

鋼製ダンパー・ブレースを有するRC鉄道高架橋下部工の開発（その1）

—— せん断降伏型ダンパー付き架構の性能評価試験 ——

岡野素之 大内 一

Development of RC Railway Viaducts with Steel Damper and Braces (Part 1)

—— Structural Integrity Tests of RC Frame with Shear Yielding Damper ——

Motoyuki Okano Hajime Ohuchi

Abstract

In the new seismic design standard of railway structures, not only high seismic performance capacity but also high stiffness has been required. In responding, the authors developed a new-type RC viaduct with steel damper and steel braces. Cyclic loading tests were conducted focusing on its seismic performance. The following results were obtained: 1) the stiffness, strength and ductility can be practically evaluated by the combined those of RC frame and damper-braces, 2) seismic performance capacity can be restored by exchange of damper even after loading experience up to 1/40 drift angle of the RC frame.

概要

鉄道構造物の新しい耐震設計標準では、高い耐震性能だけでなく地震時の水平変位を抑制するための剛性が要求される機運にある。これに対応し、RC架構内側にせん断降伏型の鋼製ダンパーとブレースを組み込み、剛性および減衰性能を高めた混合構造形式の鉄道高架橋を提案し、模型実験により構造性能を検討した。その結果、剛性、耐力および変形性能はRC架構とダンパー・ブレースそれぞれの既往の評価方法の重ね合わせで実用上評価できること、部材角1/40程度まで変形した後でもダンパーの取り替えにより架構の性能が復旧することなどがわかった。

1. まえがき

兵庫県南部地震での被害経験と性能設計への移行を受けて、鉄道構造物においては耐震設計基準が見直されつつある。そこでは、耐震安全性だけでなく、地震時に所定の水平剛性を確保することが、列車走行上の必要性能として盛り込まれる機運にある¹⁾。

この背景の下、RC高架橋内部に鋼製ダンパー・ブレースを組み込んだ混合構造形式のOH-DAS高架橋（Obayashi High Stiffness and High Damping System for Viaduct Structures）を提案した。エネルギー吸収をダンパーに、剛性をブレースにそれぞれ期待し、高剛性かつ高減衰性を確保させる。この種のダンパー・ブレースは、偏心ブレースとして既に建築の鉄骨構造で実用化されており²⁾、RC架構への適用は耐震補強工法として枠付きの鉄骨ブレースを用いた報告がある³⁾。しかし、RC架構に直接適用された例は極めて少なく、その耐震性能を把握するため、試設計構造物を対象に、模型試験体による水平交番載荷実験を実施した。本報では実験結果を報告するとともに、ダンパーの降伏後の挙動を高橋らの提案した手法²⁾を用いて評価し架構の性能を検討する。

2. 構造概要と設計概念

本構造はFig. 1に示すようにラーメン高架橋（以下RC架構と呼ぶ）の内側に逆V型の鋼製ブレースを配置し、はりとブレースの間にせん断降伏型鋼製ダンパーを設けた形式である。

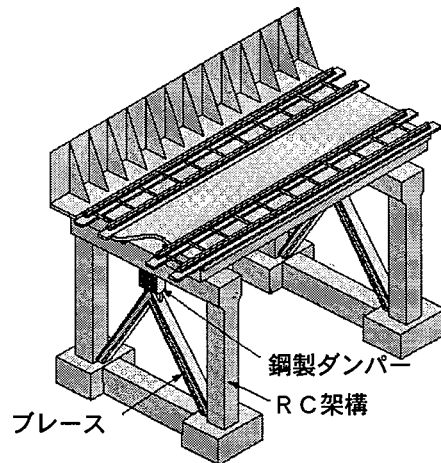


Fig. 1 構造概要
Outline of the Viaduct

設計概念と性能を Fig. 2 に示す。RC 架構とダンパー・ブレースが共に弾性の領域では高い剛性が確保される。

塑性領域では、RC 架構の鉄筋が降伏するまでは、ダンパーの減衰効果と RC 架構の剛性が共に期待できる。鉄筋降伏後はダンパーと RC 架構が共に減衰効果を発揮し、高い耐震性能が確保される。RC 架構の降伏時点を全体の降伏と定義しその水平震度を用いてニューマークのエネルギー一定則により必要じん性を決め、各部材を設計することが可能となる。

本構造では上記以外に以下の特長が挙げられる。

- 1) 水平剛性が高く、場合により基礎ばりが不要。
- 2) ダンパーの交換が可能で、大地震後の復旧が容易。
- 3) 復旧時、ブレースを反力として架構の残留変形の補正が容易。
- 4) 既存高架橋の耐震補強工法として適用可能。

3. 実験の概要

3.1 試験体

試験体は縮尺 1/2.5 の模型合計 3 体で、Fig. 3 に示すように RC 架構、ダンパーおよびブレースで構成されている。試験体の諸元と必要じん性率を Table 1, Fig. 4 にそれぞれ示す。試験体 B O は RC 架構のみの場合で、降伏震度を 0.4 に設定した。試験体 B S, B H は、B O と同じ RC 架構に、降伏震度 0.4 と 0.8 のダンパーを加え、全体の降伏震度をそれぞれ 0.8, 1.2 に設定した。試験体 B H 2 は大地震発生後の復旧性を意図し、試験体 B H で $3\delta y$ (架構の部材角で約 1/40) まで加力した後、損傷したダンパーを溶断し、新しいダンパーに取替えて溶接した後、再び最初から加力した。Fig. 4 には弾性設計震度を 1.7 G に設定した場合の、各試験体におけるエネルギー一定則に基づく必要じん性率を示した。この場合、試験体 B S, B H では、それぞれ $\mu = 2.8, 1.5$ のじん性率が必要となる。

ブレースは終局に至るまで弾性範囲で挙動するように設計した。ダンパーとはりの接合部およびブレースと基部の接合にはアンカーボルトを用いた。

使用した鋼材とコンクリートの性質を Table 2, 3 にそれぞれ示す。ダンパーのウェブには低降伏点鋼材の BT-LYP235 を用いた。

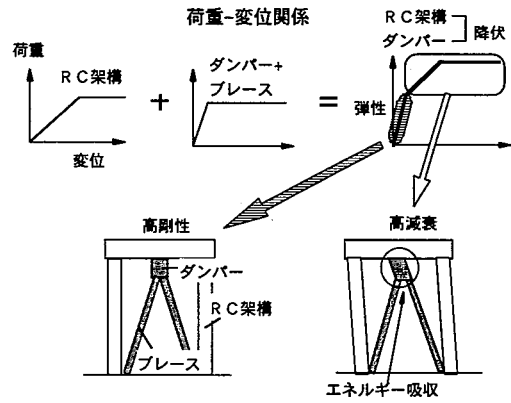


Fig. 2 設計概念と性能
Outline of the Design and Capacity

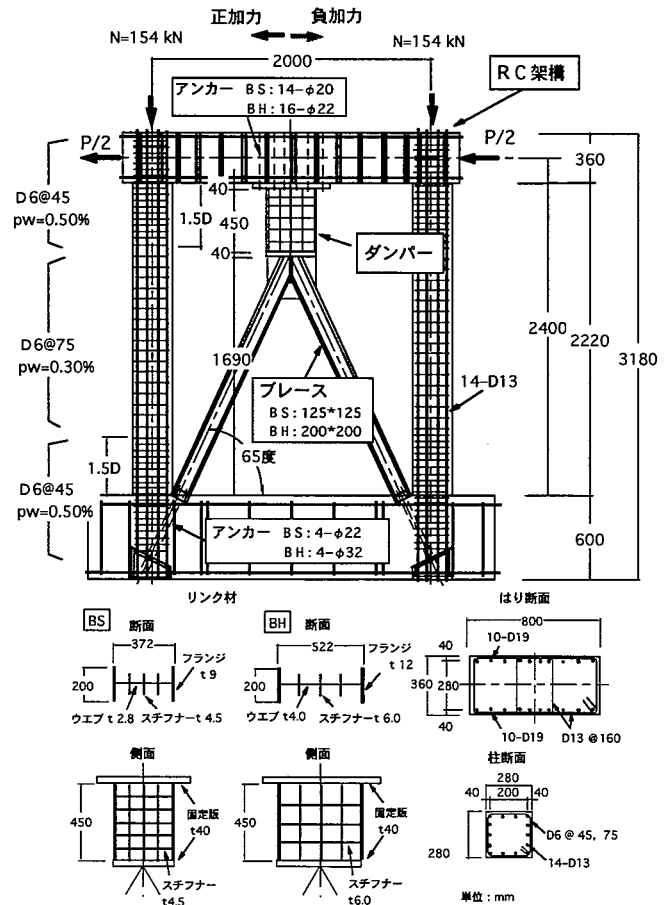


Fig. 3 試験体
Details of Specimen

Table 1 試験体の一覧
Specimens

試験体	降伏震度		RC 架構 (A)		リンク材 (B) t×b×h×l×t×s	ブレース材 (C) b×h×t1×t2	備考		
	RC 架構	リンク材	合計	柱				はり	
B O		0.0	0.4	・断面 280×280 ・軸方向鉄筋 14-D13 pt=1.1% ・せん断補強筋 D6@45~75 pw=0.30~0.50%	・断面 h360×b800 ・軸方向鉄筋 20-D19 pt=1.0% ・せん断補強筋 D13@160×2 pw=0.40%	2.8×200×354 ×450×4.5	125×125 ×9×9	損傷復旧	
B S	0.4	0.8							
B H (B H2)	0.8	1.2							

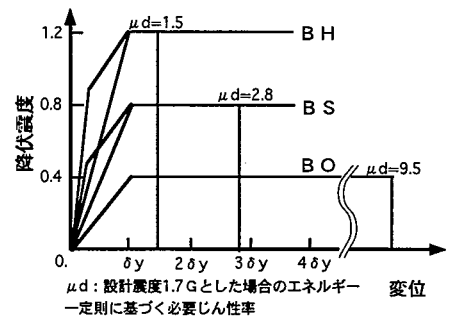


Fig. 4 必要じん性率
Required Ductilities

3.2 試験方法

載荷装置をFig. 5に示す。試験体を床に固定し、2本の柱に一定軸力を保持した状態で、押し引きジャッキ2台を用いてはりの左右の荷重が均等になるように、水平荷重(P)を載荷した。軸力は、柱の軸応力度を実構造物(列車荷重を含め $\sigma_c = 2.1 \text{ N/mm}^2$)に合わせ、1柱あたり154kNとした。載荷サイクルは、ダンパーの降伏荷重で正負1回載荷後、RC架構の降伏変位 δ_y の整数倍の変位で各3回正負繰返し載荷した。ここで δ_y は柱上下端4箇所の最外縁の軸方向鉄筋がすべて引張降伏した時点でのより中央の水平変位で定義した。

4. 実験結果と評価

4.1 破壊と変位の性状

ダンパーを有する試験体は共に、ごく小さい変位で降伏したウェブが $2\delta_y$ で座屈し始め、 $3\delta_y$ では座屈が著しくなり、その後 $4\delta_y$ でウェブが破断し荷重が低下した。最終的には $4\sim 5\delta_y$ で柱主筋の座屈によりRC架構の損傷が大きくなり、実験を終了した。

水平荷重(P)とより中央の水平変位(δ)との関係をFig. 6に示す。荷重と変位の解析値は材料試験結果を用いた以下の仮定と方法で求めた。

- 1) 全体の挙動はRC架構の挙動とダンパー・プレースの挙動の重ね合わせとする。
- 2) RC架構の挙動は基部の鉄筋の抜け出し⁴⁾を考慮し、ファイバーモデルを用いた骨組の非線形解析による。
- 3) ダンパーの挙動は、以下に示す提案モデル²⁾に従う。

$$\tau_y = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (\text{von Mises})$$

$$\frac{\tau_{cr}}{\tau_y} = \frac{1.02}{D/tw - 0.26} + 0.60$$

$$\overline{D/tw} = (D/tw) \sqrt{\frac{I_y}{E_s}}$$

ここに、

τ_y : せん断降伏応力度, τ_{cr} : 塑性座屈応力度,
 tw : ウェブ厚さ, D : スチフナー間の距離,
 D/tw : 幅厚比, $\overline{D/tw}$: 一般化幅厚比

4) ダンパー・プレースの挙動は骨組構造解析によるものとし、ダンパーの降伏後の剛性は弾性剛性の1%とする(Fig. 7A, B)。

Fig. 6より、ダンパーを有する試験体は、エネルギー吸収の大きな安定した履歴を示した。また、試験体BH2は、 $3\delta_y$ まではBHとほぼ同様の履歴で、ダンパーの取り替えにより耐震性能が回復している。ダンパーを有す

Table 2 鋼材の性質
Properties of Steel

使用部位	材質	降伏点 f_y (N/mm^2)	引張強度 f_u (N/mm^2)	ヤング係数 $E_s \times 10^4$ (N/mm^2)	
鉄筋	D6	371	509	2.01	
	D13	345	514	1.98	
	D19	384	582	1.95	
リンク材	ウェブ	LYP-235	225	331	2.05
	フランジ	t9	371	561	2.22
		t12	375	561	2.18
アンカーボルト	$\phi 20$	640	856	2.07	
	$\phi 22$	584	728	2.08	
	$\phi 32$	594	719	2.07	
プレース材	t9	371	561	2.22	
	t12	364	548	2.07	

Table 3 コンクリートの性質
Properties of Concrete

試験体	使用部位	圧縮強度 f_c (N/mm^2)	引張強度 f_t (N/mm^2)	ヤング係数 $E_c \times 10^4$ (N/mm^2)
共通	柱	19.7~25.8	2.15~2.77	2.04~2.21
	はり	20.4~26.0	1.88~2.77	2.03~2.25

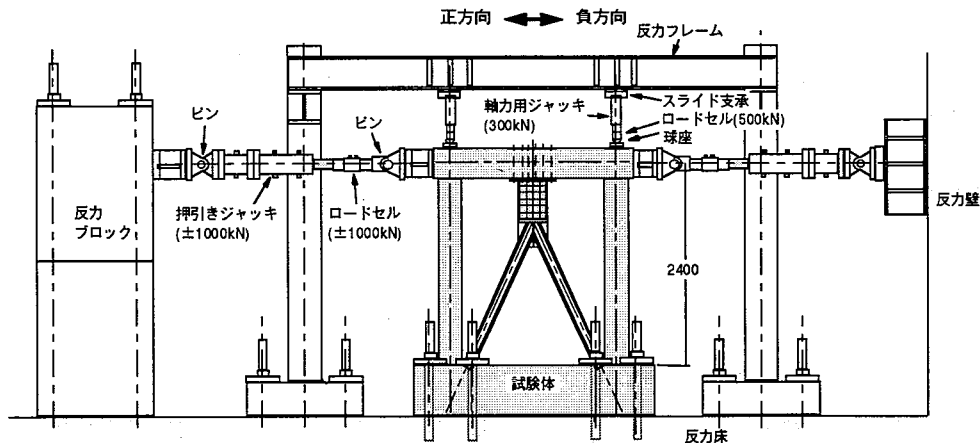


Fig. 5 載荷装置
Loading Apparatus

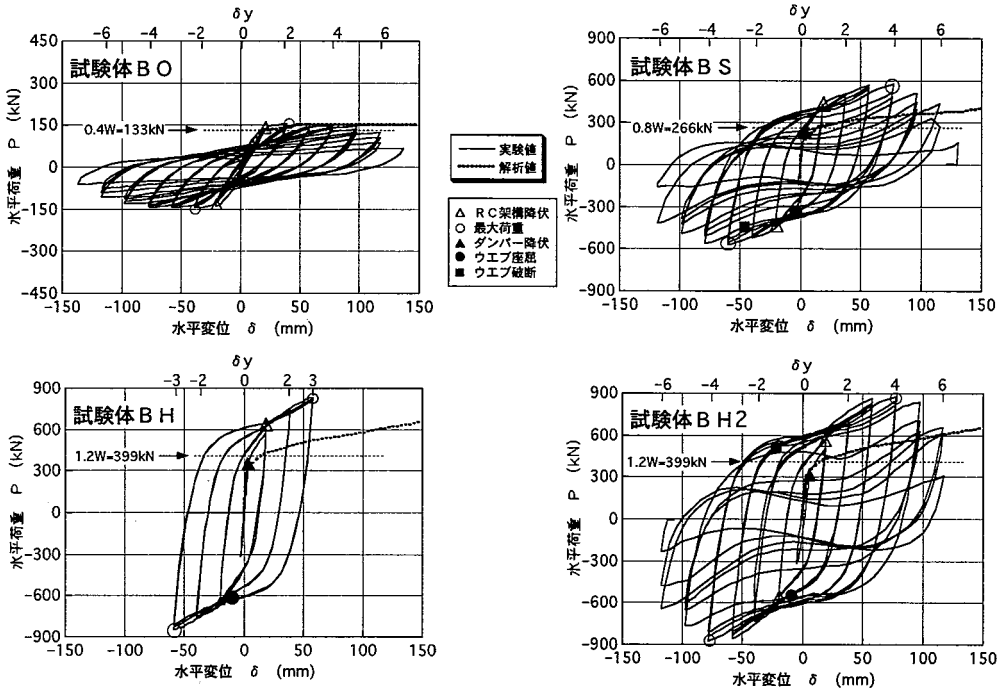
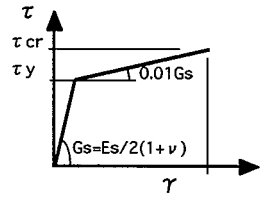
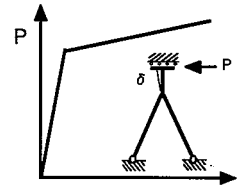


Fig. 6 水平荷重と水平変位の関係
Load-Displacement Relationship



A: ダンパーの強度



B: ダンパー・ブレースの挙動

Fig. 7 ダンパー・ブレースのモデル

Models of Damper and Braces

る試験体は、弾性領域では解析値は実験値を精度よく評価しているが、ダンパーの降伏後は解析値は安全側の評価となる。

4.2 剛性の比較

ここでは剛性を固有振動数で評価した。各試験体の比較をFig. 8に示す。固有振動数は、荷重と変位の関係から、弾性場合はダンパーの降伏した点、架構降伏の場合は $1 \delta_y$ の変位の点のそれぞれにおいて、原点との割線勾配を剛性とし、等価固有周期を算定し逆数をとった。解析値は4.1節に従い同様に求めた。全般に弾性時はRC架構降伏時に比較して1.5倍以上である。試験体BS, BHは、弾性固有振動数が解析値とほぼ一致している。RC架構降伏時の固有振動数は実験値が解析値より高い傾向にあるが、強度において解析値は低い評価を与えるためである。試験体BH2で、弾性固有振動数は実験値が解析値を大きく下回るが、これはRC架構が応力履歴を受けたことによる剛性低下に起因する。試験体BSの実験値を実橋脚に換算すると、弾性時で4.2Hz、架構降伏時で2.5Hzである。一般的に用いられる高架橋の架構降伏時の固有振動数が1.5~2.0Hz程度であることと比べ高剛性化が図られていることがわかる。

4.3 諸強度とじん性

実験結果の一覧をTable 4に示す。

4.3.1 ダンパーの降伏荷重 各試験体の実験値の解析値に対する比は1.07~1.33の範囲にある。同比は試験体BSでは1.33で高い傾向にあるが、測定間隔がやや粗かったこととダンパー材のパネル横一列が全て降伏した点を採用したためと考えられる。

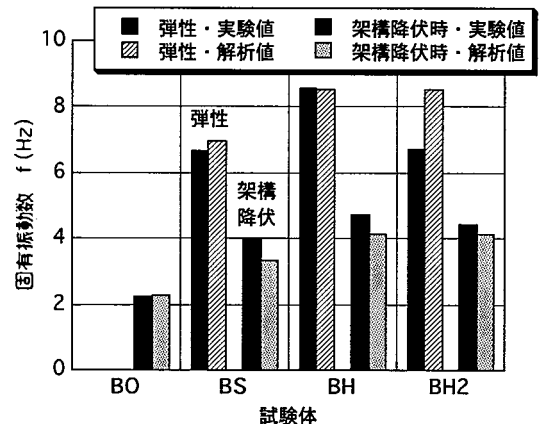


Fig. 8 固有振動数の比較
Comparison of Natural Frequency

4.3.2 RC架構の降伏荷重 実験値の計算値に対する比は、試験体BOが1.08, 1.04でほぼ解析値と一致するのに対し、試験体BS, BHは1.37~1.60で相当大きい。この理由としては、ダンパーの繰返し載荷による強度の上昇²⁾、またスチフナーによるウェブの拘束の影響があることなどが考えられる。試験体BH2の同比は、正側1.19、負側1.29で試験体BS, BHよりやや低いが、これはダンパーの強度上昇がRC架構の応力履歴による強度低下と相殺されるためである。

4.3.3 最大荷重 試験体BOは、実験値の解析値に対する比は0.95, 1.03で精度よく評価できた。試験体BS, BH2では同比は1.26~1.40で大きい。やはり前述の要因が原因である。最大荷重はダンパーの耐力上昇が著しいのでRC架構の強度低下は同比に反映されなかった。

Table 4 実験結果の一覧
Test Results

試験体	載荷方向	ダンパー降伏時 ¹⁾				RC架構降伏時 ²⁾				最大荷重時			終局変位時 ³⁾			破壊形態
		荷重			変位 δy mm	荷重			変位 δy mm	荷重			変位 δu mm	部材角 θ Rad.	じん性率 μ	
		実験値 Hby kN	解析値 Hby.a kN	実/解		実験値 Py kN	解析値 Py.c kN	実/解		実験値 Pmax kN	解析値 Pmax.c kN	実/解				
BO	正	/	/	/	/	140	130	1.08	19.5	156	152	1.03	97.5	1/23	5	柱の曲げ圧壊
	負	/	/	/	/	135		1.04		145		0.95	78.0	1/28	4	
BS	正	224	169	1.33	3.8	418	279	1.50	19.5	576	412	1.40	117.0	1/19	6	ウェブ破断後の柱の曲げ圧壊
	負	/	/	/	/	446		1.60		570		1.38	97.5	1/23	5	
BH	正	341	308	1.11	3.5	583	427	1.37	19.5	832	661	1.26	/	/	/	破壊前に終了
	負	/	/	/	/	633		1.48		846		1.28	/	/	/	
(BH2)	正	329	308	1.07	5.5	509	427	1.19	19.5	876	661	1.32	117.0	1/19	6	ウェブ破断後の柱の曲げ圧壊
	負	/	/	/	/	549		1.29		873		1.32	117.0	1/19	6	

*1) ウェブの横一列がすべて降伏した点. *2) 柱上下のすべての最外縁主筋が降伏した点. *3) 降伏荷重まで荷重が低下した点.

4.3.4 終局変位とじん性 終局変位は、RC架構降伏荷重を下回る点での変位で定義する。試験体BOはじん性率4～5（部材角で1/29～1/23）程度なのに対し、試験体BS, BH2はじん性率5～6（同1/23～19）を確保し、Fig.4に示した必要じん性率を確保し、さらに高い変形性能を示した。

5. 考察

5.1 ダンパーの挙動

ダンパーに作用するせん断力 (Hb) とせん断変形 (δrs) の関係の例をFig. 9に示す。ダンパーに作用する荷重は、ブレース (弾性範囲内で挙動) で測定したひずみから、ブレースに発生した曲げモーメント、せん断力および軸力を求めて算出した。図中の解析値は4.1節に従った。

鋼材特有のエネルギー吸収の大きな紡錘型の履歴となっているが、ウェブ破断が発生する4 δy以降は逆S型の履歴となる。また繰返しにより荷重が増大し解析値を大きく上回っている。原因として提案モデル²⁾による解析値は単調載荷モデルで、繰返しを評価していないことが挙げられるため、加藤らの累加経験則⁵⁾により、繰返しによる強度の上昇を単調載荷として評価した補正実験値をFig. 9中に併せて示し比較した。補正実験値はやはり解析値よりも高い傾向にある。理由としては、実際にはウェブの補剛版 (フランジ, スチフナー) の拘束によりウェブが一様に降伏しないのに対して、解析上はウェブが一様にせん断降伏することを前提としていることなどが考えられる。設計法を提案する上で今後の課題である。

5.2 RC架構の挙動

RC架構の受け持つ水平力 (Prc) と水平変位 (δ) の関係の例をFig. 10に示す。Prcは外力 (P) からダンパー材の受け持つ水平力 (Hb) を差し引いて求めた。図中、降

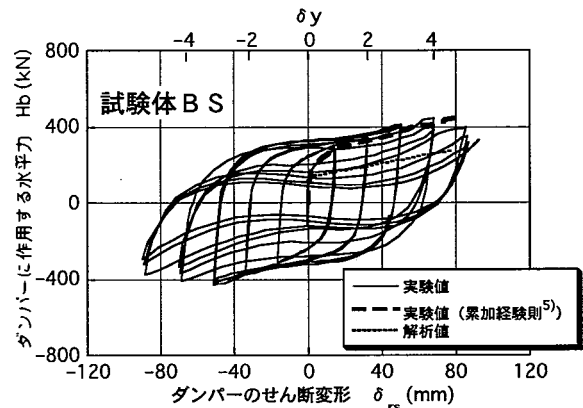


Fig. 9 ダンパーのせん断力とせん断変形の関係
Shear Force- Shear Displacement Relationship of Damper

伏線とは次式に従い、降伏荷重を固定し鉛直力の変動による二次曲げの影響を補正した値である。

$$P_y' = P_y - \frac{(N_0 + V_b - V_{by}) \cdot (\delta - \delta_y)}{H}$$

ここに、

P_y' : 降伏荷重の補正值

P_y : 降伏荷重, N₀ : 初期軸力

V_b : ブレース・ダンパーの鉛直力
(ブレースのひずみから算出)

V_{by} : 降伏荷重時のブレース・ダンパーの鉛直力

δ : 水平変位, δ_y : 降伏変位

H : 荷重の作用高さ (2400mm)。

履歴を見る限り、試験体BSのRC架構はじん性が低い印象を受けるが、降伏線で評価すると5 δyを確保しているのがわかる。従って、試験体BSのRC架構は試験体BOと同程度のじん性を保有すると評価できる。このように、軸力の増大による二次曲げの影響でRC架構の負

担荷重は減少するが、その理由は、主筋降伏後繰返しによりRC柱が軸方向に伸びること、大変位領域では幾何変形によりダンパー長さが短くなるのが考えられる⁶⁾。

また $3\delta y$ までは、RC架構の耐力低下はなく、ブレース・ダンパーとの重ね合わせが成立する。

5.3 エネルギー吸収性能

各サイクルでの等価減衰定数をFig. 11に示す。等価減衰定数は、全体に正負加力で同様の性状を示し、RC架構のみの試験体B0は、塑性率6~7まで全体に上昇する傾向を示すのに対し、ダンパーを取り付けた試験体BS、BH2は、塑性率4程度まで高く、この付近でダンパーのウェブが破断した後はRC架構と同程度まで低下し、塑性率6では逆に低くなる。ダンパーの履歴が紡錘型から逆S型に変わっていくことと整合する。

6. まとめ

鋼製ダンパー・ブレースを有するRC架構において正負交番載荷試験を実施し、結果を既往の評価式などを用い検討した。主な結果を以下に述べる。

- 1) 弾性~架構降伏の領域では高剛性化による走行安全性を確保し、大変位領域では高減衰による高耐震性能を確保する設計が可能である。
- 2) ダンパーウェブのせん断降伏→塑性座屈→破断の後、RC架構の柱主筋が座屈し破壊に至る。
- 3) 全体架構は高い減衰性能を有する履歴を示し、ウェブの破断により履歴性状が紡錘型から逆S型に変化する。
- 4) 全体架構の弾性剛性は、RC架構とダンパー・ブレースの弾性計算値の重ね合わせにより精度よく評価できる。
- 5) 全体架構の荷重と変位の関係は、RC架構をファイバーモデルによる非線形解析で、ダンパー・ブレースを単調載荷モデルの提案式によりそれぞれ評価し、重ね合わせるにより安全側に評価できる。
- 6) RC架構とダンパー・ブレースの各挙動は、 $3\delta y$ 程度まで相互作用が比較的少なく重ね合わせが成立する。
- 7) ダンパー・ブレースを有するRC架構におけるRC架構は、RC架構単独の場合と同程度のじん性能を保有する。
- 8) ダンパーの取替えにより全体架構の耐震性能は回復する。

今後、ダンパーのせん断降伏後の耐力上昇の評価、終局に至る軸力変動の把握及びこれらを考慮した設計方法の立案にむけて検討を進めたい。

謝辞

本研究は財団法人鉄道総合技術研究所との共同研究により実施しました。また低降伏点鋼材は新日鐵よりご提供いただきました。関係各位に深謝いたします。

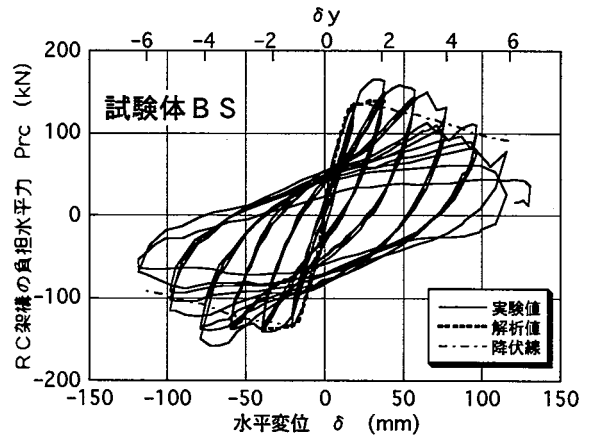


Fig. 10 RC架構の荷重と変位の関係
Load-Displacement Relationship of RC Frame

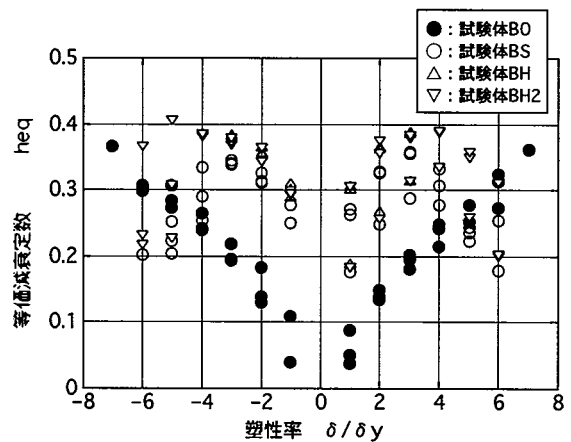


Fig. 11 等価減衰定数
Equivalent Damping Constant

参考文献

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計 (案), 財団法人鉄道総合技術研究所, 平成10年11月
- 2) 高橋泰彦, 田中耕太郎: 偏心ブレースを利用した履歴減衰型制震ダンパーの実用化, 鋼構造論文集第4巻第14号 1997.6
- 3) 勝俣英雄, 関松太郎, 隈沢文俊, 岡田恒男: 既存鉄筋コンクリート造架構の靱性抵抗型鉄骨ブレースによる耐震補強, コンクリート工学年次論文報告集 11-2, pp.263-268, 1989.6
- 4) 石橋忠良, 吉野伸一: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形能力に関する研究, 土木学会論文集, 第390号/V-8, pp.57~66, 1988.2.
- 5) BEN KATO: Beam-To-Column Connection Research In Japan, Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 108, No. ST2, pp.343-360, 1982.2
- 6) 松本信之, 岡野素之, 在田浩之, 曾我部正道, 涌井一, 大内一, 高橋泰彦: 鋼製ダンパー・ブレースを有するRC鉄道高架橋の耐震性能, 土木学会構造工学論文集 Vol.45A, pp.1411-1422 1999.3