

低損傷アンボンド X 型配筋 RC 梁の開発

DEVELOPMENT A DAMAGELESS DE-BONDED DIAGONALLY REINFORCED BEAM

島崎 和司 *

Kazushi SHIMAZAKI

Even the main aim of the earthquake resistant design is to protect life in very severe earthquakes, the recent demands of building owners have been changed to be able to use the buildings again with small repair cost. Good reparability is required to enable the reuse of buildings after severe earthquakes, even for RC members. A beam with diagonal reinforcements is very ductile with large number of concrete cracks. De-bonded diagonal reinforcements and a small design of narrow U-shaped notches near the end of the beam are one solution to reduce damage and increase the ability to absorb energy. The experimental results of the members with proposed design showed an effective means to reduce damage with greater energy dissipation ability.

Keywords : RC structure, damage control, diagonally reinforced beam, bond, earthquake resistance design
RC 構造、損傷制御、X 型梁、付着、耐震設計

1. はじめに

建築物の構造設計が性能設計を指向するようになり、建物オーナーの要求性能が高度化し、鉄筋コンクリート造建物においても、大地震後も建物を使えるという要求が強くなってきている。その為には、RC 部材の構造性能の向上と修復性が良好である事が必要である。こうした背景から、低損傷、修復性の向上を目指した部材の構法が報告されるようになってきている^{1)~4)}。

図1に示したようなコアタイプの建物の、靱性に劣る短スパン梁のせん断破壊の防止、付着割裂破壊の防止、変形性能の向上のため、X 型配筋梁が使われてきた⁵⁾⁶⁾。文献1)においてはこれに加え、損傷の低減を目的として、X 型筋の付着を除去したアンボンド X 型配筋梁を提案した。さらに、補修性という観点より、剛性回復の困難な損傷である中央部の対角クラックについて、図2に示したような耐荷機構モデルを用いて損傷評価法を検討した⁷⁾⁸⁾。これは、X 型配筋梁を X 型配筋によるブレースシステム (以下 X 型ブレースと記す) と平行配筋による RC 梁とに断面を分けて考えたものである。X 型ブレースにおいては、引張力は鉄筋(T_s)のみで抵抗し、圧縮力は鉄筋(C_s)とコンクリートのストラット(C_c)で抵抗するものとした。この X 型ブレースが負担する軸力の鉛直方向成分がせん断力 BQ となる。平行配筋梁部分については、せん断補強筋とコンクリートストラットによるトラスでせん断力 PQ に抵抗するものとして評価した。

これらの試験体においては、対角クラックを防止しても端部でせん断クラックが生じており、損傷の完全な回復は困難であった。部材のコンクリートに引張応力度を生じさせないようにすることで、これら

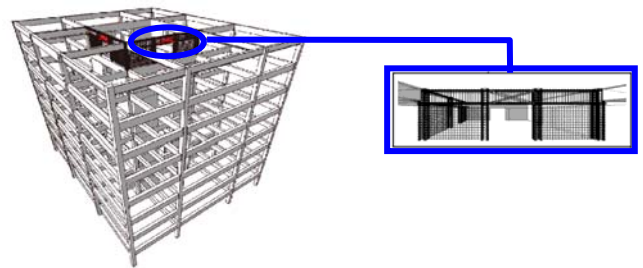


図1: コアタイプの建物における短スパン梁

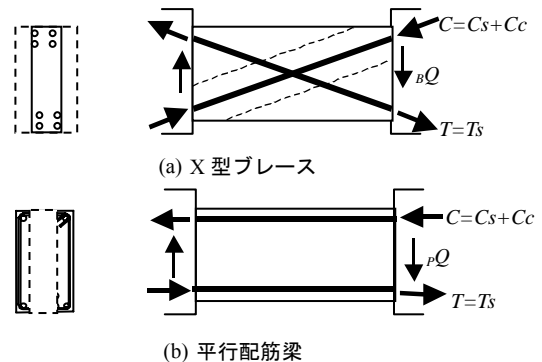


図2: X 型配筋梁の耐荷機構モデル⁸⁾

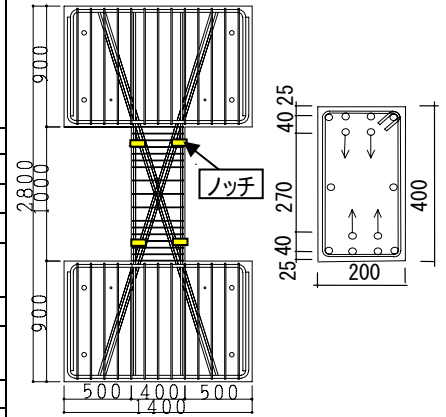
の損傷は低減できると考えられる。図2(b)の平行配筋梁部分をなくすれば、コンクリートが直接負担するせん断力がなくなり、引張応力度

*神奈川大学 工学部 建築学科 教授・博士(工学)

Prof., Department of Architecture, Kanagawa University, Dr. Engineering

表 1：試験体一覧

試験体	No. I-1	No. I-2	No. I-3	No. I-4	No. I-5	No. I-6	No. I-7	No. I-8
断面								
$b \times D(\text{mm})$	200×400							
コンクリート(N/mm ²)	54	64	64	49	33	33	43	60
平行筋	鉄筋	2-D16	2-D10					
	$\sigma_s(\text{N/mm}^2)$	476	370					
軸筋	鉄筋	4-D16 Bond	2-D16 Bond	—	2- ϕ 19 De-bond	—	2- ϕ 17 De-bond	
	$\sigma_s(\text{N/mm}^2)$	476	849		380		930	
X 型筋	Bars	4-D16 Bond			4- ϕ 19 De-bond			
	$\sigma_s(\text{N/mm}^2)$	476	386		380		370	
横補強筋	Bars	2-D6 @150			2-D6 @100/@50			
	$\sigma_s(\text{N/mm}^2)$	331	348		349		349	
	$p_w(\%)$	0.21			0.32/0.64			
実施年度	2000	2002		2003			2004	



梁端部断面 単位:mm

図 3：試験体概要

が生じなくなると考えられる。図2(a)のX型圧縮ブレースのコンクリートにノッチなどを設けることにより、コンクリートに直接圧縮力を負担させないようにすることで、損傷が極めて少ないX型配筋梁を作成することが出来ると考えられる。また、ノッチにより、圧縮側の鉄筋が圧縮降伏し、エネルギー吸収能力が増加すると考えられる。

これらのことを踏まえ本論では、既報¹⁾⁸⁾で提案したアンボンドX型配筋梁よりクラックの本数が大幅に減少して修復性が良好であり、大きなエネルギー吸収能力をもつ、X型配筋短スパン梁の新構法を提案し、その実験結果と基本特性を示した。

2. 実験概要

試験体は図1に示した中央部にコアウォールを有する8F建てのプロタイプ建物の1/3スケールの境界梁で、断面が200mm×400mm、内法寸法が1000mmで、左右に主筋定着用のスタップを有する。試験体一覧を表1に、代表的な試験体の寸法形状と配筋を図3に示す。パラメータはX型主筋の降伏強度とコンクリートの強度、軸鉄筋の有無とその強度、アンボンド化、およびプレストレス力の有無である。

No. I-1では梁端部に、それ以外の試験体では梁端部から150mm中心部へ入った位置に梁せいの1/4のノッチを設けた。No. I-2以降のノッチ位置は、長期の曲げモーメントがおおむね0となる点とし、No. I-1の実験結果および端部に平行配筋部分を有するX型配筋梁の実験結果¹⁾⁸⁾を参考に、損傷が集中しないように選定した。

すべての試験体には、8本のX型主筋がある。X型鉄筋をアンボンドとするため前報⁸⁾と同様に、アンボンド部分にSNR490Bの丸鋼を用い、定着部分にSD390の異形鉄筋を溶接し、丸鋼部分をブチレンゴム系のアンボンド材でコーティングした。スタップに定着される部分は、アンボンドにせず異形のままとして定着させた。No. I-2,3のX型鉄筋は、高強度材料を模擬するため焼入れ処置をして溶接したが、溶接時に焼鈍しとなり、溶接部近傍の強度が元の材料強度となった。表1に示したX型筋の材料強度は、溶接した試験片の引張り試験結果を示

しており、破断は溶接部近傍であった。溶接熱の影響を受けない中央部の降伏強度は746N/mm²であった。

No. I-1ではD16、No. I-2,3ではD10の4本の平行配筋を有する。それ以外の試験体では断面の4隅にあばら筋の配置のための補助筋としてD10を配置したが、スタップ内には延長せず、曲げ補強筋としては働かないようにして図2(b)の平行配筋梁に対応する耐荷機構が生じないようにした。軸筋は断面中央に入れ、主として梁の軸伸びを防止することを目的としている。No. I-1,2では異形鉄筋をそのまま用い、No. I-4,5では、丸鋼をアンボンド処理して用い、X型鉄筋と同様にスタップ部分に異形鉄筋を溶接して定着した。No. I-7,8では、高強度PC鋼材をアンボンド処理して用い、No. I-8には、1本あたり100kNをプレストレス力として導入した。PC鋼材はスタップ端部で定着プレートとナットにより定着した。横補強筋量は、No. I-1を除き、前報⁸⁾と同量の横補強筋量とした。

加力装置、試験体の変形の計測計画も前報⁸⁾と同じである。加力サイクルも前報⁸⁾と同じで、R=1/700を1回、1/400を3回、1/200を3回、1/100を6回、1/67を3回、1/40を3回とした。試験体の両側フランジの軸方向変形を区間ごとに計測し、同一区間の両側の変形差からその区間の平均曲率を求め、曲げ変形を算定した。せん断変形は、全体変形から曲げ変形を引いて求めた。また、同一区間の両側の変形の平均を軸変形とした。鉄筋のひずみは、X型配筋、平行配筋、横補強筋のそれぞれをひずみゲージにて計測した。

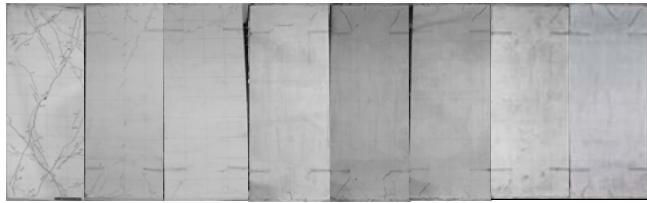
No. I-4試験体は補修効果の確認のためR=1/40のサイクル終了時に補修を行い、再加力を行った。補修は、エポキシ注入による一般的な補修方法とした。加力サイクルはR=1/200を1回、1/100、1/67、1/40をそれぞれ2回とした。

3. 実験結果

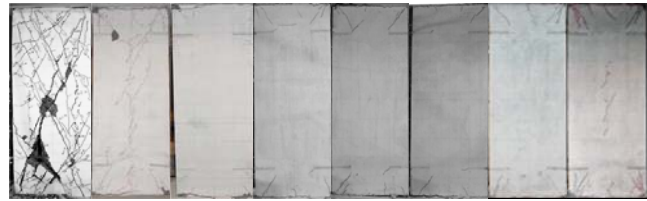
3.1 クラック性状

各試験体のR=1/100のサイクルと最終のひび割れ状況を図4に示す。

No.I-1 No. I-2 No. I-3 No. I-4 No. I-5 No. I-6 No. I-7 No. I-8



(a) R=1/100



(b) 最終状況

図 4: ひび割れ状況

各試験体とも $R=1/700$ のサイクルで梁端部に曲げひび割れが発生し、No.I-1 試験体では $R=1/400$ のサイクルで、曲げせん断ひび割れが発生した。No.I-1 を除き、変形は、端部の目開きに集中し、クラック本数は非常に少なく、大変形時までノッチにはさまれた中央部には曲げクラック、せん断クラック共に発生しなかった。軸筋がボンドのままである No.I-2 試験体は、 $R=1/200$ で軸筋部分に付着割裂ひび割れが発生し、 $R=1/100$ のサイクルで増加した。プレストレスを導入した No.I-8 試験体は、 $R=1/67$ のサイクルで部材中央部に微小な斜めクラックが生じた。

3.2 荷重－変形関係

各試験体の荷重－全体変形関係を図 5 に示す。各試験体の荷重－変形関係には $R=1/100$ まで大きな差は見られず、No.I-1,2 以外では繰返しによる耐力の低下が見られない。No.I-1 は、ノッチが端部にあり、平行配筋を有する試験体であるが、前報¹⁾のノッチを有しない X 型筋がボンドされた試験体と同様に、 $R=1/40$ の繰返し時に中央部の対角クラックが開いて、圧縮側の X 型筋が座屈して耐力低下を起こした。No.I-2 は、強度調整のため焼入れ処置をした鉄筋が、溶接部近傍で溶接熱による焼きなましとなり、その部分以外の中央部の降伏耐力が大きいため、 $R=1/40$ の繰返し時に、溶接部に塑性ひずみが集中して破断した。それ以外の試験体では、部材角 $R=1/40$ の大変形まで最大荷重を維持し、繰返し加力時の耐力低下がない安定した挙動を示している。履歴形状も紡錘形でエネルギー吸収能力の高い形状となっている。軸鉄筋のある No.I-2,4,5,7,8 は、 $R=1/40$ 繰返し時の履歴ループが途中で剛性が高くなる形状になっており、圧縮側のクラックが閉じ、軸鉄筋が曲げ補強筋として働くことによりピンチング現象を示していると考えられる。

図 6 に No.I-4 試験体の補修後の荷重－全体変形関係を初期加力時のものと比較して示す。初期剛性の完全な回復はならなかったが、 $R=1/40$ の大変形を経験したにもかかわらず、 $R=1/100$ のサイクルからは、剛性、耐力、エネルギー吸収能力とも初期加力と同等の値を示し、良好な修復性を示した。 $R=1/20$ まで耐力が徐々に上昇しながら十分な変形性能を示しており、大地震後の再使用が可能であると言える。

3.3 鉄筋のひずみ分布

X 型主筋の歪分布の例として、No.I-2,5 のアンボンド X 型主筋の歪

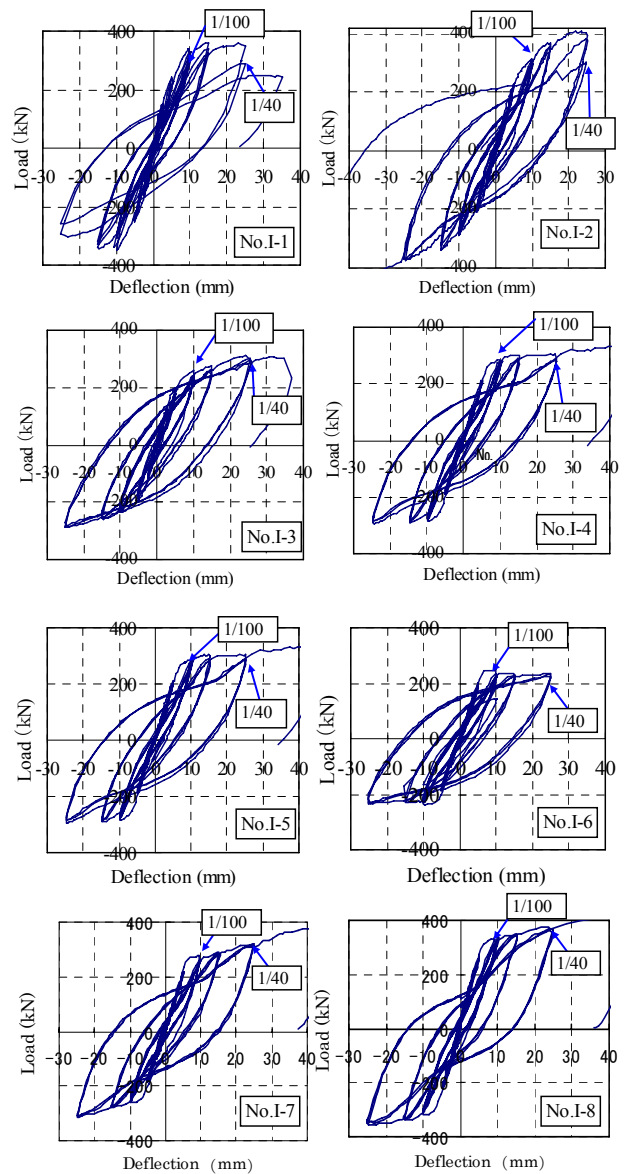


図 5: 荷重－全体変形関係

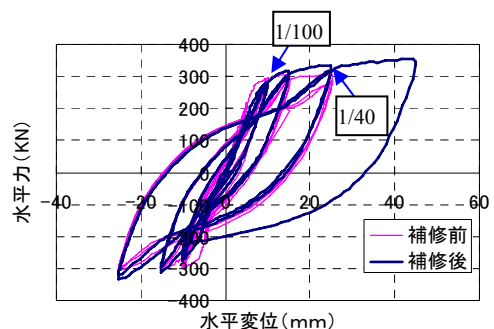


図 6: No. I-4 試験体の補修前後の荷重－全体変形関係

分布を図 7 に示す。降伏するまでは歪が全長でほとんど一定で、圧縮側の鉄筋ひずみは引張側に比べて約 $1/4$ となっている。これは、ノッチのない前報¹⁾のアンボンド X 型筋の歪分布とほぼ同様であり、ノッチを入れることによる圧縮鉄筋の歪の増大はあまり見られなかった。

図 8 に No.I-2,5,7,8 の軸鉄筋のひずみ分布を示す。軸鉄筋がボンド

されている No.I-2 では、端部のひずみが大きく、端部の曲げモーメントに対する補強筋として働いていることが伺える。No.I-5 では軸鉄筋はアンボンドされており、 $R=1/100$ までは、全長にわたり一定のひずみとなっているが、大変形時には、端部のみひずみが増大している。高強度 PC 鋼材をアンボンド処理して用いた No.I-7 では、 $R=1/200$ まではほとんどひずみが増大せず、 $R=1/40$ になっても降伏ひずみに至っていない。1 本あたり 100kN をプレストレス力として導入した No.I-8 も、 $R=1/200$ までは初期プレストレス力時のひずみを維持して、ほとんどひずみが増大せず $R=1/40$ になっても降伏ひずみに至っていない。

図9に No.I-1,2,4,8の横補強筋のひずみ分布を示す。2-D16の平行配筋を有する No.I-1では、 $R=1/67$ で横補強筋が降伏しており、平行配筋、コンクリートストラットとトラスを形成してせん断に抵抗していると考えられる。平行配筋が2-D10である No.I-2では、最終変形時でも降伏ひずみに達しておらず、平行配筋を有しない他の試験体ではほとんどひずみが生じていない。これらは、X型ブレース鉄筋以外にほとんど応力度が生じていないことを示しており、目標とした耐荷機構になっていると考えられる。この歪分布から想定される損傷は、図4に示したひび割れ状況と対応している。

4. 実験結果の検討

4.1 せん断力-変形関係

図10に平行配筋のない No.I-4,6,7,8試験体の包絡線の比較を示す。同図中には、計算値も合わせて示した。計算値は、弾性剛性はコンクリート断面がすべて有効として算定し、クラック耐力は端部のクラックモーメントを略算式(1)により算定して求めた。

$$M_c = 0.56 \sqrt{\sigma_B} Z \quad (\text{units: N, mm}) \quad (1)$$

ここで、 σ_B はコンクリート強度 (N/mm^2)、 Z は断面係数である。クラック後のコンクリートは X 型筋の座屈防止効果のみと考え、耐力は X 型ブレースの鉄筋のみで算定した。鉄筋は実降伏強度まで線形で、降伏後は降伏強度を維持するバイリニアと仮定した。X 型ブレースとしてのせん断耐力は、X 型筋の軸方向降伏耐力の鉛直成分となる。梁部材としての降伏変形は、ブレースの軸伸びによる水平変形分として算定した。プレストレスを導入した No. I-8 試験体では、X ブレースの耐力に無筋コンクリートとしてのプレストレス力による材端でのクラック時のモーメントを求め、逆対称曲げ加力であるので、求めたモーメントを2倍して、内法スパンで除してせん断力として加算した。

軸筋のない No. I-6 試験体では、X ブレース鉄筋の降伏後はおおむね計算値と同程度の耐力で推移しているが、軸筋のある試験体では耐力が徐々に増大している。これは、図8に示した軸鉄筋のひずみ分布からも明らかのように、軸鉄筋が引張力を負担し、平行配筋梁としての耐力を発揮したからと考えられる。材端部でモーメントが生じることを考えると、両端とも中立軸位置は圧縮側に寄り、軸鉄筋位置は引張領域になる。このため、軸鉄筋に定着が無くても引張鉄筋として働くことができる。これにより、コンクリートが負担するせん断力が増大することになるので、損傷評価において考慮する必要がある。

4.2 変形成分

図11に各試験体の曲げ・せん断変形の割合の変形レベルによる変化を示す。ボンド試験体の No.I-1を除き、せん断変形成分が極めて小さい。これは、クラックが端部に集中して端部クラック幅のみが増大し

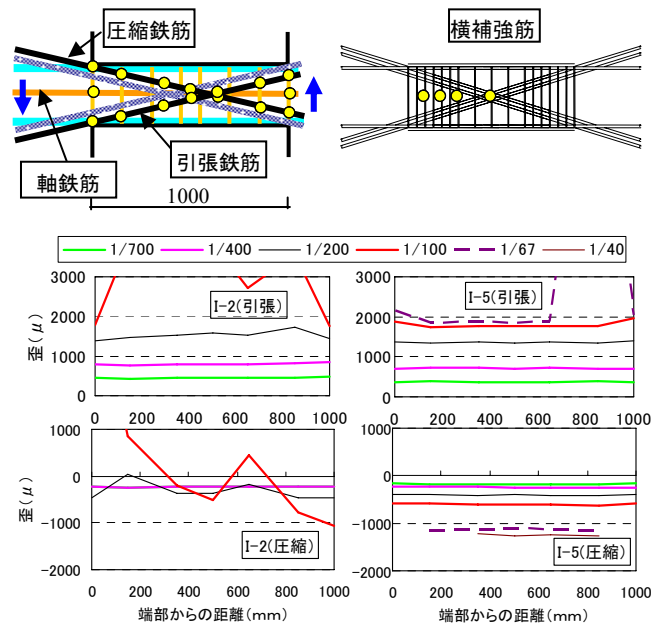


図7：X型主筋のひずみ分布

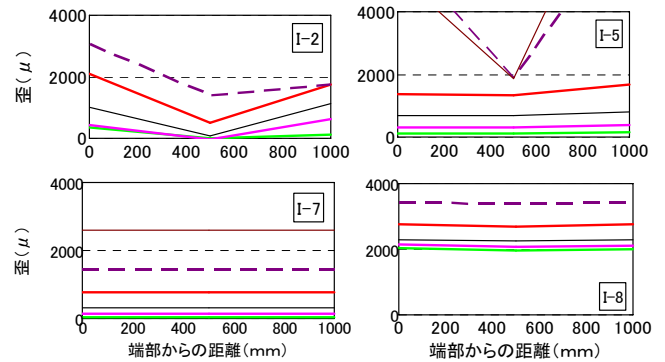


図8：軸鉄筋のひずみ分布

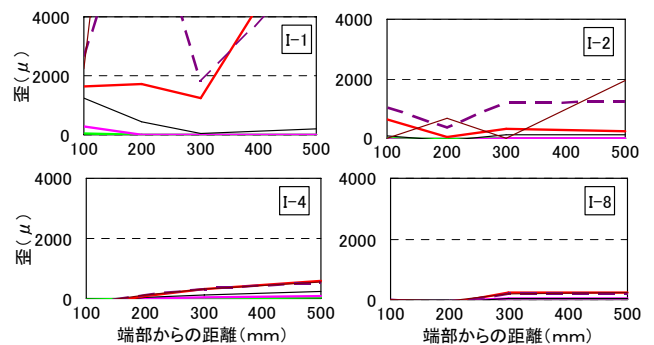


図9：横補強筋のひずみ分布

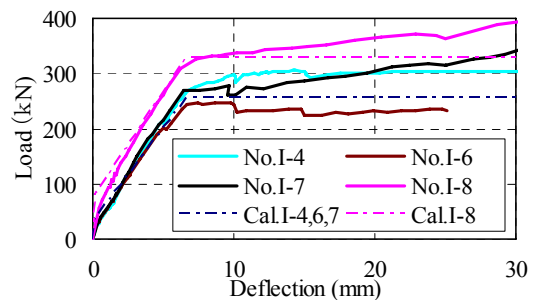


図10：せん断力-変形関係

て、端部が曲げヒンジとして回転変形し、全体がロッキング的に変形していることを示している。

4.3 残留軸伸び変形

図12に各試験体のそれぞれの層間変形最終サイクル終了時(水平変形=0)の残留軸伸び量の変化を示す。No.I-3試験体を除いてX型主筋が降伏しない $R=1/200$ までは軸方向の残留軸伸びは見られない。X筋が降伏する $R=1/100$ から損傷の激しいNo.I-1を除き残留軸伸びが顕著となる。軸鉄筋を有しないNo.I-3,6は、軸伸びが大きく、軸鉄筋を配置したNo.I-2,4,5,7試験体は、残留軸伸びが少なくなっている。軸鉄筋の強度による違いはほとんどない。軸鉄筋に高強度鉄筋を用い、プレストレスを導入したNo.I-8は残留軸伸びが最も少なく、かつ部材自体の損傷も少ない。

コンクリートの損傷が少ないと、X型筋のトラスにおいて、大変形時に圧縮側の変形が進まず、引張り側の鉄筋のみが降伏して、幾何的に軸伸びを起し、この塑性変形が累積されることが原因と考えられる。図13は、No.I-5,6,7,8の水平変形-軸伸び関係を示したものである。軸鉄筋が普通強度のNo.I-5では、軸鉄筋が降伏した後は、最大変形時の軸伸びがほとんどそのまま残留軸伸びとなっている。軸鉄筋のないNo.I-6では、最大変形時の軸伸びがNo.I-5より大きく、弾性時を除きそのまま残留軸伸びとなっている。軸鉄筋に高強度鉄筋を用いたNo.I-7, 8は、軸鉄筋が降伏していないため、最大変形時の軸伸びが水平変形の減少とともに減少し、さらに逆方向加力で圧縮側クラックが閉じるまで減少している。プレストレスを導入したNo.I-8はさらにその傾向が強くなっている。

軸伸びが大きくなると、周辺のスラブやコア壁脚部の損傷が大きくなることが考えられるため、損傷評価に当たっては自部材だけでなく、その取り付く部材を含めて評価することが必要である。この点、プレストレスを導入したNo.I-8は、部材自体の損傷が少なく、かつ残留軸伸びが少ないことより、最も損傷低減効果が期待できる部材となっている。

4.4 等価粘性減衰定数

図14に、荷重-変形関係の正側のハーフサイクルの面積から求めた等価粘性減衰定数の変化を示す。前報⁸⁾のノッチを有せず平行配筋のある試験体に比べ、全体的に大きい値となっている。とくに、 $R=1/67$ 、 $1/40$ のサイクルにおいて、繰り返し変形時にも高い減衰性能を保持している。これは、中央部に対角方向のせん断クラックが生じないため、せん断変形成分が増大せず、Xブレース鉄筋の降伏による安定したエネルギー吸収が来ているといえる。ダンパーとしても十分な機能を発揮できると考えられる。

5. まとめ

本論は、コアタイプの建物の境界梁に用いるため、既報で提案したものより地震時のエネルギー吸収能力に富み、損傷が低減され修復性が良好であるアンボンドX型配筋梁の開発を目指して、実験的研究を行ったものである。本論で得られた主な結論は以下のとおりである。

1. 短スパン梁にアンボンドX型筋を用い、梁端部から150mm 中心部へ入った位置に梁せいの1/4のノッチを設けることによって、端部の曲げクラックのみで梁中央部にクラックの生じない低損傷で、エネルギー吸収能力に優れた梁とすることが出来る。このため、大地震後の修繕性が飛躍的に改善される。

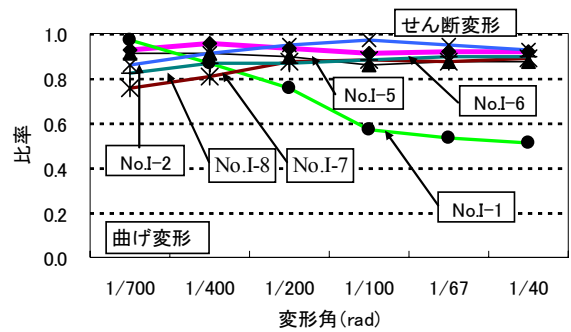


図 11：変形成分

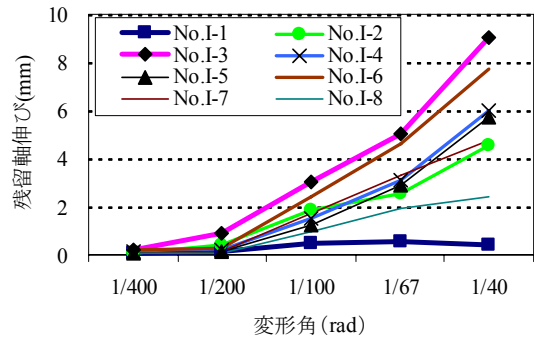


図 12：残留軸伸び

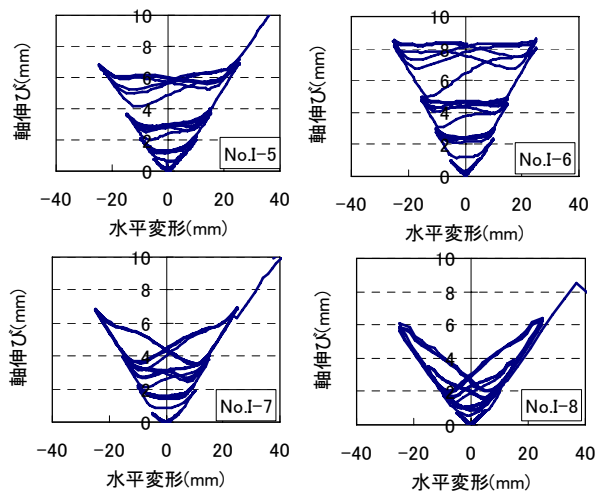


図 13：水平変形-軸伸び関係

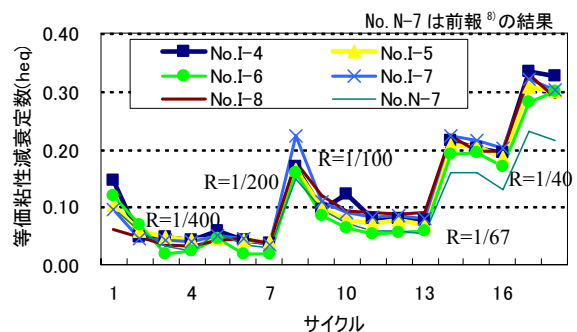


図 14：等価粘性減衰定数

- 軸鉄筋を用いることにより、軸伸びを抑えることが可能であり、さらに軸鉄筋をPC鋼棒としてプレストレスを導入することにより軸伸びが低減され、自部材だけでなく周囲の部材を含めた損傷低減効果のある部材とすることが出来る。

3. 軸鉄筋は、X型鉄筋降伏後に平行配筋梁の補強筋としての振る舞いをするため、曲げ耐力が上昇する。したがって、部材のせん断設計などに用いる上限強度にはこの事を考慮する必要がある。
4. 部材の復元力特性は、X型ブレースの復元力特性に、部材端での曲げクラック耐力を考慮することで推定できる。プレストレス力を入れた場合は、プレストレス力による曲げクラック耐力時のせん断力をX型ブレース耐力に加算することで復元力特性を推定できる。
5. 提案した構法の試験体は、 $R=1/40$ の大変形後でも、 $R=1/100$ のサイクルでは、剛性、耐力、エネルギー吸収能力とも初期加力と同等で良好な修復性を示し、大地震後の再使用が可能であると言える。

本研究により、低損傷アンボンドX型配筋梁の実現の可能性が示された。この構法は、軸伸びの評価を行えば、間柱タイプの制振ダンパーとしても利用可能であり、今後はそうした適用性の拡大について検討を進めるつもりである。本論の一部は文献^{7),10)-13)}にて発表した。

謝辞

本研究は、文部科学省学術フロンティア・横浜市産官学共同研究総合プロジェクト「地震・台風災害の制御・低減に関する研究(TEDCOM)」(研究代表者：大熊武司建築学科教授)の一環として行い、神奈川大学・教務技術主任五十嵐泉氏、卒論生の伊藤努、山田裕理、原田和行、坂上教夫、香取直樹、安田純、奥山宏之君の協力を得ました。関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 島崎和司: 損傷低減を目的としたエネルギー吸収型X型配筋RC梁の開発、日本建築学会構造系論文集、No.562、pp.83~89、2002.12
- 2) Shimazaki, K.: Experimental Study of a Diagonally Reinforced Beam with Well Reparability, 12th European Conference on Earthquake Engineering, Paper Reference 258, CD-ROM, 2002
- 3) 平石久廣, 西尾浩平, 山田宗徳, 斉藤亮平, 高木仁之, 越路正人: 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集、No.580 pp.99~104 2004.6
- 4) 平石久廣, 西尾浩平, 稲井栄一, 山田宗徳, 斉藤亮平: 鋼製筒を用いた降伏機構分離型鉄筋コンクリート造の応力伝達システムに関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.588 pp.133~140 2005.2
- 5) Park, R. and T. Paulay: Reinforced Concrete Structures, A WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION, 1975
- 6) 南宏一編: はじめてのX形配筋、建築技術、1992
- 7) K. Shimazaki: De-bonded diagonally reinforced beam for good reparability, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper 3173, Vancouver, B.C., Canada, 2004
- 8) 島崎和司: アンボンドX型配筋RC梁の損傷評価、日本建築学会構造系論文集、No.604、pp.119~126、2006.6
- 9) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(1999)、日本建築学会、1999
- 10) 島崎和司、五十嵐泉: 損傷低減を目的としたエネルギー吸収型X型配筋RC梁の開発(その3 断面欠損によるX型筋の圧縮降伏)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2、日本建築学会、pp. 277-278、2002年8月
- 11) 五十嵐泉、島崎和司: 損傷低減を目的としたエネルギー吸収型X型配筋RC梁の開発 その4 軸伸び防止と補修性の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2、pp.113-114、2003年9月
- 12) 五十嵐泉、島崎和司: 損傷低減を目的としたエネルギー吸収型X型配筋RC梁の開発 その5 芯鉄筋のアンボンド化、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2、pp.239-240、2004年8月
- 13) 五十嵐泉、島崎和司: 損傷低減を目的としたエネルギー吸収型X型配筋RC梁の開発 その6 高強度芯鉄筋と鋼繊維補強コンクリートの効果、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2、pp.57-58、2005年9月