圧壊の順序であり、柱・梁フレームのひび割れは耐震壁が最大強度に達する前から発生することが確認されている。そこで、本研究では SRC 梁のひび割れの発生を考慮した実験を計画した。そして本実験における試験体の SRC 梁に H 形鋼を内蔵した場合ひび割れを発生させることが困難な強度を有するため、図 - 4 に示すように、平鋼+頭付スタッドを H 形鋼のフランジに代用とすることで梁の強度を小さくし、後述の 2.2 に示すような加力方法でひび割れを発生させる工夫をしている。

(4) 材料の諸性質

試験体に使用したコンクリートおよび鉄筋の諸性質を表 - 1 と表 - 2 にそれぞれ示す。各試験体はコンクリートの打設日程が異なるためコン

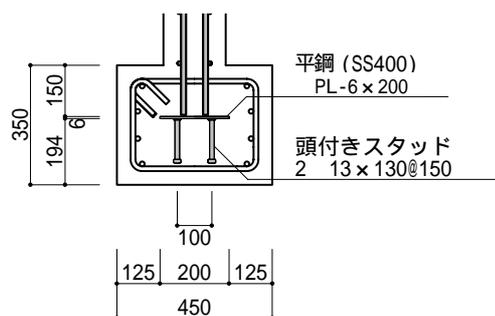


図 - 4 SRC 梁配筋詳細図
(フランジ突き当り型)

表 - 1 コンクリート強度

試験体	コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)
(a)フランジ突き当り型	22.8
(b)90°折曲げ型	23.0
(c)フランジ迂回型	23.7
(d)フック引掛け型	32.1
(e)交差定着筋型	26.6
(f)フランジ貫通型	27.3
(g)スタッド溶接型	28.0

表 - 2 鉄筋降伏強度

鉄筋の種類	使用部位	降伏強度 (N/mm^2)
D10	壁横筋	384
D13	壁縦筋, あばら筋, 梁主筋	359
異形棒鋼スタッド D13(KSW - 490)	(g)スタッド溶接型の スタッド鉄筋	468

クリート強度にはバラツキがある。また、壁筋の降伏強度が $359N/mm^2$ であるのに対し、試験体 (g) に使用した異形棒鋼スタッドの降伏強度は $468N/mm^2$ と高い。

2.2 加力方法

加力点の高さは壁下端(仕口面)から 1150mm で、荷重履歴は図 - 5 に示すように片方向の変位増分繰り返し加力(繰返載荷)である。加力速度はひずみ速度の影響を受けないよう 1 サイクルの周期を 60 秒とし、1 サイクルごとに変形角を $2 \times 10^{-3} rad$ ずつ増分させ、変形角 $30 \times 10^{-3} rad$ まで加力している。なお、試験体は変形角 $4 \times 10^{-3} rad$ までは図 - 6(a) に示すように SRC 梁の両端 2 点を拘束して加力を行い、それ以降は図 - 6(b) に示すように SRC 梁の壁際の 2 点を追加して計 4 点を拘束して加力を行った。2 点拘束時に

は SRC 梁は曲げ降伏するよう断面が設計され、SRC 梁にひび割れを発生させている。4 点拘束時には SRC 梁は曲げ降伏せずに壁が曲げ降伏するように断面が設計されている。

なお、90°折曲げ型試験体(b)のみは図 - 6(a)の固定方法で、1 サイクルで 20×10^{-3} rad まで加力（単調載荷）した。

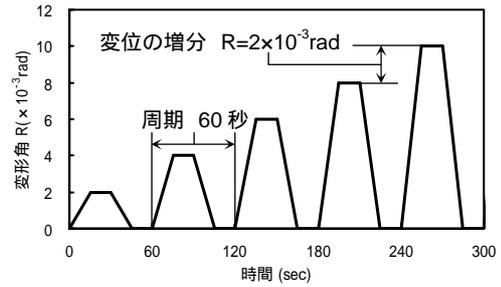


図-5 加力サイクル図

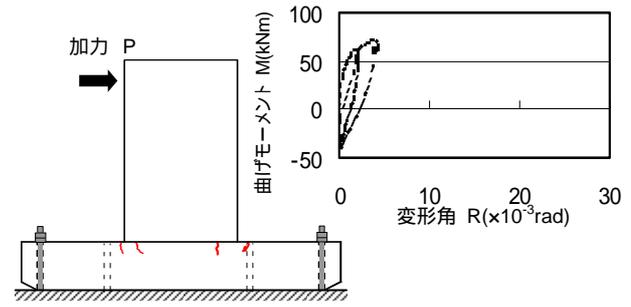
3. 実験結果

図 - 7 に全試験体の荷重変位関係の包絡線を示す。縦軸は仕口断面の曲げモーメントの値を示し、横軸は仕口面から高さ $h=1000\text{mm}$ の位置の水平変位から計算される変形角を示す。なお、加力サイクルが異なる 90°折曲げ型試験体(b)の包絡線は破線で示されている。また図 - 8 に、実験終了後にひび割れ部分のコンクリートを取り除いて調べたひび割れ状況の概要を示す。

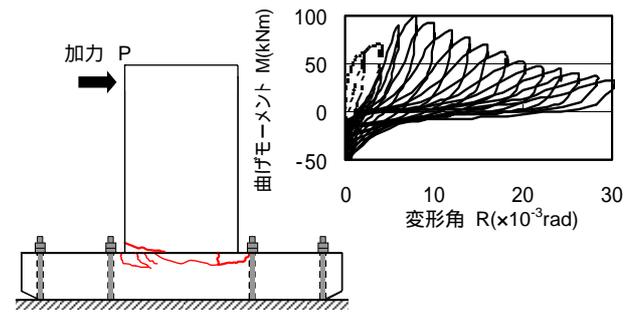
3.1 定着強度の比較

表 - 3 に各試験体の曲げ強度の実験値 M_u 、試験体(f)の曲げ強度 ${}_fM_u$ に対する強度の比 $M_u/{}_fM_u$ （以後、強度比とする）、および限界変形角 R_u を示す。ここで限界変形角 R_u は荷重変位関係の包絡線から求めた最大強度後の強度低下 20% ($0.8M_u$) 時点での変形角である。図 - 9 と 10 は表 - 3 の値から、それぞれ試験体の強度比と限界変形角の比較を図に示したものである。

試験体(a)：7 種類の定着方法のうち強度が最も小さいのが試験体(a)であり、強度比は 0.60 である。限界変形角の値も $13 \times 10^{-3}\text{rad}$ と最も小さく、図 - 7 において最大強度以降の強度低下も激しい。試験体(a)は定着筋が降伏する前にコンクリートの破壊によって最大強度に限界づけられたことが、強度比の値と図 - 8 のひび割れ状況から



(a)2 点拘束時



(b)4 点拘束時

図 - 6 試験体の固定方法

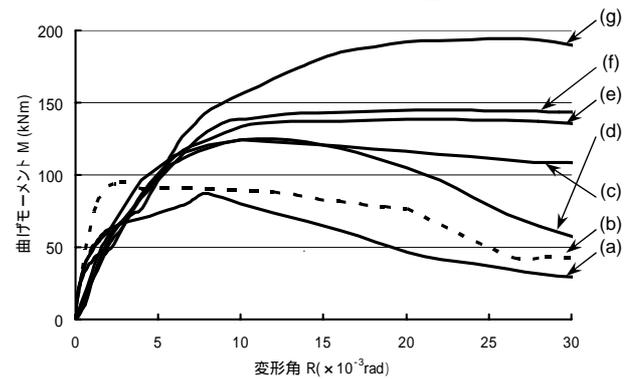
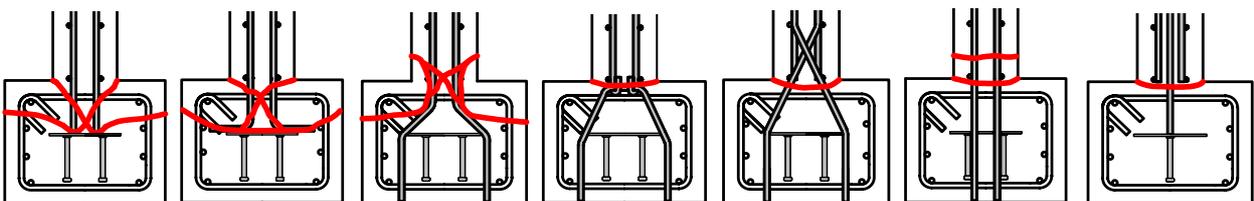


図-7 各試験体包絡線



(a)フランジ突き当り型 (b)90°折曲げ型 (c)フランジ迂回型 (d)フック引掛け型 (e)交差定着筋型 (f)フランジ貫通型 (g)スタッド溶接型

図 - 8 試験体ひび割れ図

判断できる。

文献 9)によれば、鉄筋定着の引張強度がコンクリートとの付着破壊やコンクリートのコーン状破壊で決まる場合、その強度はコンクリート強度 F_c の平方根にほぼ比例することが示されている。これを用いれば、試験体(a)のコンクリート強度が $2.78 (1/0.6^2)$ 倍以上であれば、コンクリートの破壊によらず鉄筋が降伏したと予想される。そのために必要なコンクリート強度は $F_c = 63.3\text{N/mm}^2 (22.8\text{N/mm}^2 \times 2.78)$ であり、高強度コンクリートを使用した場合に限られる。

試験体(b)：試験体(b)もまた、図 - 8 のひび割れ状況などからコンクリートの破壊で最大強度が限界づけられたと判断される。試験体(b)の強度比は 0.66 であり、この値は試験体(a)より 10%程度大きい。定着強度がコンクリートの破壊で決まる場合、その強度は配筋方法以外にコンクリート強度の影響を受けるため、両者の比較にあたってはコンクリート強度の違いを考慮しなければならないが、表 - 1 に示すように両者のコンクリート強度の差は小さい。なお、試験体(b)の加力サイクルが単調載荷で試験体(a)の加力が繰返し載荷であったことを考慮すると、単調載荷は繰返し載荷より高い強度が得られる傾向があることから、両者の違いは 10%より小さいと考えられる。いずれにせよ試験体(b)のような定着方法は、定着筋を 90° に折曲げてその余長部分の長さで定着力を確保することを目的とするが、折り曲げまでの直線長さが短い場合、余長を長くしても期待する強度は得られないといえる。

なお限界変形角に関しては加力サイクルの違いにより、他の試験体と比較することは妥当でないとと思われる。

試験体(c)：定着筋を鉄骨の手前で 90° に折曲げた試験体(b)に比較して、さらに手前から定着筋を緩やかに折曲げた試験体(c)は、定着強度が明らかに高くなり、強度比は 0.86 である。試験体(c)のコンクリート破壊部分の定着筋の折曲げ角度は約 45° であるが、強度比は鉄筋の降伏強度の鉛直成分力の割合 $0.71 (1/\sqrt{2})$ より大き

表 - 3 実験結果

試験体名	最大強度(kN・m)		限界変形角 $R_u(\times 10^{-3}\text{rad})$
	M_u	M_u/M_u	
(a)フランジ突き当たり型	100	0.60	13
(b)90°折曲げ型	109	0.65	20
(c)フランジ迂回型	143	0.86	30 以上
(d)フック引掛け型	144	0.86	18
(e)交差定着筋型	159	0.95	30 以上
(f)フランジ貫通型	167	1.00	30 以上
(g)スタッド溶接型	223	1.34	30 以上

* 試験体(g)に使用した鉄筋の降伏強度は他の試験体と異なる

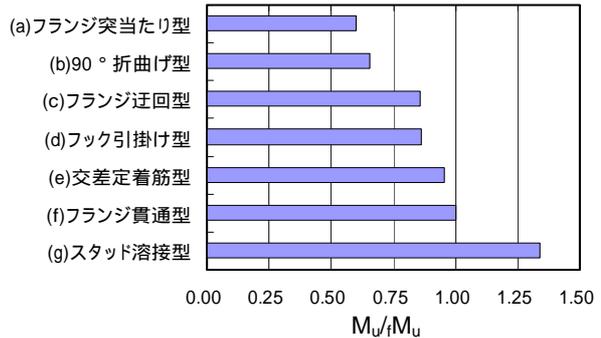


図 - 9 強度比

* 試験体(g)に使用した鉄筋の降伏強度は他の試験体と異なる

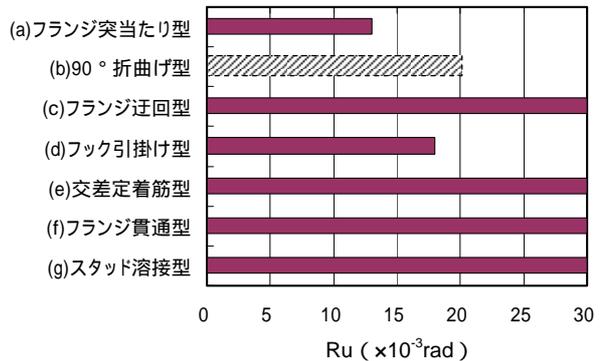


図 - 10 限界変形角

* 試験体(b)の加力サイクルは他の試験体と異なる

い。また、限界変形角の値も大きく、図 - 7 において最大強度以降の強度低下が小さい。これらのことから、試験体(c)は図 - 8 のひび割れ図によるとコンクリートの破壊が顕著であるが、最大強度は鉄筋の降伏により得られていると判断される。

試験体(d)：試験体(d)は 180° フックを引掛けるといふ安易な配筋の接合にも関わらず、試験体(c)と同程度の強度比(0.87)を有した。しかし限界変形角の値は小さく、図 - 7 において最大強度以降の強度の低下が激しい。

試験体(e)：試験体(e)は強度比が 0.96 と高く、

限界変形角の値も大きい。図 - 7 において荷重変位関係で最大強度以降の荷重低下がほとんどないことから、最大強度は定着筋の引張降伏で得られていると判断される。X 形に交差した定着筋は壁筋に対し約 25° 傾いているが、強度比はコンクリート破断面の定着筋の降伏強度の鉛直成分 0.91 ($\cos 25^\circ$) より僅かに高い値であった。

試験体(f)：試験体(f)は荷重変位曲線および、ひび割れ状況から、定着筋の引張降伏により最大強度が得られていると判断される。定着強度が鉄筋の降伏強度を有し、変形性能も高い、望ましい配筋方法だといえる。

試験体(g)：試験体(g)の強度比(1.34)はもっとも高いが、これは試験体(g)に使用した異形棒鋼スタッドが他試験体の壁筋に比較して降伏強度が高いことによると判断される。他の試験体の壁筋の降伏強度に対する異形棒鋼スタッドの降伏強度の比は 1.30 で試験体(g)の強度比 1.34 とほぼ等しい。鉄筋の降伏強度の比に比較して強度比は僅かに大きいのは、異形棒鋼スタッドが明確な降伏点を持たない鋼材で、降伏強度の値に永久伸びが 0.2% のときの強度を用いたことによると考えられる。試験体(g)も試験体(f)と同様に定着筋の引張降伏により最大強度が得られる望ましい配筋方法である。

4. まとめ

SRC 造の耐震壁の定着方法に関する実験を行った結果、以下のことが分かった。

- (1)定着強度は(a) < (b) < (c) < (d) < (e) < (f) < (g) の順序で大きくなる。
- (2)壁筋を鉄骨に貫通して配筋した場合、及び異形棒鋼スタッドを鉄骨に溶接してこれに壁筋を重ね継手した場合は、鉄筋を降伏させるに十分な定着強度を有する。
- (3)90° 折曲げ定着で直線定着部分が短い場合、余長部を長くしても、鉄筋を降伏するための十分な定着強度が得られない。
- (4)180° フックで鉄筋を引掛けた継手は、鉄筋

の引張降伏強度の 87% の力を伝えることができるが、変形性能は小さい。

- (5)仕口付近で鉄筋の傾斜角度が大きくなると、定着強度は低下する。

なお、本実験は曲げ降伏する耐震壁の下端における縦筋の定着を想定し、各種配筋方法に関する定着強度の違いを示したもので、耐震壁のせん断強度との関係を示すものではない。

謝辞

本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業(建築物の地震防災技術の研究開発)の一環として行なわれたもので、研究費の一部が補助された。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤井栄, 森田司郎, 川上修司, 山田稔明: 90° 折り曲げ鉄筋の定着耐力の再評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 429 号, 1991.11, pp.65-75
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999, p.189-202
- 3) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2003, pp.287-295
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説, 2003, pp.130-136
- 5) 日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説, 2005, pp.78-83
- 6) 日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2001, pp.150-164
- 7) 六車熙, 森田司郎, 富田幸次郎: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究, 日本建築学会論文報告集, 第 131 号, pp.1~8, 昭和 42 年 1 月
- 8) 望月洵, 竹原雅夫, 小野里憲一: 強剛な付帯フレームをもつ耐震壁のスリップ破壊せん断強度, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 416 号, 1990.10, pp.79-89
- 9) 日本建築学会: 各種合成構造設計指針, 1985, pp.191-200