

論文 RC 造柱梁接合部部分架構の履歴エネルギー吸収量

周 よしき^{*1}・久世 雄太^{*2}・楠原 文雄^{*3}・塩原 等^{*4}

要旨：既報の梁曲げ降伏型に設計された十字形・ト形・L 形の鉄筋コンクリート造柱梁接合部部分架構（計 80 体）の静的漸増振幅正負繰り返し載荷実験結果を分析し、履歴エネルギー吸収に影響を及ぼす設計因子と架構の性状を定量的に検討し報告する。十字形では、履歴エネルギー吸収に大きく影響した設計因子は柱梁強度比・柱梁の主筋量・スパンの長さであり、コンクリート強度・梁上下主筋の対称性・柱主筋の継ぎ手の有無は影響がない。ト形では、影響した設計因子は柱梁強度比・梁主筋の定着長・接合部横補強筋である。L 形では、影響した設計因子は柱梁強度比・梁下端主筋の定着長である。

キーワード：鉄筋コンクリート、柱梁接合部、履歴エネルギー

1. はじめに

現在の鉄筋コンクリート造建物の耐震設計¹⁾では、柱梁接合部に生じる接合部せん断力をせん断強度以下に制限することで、柱梁接合部の破壊を防止し、また、柱梁接合部内の梁および柱通し主筋に生じる付着応力に対する付着強度の比を増すことで、主筋の抜け出しを防ぎ、履歴性状のスリップ化を防止することを目標としている。

しかし、柱梁接合部に生じる接合部せん断力がせん断強度以下であっても、柱と梁の曲げ強度の比（以下柱梁強度比）が 1 に近い場合には、柱梁接合部内で梁と柱主筋が降伏し、柱梁接合部に損傷と変形が集中することが明らかになっている²⁾。

一方、近年建物の耐力だけでなく、地震時の建物の応答を陽に求めることができる性能設計が求められるようになってきた。建物の応答を推定する上で、地震などの外力に対する建物の履歴吸収エネルギーの評価が必要である。

本研究では、既往の柱梁接合部部分架構の実験結果の分析により、履歴エネルギーに影響を及ぼす設計因子と架構の性状（十字形、ト形、L 形）を定量的に検討する。

2. 実験の概要

実験は、柱・梁の反曲点位置で切り出した 1/3 スケールの鉄筋コンクリート造柱梁接合部部分架構 80 体の静的漸増振幅正負繰り返し載荷実験である。試験体は十字形 37 体 (A01, B01~B10, C01, C03, D01~D11, E01~E03, F01~F05, G01~G02, I02, I03)³⁾⁻⁸⁾、ト形 34 体 (A02, L01~L11, M01~M04, N01~05, O01~O04, P01~P04, Q01~Q05)¹⁰⁾⁻¹¹⁾、L 形 9 体 (V01~V09)¹²⁾から構成される。柱と梁の基準断面寸法が 240×240(mm)で、柱・梁のスパン（反曲点から柱と梁の材軸の交点までの距離）が 700mm である。

図-1 に十字形試験体 (B01)・ト形試験体 (L02)・L 形試験体 (V01) の形状と配筋を示す。

履歴エネルギー吸収量は、層間変位と層せん断力の関係における同一振幅の繰り返しのうち 2 回目のサイクルの履歴面積とする。(図-2 の色塗り部分)

3. 履歴エネルギーについて定量的な検討

3.1 十字形柱梁接合部

図-3 に変動因子以外の諸元が同一の試験体グループごとに履歴エネルギー吸収量を示す。

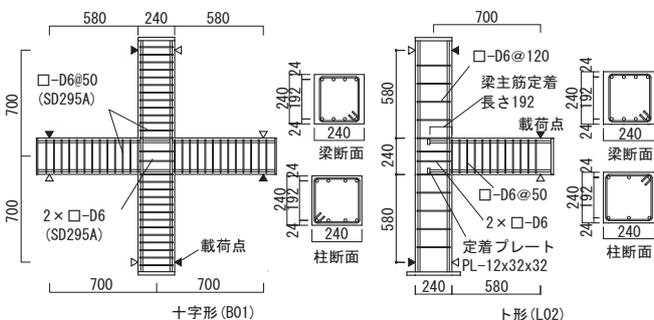


図-1 試験体の概要

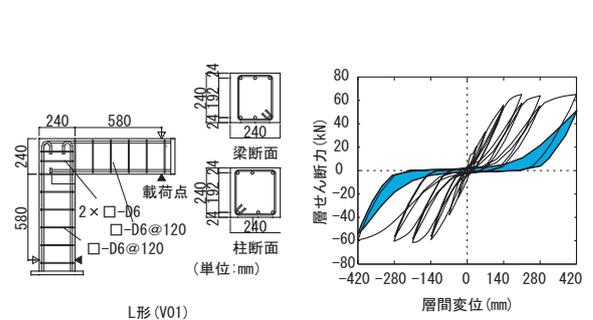


図-2 履歴ループ

*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 三井物産株式会社 (元東京大学工学部建築学科) (非会員)
 *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)
 *4 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)

(a) 柱主筋量 (柱梁強度比)

ケース1~5は、それぞれ梁は同断面・同一配筋で、柱主筋量だけを変化させることで、柱梁強度比が変化する試験体のグループである。ケース1, 2, 3は接合部アスペクト比(柱せいに対する梁せいの比)が1で、ケース4と5は接合部アスペクト比が0.5である。ケース1と2, 4と5はそれぞれ梁の主筋量が異なる。ケース3は梁配筋が上下で非対称である。

5ケースとも層間変形角が1%のとき、柱梁強度比が1程度の試験体に対して、柱梁強度比が大きい試験体の履歴エネルギー吸収量がそれぞれ最大で1.13, 1.21, 1.12, 1.07, 1.07倍になり、吸収量が少し大きくなった。層間変形角が大きくなるにつれて、柱梁強度比が大きい試験体ほど吸収エネルギーが大きくなった。ケース1と2では、層間変形角が小さい(1%, 1.5%)とき、履歴エネルギー吸収量の増加傾向が同じだった。しかし層間変形角が大きくなると(2%, 3%), ケース1と比べて柱と梁の主筋量が多いケース2では、柱梁強度比が1.35を超えると履歴エネルギー吸収量の増加率が小さくなった。ケース4,

5では、柱梁強度比が1.3~1.5程度まで履歴エネルギー吸収量の増加傾向が同じであったが、層間変形角が3%の時、柱梁強度比が1.3~1.4を超えると履歴エネルギー吸収量の増加率が大きくなった。

柱梁強度比が大きくなると、接合部の強度が大きくなり⁴⁾、架構全体の強度が大きくなるため、履歴エネルギー吸収量が大きくなる。また、部分架構を構成する要素のうち、柱・梁の履歴性状は紡錘型で、柱梁接合部はスリップ型である。柱梁強度比が大きくなると、架構全体の変形に占める柱梁接合部の変形成分の割合が減り、梁の変形成分の割合が増えるため、履歴ループのスリップ形状が緩和されて、履歴エネルギー吸収量が増えると考えられる。

(b) 柱・梁の主筋量

柱・梁の主筋量を同時に変化させ、柱梁強度比が1程度とした試験体グループである。ケース1, 3は普通コンクリート、ケース2は高強度コンクリートの試験体である。ケース1, 2は接合部アスペクト比が1、ケース3は接合部アスペクト比が2である。

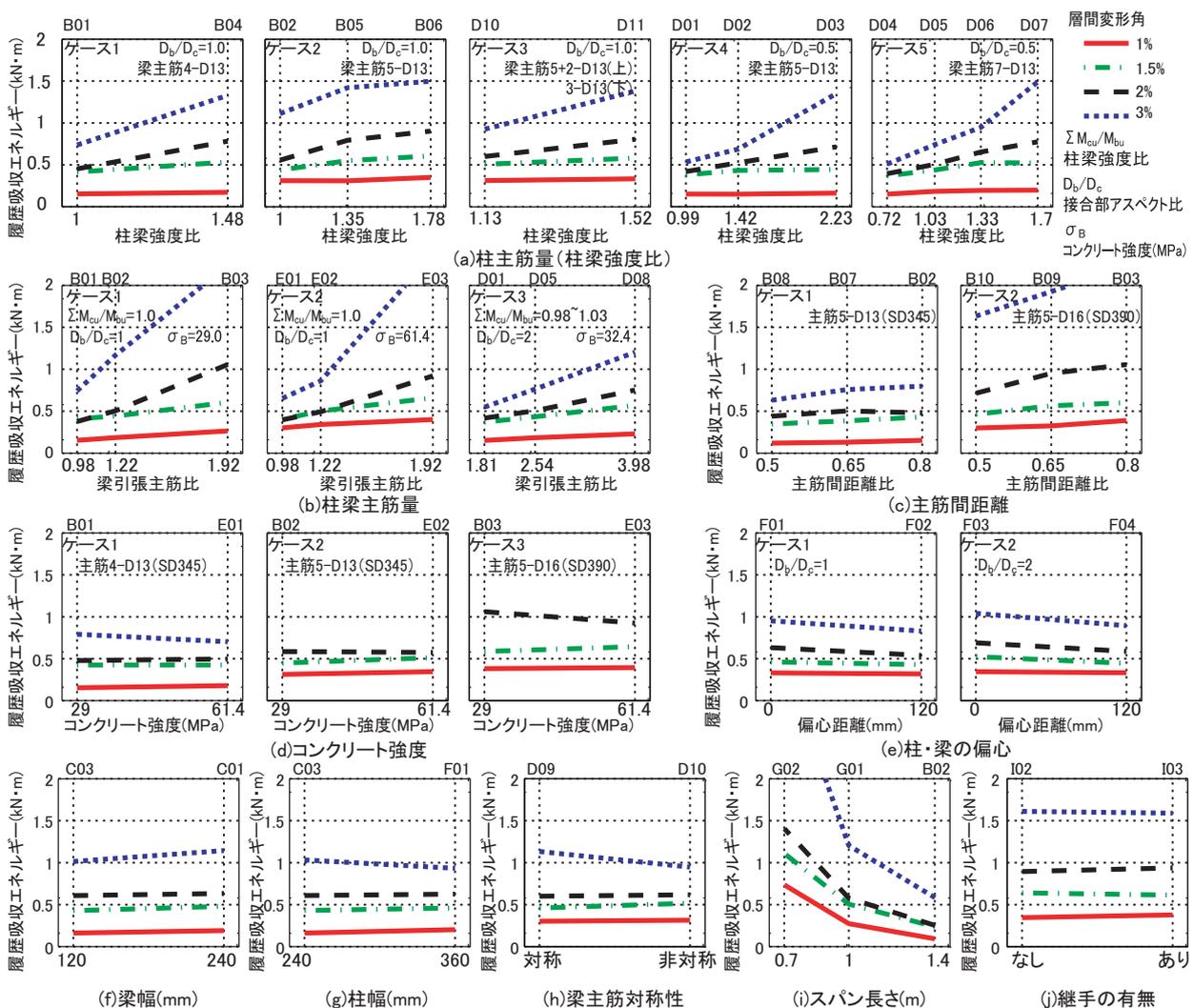


図-3 十字形柱梁接合部部分架構の各設計因子における履歴エネルギー吸収量

3 ケースとも梁引張主筋比が多くなると、つまり、柱と梁の主筋量が多くなると履歴エネルギー吸収量が大きくなった。この傾向は、層間変形角が大きくなるにつれて顕著となった。ケース1とケース2を比べると、コンクリートが普通強度から高強度に変わっても、エネルギー吸収量の増加傾向は変わらなかった。ケース1とケース3を比較すると、接合部アスペクト比が小さくなると履歴エネルギー吸収量の増加傾向が緩やかになった。

柱梁主筋量が増えると架構全体の強度が大きくなるため、履歴エネルギー吸収量が大きくなると考えられる。

(c) 主筋間距離

同じ形状で、柱と梁の主筋間距離比（部材せいに対する引張側と圧縮側の主筋の重心間距離の比）だけを変化させた試験体グループである。

ケース1では、層間変形角が3%の時を除いて、主筋間距離を変えても履歴エネルギー吸収量は変わらなかった。層間変形角が3%では、主筋間距離が増えると履歴エネルギー吸収量が少し増えた。しかし、ケース1と比べて柱梁の主筋量が多く、やや高強度の主筋を使用したケース2では、主筋間距離が増えると履歴エネルギー吸収量は大きくなった。この傾向は、層間変形角が大きくなるにつれて顕著となった。

(d) コンクリート強度

同じ形状と配筋で、コンクリート強度だけを変化させた試験体グループである。ケース1, 2, 3は番号の順に柱梁の主筋量が増えている。

3 ケースともコンクリート強度の変化によって、履歴エネルギー吸収量は変わらなかった。

(e) 梁・柱の偏心

柱・梁はそれぞれ同じ形状で、梁心と柱心間の水平距離（以下、偏心距離）を変化させた試験体グループである。ケース1は接合部アスペクト比が1で、ケース2は接合部アスペクト比が2である。

2 ケースとも、偏心があると履歴エネルギー吸収量が小さくなった。層間変形角が2%, 3%のとき、偏心がある試験体は偏心がないものと比べると、履歴エネルギー吸収量が83~87%に低減した。層間変形角が大きくなっても、履歴エネルギー吸収量の減少傾向が変わらなかった。

(f) 梁幅

同じ配筋で、梁幅だけを変化させた試験体である。

層間変形角が1%, 1.5%, 2%, 3%のとき、梁幅が240mmの試験体は120mmの試験体に対してエネルギー吸収量がそれぞれ1.18, 1.16, 1.05, 1.13倍であり、梁幅が広くなると、履歴エネルギー吸収量が少し大きくなった。

(g) 柱幅

同じ配筋で、柱幅だけを変化させた試験体である。

層間変形角が1%, 1.5%, 2%, 3%のとき、柱幅が360mmの試験体は240mmの試験体に対してエネルギー吸収量がそれぞれ1.25, 1.09, 1.03, 0.90倍になった。層間変形角が大きくなるにつれて、履歴エネルギー吸収量の増加傾向が小さくなった。

(h) 梁上下主筋の対称性

同じ形状で、左右の梁の曲げ終局モーメントの和が変わらないように主筋の総本数は同一として、梁の上下主筋の配筋量だけを変化させた試験体である。

層間変形角が1%, 1.5%, 2%, 3%のとき、梁の上下主筋の配筋量が非対称の試験体は対称な試験体に対して、エネルギー吸収量がそれぞれ1.07, 1.16, 1.03, 0.84倍になった。履歴エネルギー吸収量の値がばらつき、梁上下主筋の対称性の影響は見られなかった。

(i) スパンの長さ

同じ柱梁断面形状と配筋で、柱・梁スパンの長さだけ変化する試験体である。

柱・梁スパンが長くなると、履歴エネルギー吸収量が小さくなった。層間変形角が大きくなると、この傾向が顕著となった。

(j) 継手の有無

同じ形状と配筋で、柱脚部でスリーブ継手の有無の試験体である。

層間変形角が1%, 1.5%, 2%, 3%のとき、柱に継手がある試験体はないものに対してエネルギー吸収量がそれぞれ1.15, 0.95, 1.05, 0.99倍になった。継手の有無が履歴エネルギー吸収量に与える影響がほとんどなかった。

3.2 ト形柱梁接合部

図-4に各設計因子の試験体グループごとにおける履歴エネルギー吸収量を示す。

(a) 梁主筋量・柱主筋量（柱梁強度比）

梁主筋量（ケース1）だけでもしくは柱主筋量（ケース2~7）だけを変化させることで、柱梁強度比が変化する試験体グループである。接合部アスペクト比は、ケース1~5が1で、ケース6が0.5、ケース7は2である。梁主筋の定着方法は、ケース5だけが折り曲げ定着で、それ以外のケースは機械式定着である。ケース2~4では番号の順に梁主筋の定着長が短くなる。

7 ケースとも柱梁強度比が大きくなると、履歴エネルギー吸収量が大きくなった。梁主筋の定着長が短い場合では、柱梁強度比が2を超えると、履歴エネルギー吸収量がほとんど変わらなかった。それに対して、接合部アスペクト比が0.5であるケース6では、柱梁強度比が2を超えると、履歴エネルギー吸収量の増加率が大きくなった。定着方法を折り曲げ定着にしたケース5では、履歴エネルギー吸収量の増加傾向は機械式定着であるケース1とほとんど同じであった。接合部アスペクト比が2

であるケース7では、層間変形角が1%, 1.5%, 2%, 3%のとき、柱梁強度比が大きい試験体は小さいものに対して履歴エネルギー吸収量がそれぞれ1.13, 1.14, 1.03, 1.02倍になり、柱梁強度比が大きくなって、エネルギー吸収量はほとんど変わらなかった。

柱梁強度比によってエネルギー吸収量が増える理由は十字形と同様と考えられる。

(b) 定着長

同じ形状と配筋で、梁主筋の定着長が変化する試験体グループである。接合部アスペクト比は、ケース1~5および8が1で、ケース6, 7が0.5である。梁主筋の定着方法は、ケース8だけが折り曲げ定着で、それ以外のケースは機械式定着である。

8 ケースとも梁主筋の定着長が長いと、履歴エネルギー吸収量が大きくなった。ケース4, 5はケース2に対して、接合部横補強筋量を増やしたものであるが、横補強筋が多いケース4, 5では、定着が短い試験体に対する定着が長い試験体の履歴エネルギー吸収量の増加率が大きかった。また、ケース1~3では番号の順に柱梁強度比が大きい。柱梁強度比が小さい場合、定着が短い試験体に対する定着が長い試験体の履歴エネルギー吸収量の増加率が小さいが、柱梁強度比が大きくなると履歴エネルギー

一吸収量の増加率は大きくなった。接合部アスペクト比が0.5であるケース6, 7は接合部アスペクト比が1であるケース2と比べると、履歴エネルギー吸収量の増加率はほとんど同じであり、接合部アスペクト比の影響が見られなかった。折り曲げ定着であるケース8は機械式定着であるケース2に対して履歴エネルギー吸収量の増加率が大きかった。

定着長が長くなると柱梁接合部の強度が増える¹⁰ため、架構全体の強度が増大し、履歴エネルギー吸収量が増えると考えられる。また、接合部の強度が増えたことで全体変形の中の接合部変形が占める割合が減り、履歴ループのスリップ形状が緩和されて、履歴エネルギー吸収量が大きくなると考えられる。

(c) 接合部補強筋量と柱帯筋量

同じ形状と柱梁の主筋の配筋で、接合部補強筋量と柱帯筋だけが変化する試験体のグループである。ケース1, 2および4, 5は接合部アスペクト比が1であり、ケース3は接合部アスペクト比が2である。ケース4, 5は柱配筋が梁側で増やしたものである。また、ケース1と2, 4と5ではそれぞれ梁主筋の定着長が異なる。

5 ケースとも接合部補強筋と柱帯筋を増やすと履歴エネルギー吸収量が大きくなった。層間変形角が大きくなると

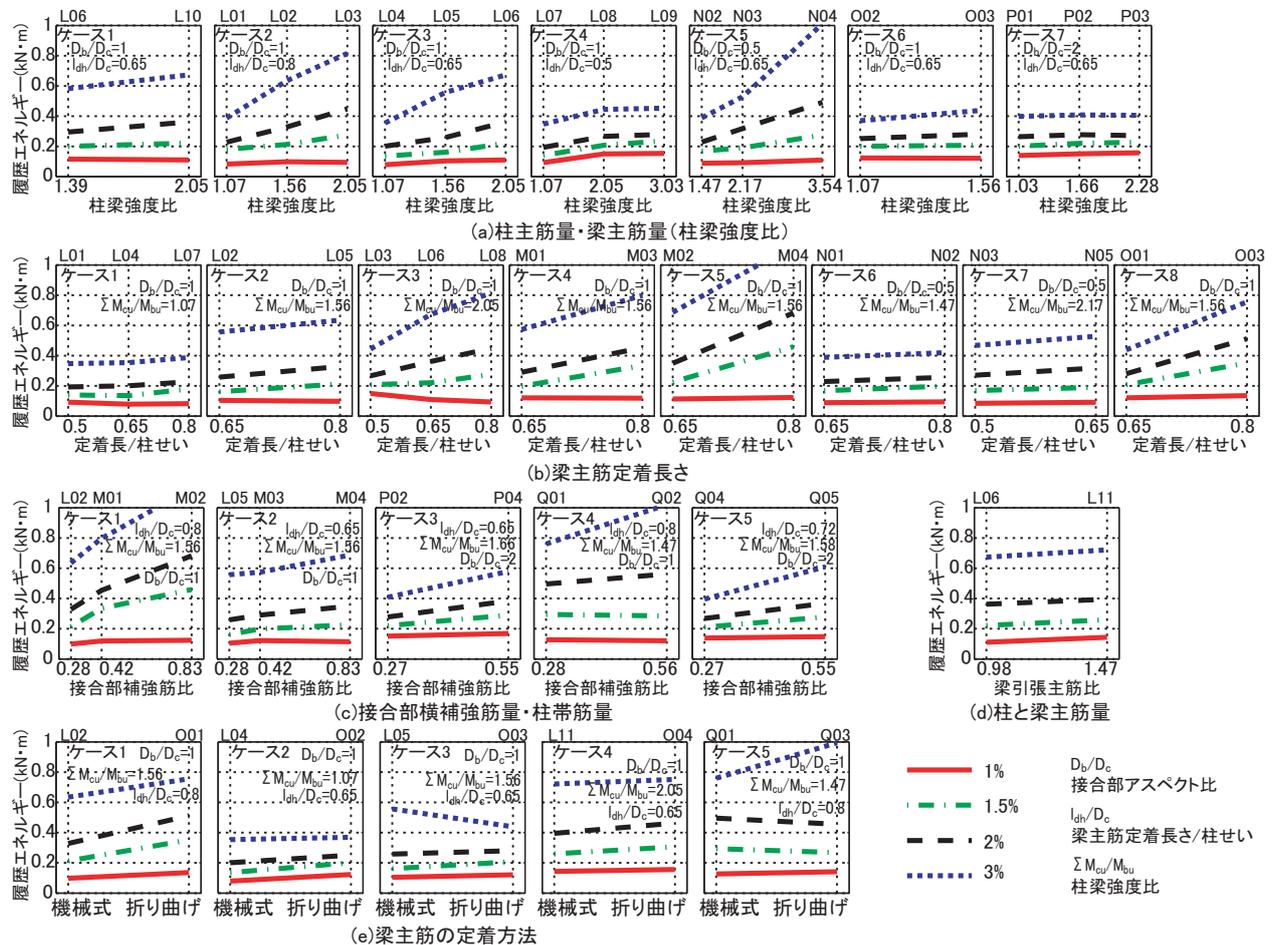


図-4 ト形柱梁接合部部分架構の各設計因子における履歴エネルギー吸収量

なるにつれて、補強筋が多い試験体の少ないものに対する履歴エネルギー吸収量の増加率も大きくなった。

柱梁強度比の場合と同様、接合部補強筋量が増えると柱梁接合部強度が上がることで、および、全体変形の中の接合部の変形が占める割合が減ることにより履歴エネルギー吸収量が大きくなると考えられる。

(d) 柱・梁主筋量

同じ形状で、柱と梁の主筋量を変化させた試験体である。柱梁強度比は2である。

梁引張主筋比が多くなるにつれて、つまり柱と梁の主筋量が多くなると履歴エネルギー吸収量が大きくなった。

この傾向の理由は十字形と同様に考えられる。

(e) 定着方法

同一の形状と配筋で、梁主筋の定着方法だけが変化する試験体のグループである。

定着方法が与える履歴エネルギー吸収量への影響はケースによって異なった。柱梁強度比が1.5程度で、梁主筋の定着長さが長いケース1では折り曲げ定着のほうが機械式定着よりもエネルギー吸収量が大きかった。

3.3 L形柱梁接合部

図-5に各設計因子の試験体グループごとにおける履歴エネルギー吸収量を示す。

(a) 柱主筋量 (柱梁強度比)

同じ形状で、柱主筋量だけが変化することで、柱梁強度比が変化する試験体グループである。

3 ケースとも柱梁強度比が大きくなると、履歴エネルギー吸収量が大きくなった。

この傾向の理由は十字形と同様に考えられる。

(b) 接合部横補強筋量

同じ形状と主筋の配筋で、接合部横補強筋だけが変化する試験体グループである。

接合部横補強筋の影響は、層間変形角によって異なるもので、横補強筋量の影響は見られなかった。

(c) 定着長

同じ形状と主筋の配筋で、梁下端主筋の定着長だけを変化させた試験体グループである。

柱梁強度比が1であるケース1では、層間変形角が1%の時を除いて、梁下端主筋の定着長が長くなると履歴エネルギー吸収量が大きくなった。柱梁強度比が1.28であるケース2では、層間変形角が3%の時を除いて、定着長が長くなると履歴エネルギー吸収量が大きくなった。

(d) 柱・梁主筋量

同じ形状で、柱梁強度比が1程度となるように柱と梁の主筋量を同時に変化させた試験体である。

層間変形角が1%, 1.5%, 2%, 3%のとき、柱・梁の主筋量が多い試験体は少ない試験体に対して履歴エネルギー吸収量がそれぞれ1.21, 0.90, 0.93, 1.06倍になり、柱・

梁主筋量の影響が見られなかった。

4. 部分架構の形状の影響

柱・梁を同形状・同配筋にした十字形接合部部分架構2体を対象として、内部柱梁接合部の応力状態となるように加力した試験体(A01)と部分架構の一方の梁に応力が生じないようにして片側の梁のみを加力した試験体(A02)を比べることで十字形・ト形として加力した時の影響を検討する。

図-6(a)は2体の試験体の履歴エネルギー吸収量を示す。変形が生じる梁が1つだけであり、最大層せん断力はおおよそ1/2であるにも関わらずト形のほうが十字形よりも履歴エネルギー吸収量が大きかった。A01は接合部破壊、A02は梁曲げ破壊であり、そのため、履歴性状が全く異なるものであった。

図-6(b)は同一柱梁断面の3体の試験体の履歴エネルギー吸収量を示す。十字形とト形の試験体の柱梁引張主筋は4-D13、L形の試験体の柱梁引張主筋は3-D13である。前述のようにL形接合部において、柱・梁主筋量の増加はエネルギー吸収量に影響を及ぼさないため、本研

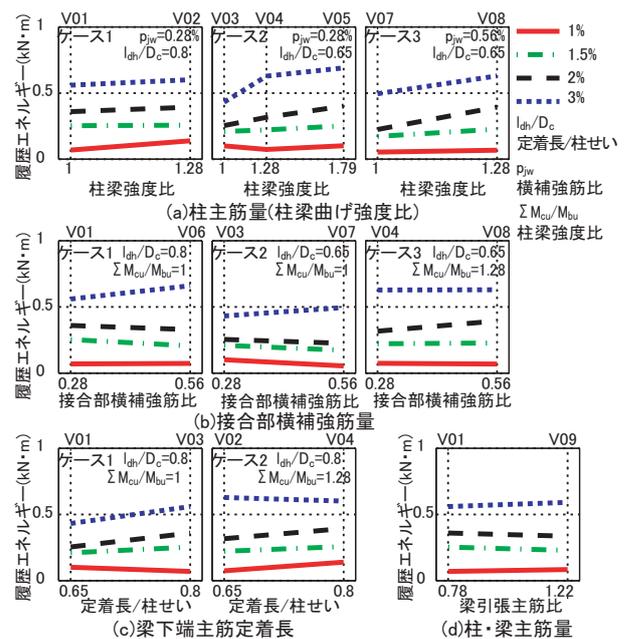


図-5 L形柱梁接合部部分架構の各設計因子における履歴エネルギー吸収量

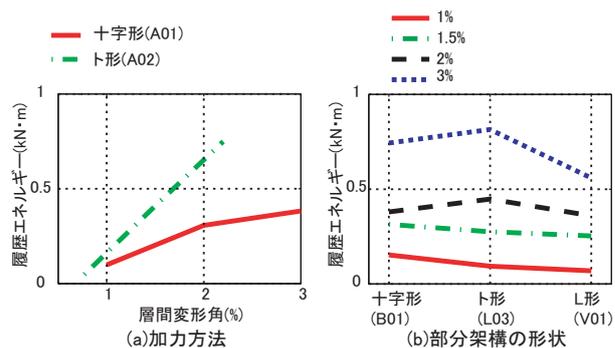


図-6 履歴エネルギー吸収量

究ではこの3体の試験体の履歴エネルギー吸収量を比較する。梁端にヒンジが生じた場合を考えると、履歴エネルギー吸収量の比は梁の本数で決まるため、十字形と比べて、ト形・L形のエネルギー吸収が0.5倍になるはずである。それに対して、層間変形角が1%、1.5%、2%、3%の時、十字形と比べて、ト形のエネルギー吸収はそれぞれ十字形の0.61、0.88、1.18、1.1倍、L形のエネルギー吸収がそれぞれ十字形の0.45、0.81、0.95、0.75倍となった。これは層間変形角が大きくなるにつれて、柱梁強度比が1である十字形とト形の接合部の破壊が進んだためと考えられる。

5. まとめ

本研究は履歴エネルギー吸収に影響を及ぼす設計因子の効果について検討したものである。以下に得られた主な知見をまとめる。

A) 十字形柱梁接合部

(1) 柱主筋量(柱梁強度比)：柱梁強度比が大きくなると、履歴吸収エネルギーが増える。(2) 柱・梁の主筋量：柱梁曲げ強度比が1.0に近いとき、柱と梁の主筋量が多くなると、履歴吸収エネルギーが増える。(3) 主筋間距離：主筋間距離が長くなると、履歴吸収エネルギーが増える。柱梁の主筋量が多い時にこの傾向が強くなる。(4) コンクリート強度：影響なし。(5) 梁・柱の偏心：偏心があると、履歴吸収エネルギーが若干減る。(6) 柱幅・梁幅：影響なし。(7) 梁主筋の上下の対称性：影響は見られない。(8) スパンの長さ：スパンが短いと、履歴吸収エネルギーが増える。(9) 継手の有無：影響なし

B) ト形柱梁接合部

(1) 梁・柱主筋量(柱梁強度比)：柱梁強度比が大きくなると、履歴吸収エネルギーが増える。ただし、梁せいが柱せいの2倍であるときは影響が見られなかった。(2) 梁主筋の定着長さ：定着長さが長くなると、履歴吸収エネルギーが増える。(3) 横補強筋：横補強筋が増えると、履歴吸収エネルギーが増える。(4) 柱・梁主筋量：柱・梁主筋量が多いと、履歴吸収エネルギーが若干増える。(5) 定着方法：定着長さが長い場合では、折り曲げ定着は機械式定着より、履歴吸収エネルギーが大きい。

C) L形柱梁接合部

(1) 柱主筋量(柱梁強度比)：柱の主筋量を増やすと、履歴吸収エネルギーが増える。(2) 接合部横補強筋：影響なし。(3) 梁下端主筋の定着長さ：定着長さが長くなると、履歴吸収エネルギーが増える。(4) 柱・梁の主筋量：影響なし。

今後の課題は、接合部の変形機構のモデル化による理論的な検討により、各因子の効果を説明できるようにする必要がある。

参考文献

- 1) 日本建築学会：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
- 2) 塩原等：鉄筋コンクリート柱梁接合部：見逃された破壊機構，日本建築学会構造系論文集，Vol.73，No.631，pp.1641-1684，2008.9
- 3) 楠原文雄，田崎渉，塩原等：柱と梁の曲げ終局強度が等しい十字形鉄筋コンクリート造柱梁接合部の破壊性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.313-318，2009.6
- 4) 楠原文雄，塩原等，田崎渉，朴星勇：柱と梁の曲げ強度の比が小さい鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部の耐震性能，日本建築学会構造系論文集，Vol.75，No.656，pp.1873-1882，2010.10
- 5) 楠原文雄，松土智史，塩原等，壁谷澤寿一，福山洋：柱幅が大きく柱梁強度比が小さい鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部の実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，構造IV，pp.495-496，2011
- 6) 楠原文雄，朴星勇，塩原等：鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部の強度に及ぼす柱・梁のスパン長さの影響，日本地震工学会大会－梗概集，pp.368-369，2011
- 7) 楠原文雄，朴星勇，塩原等：鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部部分架構の履歴エネルギー吸収能に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.271-276，2012
- 8) 焦博文，楠原文雄，塩原等：主筋に機械式継手を有する鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部の耐震実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp.295-300，2013
- 9) 楠原文雄，藤原圭佑，塩原等：架構内での変形を模した境界条件による鉄筋コンクリート造外部柱梁接合部部分架構の実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp.343-348，2011
- 10) 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.1939-1948，2013.11
- 11) 沖原圭佑，楠原文雄，塩原等：梁側の柱主筋量を増した鉄筋コンクリート造外部柱梁接合部の水平加力実験，日本地震工学会大会－梗概集，pp.210-211，2012
- 12) 楠原文雄，焦博文，塩原等，田尻清太郎，壁谷澤寿一，福山洋：鉄筋コンクリート造L形柱梁接合部の耐震性能に及ぼす柱梁強度比の影響に関する実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，構造IV，pp.485-486，2012