

論文 残留変形抑制機構を内蔵する高性能RC梁の開発に関する実験的研究

阿部 友樹*1・塩屋 晋一*2・岡崎 駿也*3

要旨: 鉄筋コンクリート造建物を対象にして大地震時に大変形を経験しても、構造体の損傷を軽微に留め、残留変形角を抑制する技術を開発している。主筋の一部に高強度鉄筋を配筋することにより残留変形抑制機構を部材内部に内蔵させるRC梁で、降伏後の二次剛性を低下させた場合の、残留変形の抑制状況を準静的加力実験により明らかにしている。残留変形が零に収束する条件と、許容範囲(1/400rad.以内)に抑制される条件を明らかにしている。

キーワード: 鉄筋コンクリート, 梁, 残留変形角, 制震構造, 損傷抑制, 高強度鉄筋

1. はじめに

鉄筋コンクリート造(以後, RC造)や鉄骨造の耐震構造は地震時には構造体の降伏や損傷により振動エネルギーを吸収するため、地震後に損傷や変形が残る。これらを軽減することが、耐震構造の今後の重要な課題である。

塩屋ら¹⁾は残留変形抑制機構を梁の内部に内蔵する方法を提案している。梁の上端主筋を高強度鉄筋とし、下端主筋を普通鉄筋とすることにより、その普通鉄筋が降伏した以降、高強度鉄筋による二次剛性を発揮させて地震後の残留変形を抑制できることを実証している。しかし、高強度鉄筋を多くすると、残留変形抑制性能はよくなるが、二次剛性が大きくなり大変形域でせん断力が増大し、梁のせん断設計や柱の設計が厳しくなる問題が残されている。

これを解決する目的で二次剛性を小さくして梁のせん断力の増加を抑制する場合の梁の加力実験を行った。論文では、実験概要と梁の残留変形を抑制する条件について考察した結果を述べる。

2. 残留変形抑制機構と残存振動の準静的加力

2.1 残留変形抑制機構

残留変形を積極的に抑制する構造としては、制震構造と免震構造がある。これらはエネルギー吸収要素と弾性抵抗要素を混合した構造である。エネルギー吸収要素が変形依存型の完全弾塑性型履歴特性(図-1(a))であれば、建物の履歴特性は、弾性抵抗要素(図-1(b))と合わせて図-1(c)の履歴特性になる。図-1(c)の弾性剛性 K_1 に対して降伏後の二次剛性 K_2 を与えることにより残留変形を抑制できる。これは最大応答変形後の残存振動と建物の履歴特性の相乗効果²⁾により生じる。耐震構造でも、構造体自体の履歴特性を図-1(c)にできると、制震構造や免震構造と同様に残存振動により残留変形を抑制する効果が発揮される。

本研究はRC造の柱・梁・耐震壁の履歴特性を図-1(c)にし、建物全体の履歴特性を図-1(c)に近づけ、残留変形

を抑制する効果を発揮させることを狙いとしている。

2.2 残存振動と準静的加力方法

地震時の最大応答後に建物に残る残存振動は、残存する地動(以後、残存地動)と自由振動の成分からなる。井上ら³⁾は鋼構造建物を対象に残存地動を無視して自由振動だけを考慮し、減衰エネルギーと塑性エネルギーにより振動が減衰するものとして評価される残留変形は、残留変形を抑制する目的であれば安全側の推定値となるとしている。

残存地動を無視して自由振動だけを考慮する準静的加力は、残留変形の抑制性能を調べる有効な方法になる。

3. 梁の準静的加力実験

3.1 実験目的

図-2のように上端主筋を全て高強度鉄筋にすると二次剛性 K_e が大きくなり大変形域で梁のせん断力が増大する。高強度鉄筋の量を減らして下端主筋側に寄せることにより K_e を小さくできる。この方法により二次剛性 K_e を調整した曲げ降伏型梁に残存振動を想定した準静的加力実験を行い、残留変形の抑制状況を明らかにする。

3.2 試験体

図-3に試験体の形状と寸法を示す。表-1に使用材料

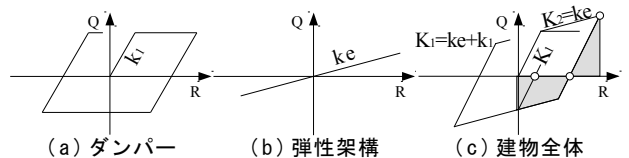


図-1 制震構造の復元力特性

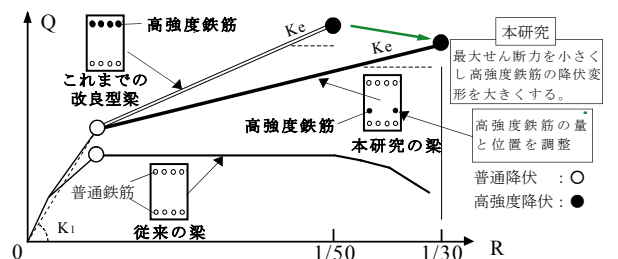


図-2 開発するRC梁の荷重-変形関係の二次勾配

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 鹿児島大学大学院 理工学研究科教授 博士(工学) (正会員)

*3 株式会社JFE設計 元鹿児島大学大学院理工学研究科建築学専攻 大学院生

の力学的特性を示す。縮尺は実大の1/4で基本形状は文献1)の試験体と同じである。高強度鉄筋の量と位置が異なる。文献1)の試験体では上端主筋を全て高強度鉄筋としていたが、本試験体では上端主筋と下端主筋とも普通鉄筋として、下端側に高強度鉄筋を2本または1本を配筋した。高強度鉄筋を減らすことにより高強度鉄筋の降伏変形が小さくなるため高強度鉄筋の付着を無くす区間を長くした。

試験体は2体である。表-2に梁の断面リストを示す。高強度鉄筋を2本配筋したものをH-No.3とし、1本配筋したものをH-No.4としている。その高強度鉄筋は梁下端側から梁せいの1/4の高さ位置に配筋した。これは、普通鉄筋の降伏後の二次剛性を抑制することと、高強度鉄筋を大変形域まで弾性抵抗させることを目的としている。図-5のように上端側に曲げ圧縮時だけに圧縮抵抗し、引張抵抗しない圧縮抵抗筋を配筋した。この鉄筋は平石ら⁴⁾の方法における補助主筋を併用している。平石らの方法は、ヒンジ領域の主筋の区間(梁せいの1/2)の付着を無くしヒンジ領域の曲げひび割れを防止する補助主筋を配筋する。その付着をなくす方法を、文献1)では塩ビシートを巻く方法を採用していたが、今回はバテが塗られた塩化ビニールテープ(厚さ0.64mm)を巻く方法に変更した。

3.3 加力方法と変形の測定方法

図-6に実験の測定状況を示す。変位計によって左右のスタブ間の鉛直変位および梁端の回転角、梁の軸方向変位を測定した。鉛直ジャッキの荷重を測定して梁の曲げモーメント分布を推定できるようにした。図-7に実験の加力方法と加力時の応力状態を示す。左右の梁端の曲げ剛性は異なるが、両スタブの回転角が等しくなるように2台のジャッキでせん断力を加力した。図-8に示すように、残存振動時の加力履歴の規則は、各目標の最大経験変形角 R_{max} に達した後、除荷時に排出される弾性エネルギー E_e と、負側に載荷して消費される弾塑性歪みエネルギー E_s が等しくなるまで進め、除荷する。この後の除荷時もこれを繰り返して、 E_e が塑性エネルギーで消費されるまで繰り返し、最終残留変形角 rRe を特定する。その後、目標を次の R_{max} へ移行させる。 R_{max} は図-9に示すように正、負の順で目標値とした。H-No.3では粘性定数 h が0%と3%の場合の検証を行い、本震後は相応の余震が生じると考え余震に対する検証も行った。粘性定数の違いでの残留変形の抑制効果、及び余震での残留変形の抑制効果を検証するため、図-10に示すように R_{max} を1.5/200rad.から1/50rad.で粘性定数 h を0%と3%で交互に行った。その後は、1/50rad.から1/200rad.に戻し、1/50rad.まで余震として再度加力を行った。この後は想定外の大地震に対して R_{max} を1/33rad.へ徐々に進めて抑制効果を検証した。

3.4 実験結果

3.4.1 梁のせん断力-変形角関係と最終残留変形角

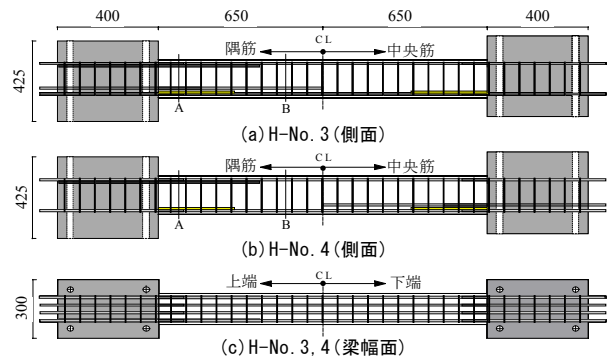


図-3 試験体の形状と配筋

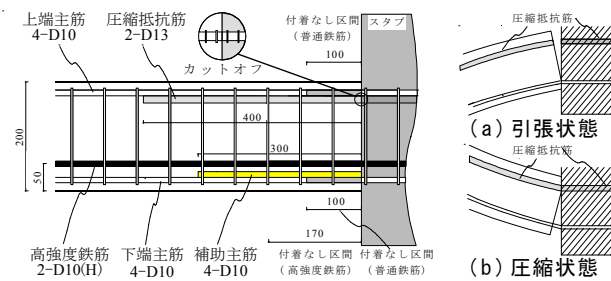


図-4 梁端部の詳細(H-No.3) 図-5 圧縮抵抗筋の挙動

表-1 使用材料の力学特性(単位:N/mm²)

コンクリート	試験体	$E_c(\times 10^4)$	σ_B	$c \varepsilon_B(\%)$	
	H-No.3, H-No.4	3.33	61	0.253	
鉄筋	種類	$E_s(\times 10^4)$	σ_y	σ_p	σ_u
	D10	1.81	368	—	506
	D10(H)	1.82	1073	775	1225
	D13	1.79	348	—	517
	D3.5	2.05	385	—	—

E_c : コンクリートのヤング係数, σ_B : 圧縮強度, $c \varepsilon_B$: 圧縮強度時のひずみ度
 E_s : 鉄筋のヤング係数, σ_y : 降伏強度, σ_p : 比例限界, σ_u : 破断強度

表-2 断面リスト

試験体	H-No.3		H-No.4	
	A	B	A	B
梁断面				
B × D	160 × 200			
上端主筋	4-D10			
下端主筋	4-D10			
高強度鉄筋	2-D10 (H)		1-D10 (H)	
補助主筋	4-D10	—	4-D10	—
圧縮抵抗筋	2-D13	—	2-D13	—
あばら筋	4-D3.5@60			

図-11に梁のせん断力-変形角関係を示す。正加力側と負加力側で残存振動させた場合をそれぞれを示している。普通鉄筋が降伏した時の降伏剛性 K_1 に対する、降伏後の二次剛性 K_e の比 α_e はH-No.3が12%, H-No.4が9%であった。

H-No.3とH-No.4とも最大経験変形角 R_{max} が大きくなると最終残留変形角 rRe も連動して大きくなるが、高強度鉄筋が多いH-No.3の方が、その残留変形角が抑制されている。図-12に文献1)のN-No.2とH-No.2の負加力側の例を示す。上端筋全ての4本を高強度鉄筋にしたH-No.2は最終残留変形角を零近くに抑制でき、全てを普通鉄筋にしたN-No.2は最終残留変形角が増大した。残留変形の抑

制状況はH-No.3とH-No.4を比較すると、H-No.3はH-No.4よりH-No.2に近く、H-No.4はH-No.3よりN-No.2に近い。

図-13(a)に rRe の推移を $Rmax$ との関係で示す。図中には最大経験変形角から減力してせん断力が零になる時の残留変形角 rRi も示している。残存振動加力により、 rRi より rRe が小さくなる。図-13(b)に文献1)のN-No.2,H-No.2と比較して図-13(a)と同様に rRe の推移を示す。塩屋らは残留変形の許容限界値を $1/400rad$ としている。H-No.2は正側では $Rmax$ が $1/50rad$ まで、負側では $1/33rad$ まで、その限界値内になっているが、H-No.3は正側では $1.5/100rad$ まで、負側では $1.75/100rad$ までは限界値内に収まっている。H-No.4は全て普通鉄筋のN-No.2に近くなっている。

これらのことから、高強度鉄筋の量を多くすることにより、残留変形の抑制効果が大きくなり、最大経験変形角が $1/50rad$ に達しても最終的な残留変形角を $1/400rad$ 以内に抑制するためには、高強度鉄筋の鉄筋比を 0.67% (本試験体では3-D10)以上、または、その位置を引張縁に近づける必要があると考えられる。

3.4.2 損傷抑制

図-14に加力終了までに確認されたひび割れと破壊状況と残留ひび割れ幅が $0.05mm$ 以上のひび割れの図を示す。文献1)のN-No.2とH-No.2のひび割れも示している。

$1/33rad$ を経験しても $0.05mm$ 以上のひび割れは左右梁端だけに抑制されている。 $1/40rad$ までヒンジ領域のコンクリートの劣化は見られず、梁の損傷は抑制できたと判断できる。しかし、今回のH-No.3,H-No.4では右端で曲げひび割れの位置が、普通鉄筋の上端筋側で曲げ危険断面からスパンの内側にずれて生じている。一つの原因として3.2節で述べたようにヒンジ領域の付着を無くす方法を変更したことが考えられる。今後は主筋に巻き付けた塩化ビニールテープを厚くすることが必要と考えられる。

4. 改良型梁の残留変形を零に抑制する条件の再考

塩屋らは改良型梁で最大変形後の残留変形が零に収束する条件を提案している¹²⁾。ここでは、これまで実験を行った改良型梁試験体について、その条件の適合状況と、残留変形の決定状況を検証する。

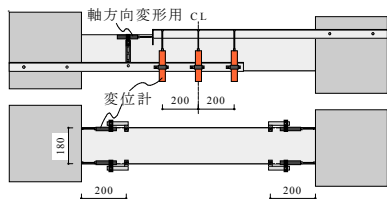


図-6 測定状況

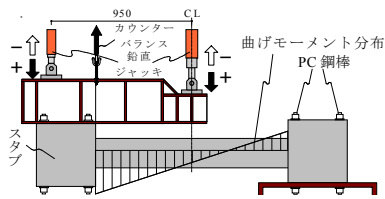


図-7 加力方法と曲げモーメント分布

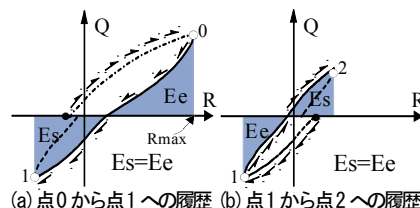


図-8 残存振動時の加力規則(h=0%)

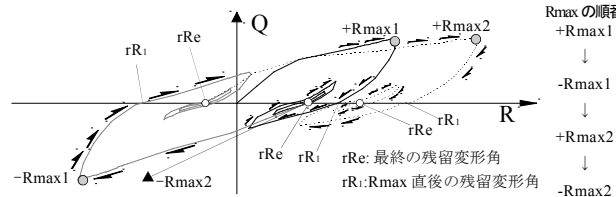


図-9 残存振動時の残留変形角を特定するための加力履歴

Yb: 下端筋降伏, Yt: 上端筋降伏, Cr: 曲げひび割れ, Yh: 高強度降伏, C: 圧縮破壊, ○: 残留変形角 rRe , Qy : 降伏応力(計算値)

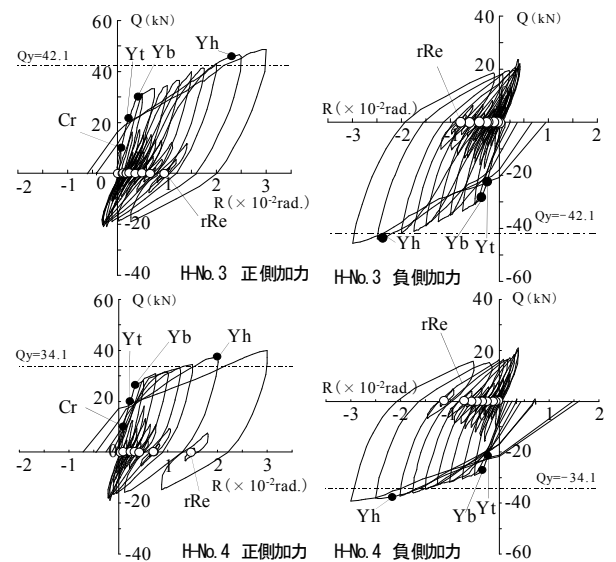


図-11 梁のせん断力-変形角関係

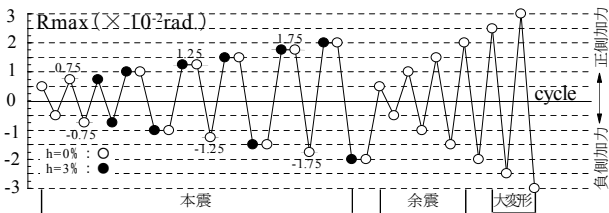


図-10 最大経験変形角 $Rmax$ の履歴(H-No.3)

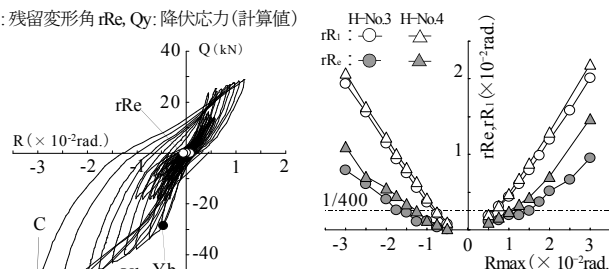
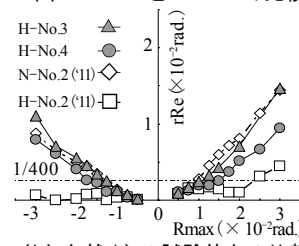


図-12 梁のせん断力-変形角関係('11)

(a) H-No.3とH-No.4の比較



(b) 文献1)の試験体との比較

図-13 残留変形角-最大経験変形角関係

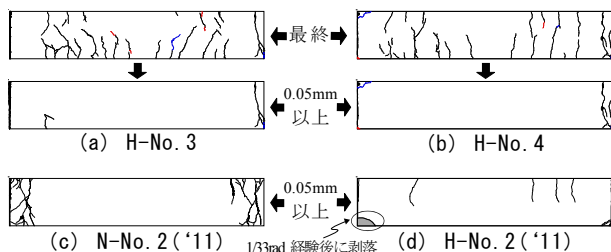


図-14 1/33rad. 経験後のひび割れと幅0.05mm以上のひび割れ

4.1 残留変形を抑制するメカニズムと零に抑制する条件

改良型梁では高強度鉄筋を大変形域(1/50～1/40rad.)まで弾性抵抗させて、これにより普通鉄筋の降伏後に二次剛性を生じさせて下記の3つの効果を発揮させる。

効果Ⅰ：図-15(a)に示すように最大変形後の除荷で荷重が零になる時の変形 rR_i を抑制できる。静的加力では rR_i が残留変形になるが、地震時は残存振動により減少する。

効果Ⅱ：図-15(b)に示すように最大変形後の除荷時に排出されるひずみエネルギーを大きくし、負側へ変形を戻す運動エネルギーを大きくさせる。これにより、残留変形を減少させる。

効果Ⅲ：残存振動により残留変形を零に収束させることが可能になる。下記の条件のいずれかを満足すれば零に収束する。

条件1：高強度鉄筋の量が多いと、図-15(c)に示すように残存振動時の履歴ループに原点を中心とする自己相似性が生じる。この履歴ループは、原点を中心に減衰振動するため最終の残留変形 rRe は零に収束する。このためには図-15(c)に示すように最大変形後、点0から点1を通過して基準線0に到達し、自己相似性を有する履歴ループの減衰振動に入る必要がある。基準線0は正負の最大変形点と原点を結ぶ直線である。この条件は、履歴ループに原点を中心とした自己相似性が存在することと、最大変形後に排出されるひずみエネルギー E_1 が基準線0に到達するエネルギー E_2 を上回ることになる。

条件2：高強度鉄筋量が少なくと前述の条件1を満足できなくなる。しかし図-15(d)に示すように必ず原点を通過して自己相似性が維持される履歴もある。この場合も、必ず原点を通過して減衰振動するので残留変形は零になる。この条件は、履歴ループに原点を必ず通過する自己相似性が存在することと、図-15(d)に示す最大変形後に排出されるひずみエネルギー E_1 が基準線1に到達するエネルギー E_2 に等しいことになる。文献1)では基準線1を降伏剛性 K_i による線とした。

文献1)では残存振動時の履歴ループを折れ線によるモ

デル化も提案している。モデル化のループと実際のループには若干の誤差が生じる。このため、モデル化された履歴ループで条件1, 2を満足しても、実際は最終の残留変形 rRe は原点の前後で変動する。条件1は原点を中心に振動するため、条件2より残留変形がより抑制されることになる。当然、条件1と条件2の間の梁も存在する。

4.2 残存振動時のループの検証

条件1または条件2を満たすことは、既に効果Ⅰと効果Ⅱを発揮させることになる。それらの条件の適合状況と残留変形の決定状況を、改良型梁について検証する。

図-16に改良型梁の残存振動時のループの例を示す。残留変形が抑制された文献1)のH-No.1とH-No.2は正側と負側を示し、H-No.3とH-No.4は負側だけを示している。

(a)H-No. 1¹⁾

一点鎖線は基準線0である。点線はモデル化された包絡線である。普通鉄筋が降伏した時の降伏剛性 K_i に対する、降伏後の二次剛性 K_e の比 α_e は22%であった。

最大経験変形角 R_{max} から除荷後、基準線0に達し、それ以降の残存振動のループでは、ピークから次の反対側のピークの半サイクルのループ形状に自己相似性が明確に生じている。1/33rad.で高強度鉄筋が降伏するが、このループまでは、正加力側、負加力側とも条件1を満足して残留変形 rRe が全て $\pm 1/800rad.$ 以内に抑制されていた。

(b)H-No. 2¹⁾

α_e は21%であった。 R_{max} から除荷後、基準線0に達しないで除荷に転じている。条件1を満足していない。これは初期の1.5/200rad.のループから確認された。しかし、正加力側の1/40rad.と1/33rad.を除くと、全て残留変形 rRe が $\pm 1/800rad.$ 以内に抑制されていた。基準線0に達しないで除荷に転じる時の、梁の左右の梁端の曲げ抵抗の状態を、文献2で考察している。図-17に最大変形後の履歴ループと梁端の曲げ抵抗の状況を再掲する。本試験体は点3-4区間で除荷に転じることになる。この除荷時の梁端の主筋とコンクリートの抵抗の箇所数と状況は最大変形角後の除荷時の点1-2区間と同じである。

鉄筋の応力-ひずみ関係における応力の除荷剛性は、それまでの履歴の影響を殆ど受けなくてヤング係数に近い。このため点3-4区間の除荷時の履歴は点1-2区間の履歴に近くなる。このことから、基準線0に達しないで除荷に転じる点からせん断力が零になる点までの除荷剛性は、図-18に示すように除荷に転じる時のせん断力 ΔQ と、点0-2区間で同じ大きさのせん断力の点からせん断力が零となる点2までの剛性で近似できる。この方法による剛性の直線を各ループに破線で示す。この剛性で原点を起点とする破線は前述の条件2の基準線1に該当する。正加力側の1/40rad.と1/33rad.を除くと、本試験体は、その破線の基準線1に達した直後に除荷に転じており、条件2を満足して

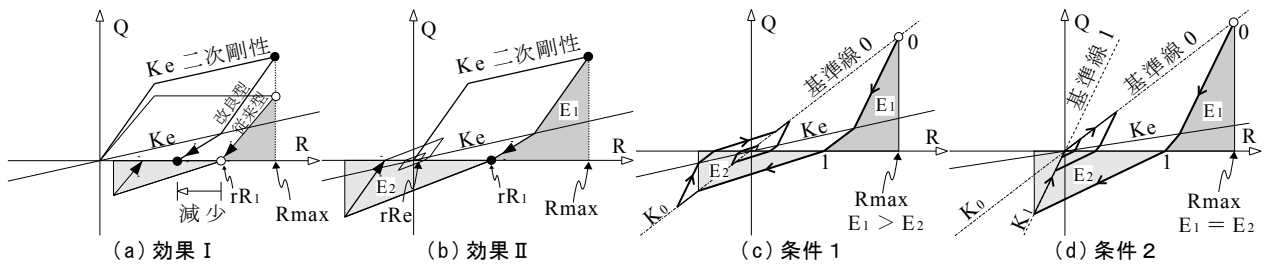


図-15 二次剛性を発揮させる効果と残留変形を零にする条件

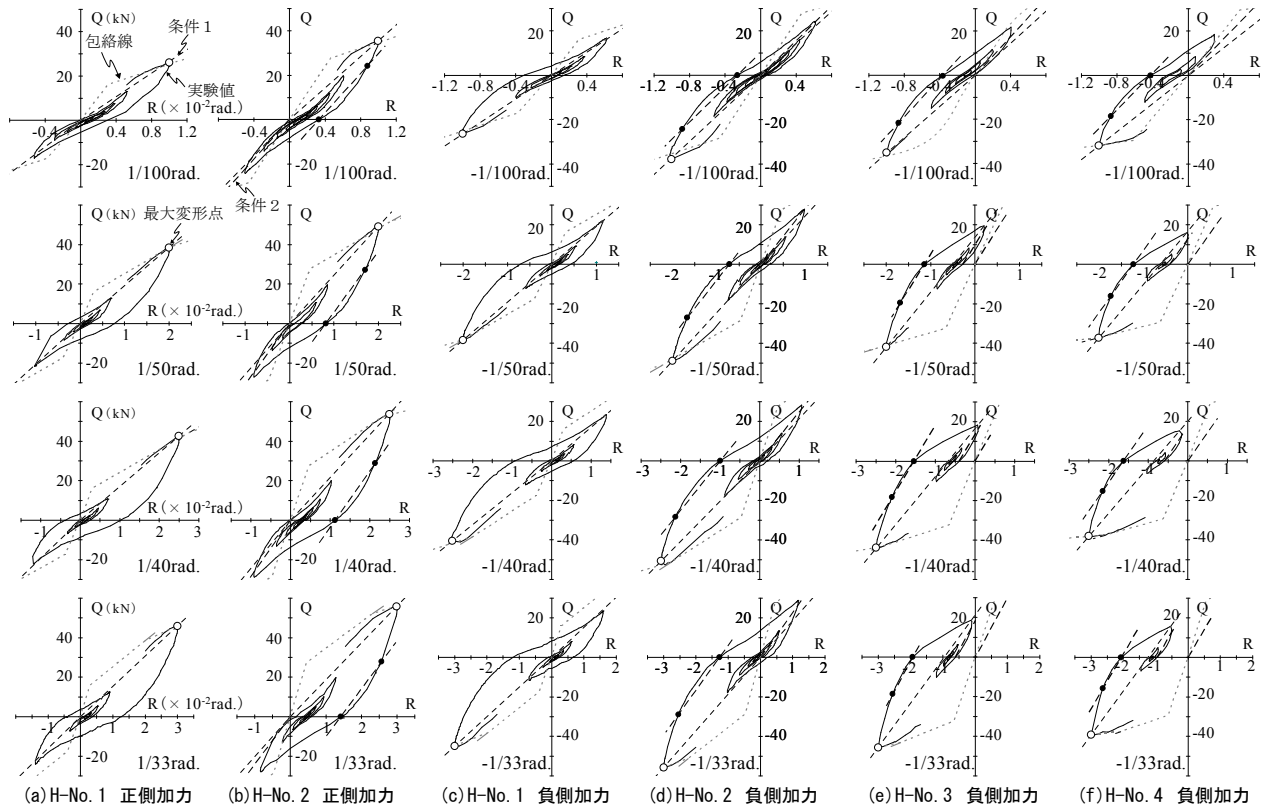


図-16 改良型梁の残存振動の時のループの例

いたことになる。このため rRe が $\pm 1/800rad$ 以内に抑制されたと説明できる。

これに対して正加力側の $1/40rad$ と $1/33rad$ は破線の基準線1に達していない。これは図-14(d)中に示すように正加力時に圧縮抵抗すべき右梁端の下端側のコンクリートが圧縮破壊して復元性が低下したことによる¹⁾。

(c) H-No. 3 と H-No. 4

両試験体とも破線の基準線1に達しないで条件2を満足していない。全てのループにおいて同様であった。

残留変形角 rRe が $1/400rad$ (視覚的許容限界) の範囲に抑制されたのは、H-No.3は正加力側では $Rmax$ が $1.5/100rad$ のループまで、負加力側では $1.75/100rad$ まで、H-No.4は $1/100rad$ まで、負加力側では $1.25/100rad$ までであった。それ以降は rRe が増大した。

図-16(e)(f)には基準線1に達しないで除荷に転じる時点に対しても破線の剛性を示している。いずれの場合も破線の剛性で除荷時の剛性をほぼ推定している。

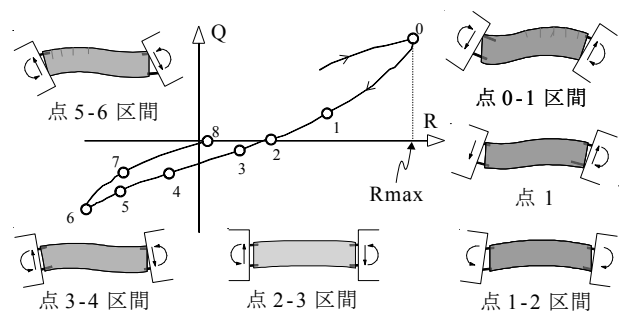


図-17 最大変形後の履歴ループと梁端の曲げ抵抗の状況

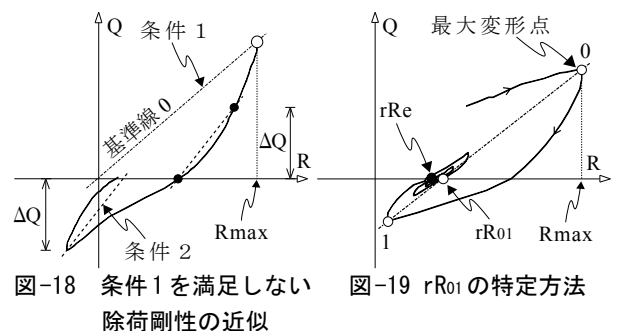


図-18 条件1を満足しない
除荷剛性の近似

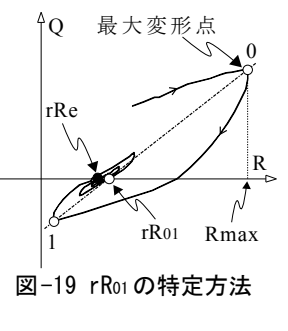


図-19 $rR01$ の特定方法

5. 残留変形を許容範囲に抑制する条件

前章では残留変形角を零に抑制する条件を述べた。しかし、設計では許容できる残留変形角 rRa を設定して3.1節で述べた理由により二次剛性を緩和することが求められる。ここでは、安全側で残留変形角を許容角 rRa より小さく抑制する簡便的な条件を示す。

図-19に示すように最大変形点0から除荷後、反対加力の最大点1を結ぶ直線と横軸の交点の変形 $rRo1$ とする。これによる $rRo1$ と rRe の実験値の推移を図-20に示す。 $rRo1$ を白塗り rRe を黒塗りとしている。○, ●は条件2を満たすH-No.2と満たさないH-No.3で, □, ■はH-No.4について示している。いずれも $rRo1$ が rRe をほぼ大きめに安全側で近似している。このことから図-19の方法による $rRo1$ が許容残留変形 rRa より小さくなるように制御すればよいことになる。

文献2)では二次剛性比 αe と最大経験変形角の塑性率 μ_{max} および残留変形角を降伏変形角で除した比 μ_{res} の相関関係を示している。それに準じて、改良型梁4体と従来型梁2体の実験データの分布を図-21(a)に示す。正加力側、負加力側も合わせて示している。黒塗りの記号は残留変形角 rRe が $1/400rad$.以内に抑制されたもので、白塗りの記号はそれを上回ったものである。○, ●はH-No.1とH-No.2で, □, ■はH-No.3とH-No.4で, △, ▲はN-No.1とN-No.2である。ワイヤフレームの曲面は文献2)の図-21で示された $\mu_{res}-\alpha e-\mu_{max}$ 相関曲面である。実験値はその相関曲面の変化傾向と同様に、 αe が小さく μ_{max} が大きくなると μ_{res} が大きくなる傾向が実験値でも確認される。図-21(b)に同図(a)の $\alpha e-\mu_{max}$ 平面を示す。プロットしたデータは図-21(a)と同様の記号である。図中に条件1から得られる $\alpha e-\mu_{max}$ の境界線を太実線で示す。履歴ループのモデル化は文献1),2)の方法によった。境界線の算出方法も文献2)を参照されたい。その境界線より αe が大きい領域は残留変形は零に抑制されることになる。その領域のデータは黒塗りで残留変形角が $1/400rad$.以内に抑制されており、実験結果とよく対応している。

図-19による $rRo1$ を $1/400rad$.として得られる境界線を一点鎖線で示す。これは許容残留変形角 rRa を $1/400rad$.としたことを意味する。圧縮破壊により復元性が低下した○のデータを除くと、境界線より αe が大きい領域も黒塗りの実験値になっている。図-19の方法による $rRo1$ を許容残留変形角 rRa 以下に抑制する条件は残留変形を許容範囲内に抑制する有効な条件と判断できる。

文献2)では条件2の基準線1の剛性を降伏剛性として残留変形を零にする境界線を示している。それを図-21(b)中の点線で示す。その境界線より αe が大きい領域には白塗りの実験値が存在しており、基準線1の剛性を降伏剛性としたことは危険側であったことが確認できる。

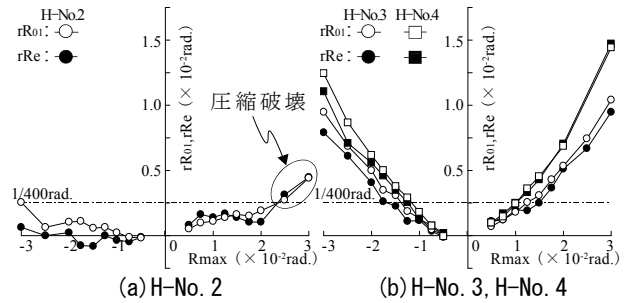


図-20 $rRo1$, rRe の実験値の推移

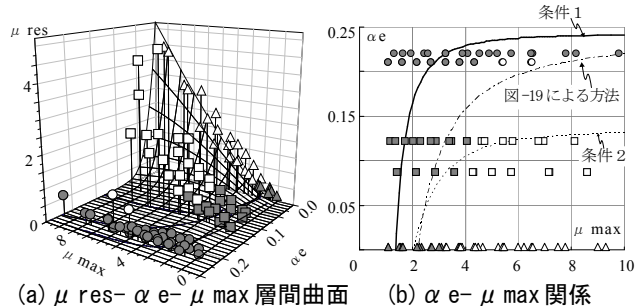


図-21 $\mu_{res}-\alpha e-\mu_{max}$ 関係

6. まとめ

二次剛性を低減させた改良型梁の加力実験を行い、実験結果を基に残留変形を抑制する条件について考察した。主たる結果を以下にまとめる。

- (1) 普通鉄筋が降伏した以降の二次剛性比が10%程度の場合、残留変形角を許容限界値($1/400rad$.)内に抑制できるのは最大経験変形角が $1.5/100rad$.までであった。
- (2) 改良型梁の残留変形角を零($\pm 1/800rad$.程度)に近づけるに二つの条件を明確にした。
- (3) 許容残留変形角を設定して残留変形角を許容残留変形角の範囲内に抑制する簡便的な条件を提案した。
- (4) $1/40rad$.の変形を経験しても地震後に補修すべき箇所は梁端の曲げひび割れに限定できた。

参考文献

- 1) 岡崎駿也, 塩屋晋一, 武矢直子: 残留変形抑制機構を部材内部に内蔵するRC梁の実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.151-156, 2012.7
- 2) 古賀武司, 塩屋晋一, 武矢直子: 残留変形抑制機構を部材内部に内蔵するRC梁の残留変形を抑制する条件の検証, コンクリート工学年次論文集 Vol.34, No.2, pp.217-222, 2012.7
- 3) 木戸脇俊樹, 井上一郎: 大地震に対する1質点バイリニア系の残留変形に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.935-936, 1999.9
- 4) 平石久廣ほか: 降伏機構分離型鉄筋コンクリート造の開発(梁の耐震実験) 日本建築学会構造系論文, 第580, pp.99-104, 2004.6