

2 の間で摩擦力が発生する仕組である。高摩擦材にはトラック用のブレーキパッドを用いた。部材 2 の摩擦面は、焼付き等の損傷を防止するため研磨仕上げとした。

2.2 摩擦ダンパーの性能確認実験

摩擦ダンパーの適用実験の予備実験として、摩擦ダンパー単体の摩擦力を測定した。図-3 に示すように、PC 鋼棒により摩擦ダンパーを緊張した状態で、圧縮試験機を用いて中央部鋼材に鉛直荷重を作用した。実験パラメータは PC 鋼棒 3 本の合計緊張力（以下、初期緊張力 T_0 ）とし、 $T_0=300, 600, 900, 1200, 1500, 1800$ kN の計 6 ケースを考慮した。尚、PC 鋼棒の緊張力は鋼棒に貼り付けた歪ゲージにより計測した。鉛直荷重の载荷履歴は中央の鋼材の鉛直変位により制御し、鉛直変位が 10mm 進行するごとに除荷、再载荷を 3 度繰り返し、30mm の時点で終了とした。写真-2 は実際の性能確認実験の様子である。

図-4 に実験結果を示す。载荷初期ではダンパーの性能が若干ばらついたが、20~30mm の载荷時にはおよそ安定した性能が得られたことを確認できる。そこで、鉛

直変位 20~30mm の区間における緊張力および摩擦力の平均値をそれぞれ実緊張力（以下、 T ）、 T 作用下における摩擦力と定義した。図-5 には摩擦力と T の関係を示す。 T におよそ比例して摩擦力が增大していることが確認できる。これらの関係から得られる各 T における摩擦係数（=摩擦力/ T ）の平均値は約 0.27 であった。尚、実験開始時と終了時の緊張力を比較すると若干の低下が見られ、変動幅は $T_0=300$ kN の場合に 8% 程度であったが、他は 5% 未満であった。

3. 摩擦ダンパーの適用実験の計画

3.1 試験体

図-6, 7, 表-1 に開発した摩擦ダンパーの適用対象である PC 梁の試験体詳細を示す。試験体は 11 階建てフル PC 建物の設計例²⁾の 2 階床位置のアンボンド PC 梁を 1/2 に縮小した半スパン模型である。スタブとの接合部分では、部材軸方向の普通鉄筋がカットオフされているため、PC 鋼棒のみで圧着されている。ただし、本試験体は摩擦ダンパーの性能確認を主目的とし、繰り返し使用する

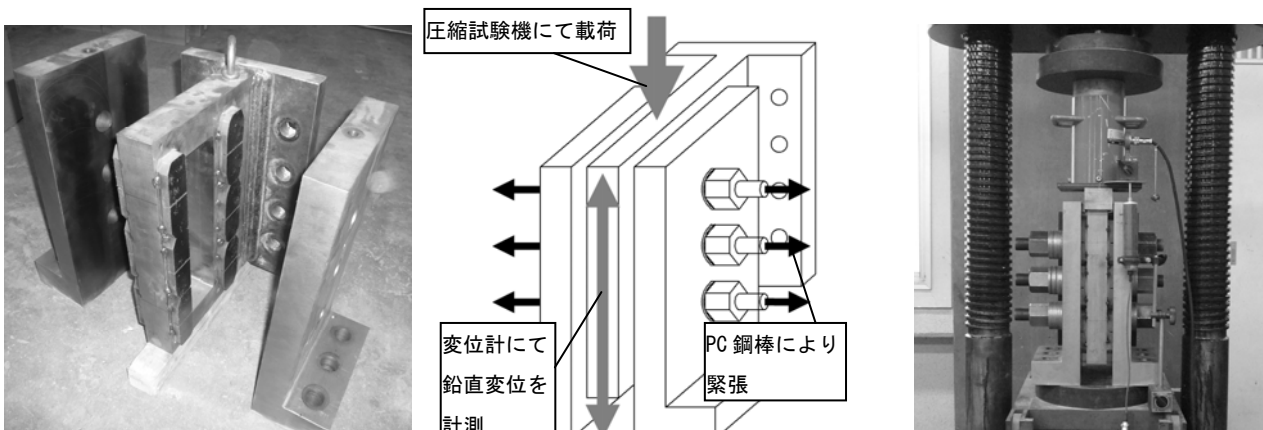


写真-1 摩擦ダンパー

図-3 性能確認実験の概要

写真-2 性能確認実験の様子

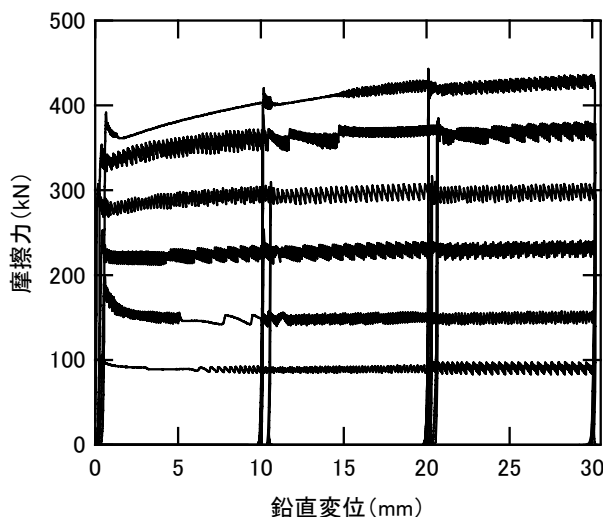


図-4 性能確認実験結果（摩擦力ー鉛直変位関係）

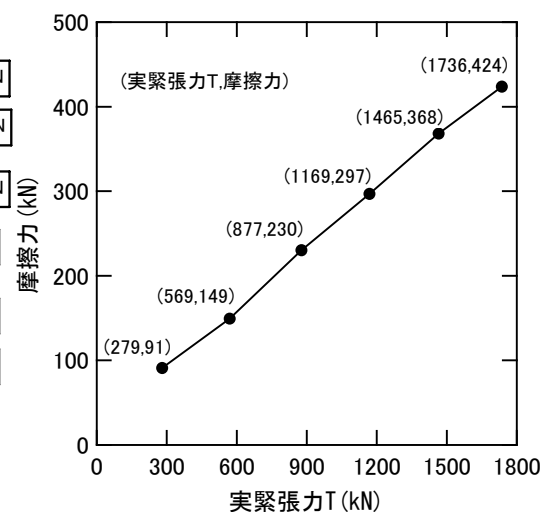


図-5 性能確認実験結果（摩擦力ー実緊張力 T 関係）

ることも想定して、試験体外周に鋼管を巻きつけて補強し損傷を軽減する計画とした。尚、図-1, 2で示した摩擦ダンパーの部材1をM24の高力ボルト計8本（片側4本）で梁に固定、部材2を計6本（片側3本）でスタブに固定できるように設計した。写真-3, 4に摩擦ダンパーを取り付けた試験体を示す。

3.2 計測計画

図-8に変位計測位置を、図-9に歪ゲージ貼付位置を示す。図-8中の両矢印は試験体に設置したインサート間の相対変位、片矢印はスタブからの絶対変位を示す。試験体の水平、鉛直変位に加え、摩擦ダンパー（図-1, 2の部材1）の変位を測定する計画とした。PC鋼棒の歪度は鋼棒の長さ中央、梁とスタブの境界位置で計測した。

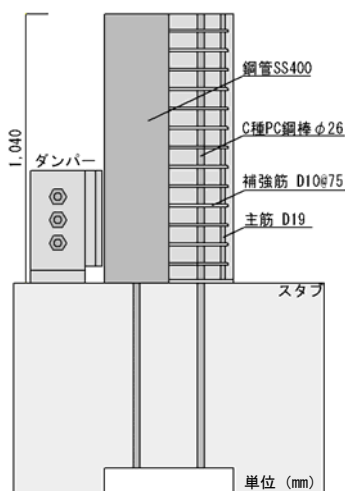


図-6 試験体立面図

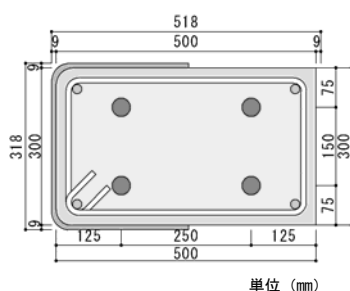


図-7 試験体断面図



写真-3 試験体

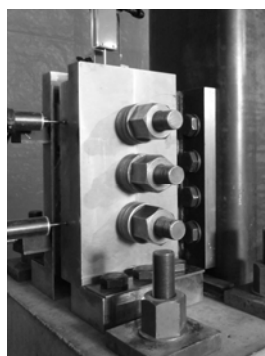


写真-4 摩擦ダンパー取付部

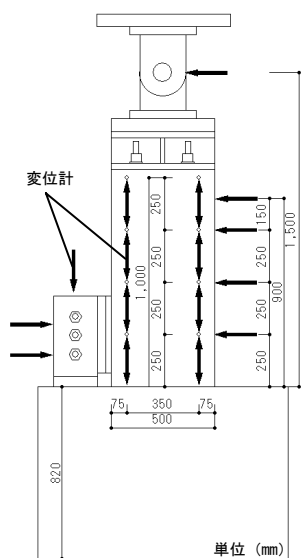


図-8 変位計位置

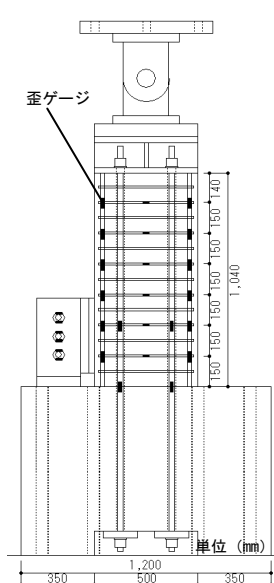


図-9 歪ゲージ貼付位置

表-1 試験体構造詳細・材料試験結果

梁	断面 b×D	300×500 mm
	設計基準強度	50 N/mm ²
	主筋	SD295, D19
	横補強筋	SD295, D10@75
P C	本数-径	4-φ26
	P _N	400 kN
	P _y , (P _N /P _y)	647 kN, (0.62)
鋼管	材質	SS400
	隅角部半径	30 mm
	厚さ	9 mm
コンクリート	材齢	76 日
	σ _B , σ _t	53.6, 3.5 N/mm ²

※ここで P_N: 導入軸力, P_y: 降伏荷重
σ_B: 圧縮強度, σ_t: 引張強度

表-2 载荷履歴

N	R	T ₀	C	N	R	T ₀	C
1	1/800	0	(1)	6	1/50	0	(1), (2)
2	1/400	0	(1), (2)			300	(3)
3	1/200	0	(1), (2)			600	(4)
		300	(3)			1200	(5)
		600	(4)			0	(6)
		1200	(5)	7	1/33	0	(1), (2)
0	(6)	300	(3)				
0	(1), (2)	600	(4)				
300	(3)	1200	(5)				
600	(4)	0	(6)				
4	1/100	1200	(5)	8	1/25	0	(1), (2)
		0	(6)			300	(3)
		0	(1), (2)			600	(4)
		300	(3)			1200	(5)
5	1/67	600	(4)	0	(6)		
		1200	(5)	0	(1), (2)		
		0	(6)	300	(3)		
		0	(1), (2)	600	(4)		
		300	(3)	9	1/20	1200	(5)
		600	(4)			0	(6)
		1200	(5)				
		0	(6)				
※ここで、							
N: 載荷順序, R: 変形角 (rad.).							
T ₀ : 初期緊張力 (kN), C: サイクル名							

3.3 荷重計画

実験で用いた荷重装置を図-10に示す。同図に示すように、梁試験体を鉛直に設置し、梁端部にピンを取り付け、スタブとピンを荷重装置に固定した。荷重は軸力を作用しない状態を維持しながら、正負交番で水平力を作用した。水平荷重は梁とスタブの境界からの高さ 1500 mm 位置（ピン中心）での水平変位により制御し、荷重履歴は表-2に示す通りである。表-2中の荷重順序に従い、 T_0 をパラメータとして変形角（以下、 R ）1/800～1/20 rad.の範囲で荷重を行った。 T_0 の導入は、直前のサイクルの負荷荷重後（除荷時）とした。

4. 実験結果と考察

4.1 鋼管補強 PC 梁の挙動

(1) 実験経過

図-11に摩擦ダンパーを適用しない（ $T_0=0$ ）サイクルの荷重変形関係を示す。 $R=1/200$ のサイクルで初期剛性の低下を示した（図中○）。 $R=1/33$ のサイクルで試験体内 PC 鋼棒の降伏を確認した（図中△）。その後、 $R=1/20$ まで耐力低下することなく安定した履歴を描いた。

(2) 耐力評価

初期剛性低下時および曲げ降伏時の耐力を算定する。ただし、試験体断面は長方形断面（厚さ 9mm の鋼管を外周に有する 500×300 mm のコンクリート断面）を仮定して略算した。

初期剛性低下時は、本 PC 梁試験体において引張縁の離間開始時である。離間開始時の耐力 M_1 は下式より算出した。

$$M_1 = \frac{P_e}{A} \cdot Z \quad (1)$$

ここで、 P_e ：有効プレストレス力、 A ：梁断面積、 Z ：梁断面係数である（ A 、 Z ともに鋼管を考慮）。

曲げ降伏耐力 M_2 は、引張側 PC 鋼棒降伏時の耐力と定

義し、以下の手順により算出した。

- I. PC 鋼棒の緊張力導入による鋼棒の引張歪度 ε_{p0} （以下、すべて引張を正とする）、梁の圧縮歪度 ε_{c0} を求める。
- II. 緊張力導入後は梁とスタブの境界が平面保持すると仮定し、曲げ降伏時（引張側 PC 鋼棒の引張歪度 = ε_y のとき）の歪度分布を図-12のように想定する。ここで、 D ：コンクリート部分の全せい、 t ：鋼管の板厚である。
- III. 圧縮縁から歪が ε_{c0} となる位置までの距離（以下、回転軸と称す） x_r を未知数として、圧縮側 PC 鋼棒の歪度増分 ε_{pc} 、コンクリートの圧縮縁の歪度増分 ε_c 、鋼管の増分歪度 ε_s を幾何学的に求め、各部の負担力を計算する。
- IV. 式(2)を満足する x_r を求め、式(3)により曲げ耐力を算定する。

$$N_y + N_p + N_c + N_s = 0 \quad (2)$$

ここで、 N_y ：引張側 PC 鋼棒の降伏荷重、 N_p ：圧縮側 PC 鋼棒の負担（引張）力、 N_c ：コンクリートの負担（圧縮）力、 N_s ：鋼管の負担（圧縮）力である。尚、コンクリート、鋼管ともに応力分布を線形分布と仮定した。

$$M_2 = N_y \cdot L_1 + N_p \cdot L_2 + N_c \cdot L_3 + N_s \cdot L_4 \quad (3)$$

ここで、 L_1 ：引張側 PC 鋼棒から回転軸位置までの距離、 L_2 ：圧縮側 PC 鋼棒から回転軸位置までの距離、 L_3 ：コンクリートが負担する圧縮力の重心位置から回転軸位置までの距離、 L_4 ：鋼管が負担する圧縮力の重心位置から回転軸位置までの距離である。

得られた M_1 、 M_2 を水平耐力に換算した結果を図-11に併せて示した。初期剛性低下時、曲げ降伏時ともに計算結果が実験結果に概ね対応することを確認した。ただし、 M_2 が実験値を上回った結果から、厳密には平面保持が成り立っていない可能性を指摘できる。

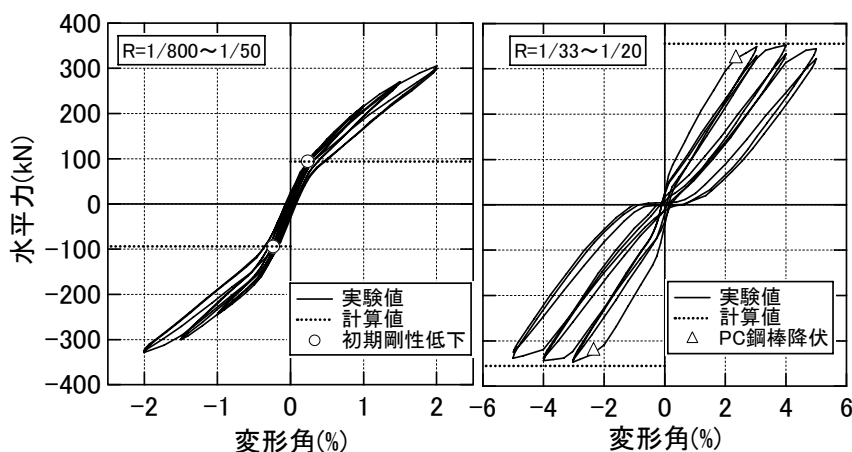


図-11 ダンパーなしの場合の荷重変形関係

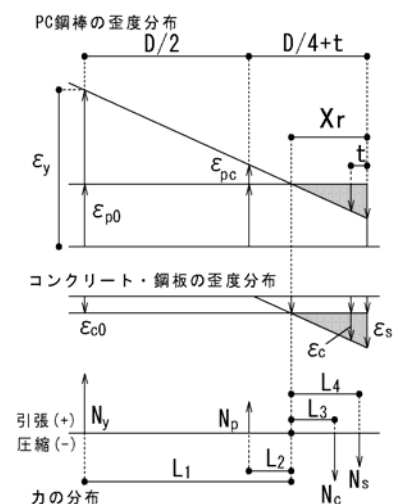


図-12 降伏時の歪分布

4.2 摩擦ダンパーの取り付け効果

(1) 荷重変形関係と等価減衰定数

図-13 に $R=1/200$, $1/20$ のサイクルにおける $T_0=0$ (2 サイクル目), 600, 1200 kN の場合の荷重変形関係を示し, 摩擦ダンパーの効果を確認する。ダンパーの適用により最大耐力, 履歴面積, 残留変形が増大すること, その効果は T_0 が大きいほど大きく, 载荷方向の正負側で非対称であることがわかる。続いて, 各サイクルにおける等価減衰定数 h_{eq} を図-14 に従い算出し, 図-15 に示す。ただし, 先述のように载荷方向によりダンパーの効果に差があるため, 正負それぞれで算出し, 同図にはその平均値を示した。はじめに $T_0=0$ kN の場合について, いずれのサイクルでも繰り返し载荷の影響により第 1 サイクルに比べ第 2 サイクルの h_{eq} は減少した。ただし, $R=1/200$ のサイクル以降におけるダンパー適用前後 (第 2, 第 6 サイクル) の h_{eq} はほぼ同様の値であり, 第 2~第 6 サイクルにかけての繰り返し载荷による劣化は大きくないと判断される。一方, ダンパーを適用した場合, $R=1/200$, $1/100$ のサイクルを除いて, T_0 の増大に伴い h_{eq} は増大した。 $R=1/200$, $1/100$ では, $T_0=1200$ kN の場合に, 履歴面積の増大が, 耐力増大による等価ポテンシャルエネルギー

の増大を下回った結果, h_{eq} が低下した。(図-13(a))。

(2) 载荷方向による耐力の差異について

図-13 より摩擦ダンパーの効果は正負非対称であることを確認した。ここではとくに耐力の差異について検討する。図-16 に, 試験体の軸方向に設置した変位計 (図-8) の計測値より算出した, 部材長さ方向の平均曲率分布の推移を示す。試験体はおよそ剛体回転していることがわかる。この結果に基づいて, ダンパーを取り付けた場合における耐力評価を前述の式 (2), (3) にダンパーの摩擦力 N_d を加えて以下の式 (4), (5) のように評価する。概要は図-17 に示すとおりである。

$$N_y + N_p + N_c + N_s + N_d = 0 \quad (4)$$

$$M_2 = N_y \cdot L_1 + N_p \cdot L_2 + N_c \cdot L_3 + N_s \cdot L_4 + N_d \cdot L_5 \quad (5)$$

ここで, L_5 : 摩擦ダンパーから回転軸位置までの距離である。

载荷方向によって L_5 に差が生じた結果, 正負の付加耐力に差が生じたと考えられる。式(5)を用いて, ダンパーの水平耐力寄与を算定し, ダンパーを適用した場合 ($T_0=600, 1200$ kN の場合) の試験体の耐力を評価した結果を図-13(b)に示す。試験体の耐力を $\pm 8\%$ 未満の精度で評価できたことを確認できる。

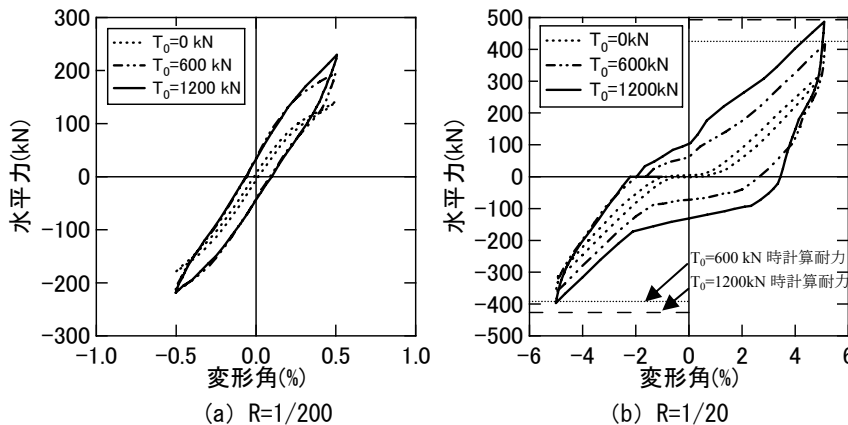


図-13 ダンパー適用の場合の荷重変形関係

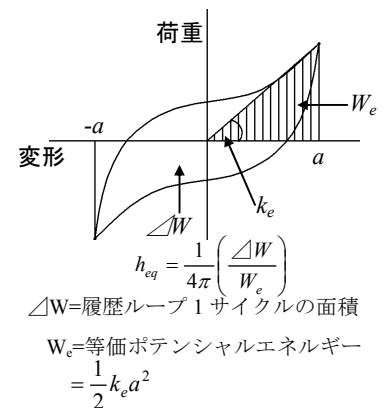


図-14 等価減衰定数の算出方法

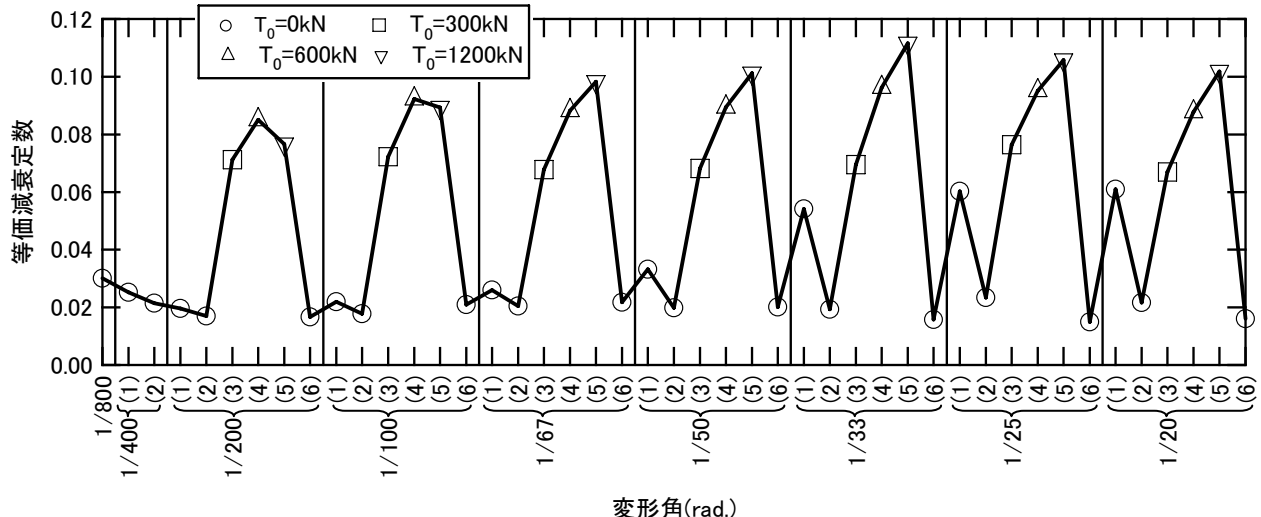


図-15 等価減衰定数

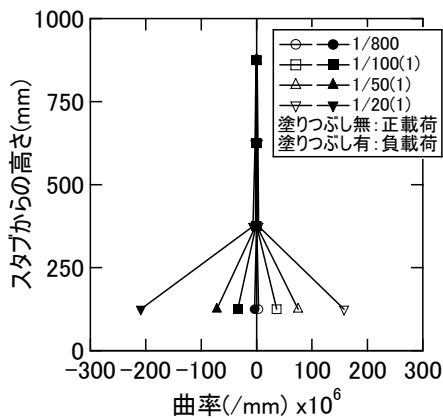


図-16 平均曲率分布

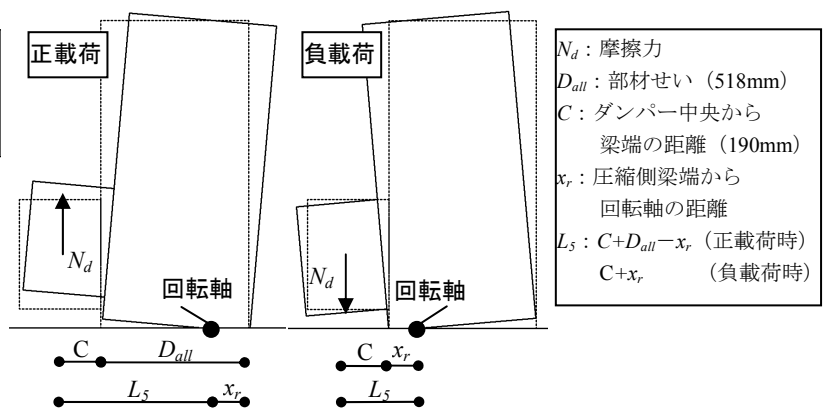


図-17 摩擦ダンパーによる付加耐力の算出概要

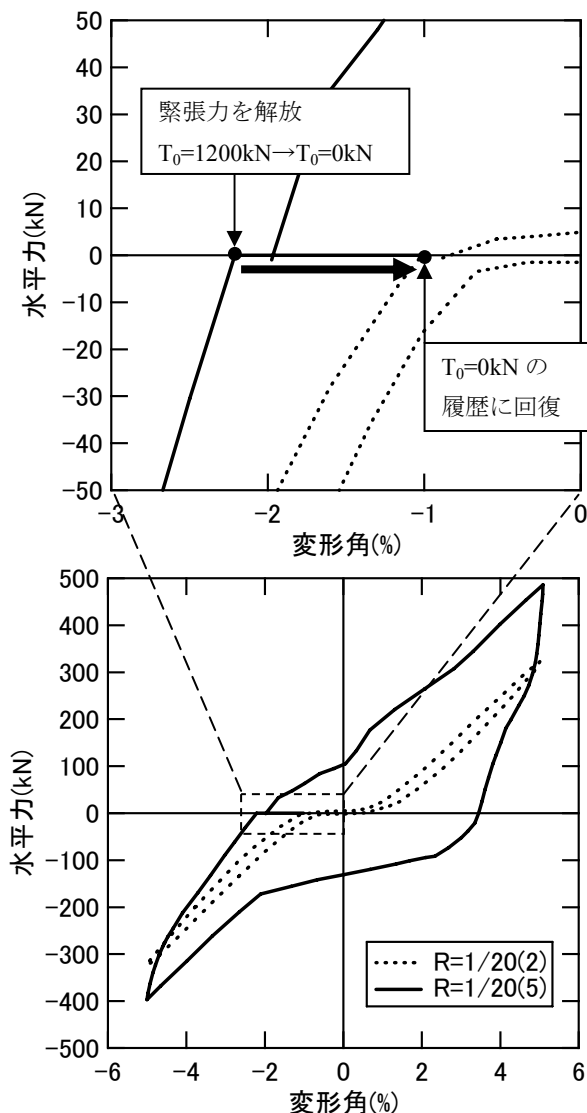


図-18 残留変形の挙動

(3) 残留変形

先述のように、摩擦ダンパー適用による負の効果として残留変形の増大を確認した。図-18に $R=1/20$ の第5

サイクル ($T_0=1200$ kN) 後におけるダンパーの緊張力解放時の挙動を示す。同図より、緊張力の解放により、ダンパー適用前の第2サイクル ($T_0=0$ kN) の履歴上に概ね回復することがわかる。すなわち、残留変形が生じるほどの大地震後にも、摩擦ダンパーの緊張力を一旦解放することにより、残留変形を摩擦ダンパーのない PC 構造の水準に復元できることを意味する。

5. まとめ

PC 構造のエネルギー吸収能力改善を目的に、摩擦ダンパーを開発した。ダンパーを PC 梁を想定した試験体の端部片側に取り付けた適用実験を実施した結果、以下の知見を得た。

1. ダンパーの適用により、部材のエネルギー吸収性能は増大した。ただし、その効果は正負非対称であり、ダンパーが引張側になるとき効果が大きい。
2. ダンパーの効果の非対称性は梁部材端部の回転軸の移動に起因し、ダンパーと回転軸の距離を評価することで、ダンパーの耐力寄与を評価できる。
3. ダンパーの適用により、梁の残留変形は増大した。ただし、残留変形はダンパーの緊張力を解放することにより解消できる。

参考文献

- 1) Brian G. Morgen and Yahya C. Kurama: A Friction Damper for Post-Tensioned Precast Concrete Moment Frames, PCI Journal, Vol. 49, No. 4, pp. 112-133, Jul.-Aug. 2004
- 2) 日本建築学会：PC 構造研究の現状，新 PC 基準へ向けての活動及びプレストレス技術を有効利用した建物例，2007.8
- 3) 柴田明徳：最新建築学シリーズ 最新耐震構造解析 第2版，森北出版株式会社，1981.6