

摩擦ダンパーを端部に装着したアンボンドPC梁の性能評価実験

豊橋技術科学大学大学院工学研究科
豊橋技術科学大学大学院工学研究科 修(工)
豊橋技術科学大学大学院工学研究科 博(工) 正会員

○杉浦 弘樹
佐島 悠太
真田 靖士

Abstract : The authors developed a friction damper for improving the energy dissipation capacity of prestressed concrete structures in their previous experimental study. The damper was applied to an unbonded prestressed concrete beam specimen in this study. Comparing the test results from two specimens with/without the damper, the following conclusions were obtained. (1) The maximum strength, area of hysteresis loop, and residual deformation increased by applying the damper. (2) The strengths of specimens were approximately simulated by bending analyses considering with/without the damper.

Key words : Energy dissipation device, Performance evaluation, Bending analysis, Prestressed concrete

1. はじめに

プレストレストコンクリート(以下、PC)造は、その高い復元力特性から、大地震後の建物の継続使用性が期待できる。一方でエネルギー吸収能力が低く、地震時の変形が大きくなる耐震性能上の欠点がある。エネルギー吸収性能を改善する方法例として、異らの座屈抑制用鞘鋼管付き普通鉄筋を外付けダンパーデバイスとして用いる方法がある¹⁾。普通鉄筋の塑性化を利用し、PC構造特有の高復元性とエネルギー吸収能力向上を報告している。しかし、この方法は地震後に塑性化した部材の交換が必要となる。一方で、海外を中心に実施された近年の研究^{2), 3)}では、部品交換の不要な摩擦ダンパーを用いる手法が提案されている。筆者らは、わが国における同様の研究事例が少ないことから、エネルギー吸収能力を向上するための摩擦ダンパーを開発し、鋼管補強PC梁への適用実験を通して、その有効性を確認した⁴⁾。

上記の通り、文献4) では梁の損傷を意図的に抑制するため、鋼管補強した特殊なPC梁を用いた。そこで、本研究では実用化に向け一般のPC梁へ摩擦ダンパーを適用し、ダンパーの有無をパラメータとするPC梁試験体の静的載荷実験を行い、ダンパーの効果を荷重変形関係、損傷状況などに着目して検証した。さらにダンパーの有無をパラメータとした曲げ解析を行い、実験結果との整合を比較、検討した。

2. 実験計画

2.1 摩擦ダンパー概要

摩擦ダンパーの詳細を図-1に示す。部材1に高摩擦材を溶接により固定し、3本のPC鋼棒(φ32)を用いて部材1, 2間に圧縮力を導入して一体化する。部材1が移動する際に、高摩擦材と部材2の間で摩擦力が発生する仕組みである。文献4)より本ダンパーの摩擦係数は0.27である。

2.2 試験体概要

図-2, 表-1, 2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、使用材料の特性をそれぞれ示す。試験体は11階建てフルPC建物の設計例⁵⁾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2体であり、実験パラメータはダンパー適用の有無である。梁はスタブとの接合部分で軸方向の普通鉄筋がカットオフされており、15mmの目地を介して圧着されている。シース管はφ38の径を用いた。試験体1体には、梁端部とスタブにダンパーを取り付けるための異形インサートと差し筋を設けた。異形インサートは、図-1で示した部材1をM24の高力ボルト計8本(片側4本)で梁に、部材2を計6本(片側3本)でスタブにそれぞれ固定できるように配置した。尚、導入緊張力 P_N は実験開始直前に導入した。

2.3 荷重計画

実験で用いた荷重装置を図-3に示す。同図に示すように、梁試験体を鉛直に設置し、試験体上端にピンを取り付け、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、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1500mm位置(ピン中心)での水平変位により制御した。変形角(以降, R)=1/800(rad.)を1回, R=1/400, 1/200, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33, 1/25, 1/20(rad.)を2回ずつ、繰り返し荷重を行った。

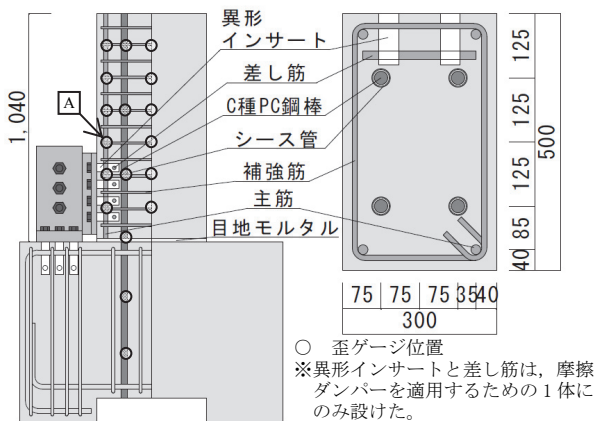


図-2 試験体断面

表-1 梁断面詳細

断面(b×D)	300×500mm
設計基準強度	50N/mm ²
主筋	SD345, 4-D19
補強筋	SD345, D10@75 (p _w =0.63%)
PC鋼棒	C種 4-φ26

表-2 材料特性一覧

コンクリート	試験体 (ダンパー適用の有無)	E _c (×10 ⁴ N/mm ²)	f _c (N/mm ²)	f _t (N/mm ²)	ε _c (μ)
		非適用	3.59	52.9	3.9
	適用	3.71	51.0	3.5	2258
モルタル	非適用時		76.4		
	適用時		72.7		
鉄筋	呼び径	E _s (×10 ⁵ N/mm ²)	σ _y (N/mm ²)	f _t (N/mm ²)	ε _y (μ)
	D10	1.88	355.2	476.2	1889
	D19	1.87	368.1	551.8	1968
PC鋼棒	種類	P _N (kN)	E _{pc} (×10 ⁵ N/mm ²)	σ _y (N/mm ²)	ε _y (μ)
	C種	400	2.0	1218	6090

表-1, 2の記号を以下にまとめて示す。

p_w:せん断補強筋比, E_{pc(c,s)}:弾性係数, f_c:圧縮強度, f_t:引張強度, ε_c:圧縮強度時歪度, σ_y:降伏応力度, ε_y:降伏歪度, P_N:導入緊張力

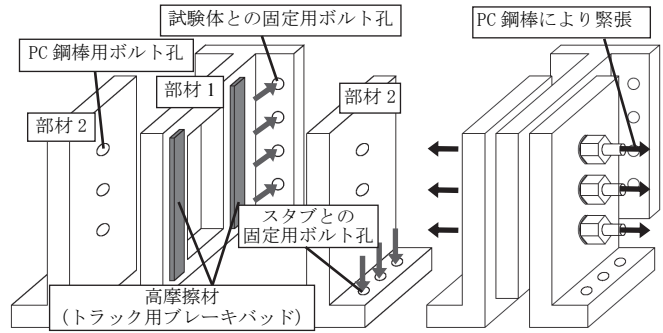


図-1 摩擦ダンパー詳細

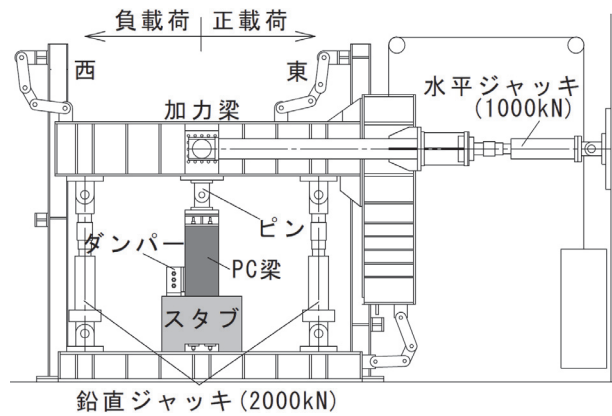


図-3 荷重装置

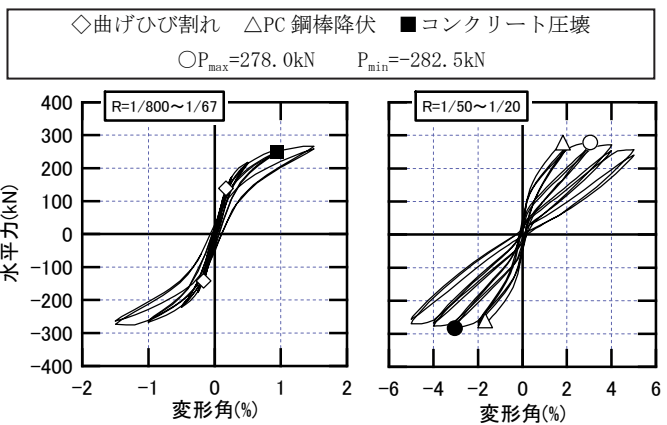


図-4 荷重変形関係(ダンパー非適用時)

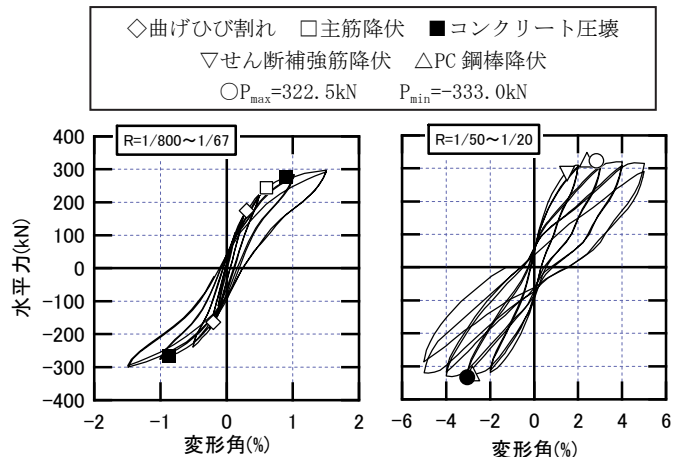


図-5 荷重変形関係(ダンパー適用時)

2.4 ダンパーの摩擦力の設定

ダンパーの摩擦力は、梁断面の側方に位置する普通鉄筋2本の降伏荷重(=211kN)の約50%(=100kN)に設定した。摩擦係数に基づいてダンパーの緊張力を算定し、ダンパーに400kNの緊張力を導入した。尚、緊張力の導入は実験開始直前に行い、実験中の再緊張は行わなかった。

3. 実験結果

3.1 破壊経過と荷重変形関係

摩擦ダンパー非適用時(図-4), $R=1/400$ (0.25%)のサイクルで、梁とスタブの圧着部目地と梁端部に曲げひび割れを確認した(図中◇)。 $R=1/100$ (1%)でコンクリートの圧壊(図中■), $R=1/50$ (2%)でPC鋼棒の降伏を確認した(図中△)。 $R=1/20$ (5%)まで顕著な耐力低下を生じることなく安定した履歴を描いた。

摩擦ダンパー適用時(図-5), $R=1/400$ (0.25%)にてダンパー(図-1の部材1)最上部異形インサート位置に曲げひび割れを初観測し, $R=1/200$ (0.5%)にて圧着部目地に曲げひび割れを確認した(図中◇)。 $R=1/100$ (1%)の正載荷時には引張側普通鉄筋の降伏を図-2中A点の歪ゲージで確認した(図中□)。このとき, A点から高さ±150mm位置の歪はそれぞれ降伏歪の約40%, 約70%であった。また, 同変形角でコンクリートの圧壊を観測した(図中■)。 $R=1/50$ (2%)でせん断補強筋の降伏を(図中▽), $R=1/33$ (3%)でPC鋼棒の降伏を確認した(図中△)。その後, ダンパー非適用時と同様安定した履歴を描いた。ダンパー適用によって, 最大耐力, 履歴面積, 残留変形の増大を確認した。

3.2 主筋の挙動

摩擦ダンパー適用時, ダンパー取り付け面より上部の梁主筋を降伏させないため, 摩擦力を主筋の降伏荷重以下に設定したが図-2中A点で降伏が生じた。ここで, 各サイクル正載荷ピーク時, 同位置の主筋歪度の推

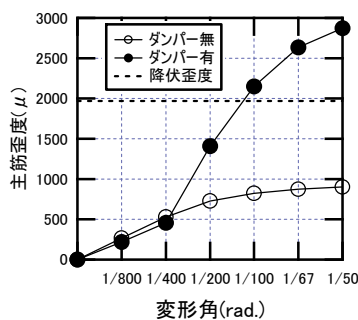
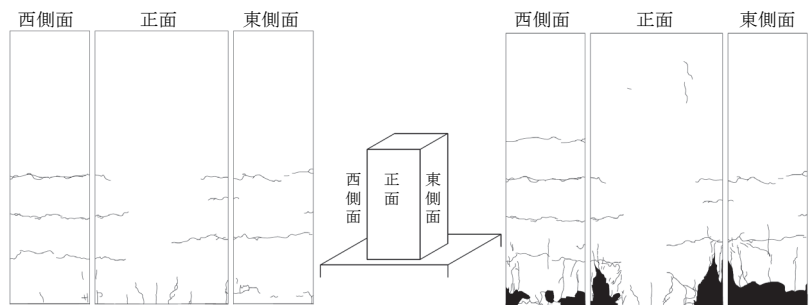
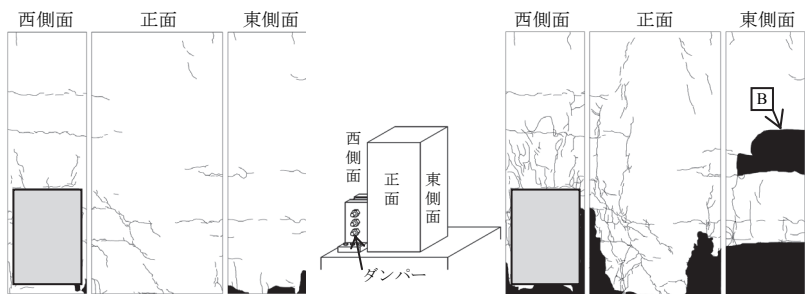


図-6 主筋歪度の推移



(a) ダンパー非適用時



(b) ダンパー適用時 □ ダンパー取り付け位置

図-7 ひび割れ図(左: 1/100, 右: 1/20)

表-3 目視で観察された損傷の推移

変形角	摩擦ダンパー非適用時	摩擦ダンパー適用時
1/800	・ 損傷なし	・ 損傷なし
1/400	・ 圧着部目地と梁端部に曲げひび割れ発生	・ ダンパー(図-1の部材1)最上部異形インサート位置に曲げひび割れ発生
1/200	・ 圧着部から縦ひび割れ発生	・ 圧着部目地の曲げひび割れ発生およびダンパー(図-1の部材1)周辺の曲げひび割れ増加
1/100	・ 縦ひび割れの進展 ・ 圧縮側コンクリートの圧壊開始	・ 圧着部, ダンパー(図-1の部材1)上部に縦ひび割れ発生 ・ 圧着部, 圧縮側コンクリートの圧壊および剥落開始
1/67	・ 圧縮側圧着部でコンクリートの剥離	・ サイクルが進むごとにひび割れが増加, 進展 ・ 損傷はダンパー取り付け位置および圧着部に集中 ・ 残留ひび割れの増大 ・ 図-7中Bの剥落は, $R=1/33$ の正載荷時, ダンパーの拘束効果によるダンパー上部のコンクリート圧壊に起因する ・ 目地モルタルに大きな損傷は見られなかった
1/50	・ サイクルが進むごとにコンクリートの剥離が進展	
1/33	・ 損傷は圧着部圧縮側に集中	
1/25	・ 損傷は圧着部圧縮側に集中	
1/20	・ 圧着部目地の残留ひび割れの増大 ・ 目地モルタルに大きな損傷は見られなかった	

移を図-6に示す。摩擦ダンパー非適用時でも歪度が増加したことが確認できる。主筋が梁端部でカットオフされているにも関わらず、トラス機構の形成により引張を受けたものと推察される。摩擦ダンパーの適用に際して主筋の降伏を回避するには、摩擦ダンパー非適用時の主筋の歪度増分を考慮する必要がある。また、ダンパー適用時の $R=1/200$ で歪が急増している。これは、変形角が進むにつれてダンパー固定用ボルト孔のクリアランスが解消され、 $R=1/200$ にて初めてダンパーの効果が得られたことを示している。

3.3 ひび割れ状況

表-3に両試験体の目視で観察された損傷の推移を、図-7にひび割れ状況(摩擦ダンパー適用時に主筋の初降伏を観測した $R=1/100$, 最終ひび割れ状況である $R=1/20$ のとき)を示す。 $R=1/800$ では両試験体ともに損傷は生じなかった。 $R=1/400$ に両試験体で観察された曲げひび割れは、プレストレス力により除荷時には閉じた。コンクリートの圧壊は、いずれも $R=1/100$ で初めて観測されたが、コンクリートの剥落については、ダンパー非適用時は $R=1/67$, 適用時には $R=1/100$ と違いがみられた。図-7(b)中Bの剥落は $R=1/33$ の

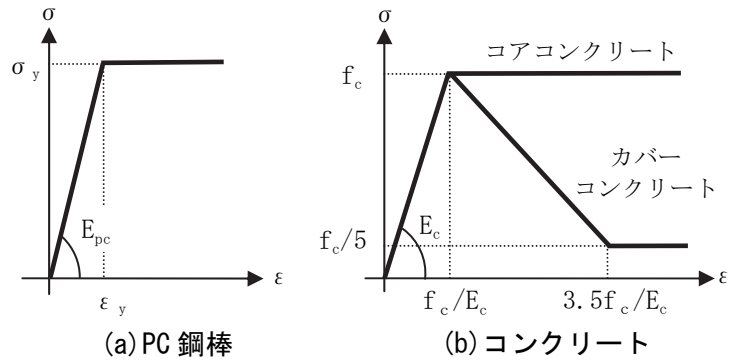


図-8 材料特性

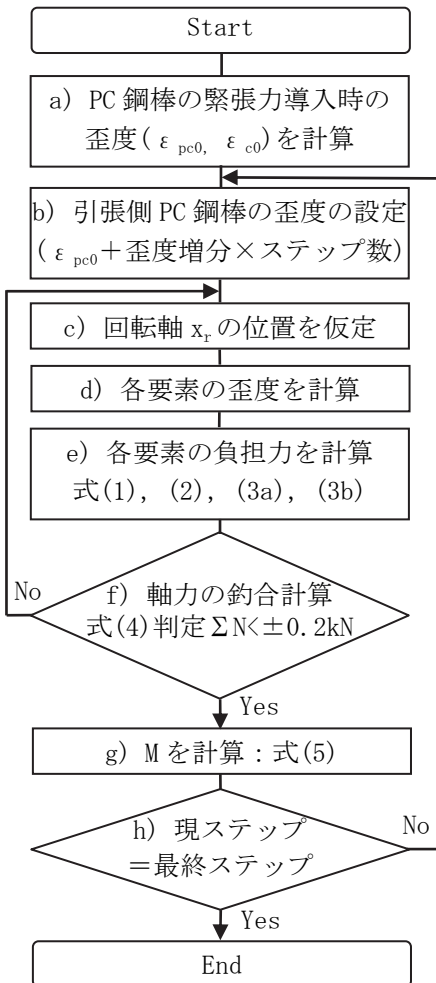


図-9 解析フロー

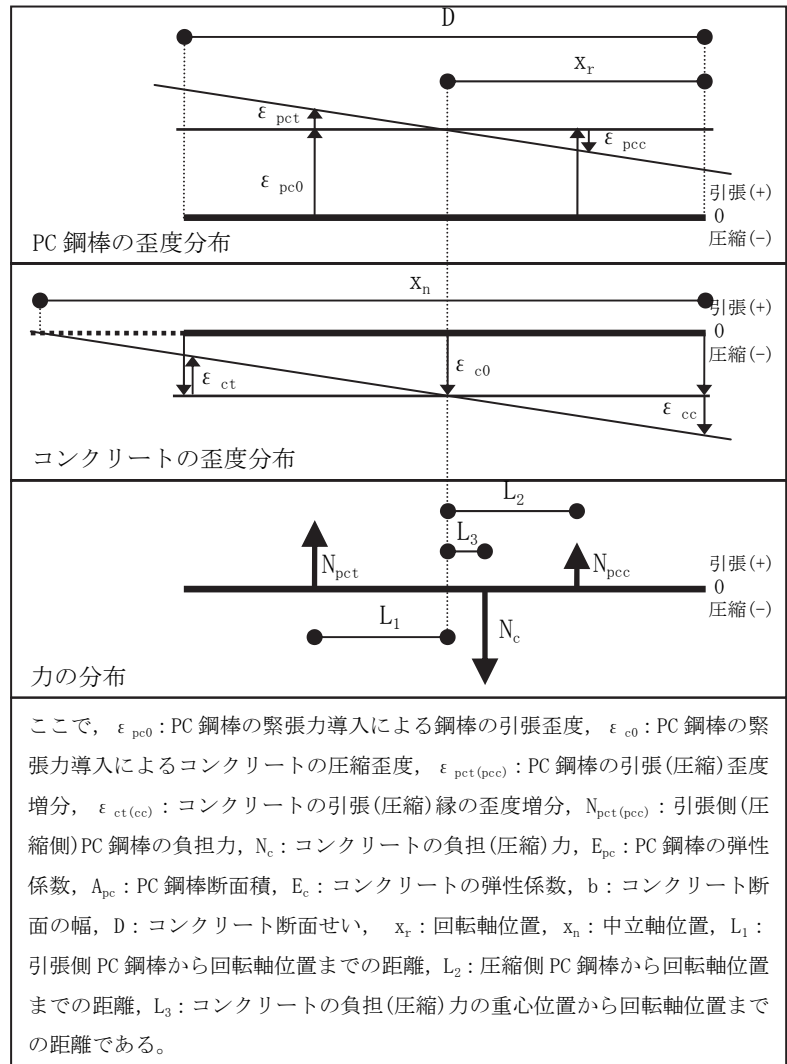


図-10 歪度および応力分布の仮定

正載荷時に観測された。これはダンパーを適用することでダンパー取付け面に位置する梁の変形が拘束され、ダンパー取付け面上部の曲げ変形が大きくなりコンクリートが圧壊したと考えられる。ダンパー非適用時では、損傷が圧着部圧縮側に集中したのに対し、適用時は圧着部圧縮側およびダンパー取付け位置周辺に生じた。最終状況では、ダンパー非適用時はひび割れおよびカバーコンクリートの剥落が対称に生じたのに対し、適用時はダンパー周辺のひび割れが多く、剥落も非対称であった。実験終了後、試験体からダンパー(図-1の部材1)を取り外したところ、ダンパーの取付け面に目立った損傷は見られなかった。

4. 曲げ解析による耐力評価

両試験体の耐力を評価するために、PC鋼棒の緊張力導入後に梁とスタブの境界が平面保持すると仮定した曲げ解析を行う。とくに平面保持仮定下での耐力評価の可否について検討する。

4.1 解析手順

解析に用いるPC鋼棒およびコンクリートの材料特性は、材料試験結果に基づいて図-8のように仮定した。記号については表-2を参照されたい。本解析のフローを図-9に、梁端部断面における歪度分布の想定を図-10に示す。図-9中d)各要素の歪度は図-10に基づいて幾何学的に求めた。ここで、c)回転軸位置 x_r は圧縮縁からコンクリートの歪度が ϵ_{c0} となる位置までの距離を示す。e)各要素の負担力は下式(1)、(2)、(3a)、(3b)より計算する。

$$N_{pct} = E_{pc} \cdot A_{pc} \cdot (\epsilon_{pc0} + \epsilon_{pct}) \quad (1) \quad N_{pcc} = E_{pc} \cdot A_{pc} \cdot (\epsilon_{pc0} + \epsilon_{pcc}) \quad (2)$$

$$N_c = E_c \cdot \frac{b \cdot D}{2} \cdot (2\epsilon_{c0} + \epsilon_{ct} + \epsilon_{cc}) \quad (3a) \quad N_c = E_c \cdot \frac{b \cdot x_n}{2} \cdot (\epsilon_{c0} + \epsilon_{cc}) \quad (3b)$$

ここで、式(3a)は試験体圧着部の引張側縁が離間する(図-10中 $\epsilon_{ct} = -\epsilon_{c0}$)前、(3b)は離間後に適用する。f)軸力の釣合式(4)を $\pm 0.2\text{kN}$ で満足する x_r を求め、g)曲げ耐力Mを式(5)より算定する。

$$N_{pct} + N_{pcc} + N_c = 0 \quad (4) \quad M = N_{pct} \cdot L_1 + N_{pcc} \cdot L_2 + N_c \cdot L_3 \quad (5)$$

4.2 ダンパー非適用時の解析結果

図-11にダンパー非適用時の離間時耐力と最大耐力の解析結果を実験結果の包絡線と比較して示す。離間時耐力は解析値が実験値を過小評価したが、図-8に示したように、本解析ではコンクリートの引張応力度負担を考慮しなかったためである。最大耐力については良好に実験値を評価することができた。

4.3 摩擦ダンパーの考慮

上記の解析結果を踏まえ、摩擦ダンパー適用時の耐力評価を行う。解析フローは図-9に従うが、ダンパーの適用を以下の通り考慮する。

図-12に実験より得られたダンパーの滑動方向を示す。ダンパーの滑動方向はダンパーの重心と回転軸を結ぶ軸のおよそ直交方向であった。そこで、式(4)、(5)に摩擦力の項を追加した式(6)、(7)に

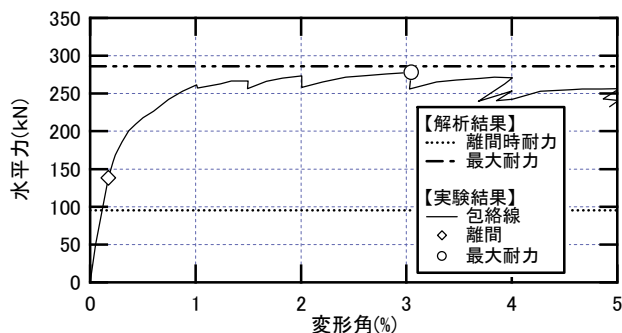


図-11 解析結果(ダンパー非適用時)

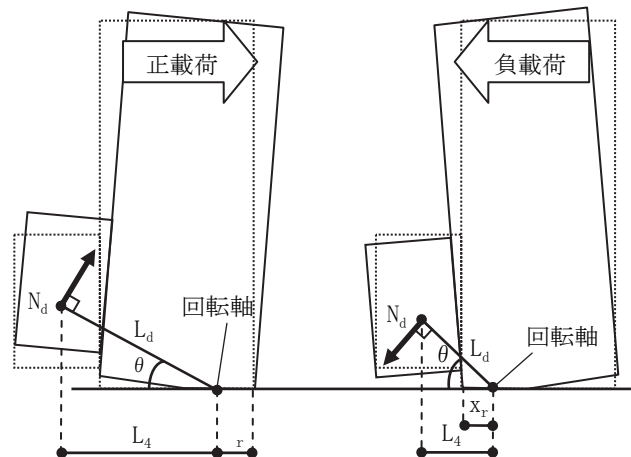


図-12 摩擦ダンパーによる付加耐力の評価方法

より図-9中f)軸力の釣合, g)曲げ耐力Mの計算を行った。

$$N_{pct} + N_{pcc} + N_c + N_d \cos\theta = 0 \tag{6}$$

$$M' = N_{pct} \cdot L_1 + N_{pcc} \cdot L_2 + N_c \cdot L_3 + N_d \cdot L_d \tag{7}$$

ここで, N_d :ダンパーの摩擦力, $\cos\theta = L_4/L_d$, L_d :ダンパー重心から回転軸位置までの直線距離, L_4 :ダンパー重心から回転軸位置までの水平距離である。

4.4 ダンパー適用時の解析結果

ダンパー適用時の実験結果の包絡線と耐力の評価結果を図-13に比較して示す。ダンパー非適用時同様、コンクリートの引張応力度負担を考慮していないため、離間時耐力の解析値が実験値を過小評価した。最大耐力については、正側では精度よく評価できたが、負側でやや過小評価した。これはダンパー適用時の载荷初期から降伏点にかけて梁端両側面の損傷が正負载荷時で異なった結果(図-7(b))に起因する可能性がある。すなわち、ダンパーの取付けによるカバーコンクリートの拘束条件、劣化性状の変化が梁の性能に影響した可能性がある。

以上より、本解析ではPC鋼棒の緊張力導入後に梁とスタブの境界が平面保持すると仮定したが、ダンパー非適用時および適用時正側の最大耐力を良好に評価することができた。離間時耐力とダンパー適用時負側の最大耐力については前述の通りコンクリートモデル(図-8(b))を再考することで改善の見込みがある。

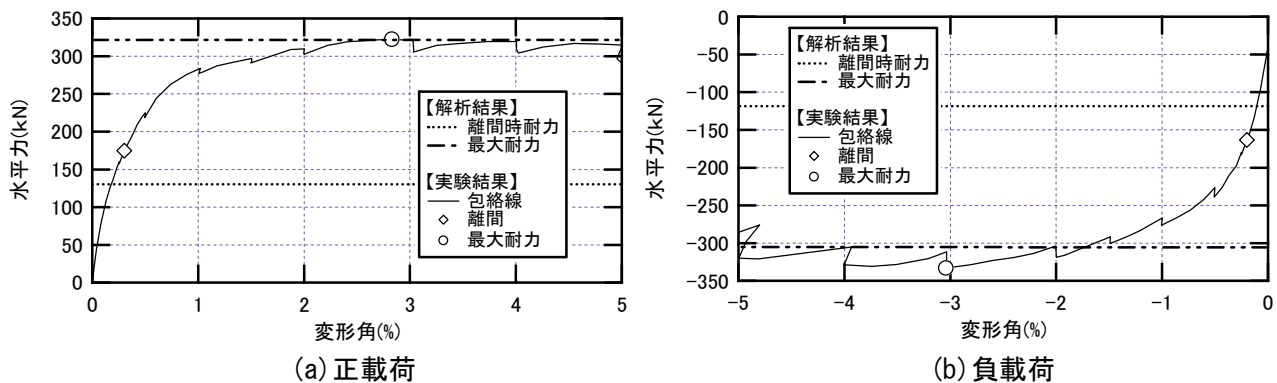


図-13 解析結果(ダンパー適用時)

5. まとめ

筆者らが開発した摩擦ダンパーの適用の有無をパラメータとしたPC梁の静的载荷実験および曲げ解析を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 実験結果より、摩擦ダンパーの適用によって、最大耐力、履歴面積、残留変形の増大を確認した。
- (2) 摩擦ダンパーの有無をパラメータとした曲げ解析による耐力評価を行い、実験結果との整合を比較、検討した。その結果、平面保持仮定下においてもアンボンドPC梁の最大耐力を概ね評価できる場合があることを確認した。今後、解析精度を向上する方法について検討する計画である。

参考文献

- 1) 巽英明, 中塚侑, 浅川弘一, 寒川勝彦, 溝口茂: アンボンド PC 鋼材圧着工法と剥離性目地によるサステナブル PC 建築についての基礎研究, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造 IV C2, pp. 141-144, 2006
- 2) 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
- 3) 真田靖士: PC 建築を対象とするエネルギー吸収デバイスの近年の開発事例, コンクリート工学, Vol. 48, No. 3, pp. 35-40, 2010. 3
- 4) 佐島悠太, 杉浦弘樹, 真田靖士, 小嶋慶大: 摩擦ダンパーによるプレストレストコンクリート構造のエネルギー吸収能力の補填に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 2, pp. 523-528, 2010. 7
- 5) 丸田誠, 福井剛, 内山執樹, 二村有則, 島崎和司, 真田靖士: PC 構造研究の現状, 新 PC 規準に向けての活動およびプレストレス技術を有効利用した建物例 5. 限界耐力計算による試設計建物の動的応答, 日本建築学会大会構造部門(PC構造)パネルディスカッション資料, pp. 44-71, 2007. 8