

論文 簡易な接合方法を用いた履歴型ダンパーの構造性能に関する基礎研究

藤本 利昭¹・稲井 栄一^{*2}・李 柱国^{*2}

要旨：本研究は、RC 造建築物に適用する間柱形式の履歴型ダンパーを研究対象とし、ダンパーと根巻き RC 部との接合方法（頭付きスタッド、ベースプレート）ならびに根巻き RC 部の応力状態を要因とした構造実験を行った。実験結果より、接合方法および根巻き RC 部の応力状態の違いがダンパーの変形成分、応力伝達メカニズム、構造性能に及ぼす影響を明らかにするとともに、提案した簡易な接合方法を用いた構法が、ダンパーの性能を十分有することを明らかにした。

キーワード：鋼材ダンパー、低降伏点鋼、接合方法、根巻き RC 部

1. はじめに

近年、超高層 RC 造建築物への制震技術の適用が増加している。特に、図-1 に示すような低降伏点鋼を用いたせん断型履歴ダンパーの上下部を RC で根巻きする間柱型ダンパーが多く採用されている。このような制震ダンパーを RC 造建築物に設置する場合、接合方法により制震ダンパーの性能が大きく左右されることから、文献 1), 2)等に見られるように、種々の接合方法が提案されている。しかしながら、これらダンパーは接合方法が煩雑であり、充分合理的な構法とはなっていない。

本研究では、文献 3)に示された頭付きスタッド（以下、スタッド）ならびにベースプレートによる簡易な接合方法を適用した間柱型せん断ダンパーの構造性能について载荷実験に基づき検証した。

2. 载荷実験

2.1 試験体

表-1 に試験体一覧を、図-2 に試験体形状を示す。試験体は図-1 の間柱型ダンパーの 1/2 縮小模型試験体である。試験体上下には、躯体の梁を模したスタブを取り付けている。また、試験体中央部の H 形鋼が履歴ダンパー部分であり、根巻き RC 部に埋め込まれている。

試験体 No.3, No.4 が、本論文で提案するダンパー試験体である。H 形断面を有するダンパー

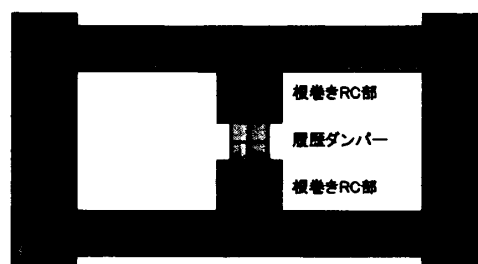


図-1 間柱型ダンパー

表 - 1 試験体一覧

試験体	根巻きRC断面	鉄骨		埋め込み深さ	ベースプレート	頭付きスタッド	主筋	p_t (%)	せん断補強筋	p_m^* (%)	上部横補強筋	下部横補強筋
		ダンパー部	埋め込み部									
No. 1	b×D=	H-200×75×5.5×8		200mm	無し	12-Φ13	16-D16	1.06	4-RB6.2Φ40	1.33	2-RB6.2, 2	2-RB6.2, 2
No. 2	300mm			300mm	t=12mm	無し	16-D16	1.06	4-RB6.2Φ40	1.33	2-RB6.2, 2	2-RB6.2, 2
No. 3	×	300×100	300×100	300mm	無し	12-Φ13	16-D16	1.06	4-RB6.2Φ40	1.33	2-RB6.2, 3	2-RB6.2, 3
No. 4	500mm	×4.5×9	×6.5×9				20-D16	1.32	4-RB6.2Φ35	1.71	2-RB6.2, 3	-

※：ダンパーのフランジの外側を根巻きRCの有効幅として算定した値

*1 安藤建設技術研究所 振動・基礎研究室 博士（工学）（正会員）

*2 山口大学大学院理工学研究科 助教授 博士（工学）（正会員）

は、根巻き RC 部に 300mm (H 形鋼のせい長さ) 埋め込み、フランジにスタッドを設置している。ダンパー中央部はウェブを切り取り、No.3 は LY100, No.4 は LY225 の低降伏点鋼を隅肉溶接で取り付けている。

試験体 No.1, No.2 は、No.3, No.4 とほぼ同程度のせん断力で根巻き RC 部の応力条件が厳しくなるように、H 形鋼の断面を小さくし、普通鋼 (SS400) を用いて、根巻き RC 部の長さを短くした試験体である。ダンパー部が長くなるため、鉄骨と根巻き RC 部の切り替え部には大きなモーメントが作用する。No.1 は、ダンパーを根巻き RC 部に 200mm (H 形鋼のせい長さ) 埋め込み、フランジには No.3, No.4 と同数のスタッドを設置している。No.2 は、文献 3) の実験結果を基に、構造性能が優れていると考えられるベースプレート形式とした。ダンパーの根巻き RC 部への埋め込み深さは 300mm (H 形鋼のせいの 1.5 倍) とし、上下端部にベースプレートを設けている。なおスタッドは設けていない。

根巻き RC 部の主筋は、No.1, No.2, No.3 が 16-D16, No.4 が 20-D16 とし、全てプレート定着とした。根巻き RC 部には、せん断補強筋の他に、No.1, No.2, No.3 ではダンパーとの切り替え部近傍とダンパー端部に横補強筋を集中的に配し

ているが、No.4 では合理性を高めるため、ダンパー端部の横補強筋を省略した。

試験体に用いた材料の試験結果を表-2、表-3、表-4 に示す。

表 - 2 コンクリートの材料試験結果

試験体	圧縮強度 σ_c (N/mm ²)		ヤング係数 E_c (N/mm ²)	
	下柱	上柱	下柱	上柱
No.1	41.8	42.9	26.7	26.5
No.2	42.7	43.0	26.5	26.8
No.3	42.8	43.9	26.5	26.7
No.4	34.9	38.1	24.4	24.5

表 - 3 鉄筋の材料試験結果

種類	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	引張強さ σ_t (N/mm ²)	降伏ひずみ ϵ_y (%)	破断伸び ϵ_t (%)
RB6.2(No.1~3)	882	898	0.473	12.4
RB6.2(No.4)	872	892	0.464	13.3
D16(No.1~3)	374	568	0.195	21.6
D16(No.4)	373	572	0.193	22.0

表 - 4 鋼材の材料試験結果

使用箇所		板厚 t (mm)	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	引張強さ σ_t (N/mm ²)	降伏 ひずみ ϵ_y (%)	破断 伸び ϵ_t (%)
フランジ	No.1,2	7.57	286	434	0.139	38.2
	No.3	8.63	330	465	0.156	39.6
	No.4	8.27	281	428	0.139	37.7
ウェブ (埋込み部)	No.1,2	5.20	296	433	0.145	37.6
	No.3	6.43	429	520	0.206	29.0
	No.4	6.13	326	450	0.155	37.4
ウェブ (ダンパー部)	No.3	4.58	91.3	253	0.054	58.7
	No.4	4.43	214	317	0.107	38.7

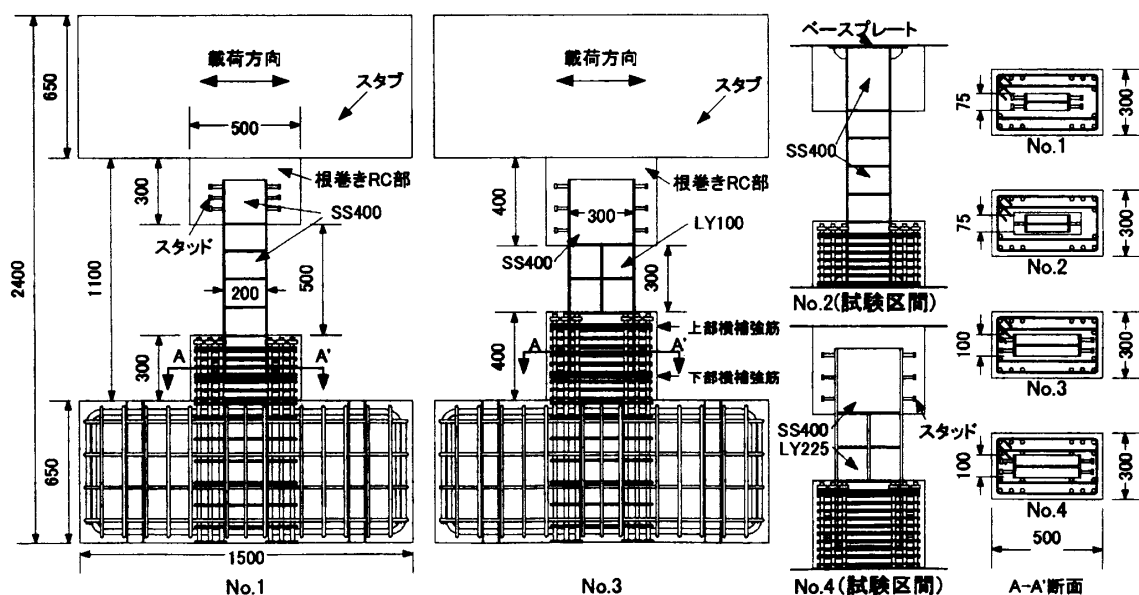


図-2 試験体形状

2.2 載荷方法及び計測計画

載荷装置を図-4 に示す。載荷は逆対称加力とし、変位制御による正負交番載荷とした。載荷サイクルは部材角 R (水平変位/内法高さ) が $1/1000$, $2/1000(\text{rad})$ で各 1 回, $3/1000$, $5/1000$, $7.5/1000$, $10/1000$, $15/1000(\text{rad})$ で各 2 回, $7.5/1000$, $20/1000$, $30/1000(\text{rad})$ で各 1 回繰り返すことにした。なお、軸力は作用させていない。

測定項目は水平ジャッキの荷重、水平変位、RC 部における回転角と水平変形、H 形鋼の抜け出し等である。また、RC 部の主筋及びせん断補強筋、H 形鋼のフランジ及びウェブにはひずみゲージを貼付し、ひずみを計測した。

3. 実験結果

3.1 荷重変形関係及び破壊経過

写真-1 に最終ひび割れ状況を、図-5 に試験体のせん断力 Q (水平ジャッキの荷重) - 部材角 R

関係を示す。

根巻き RC 部のひび割れは、全試験体ともにダンパーとの切り替え部上下面のフランジ付け根のひび割れ、スタブ付け根の曲げひび割れ、せん断ひび割れの順に発生した。

No.1 は、部材角 $R=3/1000$ で鉄骨フランジが降

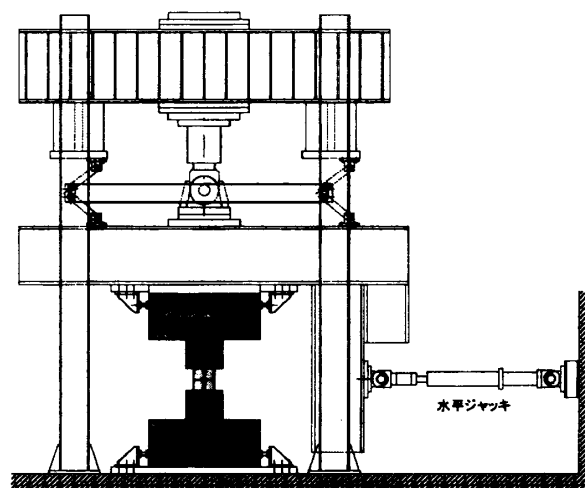


図-4 載荷装置

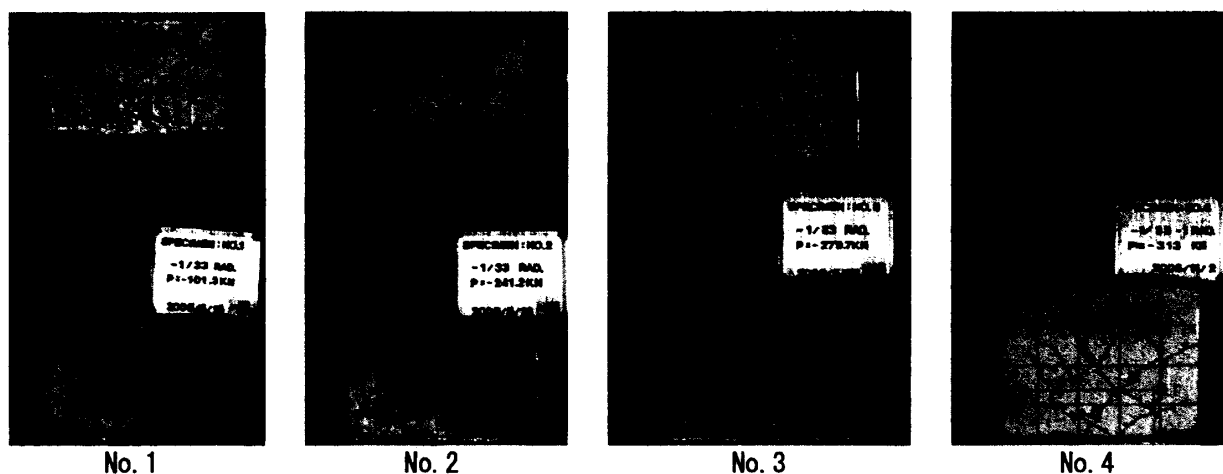


写真-1 最終ひび割れ状況

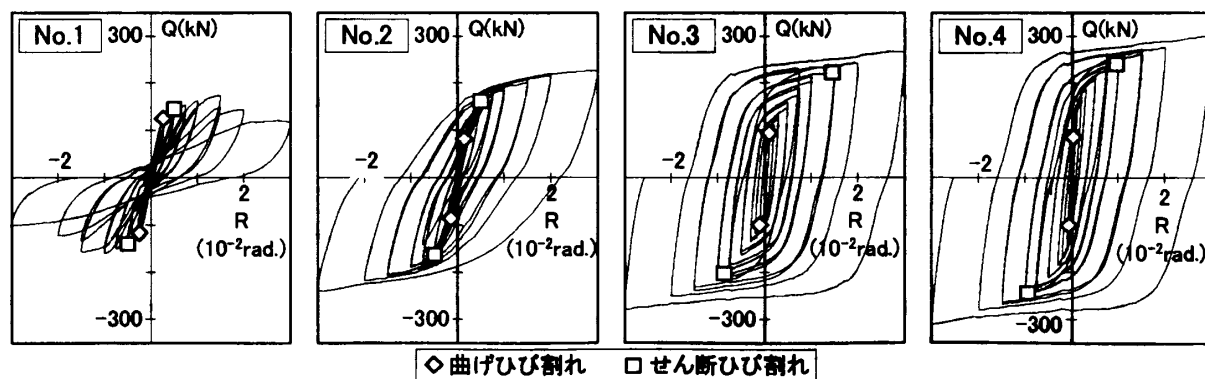


図-5 せん断力-部材角関係

伏した。その後ひび割れの増加とともに鉄骨の抜け出しが顕著となり、 $R=15/1000$ で最大耐力に達し、抜け出し破壊により耐力が低下した。

No.2は $R=3/1000$ で鉄骨フランジが降伏した後耐力は上昇し、 $R=30/1000$ においても耐力低下は認められなかった。

No.3は $R=1/1000$ でダンパーのウェブ(LY100)が、No.4は $R=2/1000$ でダンパーのウェブ(LY225)がせん断降伏した。No.3, No.4 試験体ともにせん断降伏後も耐力は上昇し、 $R=30/1000$ においても耐力低下は認められなかった。

なお、いずれの試験体も主筋、補強筋は降伏していない。

3.2 変形状

図-6 に試験体の部材角に伴う各部の変形割合の変化を示す。No.1 では、頂部コンクリートの損傷が激しく、ダンパーの変形とダンパーの抜け出しによる変形とが分離できなかったが、破壊形状からは、ダンパーの抜け出しによる変形が卓越しているものと考えられる。

一方 No.2, No.3, No.4 ではダンパーの変形が全体変形の約 80%と大きく、RC の変形は僅かである。No.3 と No.4 では、ダンパーに LY100 を用いた No.3 は、LY225 を用いた No.4 に比べ早期にせん断降伏による剛性低下が生じたことから、部材角の小さな段階からダンパーの変形割

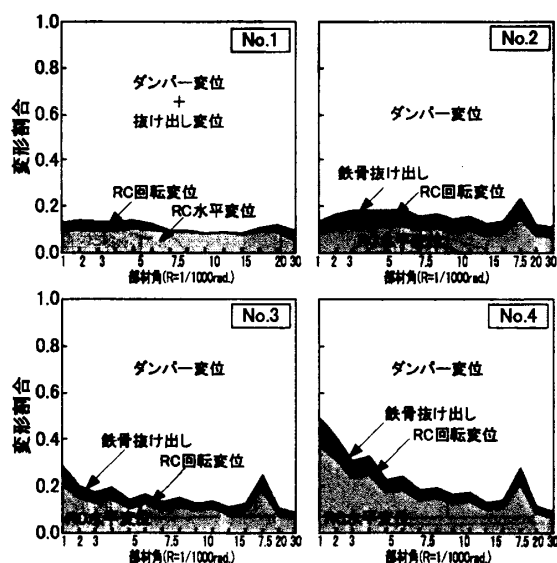


図-6 変形割合

合が大きくなっている。また、No.2, No.3, No.4 では抜け出しによる変形は僅かで、終始一定の割合であった。

4. 根巻き RC 部の応力伝達と耐力

4.1 根巻き部における応力伝達

図-7 に $R=10/1000(\text{rad.})$ におけるダンパーの負担モーメントの高さ方向の分布を示す。図の横軸は RC 材端断面のモーメントで基準化して表している。

スタッドを設けた No.1, No.3, No.4 では、RC との切り替え部から材端に向かって負担モーメントが徐々に減少している。ダンパー端部にベースプレートを持つ No.2 では埋め込み部でほぼ一定のモーメントを負担している。

図-8 に $R=10/1000(\text{rad.})$ におけるダンパーの負担せん断力の高さ方向の分布を示す。図の横軸は試験体せん断力で基準化して表している。

負担せん断力は、材端に近づくにつれ減少している。ダンパーの抜け出しにより破壊した

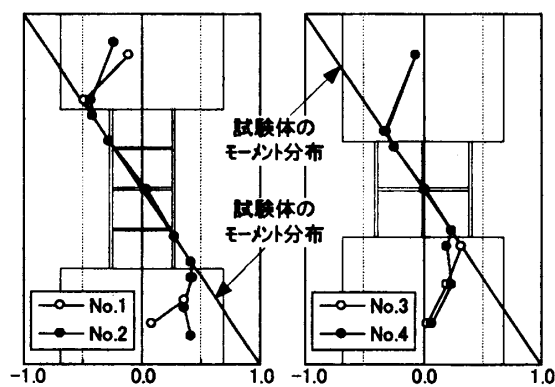


図-7 鉄骨の負担モーメント ($R=10/1000\text{rad.}$)

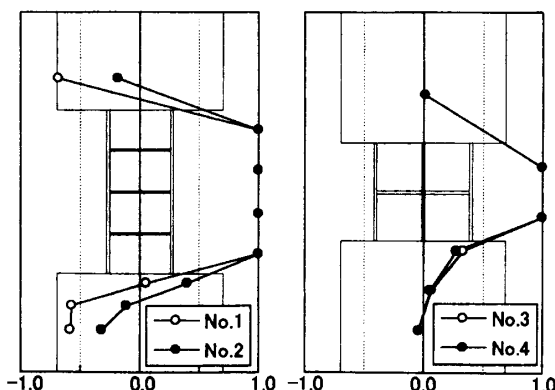


図-8 鉄骨の負担せん断力 ($R=10/1000\text{rad.}$)

No.1 の鉄骨端部には大きな負のせん断力が生じている。

図-9 に、根巻き RC 部のコーナー部主筋、および補強筋の高さ方向のひずみ分布を示す。No.2, No.3, No.4 の主筋のひずみは、材端から切り替え部に向かって直線的に減少しているが、No.1 では、ほぼ一定のひずみ分布となっている。No.1 はダンパー（スタッド）の抜け出しによるコンクリートのコーン状破壊に対して主筋の定着プレートが抵抗したため、主筋が純引張に近い応力状態になったものと考えられる。また補強筋は、No.1, No.2 では、材端から切り替え部に向かってひずみが増加しており、特に No.1 のひずみが大きい。一方 No.3, No.4 のひずみは僅かであり、ダンパー端部の集中補強筋を省略した影響は認められない。

文献 3)で述べられているように、ベースプレ

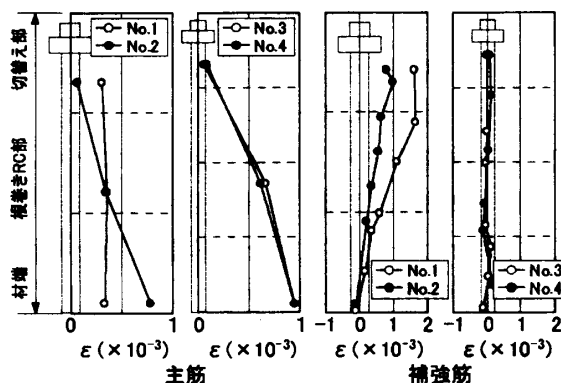


図-9 鉄筋のひずみ分布(R=10/1000rad.)

ートや、スタッドによりモーメントに抵抗できる場合には、RC 部に入力するせん断力はほぼ試験体のせん断力に等しくなるが、ベースプレートが無く、またスタッドの耐力が不十分な場合には、試験体のせん断力より RC 部に入力されるせん断力が大きくなるものと考えられる。

4.2 根巻き RC 部の耐力

表-5 に実験値と試験体各部の計算耐力を比較して示す。表中の数値は、全て試験体の水平力に換算した値である。ここで、根巻き RC 部の終局曲げ耐力 Q_{mu} は、ACI のストレスブロック法により、終局せん断耐力 Q_{su} は文献 4)の A 法による値である。なお Q_{su} は、ダンパーのフランジの外側を有効幅として算定した。また、No.3, No.4 のダンパーの終局せん断耐力 Q_{dsu} は、文献 5)の式により求めた。

本実験では、全ての試験体で根巻き RC 部の曲げ耐力およびせん断耐力が、ダンパーの耐力に対して大きく上回るように設計している。特にせん断耐力は、前節で述べたように試験体のせん断力より RC 部に入力されるせん断力が大きくなるおそれがあったことから、RC 部の曲げ耐力に対して余裕を持たせている。実験結果からも、低降伏点鋼を用いたダンパーのひずみ硬化による耐力上昇は顕著であり、実際の設計においても充分余裕を持った設計をすることが肝要である。なお、ひび割れ耐力がダンパーの耐力

表 - 5 耐力一覧 (Unit: kN)

試験体		実験値				計算耐力									
		Q_{nc}	Q_{sc}	Q_{100}	Q_{max}	根巻き RC					ダンパー				
						Q_{nc}	Q_{sc}	Q_{mu}	Q_{su}	Q_{std}	Q_{anc}	Q_{day}	Q_{dsu}	Q_{day}	Q_{dsu}
No. 1	正側	125	145	162	174	106	218	467	796	337	145	152	178	164	-
	負側	-117	-140	-160	-160										
No. 2	正側	81	162	184	227	107	219	467	801	-	246	152	178	164	-
	負側	-86	163	-186	-241										
No. 3	正側	94	221	202	268	106	196	467	716	848	445	664	609	68	277
	負側	-100	-205	-206	-280										
No. 4	正側	86	241	241	302	101	174	548	600	735	401	545	579	155	301
	負側	-100	-244	-244	-313										

※ Q_{nc} , Q_{sc} : 根巻き RC の曲げひび割れ, せん断ひび割れ耐力

(Q_{sc} の実験値は、せん断ひび割れが発生した加力サイクルの最大荷重を表示)。

Q_{100} : $R=1/100$ 時せん断力, Q_{max} : 最大耐力, Q_{mu} , Q_{su} : 根巻き RC の終局曲げ耐力, 終局せん断耐力⁴⁾。

Q_{std} : (1)式によるスタッドのせん断耐力⁶⁾, Q_{anc} : (2)式による頭付きアンカーのせん断耐力⁶⁾。

Q_{day} , Q_{dsu} : ダンパーの降伏曲げ耐力, 終局曲げ耐力。

Q_{day} , Q_{dsu} : ダンパーの降伏せん断耐力, ダンパーの終局せん断耐力⁵⁾

を上回るように設計することは困難であり、間柱型ダンパーの根巻き RC 部のひび割れは不可避であると考えられる。

4.3 スタッド接合部の耐力

スタッド接合部の耐力評価法として、文献 6) に(1)式に示すスタッドコネクタのせん断耐力式がある。

$$Q = n \cdot 0.5 s_c a \sqrt{F_c \cdot E_c} \quad (1)$$

ここで、 n : スタッドの本数、 $s_c a$: スタッドの断面積、 F_c 、 E_c : コンクリートの圧縮強度およびヤング率

ダンパーが抜け出し破壊した No.1 は、ダンパーの断面せいが小さいため、フランジからスタッドに作用するせん断力が大きくなり、スタッドに対して厳しい応力状態となるが、表-5 に示すように実験による最大耐力は、(1)式によるせん断耐力 Q_{std} の 1/2 程度である。そこで No.1 では鉄骨の抜け出しによりコンクリートがコーン状破壊をしたことから、図-10 に示す破壊形状を仮定し、文献 6) に示された頭付きアンカーのせん断耐力式(2)を基にスタッドの耐力を検討した。

$$Q = \sqrt{F_c} \cdot A_c \quad (2)$$

ここで、 A_c : コンクリートの有効投影面積

なお、No.2 はベースプレートをスタッドと見なして同様に評価した。

表-5 に示すように、(2)式から求めたスタッドの耐力 Q_{anc} は、全ての試験体で(1)式に比べ小さ

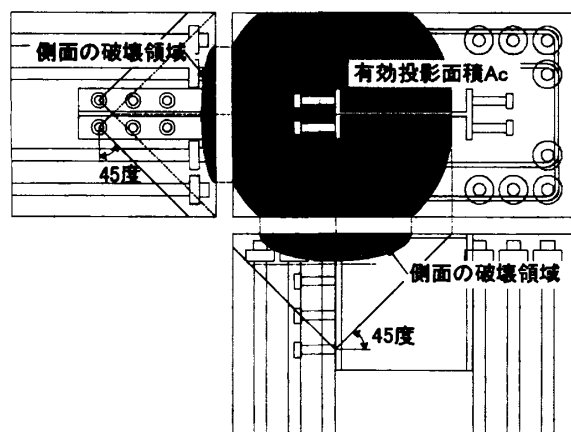


図-10 仮定した有効投影面積

く、No.1 では最大耐力を下回っている。一方 No.2, No.3, No.4 では、最大耐力に対して(2)式によるスタッドの耐力が上回っており、破壊が生じなかったものと考えられる。以上のことから、(2)式はスタッド接合部耐力の評価指標になるものと考えられる。

5. まとめ

簡易な接合方法を用いた履歴ダンパーの実験から以下の知見が得られた。

- 1) 低降伏点鋼を用いたダンパーの耐力上昇は顕著であり、根巻き RC 部の設計では耐力に充分余裕を持たせることが重要である。
- 2) スタッド接合部は、少なくとも(2)式による耐力を満足するように設計する必要がある。
- 3) 試験体 No.4 実験結果から、スタッドの耐力が十分であれば、ダンパー端部の集中補強筋は省略可能と考えられる。
- 4) ベースプレート形式は、スタッド形式に比べ根巻き RC 部の応力条件が厳しい場合にも充分な性能を有している。
- 5) 本実験に採用した簡易な接合方法を用いても、根巻き RC 部の変形は僅かであり、間柱型ダンパーとして充分な構造性能を発揮することが明らかとなった。

参考文献

- 1) 安田聡, 原孝文ほか: 極低降伏点鋼を用いた RC 構造用間柱型制振部材の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.1073-1074, 2001.9
- 2) 洲上克志, 都祭弘幸ほか: 極低降伏点鋼を用いた超高層 RC 建物対応鋼材ダンパーの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2, pp.783-784, 2001.9
- 3) 木田貴史, 稲井栄一, 松浦恒久: 履歴ダンパーと RC 部材の接合方法に関する実験的研究, 日本コンクリート工学協会年次報告集, 2006.7
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990
- 5) 松浦恒久, 伊藤嘉朗, 稲井栄一: 低降伏点鋼を用いた制震間柱の構造性能に関する研究 その2 実験結果の検討, 日本建築学会大会学術梗概集, pp.611-612, 2001 年
- 6) 日本建築学会: 各種合成構造設計指針・同解説, 1985