

論文 鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の梁主筋機械式定着に関する実験データベースを用いた検討

守屋 暁*1・塩原 等*2・楠原 文雄*3

要旨: 梁主筋が機械式定着された RC 造ト形柱梁接合部に関する日本建築総合試験所の設計指針の規定と ACI318-14 の耐震規定を比較し、既往実験のデータベースを用いてそれらの規定の妥当性を検討した結果について述べる。前者の定着長さの規定は危険側に設定されている可能性があり、後者の定着長さや接合部横補強筋比の規定はより安全側に設定されていることを明らかにする。また各因子が接合部の耐震性能に及ぼす影響については、接合部せん断余裕度が 1.0 に近く、柱と梁の曲げ終局強度の比が 1.0~2.0 程度の範囲にあると接合部の耐震性能が低下する実験例があるが、この範囲の実験例自体が極めて少ないことを示す。

キーワード: 鉄筋コンクリート, ト形柱梁接合部, 機械式定着, データベース

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート造建築物の柱梁接合部に梁主筋を定着する際、鉄筋が込み合うことを避け、コンクリート打設の欠陥を防止することを目的として機械式定着が用いられることが増している。

しかし我が国の場合、定着製品ごとに個別に技術評価を得て使用され、それとは別に機械式鉄筋定着工法設計指針¹⁾(以下、「日総試指針」という)が提案されている。また、建築基準法令や日本建築学会(AIJ)の設計指針²⁾にその具体的な規定はない。一方米国のコンクリートの規準である ACI318-14³⁾(以下、「ACI 規準」という)には主筋の機械式定着に関する規定がある。この規定は限られた実験に基づいて定められており、Kang によれば⁴⁾ACI 規準の機械式定着についての規定は、a)定着具付き主筋の重ね継手、b)主筋と 30°~55°の角度をなす向きに圧縮力の加わる梁端での主筋機械式定着、c)側面かぶり厚を実験変数とした側面剥離定着破壊、d)浅い位置での掻き出し定着破壊実験に基づいて定められている。

本論文では、日総試指針および ACI 規準の機械式定着に関する規定を比較し、梁主筋が機械式定着された鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の実験データベースを用いて、これらの規定の妥当性について検討する。さらに各因子が柱梁接合部の耐震性能に及ぼす影響を分析する。

2. 日本とアメリカの規定比較

2.1 ト形柱梁接合部における梁主筋機械式定着の規定

日総試指針¹⁾は SD295A, 同 B, SD345, SD390, および SD490 の梁主筋と設計基準強度 21N/mm² 以上 60N/mm² 以下の普通コンクリートの組み合わせ、もしくは

は梁主筋 590N/mm² 級, 685N/mm² 級の高強度鉄筋と設計基準強度 45N/mm² 以上 120N/mm² 以下の普通コンクリートの組み合わせに対して適用できる。ただし呼び名 D41 以下の梁主筋のみを対象とする。

日総試指針による必要定着長さの算定式は、側面剥離定着耐力の実験式より導出される。梁主筋強度、コンクリート強度、梁上下主筋の重心間距離、梁主筋径をパラメーターとし、さらに接合部横補強筋比および側面直交梁付きか否かによる補正が行われる。定着長さはこの算定式による必要定着長さに加えて、構造規定として 12d_b 以上かつ、掻き出し定着破壊防止のため 2/3D_c 以上(高強度材料を用いる場合は 3/4D_c 以上)とすることを基本とする。ただし、d_b は主筋径、D_c は柱せいを示す。

定着長さ以外にも、梁主筋中心からの側面かぶり厚を 3d_b 以上、定着板内面からの背面かぶり厚を 4d_b 以上(定着長さが 15d_b 以上の場合は 3d_b 以上)とするよう梁主筋定着部の構造規定が定められている。また隣り合う柱、梁主筋のあきは、一般部と同様に主筋呼び直径の 1.5 倍、粗骨材最大寸法の 1.25 倍、25mm のうち最も大きい値以上とするよう定められている。

それに対して ACI 規準³⁾による規定は梁主筋降伏強度が 420N/mm² 以下、梁主筋サイズ No.36(公称直径 35.8mm) 以下、梁主筋表面からの側面かぶり厚 2d_b 以上(主筋中心から 2.5d_b 以上)、梁主筋のあき 4d_b 以上の場合に適用される。

ACI 規準の必要定着長さの算定式は、梁主筋強度、コンクリート強度のみをパラメーターとしており、定着長さは算定式による必要定着長さ、8d_b、150mm のうち最も大きい値以上とする。ただし、算定式に用いるコンク

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 修士課程 (学生会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 助教 修(工) (正会員)

リート強度は 40N/mm^2 を上限値とする。またこれに加えて、柱に定着される梁主筋は、柱の拘束されたコアの遠い側の面まで伸ばすという柱梁接合部の規定がある。

2.2 柱梁接合部横補強筋の規定

AIJ の設計指針²⁾では、接合部横補強筋による接合部せん断強度の上昇効果がほとんど期待できないという研究から、接合部横補強筋比は最小横補強筋比 0.3%以上とするようにのみ定められている。

それに対して日総試指針では柱梁接合部の必要横補強筋比が、コンクリート強度、接合部横補強筋の降伏強度、日総試指針による接合部せん断余裕度などを変数とし、直交梁の本数により補正される算定式によって求められる。ただしト形接合部では、必要横補強筋比を最低でも 0.2%以上（高強度材料を用いる場合は 0.3%以上）とするよう規定されている。

一方 ACI 規準では柱梁接合部の必要横補強筋比は、接合部近傍もしくは降伏すると考えられる位置における柱の必要横補強筋比の規定と同様にして算出するように定めている。これらの位置における柱の必要横補強筋比の算定式は、コンクリート強度、接合部横補強筋の降伏強度、柱コア部の断面積に対する柱の全断面積の比、コンクリート強度と柱断面積の積に対する柱軸力の比である柱軸力比を変数としている。ACI 規準の算定式によれば必要横補強筋比は、コンクリート強度および接合部横補強筋の降伏強度による影響が大きく、柱軸力比が大きい場合には柱軸力比の影響も大きくなる。

日総試指針と ACI 規準による接合部の必要横補強筋比

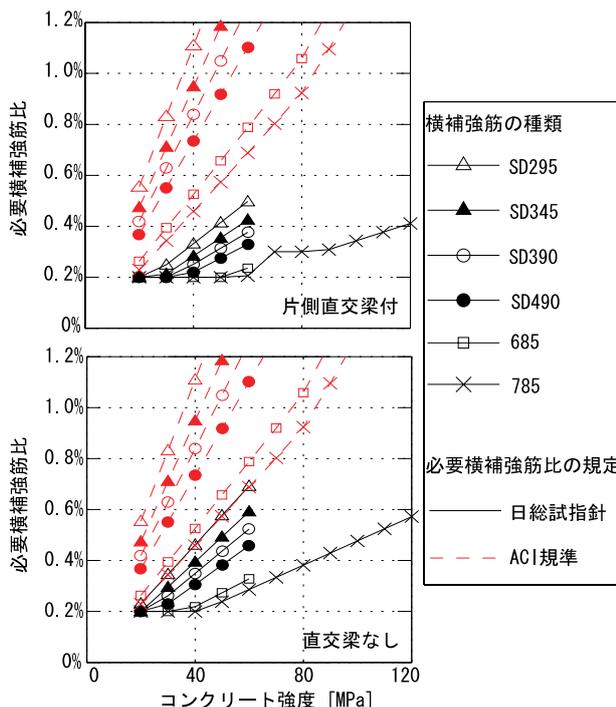


図 - 1 日総試指針および ACI 規準による必要横補強筋比

を、片側直交梁付きの場合と直交梁なしの場合についてそれぞれ図 - 1 に示す。算定にあたって、接合部せん断余裕度は 1.2、柱コア部の断面積に対する柱の全断面積の比は 1.25、柱軸力比は 0.3 とした。

一般的な設計に用いられるコンクリート強度と接合部横補強筋の降伏強度の組み合わせを考えると、日総試指針による必要横補強筋比が片側直交梁付きの場合で 0.2~0.4%、直交梁が付いていない場合でも 0.2%~0.5% 程度であるのに対して、ACI 規準による必要横補強筋比は 0.6~1.0% 以上となっており大きな違いがある。また直交梁なしで高強度コンクリートを用いる場合を除いて、日総試指針による必要横補強筋比は、実際には AIJ 設計指針の最小横補強筋比 0.3% を大きく上回ることはない。

3. 収集データ

3.1 収集データの範囲

検討に用いる実験データは、Kang ら⁵⁾もしくは藤原ら⁶⁾の論文のデータベースに記載のある鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部試験体のうち、梁主筋が機械式定着された国内 174 体、国外 11 体の計 185 体である。

3.2 破壊形式の分類

Kang らの論文⁵⁾に記載のある試験体については Kang らによる破壊形式の分類に従い、記載のない試験体については、Kang らの基準⁵⁾に従い分類した。この破壊形式分類法は客観的な数値により分類するもので、これによって実験者の主観によらず定量的に破壊形式を分類することが可能となる。

今回採用した破壊形式の分類は Category1~3 の 3 分類である。 $M_p \geq M_n$ であり、層間変形角 3.5% まで耐力低下が最大耐力の 20% 未満かつ接合部せん断変形の記述がある場合には接合部せん断変形が 1.2% 以下の試験体は Category1 に分類され、 $M_p < M_n$ かつ柱および梁主筋の降伏が観察されなかった試験体は Category3 に分類される。Category1 および 3 に分類されない試験体は Category2 に分類される。ただし、 M_p は最大耐力実験値、 M_n は危険断面を柱、梁フェースとして ACI のストレスブロック置換による方法を用いて求めた曲げ終局時耐力計算値を示す。このようにして分類した破壊形式ごとの試験体数を表 - 1 に示す。

この分類法により、柱または梁における塑性ヒンジ形

表 - 1 破壊形式ごとの試験体数

破壊形式	国内	国外	計
Category 1	104	11	115
Category 2	34	0	34
Category 3	36	0	36
計	174	11	185

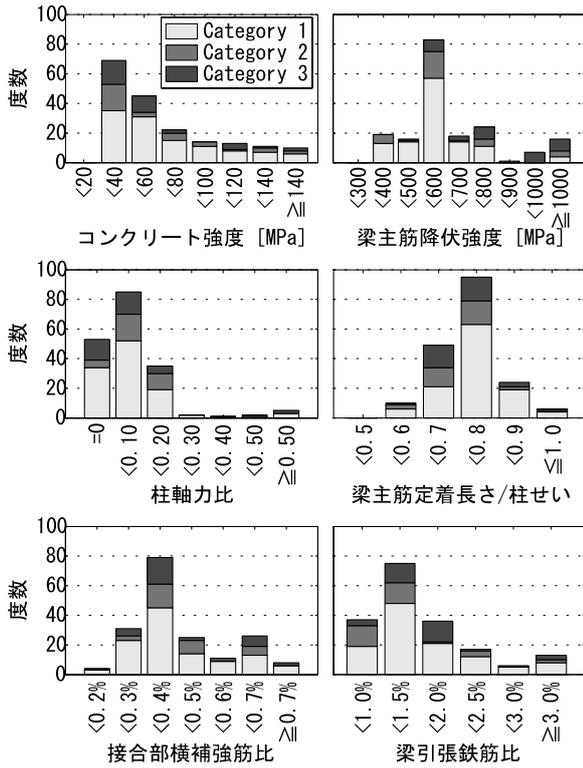


図 - 3 収集データの主要な因子の度数

成後の接合部性能の低下が小さい試験体は Category1, 柱または梁における塑性ヒンジ形成後に接合部破壊した試験体は Category2, 柱または梁の塑性ヒンジ形成に先立って接合部破壊が発生した試験体は Category3 に分類される。Category1 の試験体は接合部が十分な耐震性能を持っていると判断されるのに対して, Category2 および 3 の試験体は接合部の耐震性能が不十分であると判断される。

3.3 収集データの特徴

主要な因子について収集したデータの度数分布を図 - 2 に示す。また, 現行の設計指針で破壊モードを制御している接合部せん断余裕度および, 現行の設計法では考慮されていないが既往の研究⁷⁾によって破壊モードに影響を与えると考えられる柱梁曲げ強度比についても収集したデータの度数分布表を図 - 3 に示す。接合部せん断余裕度については日総試指針と ACI 規準の 2 通りの方法によって求めた結果を示す。接合部せん断余裕度は, 梁曲げ降伏時の接合部せん断力に対する, 日総試指針もしくは ACI 規準による接合部せん断強度の比として求めた。ト形柱梁接合部のせん断強度は日総試指針によると,

$$V_{ju} = 0.7 \times \phi \times 0.8 f_c^{0.7} b_j D_j \quad (N) \quad (1)$$

ACI 規準によると,

$$V_{ju} = 1.0 \sqrt{f_c} A_j \quad (N) \quad (2)$$

となる。ただし, ϕ は直交梁の有無による補正係数で両

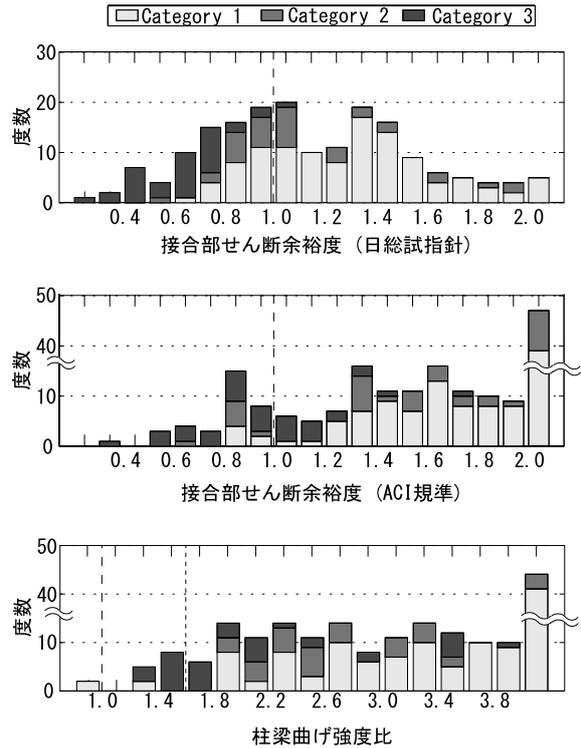


図 - 3 接合部せん断余裕度および柱梁曲げ強度比の度数

側直交梁付きの場合 1.0, それ以外の場合 0.85, f_c はコンクリート強度, b_j は接合部有効幅, D_j は接合部有効せい, A_j は有効接合部面積をそれぞれ示す。日総試指針による柱梁接合部のせん断強度では, 梁主筋が機械式定着されている場合, 接合部有効せいとして柱せいの代わりに梁主筋の定着長さを用いるが, ACI 規準では有効接合部面積は定着長さによらない。

柱梁曲げ強度比は, 上下柱の曲げ終局時の節点モーメントの和を梁の曲げ終局時の節点モーメントで除して求める。また, 柱および梁の曲げ終局モーメントは柱もしくは梁のフェースを危険断面として ACI のストレスブロック置換による方法で求める。

収集した試験体データは国内のものが多いため, 各因子とも現在の日本における設計指針を基に設計されているものも多く, コンクリート強度, 梁主筋強度は普通強度, 接合部横補強筋比は設計指針の下限値となる度数が多い。

現行の設計法によれば接合部せん断余裕度が 1.0 以上の場合には接合部の損傷が小さく破壊形式が Category1 となることが予想される。日総試指針による接合部せん断余裕度が 1.0 以上の試験体の破壊形式は多くが Category1 に分類されているものの, Category2 もしくは 3 の試験体もあることが分かる。ACI 規準による接合部せん断余裕度の場合には, 余裕度が 1.0 以上であっても破壊形式の分類が Category2 もしくは 3 となる試験体が多い。

また、日本の耐震設計法には特に規定がないため一般的な建築物では柱梁曲げ強度比が 1.0 に近い柱梁接合部もあると考えられるが、収集したデータベースでは柱梁曲げ強度比が 1.0 に近い試験体による実験は少ないことが分かる。特に柱梁曲げ強度比が 1.0 に近く破壊形式が Category1 に分類される試験体が少なく、実際に設計されることがあると考えられる柱梁曲げ強度比が 1.0 から 1.6 の範囲で Category1 に分類された試験体は 2 体しかない。

4. 梁主筋機械式定着に各因子が及ぼす影響の検討

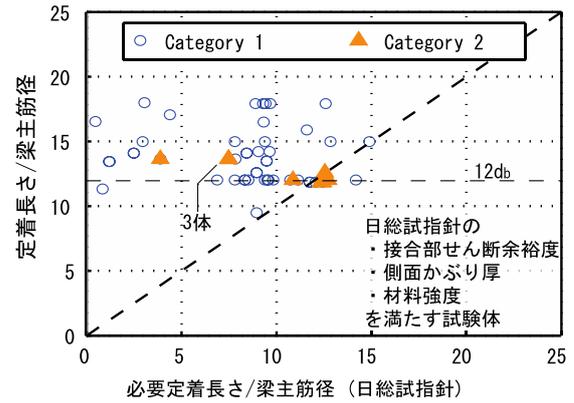
4.1 梁主筋定着長さの影響

日総試指針もしくは ACI 規準のト形柱梁接合部における、梁主筋機械式定着に関する定着長さおよび接合部横補強筋比以外の規定を満足する試験体についてのみ、横軸を日総試指針もしくは ACI 規準による必要定着長さ、縦軸を実験試験体の実際の定着長さとしてプロットし図 - 4 に示す。ここでいう機械式定着に関する定着長さおよび接合部横補強筋比以外の規定とは、日総試指針の規定の場合は日総試指針による接合部せん断余裕度、側面かぶり厚、コンクリート強度、梁主筋降伏強度であり、ACI 規準の規定の場合は ACI 規準による接合部せん断余裕度、側面かぶり厚、梁主筋降伏強度である。また、必要定着長さについては日総試指針、ACI 規準ともに算定式による値としている。それぞれによる定着長さおよび接合部横補強筋比以外の規定を満たした試験体は日総試指針が 58 体、ACI 規準が 17 体で、全て Category1 または 2 に分類される試験体であった。

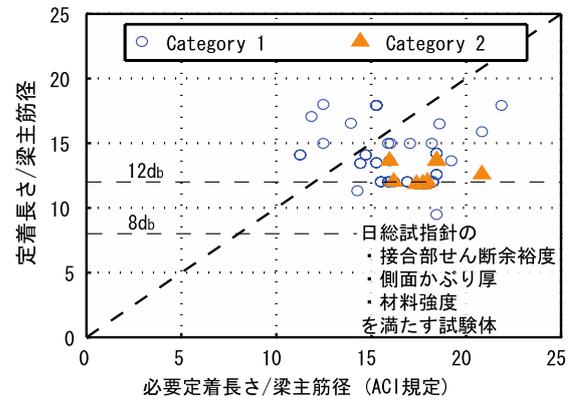
図 - 4 (a) に示す通り、日総試指針による接合部横補強筋比と定着長さの構造規定以外の規定を満足し、定着長さが日総試指針による必要定着長さと同程度もしくはそれ以上であっても破壊形式が Category2 に分類される試験体が、幅広梁を有する試験体 4 体を含めて 6 体あった。

それに対して、定着長さが ACI 規準による必要定着長さ以上である試験体は全て破壊形式が Category1 であった。しかし、日総試指針もしくは ACI 規準のいずれかによる接合部横補強筋比と定着長さの構造規定以外の規定を満足して、定着長さが ACI 規準による必要定着長さ以上である試験体数は少ないことが図 - 4 (b) および (c) からわかり、ACI 規準による規定が十分であると断定することはできない。

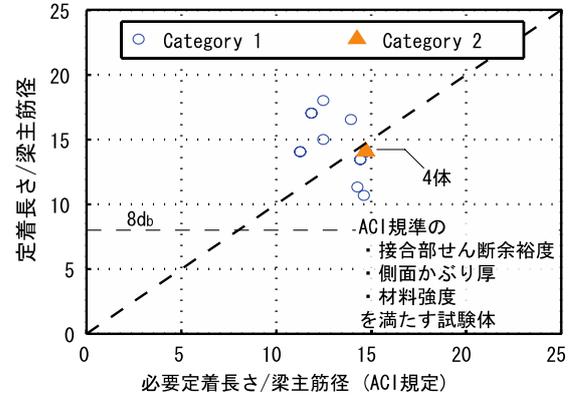
次に図 - 4 (a) において定着長さに関する梁主筋径の 12 倍以上かつ柱せいの 2/3 以上という構造規定も満たしている試験体 42 体のプロットを図 - 5 に示す。梁主筋径の 12 倍以上かつ柱せいの 2/3 以上という規定を考慮した場合であっても、定着長さが日総試指針による必要定着長さ以上であるにもかかわらず破壊形式が Category2 に分類される試験体が、幅広梁を有する 4 体を含めて 5 体あ



(a) 日総試規定満足



(b) 日総試規定満足



(c) ACI規定満足

図 - 4 破壊形式別の定着長さ

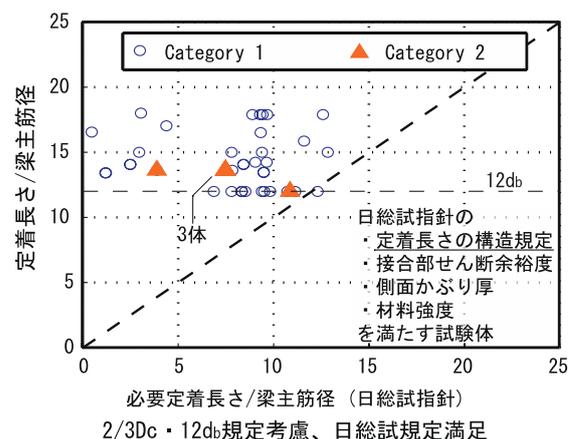


図 - 5 破壊形式別の定着長さ

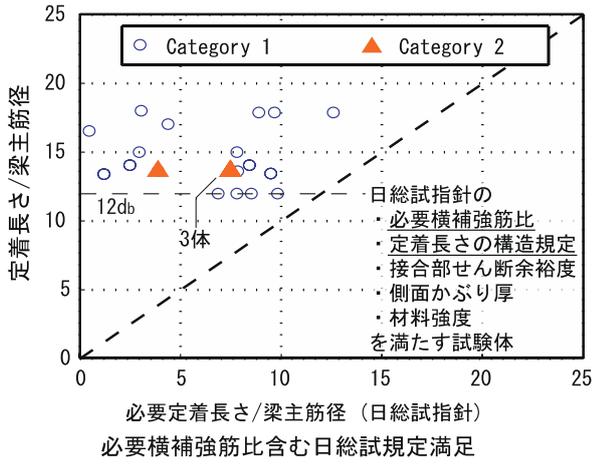


図 - 6 破壊形式別の定着長さ

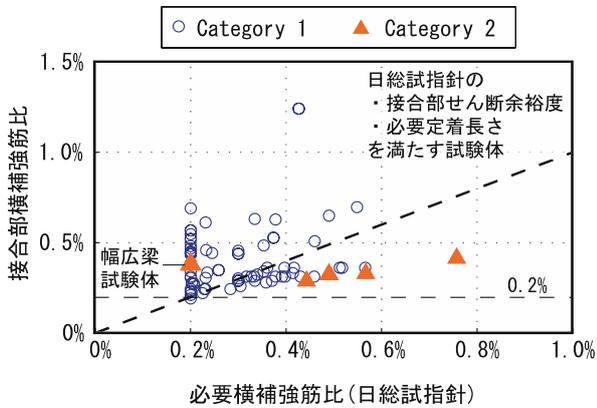


図 - 7 日総試指針による必要横補強筋比と横補強筋比

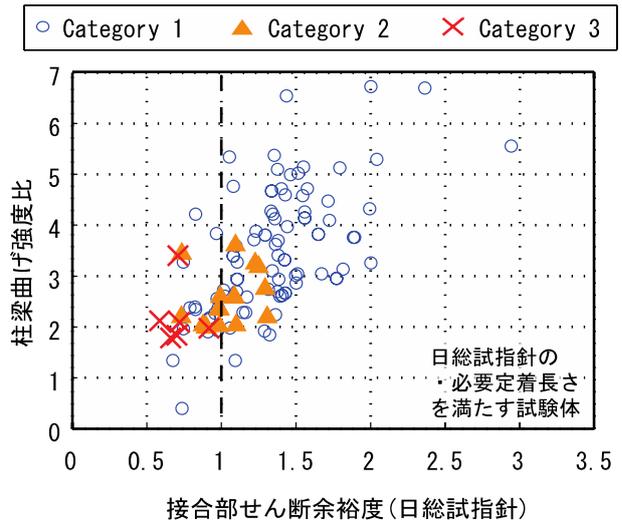
った。したがって、日総試指針による必要定着長さの規定だけでは十分であるとは言えない。

4.2 接合部横補強筋の影響

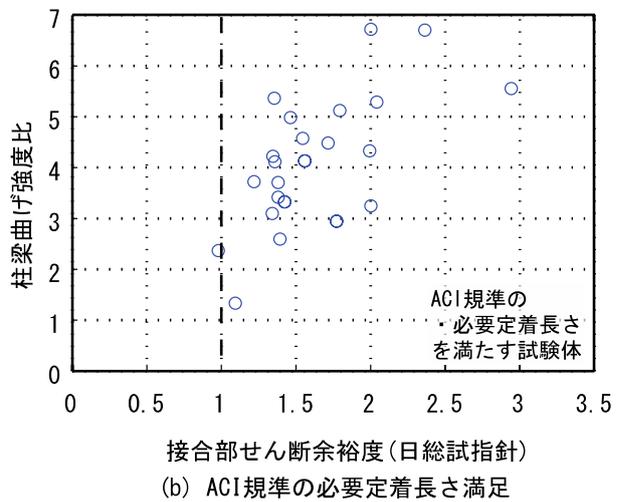
図 - 5 と同様に定着長さに関する構造規定を含む日総試指針による各規定を満足し、それに加えて接合部横補強筋比の規定も満たす試験体 26 体について横軸を日総試指針による必要定着長さ、縦軸を実際の定着長さとしてプロットし図 - 6 に示す。日総試指針による各規定を満たし、定着長さも必要定着長さ以上であるにも関わらず破壊形式が Category2 に分類される試験体が 4 体あったが、この 4 体はいずれも柱幅よりも幅の広い梁を有する試験体であった。

一方、ACI 規準による必要横補強筋比の規定を満たしている試験体は今回収集した実験データには存在せず、ACI 規準による接合部横補強筋比の規定が非常に厳しいことが分かる。

次に日総試指針による接合部せん断余裕度が 1.0 以上で必要定着長さを満たしている試験体についてのみ、横軸を日総試指針による必要横補強筋比、縦軸を実際の接合部横補強筋比としてプロットし、図 - 7 に示す。日総試指針による接合部せん断余裕度が 1.0 以上で必要定着



(a) 日総試指針の必要定着長さ満足



(b) ACI規準の必要定着長さ満足

図 - 8 接合部せん断余裕度と柱梁曲げ強度比

長さを満たしていても Category2 に分類された試験体のうち、幅広梁を有する試験体を除いた 4 体は全て日総試指針による必要横補強筋比の規定を満たしておらず、必要横補強筋比についての規定の必要性が確認された。しかし、接合部横補強筋比が必要横補強筋比を下回っていても Category1 に分類される試験体も多く、必要横補強筋比については今後検討が必要である。

4.3 接合部せん断余裕度と柱梁曲げ強度比の影響

実際の定着長さが日総試指針およびACI規準による必要定着長さ以上の試験体について、それぞれ横軸を日総試指針による接合部せん断余裕度、縦軸を柱梁曲げ強度比としてプロットし図 - 8 に示す。

図 - 8(a) をみると、接合部せん断余裕度が試験体の破壊形式に影響を与えていることが分かる。定着長さが日総試指針による必要定着長さ以上であれば、破壊形式が Category3 に分類された試験体は全て接合部せん断余裕度が 1.0 未満であり、Category2 に分類された試験体も

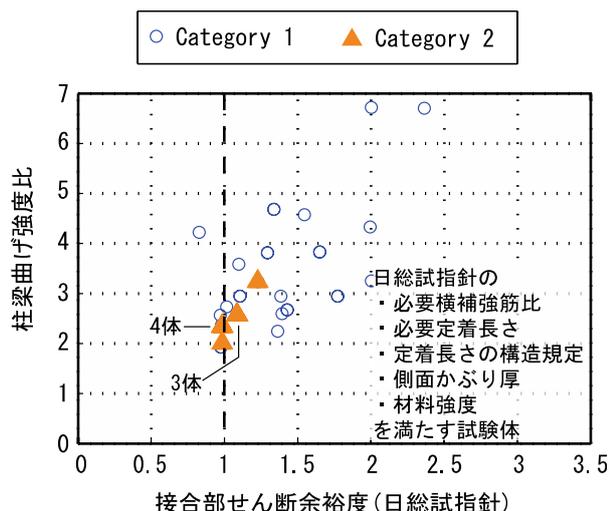


図 - 9 接合部せん断余裕度と柱梁曲げ強度比

全て接合部せん断余裕度がおおよそ 1.3 以下であった。

また図 - 8(a) から接合部せん断余裕度が 1.0 前後で破壊形式が Category2 もしくは 3 に分類された試験体は Category1 の試験体に比べて相対的に柱梁曲げ強度比が小さい範囲で多くみられ、柱梁曲げ強度比による影響も予想される。しかし、接合部せん断余裕度が 1.0 以上で柱梁曲げ強度比が小さく 1.0~2.0 程度の範囲にある試験体がほとんどないため、さらなる検討が必要である。

一方、図 - 8(b) からは定着長さが ACI 規準の必要定着長さ以上の試験体は全て破壊形式が Category1 に分類されたが、そのような試験体は少なかったことが分かる。

図 - 8(a) と同様に定着長さが日総試指針による必要定着長さ以上であり、それに加えて日総試指針による定着長さの構造規定、必要横補強筋比、側面かぶり厚、コンクリート強度、梁主筋降伏強度の規定を満たす試験体 35 体について横軸を日総試指針による接合部せん断余裕度、縦軸を柱梁曲げ強度比としてプロットし図 - 9 に示す。これらの規定を満たしていても、接合部せん断余裕度が 1.0 に近い場合には Category2 に分類される試験体が、幅広梁を有する 5 体と変動軸力であった 2 体を含む 9 体あった。柱梁曲げ強度比による影響も予想されるが、これらの各規定を満たし、接合部せん断余裕度が 1.0 以上で柱梁曲げ強度比が 2.0 以下の試験体がなく、今後さらなる検討が必要である。

5. まとめ

梁主筋が機械式定着されたト形柱梁接合部の既往実験の試験体を対象に作成したデータベースの分析により以下の知見を得た。

- (1) 梁主筋機械式定着に関して日総試指針は、必要定着長さについての規定を満足しても接合部破壊や大きな耐力低下などを示し十分な耐震性能を有していな

い可能性がある。逆に接合部横補強筋比についての規定は現在の規定より緩和できる可能性がある。また、柱幅よりも幅の広い梁を有する柱梁接合部に対する規定の検討が必要である。

- (2) 収集した実験データの範囲では ACI 規準による規定について、必要定着長さを満たしている試験体は全て接合部が十分な耐震性能を有しており、必要横補強筋比を満たしている試験体はなかった。ACI 規準による規定は限られた実験のみに基づいているため定着長さや接合部横補強筋比などの規定が必要以上に厳しく定められている可能性がある。
- (3) 日総試指針による必要定着長さの規定を満たしている場合、十分な耐震性能を有していない試験体は全て接合部せん断余裕度がおおよそ 1.3 以下であった。
- (4) 接合部せん断余裕度が 1.0 に近く、柱梁曲げ強度比が 1.0~2.0 程度の範囲にあると接合部の耐震性能が低下する実験例がある。しかしこのような範囲にある例自体が極めて少ないので、日総試指針による各規定を満たした上で、柱梁曲げ強度比が 1.0~2.0 の範囲で幅広く日総試指針の妥当性を実験的に検証する必要がある。

参考文献

- 1) 機械式鉄筋定着工法研究委員会：機械式鉄筋定着工法設計指針，日本建築総合試験所，2010.5
- 2) 構造委員会：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，日本建築学会，1999.8
- 3) ACI Committee 318：Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary, American Concrete Institute, Sep. 2014
- 4) Kang TH-K：Recommendations for Design of RC Beam-Column Connections with Headed Bars Subjected to Cyclic Loading. Proceeding of the 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE), Beijing, China, Oct. 2008
- 5) Kang TH-K et al.：Seismic Design of Reinforced Concrete Beam-Column Joints with Headed Bars. ACI Structural Journal, Vol. 106, No. 6, pp. 868-877, Nov./Dec. 2009
- 6) 藤原圭佑，楠原文雄，塩原等：実験データベース分析に基づく鉄筋コンクリート造外部柱梁接合部の終局強度に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33, No. 2, pp. 367-372, 2011.7
- 7) 楠原文雄，塩原等：柱と梁の曲げ強度の比が小さい鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の耐震性能，日本建築学会構造系論文集，Vol. 78, No. 693, pp. 1939-1948, 2013.