

論文 鉄筋コンクリート骨組における方立壁へのダンパー適用による損傷制御構造に関する実験研究

毎田 悠承*1・坂田 弘安*2・和泉 信之*3・前川 利雄*4

要旨：本論文では鉄筋コンクリート骨組における方立壁に着目し、構造スリット部にダンパーを適用することによる損傷制御構造に関して、平面門形架構実験により検討した。試験体は方立壁を梁に剛接したもの、方立壁に構造スリットを設置したもの、方立壁下端にダンパーを取り付けたもの、方立壁中央にダンパーを取り付けたものの計4体とした。実験結果から、ダンパー力を考慮して設計した方立壁にダンパーを適用することで、柱梁架構および方立壁に悪影響を及ぼすことなく、エネルギー吸収能力と減衰効果を付与できた。一方、大変形域ではダンパー接合部の変形や方立壁のひび割れにより、ダンパー変位に正負で差異が生じた。

キーワード：鉄筋コンクリート骨組、方立壁、ダンパー、損傷制御、エネルギー吸収能力、等価粘性減衰定数

1. 序

近年の地震被害調査から鉄筋コンクリート（以下、RC）骨組における非構造壁の損傷被害が報告されている¹⁾。非構造壁の損傷抑制方法として、構造スリットにより柱梁架構から切り離す方法が挙げられるが、ラーメン骨組の靱性能に過度に期待して設計した構造物は、大地震時に塑性変形が生じ、残留変形によって継続使用が難しくなる。一方、これまで非構造壁として扱われてきた袖壁、腰壁、垂壁などを、柱梁架構と一体にすることで構造抵抗要素として扱い、建物の強度を増加させる検討も近年行われている²⁾。RC骨組に剛接された非構造壁は、小変形域で耐力を発揮した後に脆性破壊し、継続使用が困難になる（図-1（a））。建物全体の耐力向上およびエネルギー吸収能力確保という観点からは、構造スリットを設置することが必ずしも得策とは言えないのが現状である。

以上のような背景から、本研究では、非構造壁である方立壁に着目し、方立壁へのダンパー適用による損傷制御構造を提案する。方立壁の構造スリット部にダンパーを設置することで、柱梁架構に比べて、ダンパーを小変形域から降伏させ、方立壁および柱梁架構の損傷を抑制し、建物全体のエネルギー吸収能力を向上させることが可能になる（図-1（b））。塩原³⁾などは、PCa壁と柱梁架構をダウエル鉄筋により接合することで、そのダウエル鉄筋によるエネルギー吸収能力付与の有効性を示している。

本研究では、方立壁の構造スリット部にエネルギー吸収デバイスを適用したRC骨組の力学挙動を解明し、その設計法を確立することを目的とする。その第一段階として、本論文では、ダンパーを適用した方立壁付きRC平面門形架構の実験を行い、エネルギー吸収能力や等価粘性

減衰定数などの定量的評価を行うとともに、柱梁架構および方立壁の損傷制御効果を確認する。

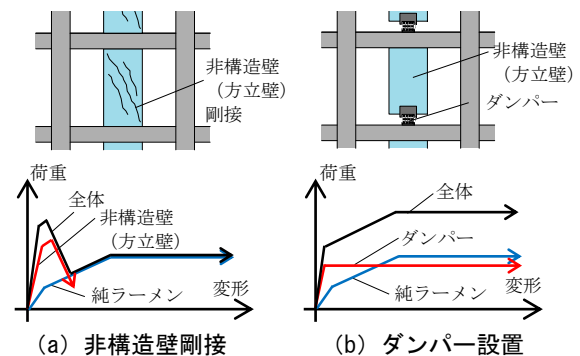


図-1 非構造壁の接合方法の違いによる骨組の性状

2. 実験計画

2.1 試験体概要

試験体形状を図-2に、試験体パラメータ、諸元、およびコンクリートの材料特性を表-1に、鉄筋・ダンパー用鋼材の材料特性を表-2に示す。試験体はRCの柱・梁および方立壁からなる1層1スパンの平面門形架構であり、実大の約1/2スケールを想定している。

柱・梁の断面は、全試験体において梁の曲げ降伏を先行させるため、RC規準⁴⁾の降伏モーメント略算式を用いて、柱梁曲げ降伏耐力比を1.7として設計した。柱への軸力は導入しなかった。方立壁の断面は、ダンパーを取り付けない試験体では一般的なものと同様の配筋とした。この方立壁の耐力を、曲げ耐力は構造関係技術基準解説書⁵⁾の略算式、せん断耐力は文献5)の広沢mean式を用いて計算すると、方立壁に作用する軸力が0とした場合、計算上は曲げ破壊となる。一方、谷ら⁶⁾は、実際の架構内では、方立壁の伸びを周辺架構が拘束するこ

*1 千葉大学 大学院工学研究科建築・都市科学専攻建築学コース 助教 博士（工学）（正会員）

*2 東京工業大学 環境・社会理工学院建築学系 教授 工学博士（正会員）

*3 千葉大学 大学院工学研究科建築・都市科学専攻建築学コース 教授 博士（工学）（正会員）

*4 熊谷組 技術研究所建築構造研究グループ グループ部長 工学修士

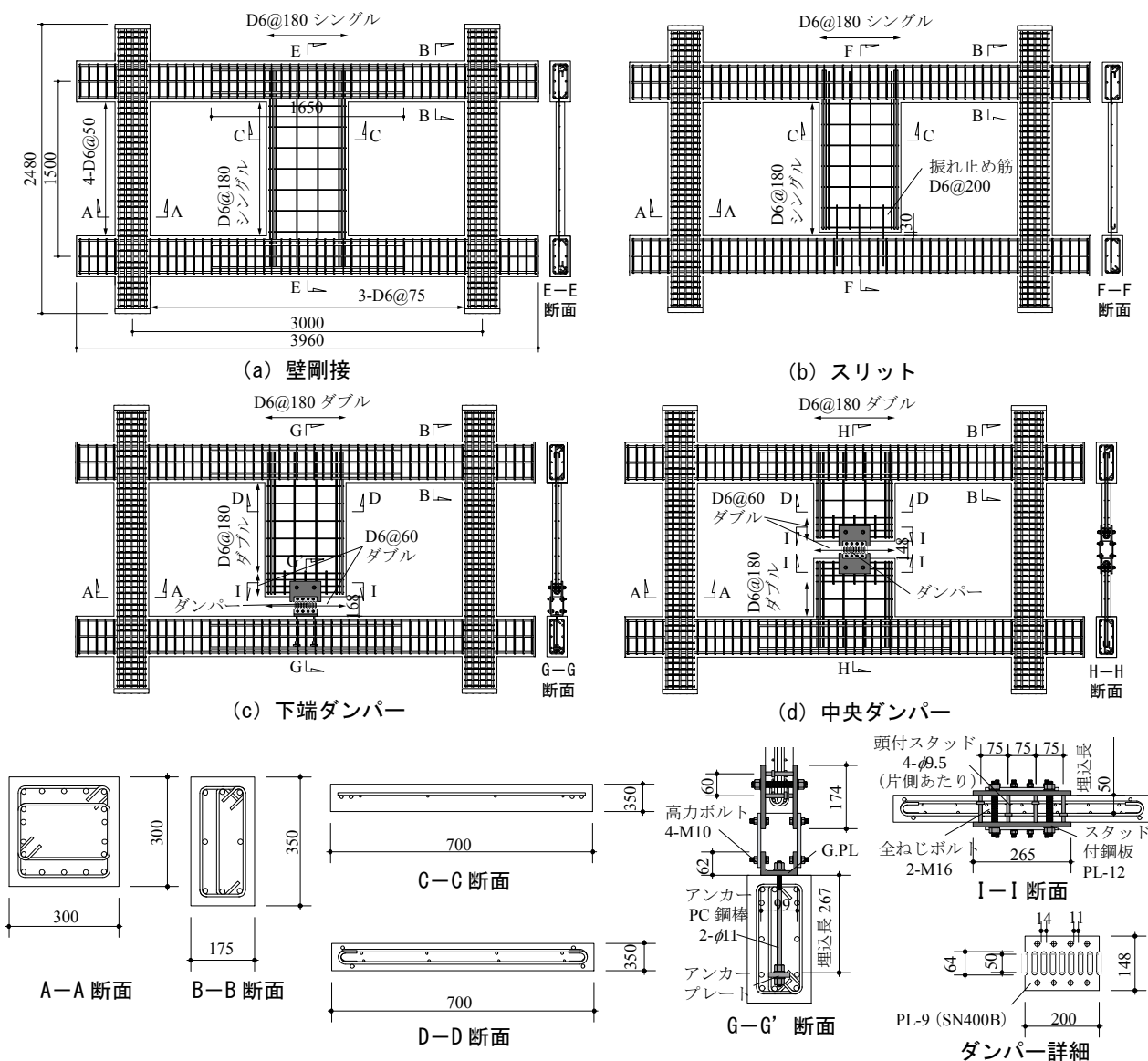


図-2 試験体形状 (単位[mm])

とで、軸力比 0.15 相当の圧縮軸力が方立壁に作用するとしており、それを考慮した場合、計算上はせん断破壊となる。ダンパーを取り付ける試験体の方立壁は、ダンパー力に対してせん断破壊しないように前述の式を用いて設計し、縦横筋はダブル配筋とした。ダンパーを取り付けない試験体の 2 倍の配筋である。また、ダンパー接合部周辺は補強のために配筋をより密にした。

ダンパーには鋼製スリットダンパー⁷⁾ (以下、ダンパー) を用いた。ダンパーの降伏耐力は、RC 柱梁架構の降伏耐力計算値 78kN (方立壁による梁の曲げ戻し考慮せず) の約 2/3 となる 50kN (25kN×2 枚) に設定した。ダンパー降伏時の層間変形角は、ダンパー接合部における変形ロスがないとした場合、 $R=1/800\text{rad}$ に設定した。

試験体パラメータは、方立壁における構造スリットの有無、ダンパーの有無である。方立壁を梁に剛接した試験体 (壁剛接)、方立壁下端に構造スリットを設置し、柱梁架構と分離した試験体 (スリット)、方立壁下端の構造

スリット部にダンパーを取り付けた試験体 (下端ダンパー)、方立壁中央に構造スリットを設け、ダンパーを取り付けた試験体 (中央ダンパー) の計 4 体とした。

ダンパー接合部の詳細について述べる。ダンパーは、2 枚取り付ける。方立壁には、頭付スタッドを溶接した鋼板 (以下、スタッド付鋼板) 2 枚を表と裏から挟むように取り付け、鉛直・水平ずれを防ぐ目的で全ねじボルト 2-M16 によって固定した (I-I 断面)。頭付スタッドは、ダンパー降伏耐力 (片側当たり 25kN) に対して、各種合成構造設計指針⁸⁾ に基づいて設計した。鋼板片側当たり 4- $\phi 5$ のスタッドを用い、埋込長は 50mm とした。梁には、溝形のガセットプレート (以下、G.PL) をアンカー PC 鋼棒により緊結した。アンカー PC 鋼棒に導入する緊張力は、2 枚のダンパーの降伏耐力 (25kN×2 枚=50kN) によって G.PL にずれが生じないように、文献 9) を参考に RC 梁と G.PL 間の摩擦係数を 0.4 として決定した。導入張力はアンカー PC 鋼棒 1 本当たり 70kN である。

表－1 試験体パラメータ，諸元，およびコンクリートの材料特性

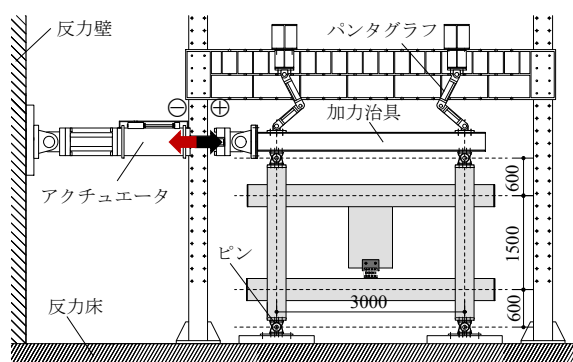
		壁剛接		スリット	下端ダンパー	中央ダンパー
柱	幅 B ×せい D [mm]		300×300			
	主筋		18-D13 (SD345) p_g =2.54%			
	帯筋		4-D6@50 (SD295A) p_w =0.85%			
梁	幅 B ×せい D [mm]		175×350			
	主筋 (上端, 下端共通)	端部	3-D13 (SD345) p_t =0.73%			
		中央部	3+2-D13 (SD345)	3-D13 (SD345)	3+2-D13 (SD345)	
	あばら筋		3-D6@75 (SD295A) p_w =0.72%			
方立壁	幅 B ×せい D [mm]		75×700			
	縦横筋		D6@180シングル (SD295A) p_w =0.23%		D6@180ダブル (SD295A) p_w =0.47%	
	開口部補強縦筋		2-D10 (SD295A)			
	ダンパー接合部周辺縦横筋		-		D6@60ダブル (SD295A) p_w =1.41%	
全部材	$\sigma_B/\sigma_T/E_C$ [N/mm ²]		52.9/3.78/34000	54.3/4.21/34200	56.0/4.35/34400	48.4/3.82/32900

(コンクリートの材料特性 σ_B : 圧縮強度, σ_T : 引張強度, E_C ヤング係数 (ヤング係数は (α - ϵ 関係で σ_B の 1/3 における割線剛性))

表－2 鉄筋・ダンパー用鋼材の材料特性 (単位 [N/mm²])

	σ_y	σ_u	E_s
柱梁主筋 D13 (SD345)	381	535	190000
開口部補強筋 D10 (SD295A)	371	513	194000
せん断補強筋，壁筋 D6 (SD295A)	430	553	184000
ダンパー用鋼材 PL-9 (SN400B)	290	426	185000

(σ_y : 降伏強度, σ_u : 引張強度, E_s ヤング係数)



図－3 セットアップ (単位 [mm])

2.2 载荷

セットアップを図－3 に示す。上下層柱をピン支持とした。下層柱のピン支承は反力床に取り付けた。加力治具を介して上層柱のピン支承とアクチュエータを接続し、正負交番繰り返し载荷を行った。本加力方法では、梁の軸方向伸びをピンに取り付く柱により拘束する形式となっている。実際の架構においてはスラブが取り付けられているなど、この拘束の程度は一概には決められないが、本加力方法による拘束は特別に大きなものではないと考えている。本論文では、方立壁へのダンパー適用による損傷制御効果の検討を主目的としたため、このような簡易な加力方法とした。目標加力サイクルは層間変形角 $R=1/1600$, $1/800$, $1/400$, $1/200$, $1/100$, $1/67$, $1/50$ rad において正負交番载荷を 2 サイクルずつ, $R=1/33$ rad において正負交番载荷を 1 サイクル行った後, $R=1/25$ rad まで正側に载荷し、除荷して実験を終了した。

3. 実験結果の考察

3.1 層せん断力－層間変形角関係

層せん断力 Q －層間変形角 R 関係を図－4 に示す。

壁剛接試験体では、 $R=1/299$ rad で危険断面位置の梁主筋が降伏ひずみ度に到達するのとほぼ同時に方立壁のせん断ひび割れが拡大した。 $R=1/255$ rad で最大耐力 160kN に達し、方立壁がせん断破壊した。その後の加力ではスリット試験体とほぼ同様の履歴性状が得られた。

スリット試験体では、 $R=1/219$ rad 時に危険断面位置の梁主筋の降伏が確認され、 $R=1/25$ rad 時に最大耐力 125kN に達した。実験終了時まで安定した履歴特性を有していた。最終破壊形式は梁の曲げ破壊となり、脆性破壊は生じないことが確認された。方立壁の振れ止め筋が $1/67$ rad サイクル中に破断した。梁主筋降伏時の層せん断力は、RC 規準⁴⁾ による計算値と良い対応を示していた。

下端ダンパー試験体、中央ダンパー試験体ではそれぞれ $R=1/673$, $1/1080$ rad でダンパーが降伏し、 $R=1/223$, $1/240$ rad で危険断面位置の梁主筋が降伏した。最大耐力はそれぞれ 171, 167kN であった。両試験体とも RC 架構の最終破壊形式は梁の曲げ破壊であった。下端ダンパー試験体では負側载荷の、中央ダンパー試験体では正負両側载荷の大変形時に荷重低下が見られた。これは方立壁に取り付けているスタッド付鋼板周辺のコンクリートが損傷し、ダンパーの安定した水平変位が確保できなくなったためである。実構造物への適用に際してはダンパー接合部のディテールに関して更なる検討が必要である。

3.2 エネルギー吸収量，等価粘性減衰定数

各試験体の実験終了時までのエネルギー吸収量 E －累積層間変形角 $\Sigma|R|$ 関係を図－5 に示す。

図－5 から、 $R=1/100$ rad における 2 サイクル目除荷時 ($\Sigma|R|$ が約 0.15rad 時) までのエネルギー吸収量は、壁剛接試験体では 6.7kNm，スリット試験体では 3.5kNm，下

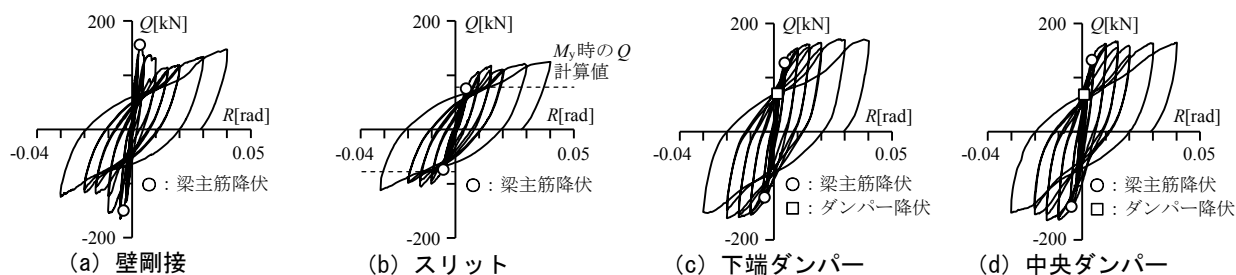


図-4 層せん断力 Q - 層間変形角 R 関係

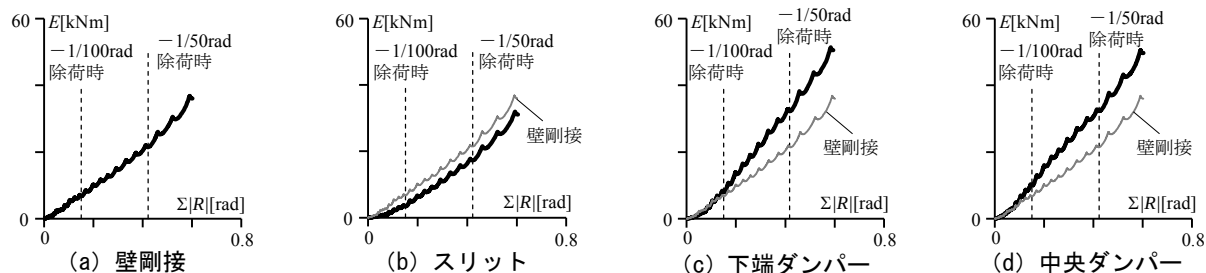


図-5 エネルギー吸収量 E - 累積層間変形角 $\Sigma|R|$ 関係

端ダンパー試験体では 7.9kNm, 中央ダンパー試験体では 9.9kNm である。また、実験終了時 ($\Sigma|R|$ が約 0.60rad 時) までのエネルギー吸収量は、壁剛接試験体では 36.0kNm, スリット試験体では 31.1kNm, 下端ダンパー試験体では 50.5kNm, 中央ダンパー試験体では 49.7kNm である。 $R = -1/100\text{rad}$ 除荷時までの小変形域では、ダンパーが早期に降伏した中央ダンパー試験体が最も吸収エネルギー量が多い。壁剛接試験体と下端ダンパー試験体では大きな差異はなく、せん断破壊以前の方立壁の耐力がエネルギー吸収能力向上に寄与している。一方、実験終了時のエネルギー吸収量は下端ダンパー試験体と中央ダンパー試験体にほとんど差異はなく、壁剛接試験体の約 1.4 倍、スリット試験体の約 1.6 倍のエネルギー吸収量が得られた。以上のことから、ダンパー力を考慮して設計した方立壁にダンパーを適用することで、大変形時の安定したエネルギー吸収能力を確保できる。

次いで、等価粘性減衰定数 h_{eq} に着目する。 $R=1/800, 1/400, 1/200, 1/100\text{rad}$ の各 1 サイクルにおける等価粘性減衰定数 h_{eq} を表-3 に示す。 $R=1/400\text{rad}$ サイクルでは中央ダンパー試験体の h_{eq} が顕著であり、ダンパーが早期に降伏したことで、小変形域から高い減衰効果を付与できた。 $R=1/200\text{rad}$ サイクルでは、スリット試験体と比較して他の試験体では 2 倍程度の減衰効果が付与できた。 $R=1/100\text{rad}$ サイクルでは、下端ダンパー、中央ダンパー試験体ともに約 13% と同等の減衰効果を示した。

3.3 ひび割れ状況、ひび割れ幅の推移

$R = \pm 1/100\text{rad}$ 除荷時のひび割れ状況を図-6 に示す。

壁剛接試験体を除く試験体では $R=1/800$ または $1/400\text{rad}$ 時に梁端部の曲げひび割れが確認され、その後、梁中央方向に拡がった。方立壁のひび割れは、スリット試験体では $R=1/67\text{rad}$ 時に曲げひび割れが、下端ダンパ

表-3 各サイクルにおける等価粘性減衰定数 $h_{eq}[\%]$

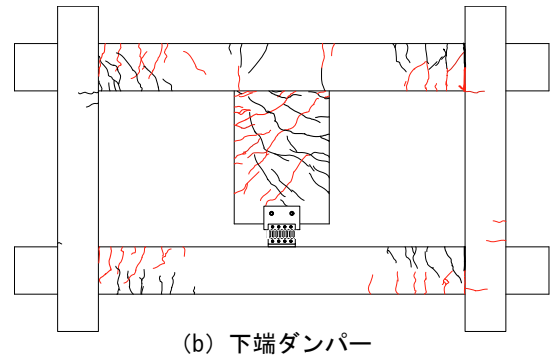
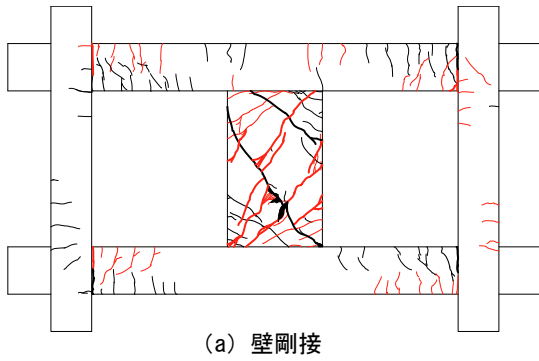
サイクル [rad]	壁剛接	スリット	下端 ダンパー	中央 ダンパー
1/800	6.1	6.0	6.7	6.7
1/400	5.1	5.8	5.5	8.3
1/200	8.1	4.3	7.8	9.6
1/100	10.9	10.4	12.7	13.1

ー、中央ダンパー試験体では、 $R=1/800\text{rad}$ 時に曲げひび割れ、 $R=1/400\text{rad}$ 時にせん断ひび割れが確認された。一方、壁剛接試験体では、 $R=1/1600\text{rad}$ から梁の曲げひび割れ、および方立壁のせん断ひび割れが確認された。層間変形角の増加に伴って、方立壁のせん断ひび割れ幅も大きくなり、 $R=1/200\text{rad}$ サイクル中にせん断破壊した。

各加力サイクルのピーク時と除荷時の梁の最大ひび割れ幅 w_{Ger} 、および方立壁の最大ひび割れ幅 w_{wer} の推移を図-7 に示す。図には耐震性能評価指針¹⁰⁾に示される限界状態・損傷度の区分(試験体の寸法効果を考慮して、実際の指標の 1/2 の値¹¹⁾)を示している。ひび割れ幅はクラックスケール(最少目盛 0.05mm)により計測した。

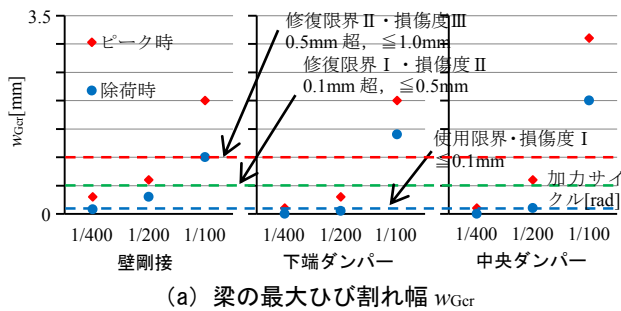
梁の最大ひび割れ幅は、 $R=1/200\text{rad}$ 除荷時において、壁剛接試験体では使用限界を超えているが、下端ダンパー、および中央ダンパー試験体では使用限界以内であり、補修不要なひび割れに抑えられていた。 $R=1/100\text{rad}$ 除荷時においては、下端ダンパー、中央ダンパー試験体では修復限界を超えている。ダンパーを取り付けることで、RC 架構とダンパーの除荷剛性の違いにより残留変形が大きくなったと考えられる。いずれの試験体においても層間変形角が大きくなるのに伴って、ピーク時から除荷してもひび割れが閉じにくくなっていることが分かる。

次いで、方立壁の最大ひび割れ幅に着目する。せん断ひび割れであるため、梁に比べて、小変形の加力サイク

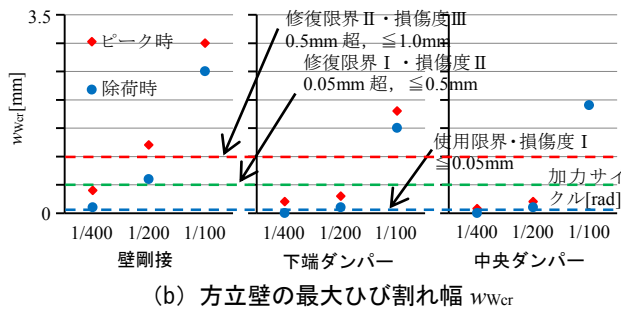


除荷時ひび割れ幅：正 — $\leq 0.1\text{mm}$ (方立壁は $\leq 0.05\text{mm}$)，負 — 0.1mm 超， $\leq 0.5\text{mm}$ (方立壁は 0.05mm 超， $\leq 0.5\text{mm}$)，正 — 0.5mm 超

図-6 $R=\pm 1/100\text{rad}$ 除荷時のひび割れ状況 (ピーク時に確認され、閉じたひび割れも含む)



(a) 梁の最大ひび割れ幅 w_{Gcr}



(b) 方立壁の最大ひび割れ幅 w_{wcr}

図-7 最大ひび割れ幅の推移

ルから、除荷してもピーク時のひび割れが閉じにくいことが分かる。壁剛接試験体では、 $R=1/400\text{rad}$ 除荷時から使用限界を超え、 $R=1/200\text{rad}$ 除荷時には修復限界Ⅱと評価された。下端ダンパー、および中央ダンパー試験体では、壁剛接試験体に比べて、壁筋を2倍にしたこともあり、全変形角において、ひび割れ幅が小さく抑えられた。

以上のことから、ダンパー力を考慮して設計した方立壁にダンパーを取り付けることで、柱梁架構および方立壁に悪影響を及ぼすことなく、エネルギー吸収能力と減衰効果を付与できることが分かった。

3.4 ダンパーおよびダンパー接合部の挙動

下端ダンパー、中央ダンパー試験体の表側1枚のダンパーおよびダンパー接合部の挙動について考察する。変位計測位置を図-8(i)に示す。層せん断力の状態に着目して、 $R=1/100\text{rad}$ サイクル時の層せん断力が正側載荷時(■-◆)、正側除荷時(◆-□)、負側載荷時(□-◇)、負側除荷時(◇-△)の各状態における挙動を考察する。図-8の横軸は累積層間変形角 $\Sigma|R|[\text{rad}]$ であり、い

ずれの図も $R=1/67\text{rad}$ 除荷時までの結果を示している。

(1) ダンパーの挙動

ダンパー水平変位 δ_{DH} を図-8(ii)に示す。小変形域では正側と負側の載荷時でダンパー水平変位に大きな差異はないが、 $R=1/100\text{rad}$ サイクル以降の大変形時には正側と負側で差異が生じており、下端ダンパー試験体ではその傾向が顕著である。これはダンパー接合部の変形や方立壁のひび割れによる影響であると考えられる。

(2) スタッド付鋼板の水平および鉛直変位

スタッド付鋼板の水平変位 δ_{UH} 、 δ_{LH} を図-8(a)(iii)、(b)(iii)、(b)(iv)に、鉛直変位 δ_{UV} を図-8(a)(iv)に示す。 δ_{UH} は δ_{UHL} と δ_{UHR} の、 δ_{LH} は δ_{LHL} と δ_{LHR} の、 δ_{UV} は δ_{UVL} と δ_{UVR} の平均値である。

δ_{UH} 、および δ_{LH} は層せん断力の増減に伴って増減している。下端ダンパー試験体では、 δ_{UH} は最大でも0.4mm以下であり、除荷時には変位がほぼゼロになっているが、中央ダンパー試験体では、最大5mm以上の δ_{LH} が生じ、徐々に負側に変位が片寄っている。

δ_{UV} は、正側載荷時および正側除荷時にはほとんど変位は増減しないが、負側載荷時および負側除荷時に大きくなっている。この変形ロスにより、ダンパーに安定した水平変位が生じなかったと考えられる。スタッド周辺のコンクリートの損傷が激しかったためである。安定したダンパー変位を確保するためにも、方立壁へのダンパー接合部のディテールに関して更なる検討が必要である。

(3) G.PLの水平および鉛直変位

G.PLの水平変位 δ_{GH} を図-8(a)(v)に、鉛直変位 δ_{GV} を図-8(a)(vi)に示す。 δ_{GH} は δ_{GHL} と δ_{GHR} の、 δ_{GV} は δ_{GVL} と δ_{GVR} の平均値である。

G.PLの水平変位 δ_{GH} は $R=1/100\text{rad}$ ピーク時まで最大でも0.2mm以下に抑えられており、ダンパー水平変位に対して小さい。一方、鉛直変位 δ_{GV} は正負の載荷時に浮き上がる方向に生じ、除荷しても残留変位が生じた。したがって、G.PLではアンカーPC鋼棒の本数や径を増加し、より余裕度の高い導入張力を確保する必要がある。

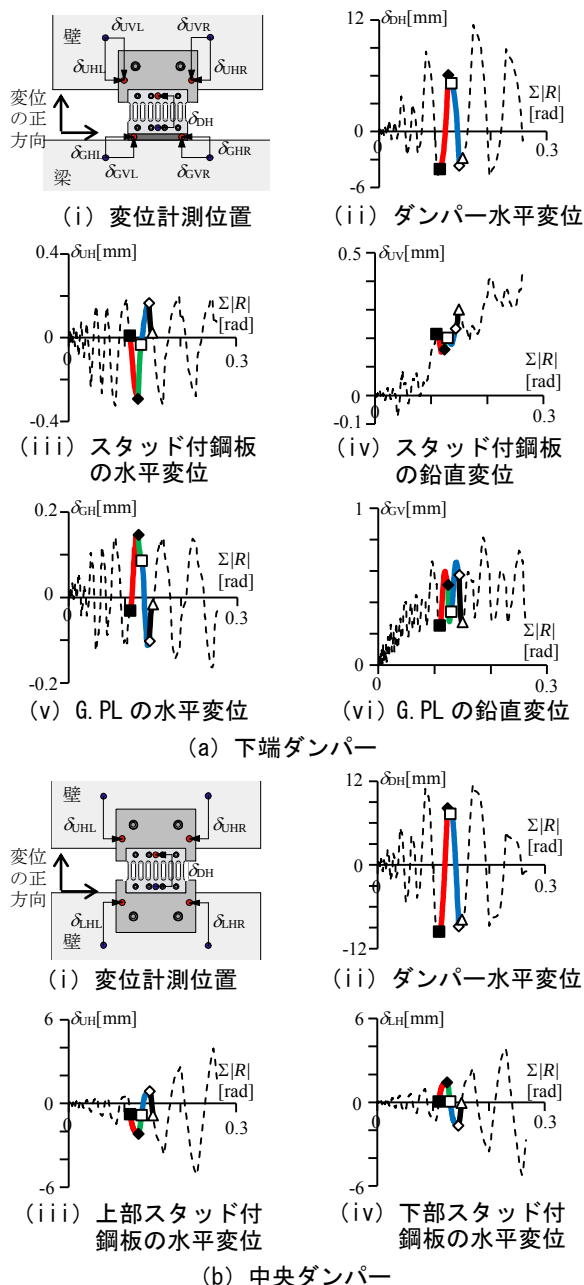


図-8 ダンパーおよびダンパー接合部の挙動

4. 結

本論文では RC 骨組における方立壁へのダンパー適用による損傷制御構造を提案し、RC 平面門形架構の実験を行った。以下に得られた結果をまとめる。

- 1) 実験終了時点で、方立壁にダンパーを適用した試験体では、ダンパー設置位置の違いによるエネルギー吸収量の差はなく、壁剛接試験体の約 1.4 倍、スリット試験体の約 1.6 倍のエネルギー吸収量が得られた。
- 2) 等価粘性減衰定数 h_{eq} の比較から、 $R=1/100\text{rad}$ サイクルでは、下端ダンパー、中央ダンパー試験体ともに h_{eq} は約 13% と同等の減衰効果を示し、壁剛接、およびスリット試験体よりも 2~3% 大きかった。
- 3) ひび割れ状況に着目すると、壁剛接試験体では、 $R=1/400\text{rad}$ 除荷時には梁が使用限界を超えたとともに、方立壁が $R=1/255\text{rad}$ 時にせん断破壊した。ダンパーを適用した試験体では、梁、方立壁ともに $R=1/200\text{rad}$ 除荷時まで使用限界以内に抑えられた。

以上のことから、ダンパー力を考慮して設計した方立壁にダンパーを適用することで、柱梁架構および方立壁に悪影響を及ぼすことなく、エネルギー吸収能力と減衰効果を付与できる。

- 4) 大変形域ではダンパー接合部の変形や方立壁のひび割れにより、ダンパー変位に正負で差異が生じた。今後は、方立壁へのダンパー接合部のディテールに関して検討を重ねてゆきたい。

謝辞

本研究は熊谷組技術研究所副所長 濱田真氏と共同で実施しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報，2011.7
- 2) 福山洋ほか：損傷低減のために袖壁を活用した実大 5 層鉄筋コンクリート造建築物の静的載荷実験（その 1：研究背景），日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2 分冊，pp.361-362，2015.9
- 3) 塩原等ほか：ダウエル鉄筋で周辺骨組に接合されたプレキャストコンクリート非構造パネルの水平加力実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.979-985，2006.7
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010，2010.2
- 5) 国土交通省住宅局建築指導課ほか監修：2007 年版建築物の構造関係技術基準解説書，2007.8
- 6) 谷昌典ほか：実大試験体を用いた RC 造非耐力壁の破壊形式及び損傷状態に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.631-636，2014.7
- 7) 和田章ほか：鋼製スリットダンパーに関する研究 その 1 ダンパー部要素実験，日本建築学会学術講演梗概集，B-2 分冊，pp.843-844，1997.7
- 8) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，2010.11
- 9) 日本建築学会：鋼コンクリート構造接合部の応力伝達と抵抗機構，2011.2
- 10) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐震性能評価指針（案）・同解説，2004.1
- 11) 前田匡樹ほか：RC 柱の損傷状態に基づく残余耐震性能の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.259-264，2001.7