

16. PC箱桁の復元力特性に関する交番載荷実験

16.1 はじめに

1995年の兵庫県南部地震以後、設計地震力が大幅に引き上げられ、また、地震時の挙動が複雑な橋梁に関しては動的解析による照査が必要となった。これに伴い、既存橋梁の耐震安全性の見直しが行われている。大きな地震力がPCラーメン橋に作用した場合、従来は弾性部材として扱われていた上部工が非線形領域に入る可能性がある。また、非線形性履歴モデルの選定は、動的解析における部材の最大応答評価に与える影響が大きいため、上部構造の履歴モデルを的確に評価することは橋全体の耐震安全性の把握にとって重要である¹⁾。しかしながら、PC上部構造の履歴特性に関する既往研究は少なく、PCラーメン橋等の不静定構造物において、今後、精度の高い動的解析を行うには、上部構造の非線形性を考慮した新たな履歴モデルの提案が必要であると考えられる。

本文では、プレストレスの導入度、鋼材の偏心量、外ケーブルの効果などに着目し、一般的な実橋梁PC上部構造を想定した縮尺模型を製作し、その交番載荷実験を行って得られたPC箱桁の履歴特性に関する知見を紹介する²⁾³⁾。

16.2 実験概要

(1) 供試体概要

供試体は1室箱桁断面形状とし、実橋梁の1/8.5の外形寸法で設計した。使用材料として、 $\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ のコンクリートとSD295(D6、D13)の鉄筋を用い、PC鋼材は現在PC橋で一般に使用されているPC鋼より線とし、1S15.2を使用した。検討ケースは、プレストレス導入度、鋼材の偏心量、PC鋼材の付着の有無(内・外ケーブル)、支間中央鉄筋の重ね継手の影響および横拘束筋の効果に着目し、比較のためのRC供試体を含め12ケースとした。表16.1に検討ケースを、図16.1に各供試体の断面図を示す。

表 16.1 検討ケース

供試体名	プレストレス (MPa)	PC鋼材の本数と位置	PC鋼材の配置	備考
L01	-	-	-	RC部材
L02	3.6	6本(全内ケーブル)	軸力配置	-
L03	3.6	〃	下縁配置	-
L04	3.6	〃	上縁配置	-
L05	6.0	10本(全内ケーブル)	軸力配置	-
L06	3.6	6本(4本外ケーブル)	下縁配置	-
L07	3.6	〃	上縁配置	-
L08	3.6	6本(全内ケーブル)	軸力配置	重ね継手
L09	3.6	6本(全内ケーブル)	軸力配置	横拘束筋
L10	2.4	4本(全内ケーブル)	軸力配置	-
L11	4.8	8本(全内ケーブル)	軸力配置	-
L12	3.6	6本(全外ケーブル)	下縁配置	-

<p>L01 : RC構造</p> <p>L02 と終局耐力を同等に設定</p>	<p>L02 : PC構造 3.6 MPa (軸力配置)</p>	<p>L03 : PC構造 3.6 MPa (下縁配置) 上下終局耐力比 1 : 3</p>
<p>L04 : PC構造 3.6 MPa (上縁配置) 上下終局耐力比 3 : 1</p>	<p>L05 : PC構造 6.0 MPa (軸力配置)</p>	<p>L06 : 内外併用PC構造 3.6 MPa (下縁配置) L03 と鋼材偏心を同等に設定</p>
<p>L07 : 内外併用PC構造 3.6 MPa (上縁配置) L04 と鋼材偏心を同等に設定</p>	<p>L08 : PC構造 3.6 MPa (軸力配置) 軸方向鉄筋重ね継手</p>	<p>L09 : PC構造 3.6 MPa (軸力配置) 上下フランジに拘束鉄筋配置</p>
<p>L10 : PC構造 2.4 MPa (軸力配置)</p>	<p>L11 : PC構造 4.8 MPa (軸力配置)</p>	<p>L12 : 全外PC構造 3.6 MPa (下縁配置) L03 と鋼材偏心を同等に設定</p>

図 16.1 供試体断面図 (単位 mm)

(2) 載荷方法

載荷方法は、単純曲げ載荷(2点載荷)の正負交番漸増載荷とし、押し引き100tfの油圧ジャッキを用いて、軸方向鉄筋初降伏時の変位 δ_{y0} までは荷重制御、その後は δ_{y0} の整数倍を片振幅とした両振り交番載荷($\pm 2\delta_{y0}$, $\pm 3\delta_{y0}$, $\pm 4\delta_{y0}$...)を、最大荷重以下に低下するまで行った。載荷スパン長は中央部600mmとし、桁中央点から左右300mmの位置に載荷用丸鋼(直径60mm)をフランジ上下面にセットし、PC鋼棒で締めた。

測定項目は、①変位、②荷重、③曲率、④コンクリートのひずみ、⑤鋼材のひずみであり、主に桁中央部の断面で測定した。

本実験で用いた実験装置および供試体設置状況を図16.2に示す。

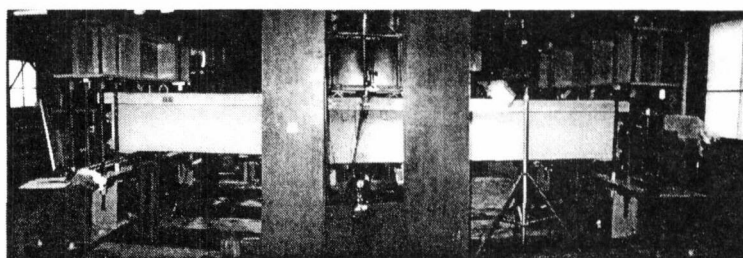
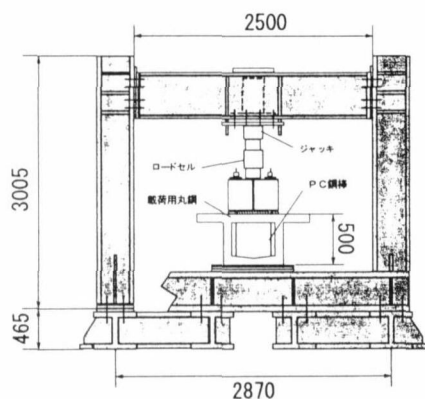


図16.2 載荷装置および供試体設置状況(単位 mm)

16.3 実験結果

(1) 曲げモーメントー曲率(M- ϕ)関係

実験で得られた各供試体のM- ϕ 履歴曲線を図16.3に示す。図中には道路橋示方書V編⁴⁾に規定されている応力ひずみ曲線を用いて算出したM- ϕ 骨格曲線を重ねて示している。コンクリート圧縮強度は、材料試験結果を用いた。ここに骨格曲線は拘束筋のない場合に対応させ、コンクリートの終局ひずみを2000 μ としている。

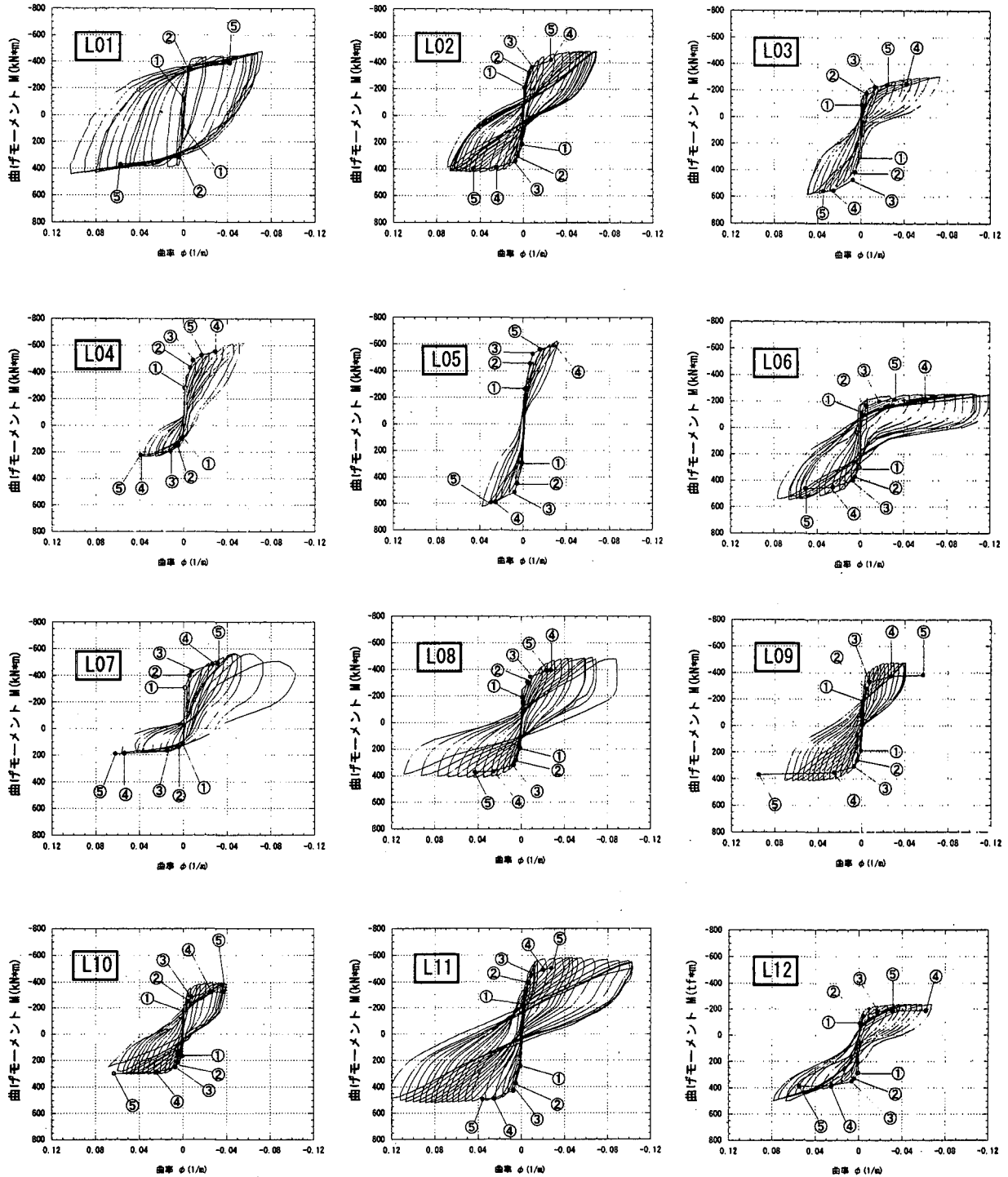
また、各供試体の実験終了時の破壊状況のスケッチ図および写真を図16.4、写真16.1に示す。供試体によっては、支間中央で破壊せずに、載荷点外側で破壊したり、コンクリートの剥離によって変位制御に支障が生じたりしたため、最終じん性率に関する評価は行わない。

RC供試体(L01)は、軸方向鉄筋降伏後の剛性低下が著しく、残留変位が大きい典型的な紡錘型の履歴を示した。本供試体は載荷スパン外で破壊した。PC鋼材軸力配置(6本)のL02は、L01に比べ最大耐力までの耐力上昇が緩やかで、除荷時の剛性が低下することにより、残留変位は小さく原点付近を指向する結果を得た。これは、PC鋼材が鉄筋に比べ降伏強度が高く、降伏ひずみも大きいいため、PC鋼材が降伏前の領域に留まるためであると考えられる。

PC鋼材を下縁配置、上縁配置したL03、L04においては、それぞれ鋼材を偏心させた側へ耐力が増加した。図16.3より、骨格曲線は鋼材を偏心配置した供試体においても概ね再現可能であることが確認できた。損傷の度合いは下縁配置では上側、上縁配置では下側の損傷が著し

い。

プレストレス量の違う L02(3.6MPa)、L05(6.0MPa)、L10(2.4MPa)、L11(4.8MPa)の最大耐力は、L02(3.6MPa)に対し、L11(4.8MPa)では約20%増加、L05(6.0MPa)では約30%増加、L10(2.4MPa)では約20%減少した。これら4つの供試体を比較してみると、プレストレスの導入量



解析上のイベント ①：ひびわれ ②：鉄筋降伏 ③：PC弾性限界 ④：PC降伏 ⑤：コンクリートの圧壊

図 16.3 曲げモーメント-曲率関係

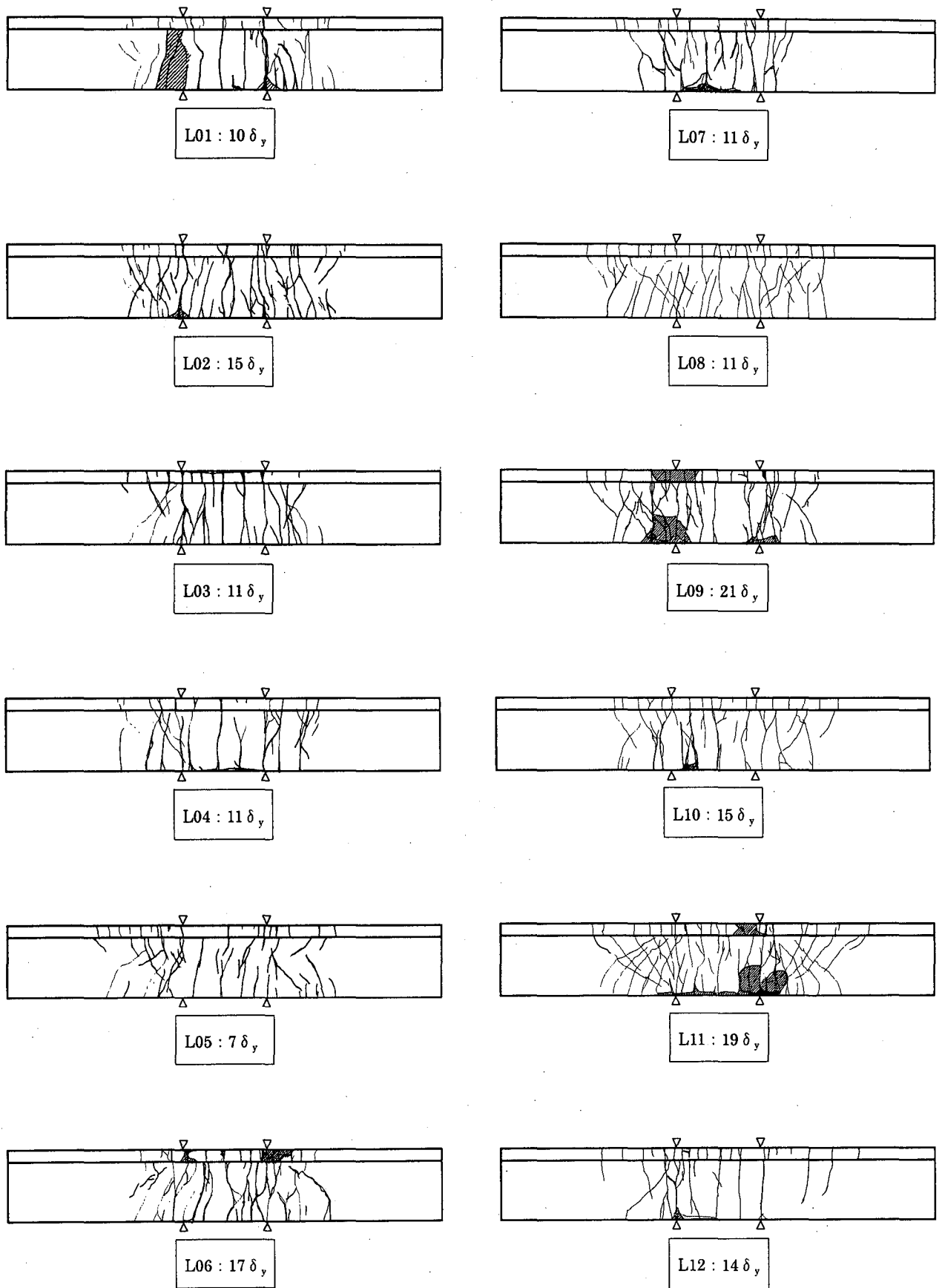
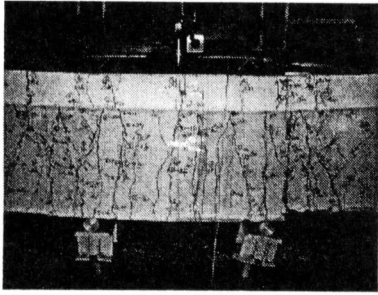
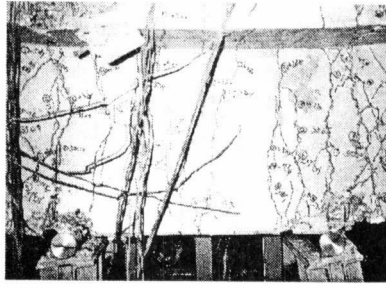


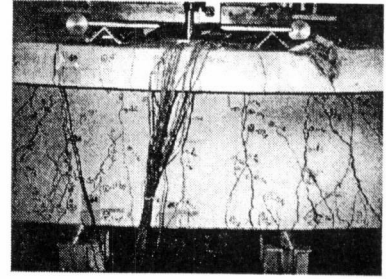
図 16.4 破壊状況スケッチ(実験終了時の状況)



L01(15 δy)



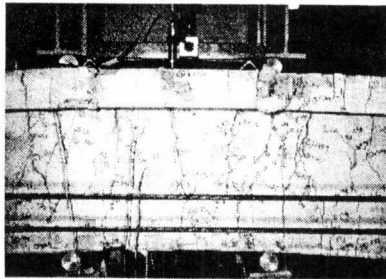
L02(15 δy)



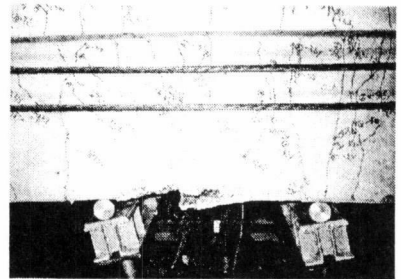
L03(11 δy)



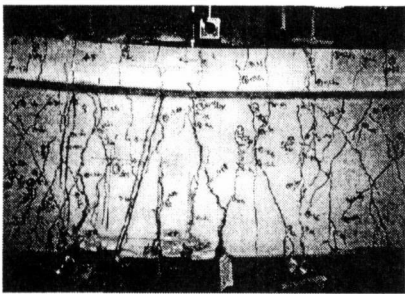
L04(11 δy)



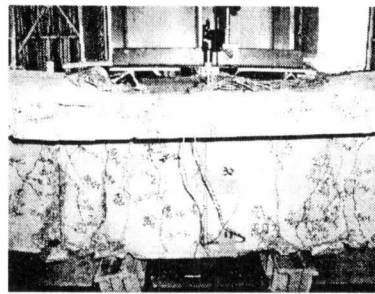
L06(17 δy)



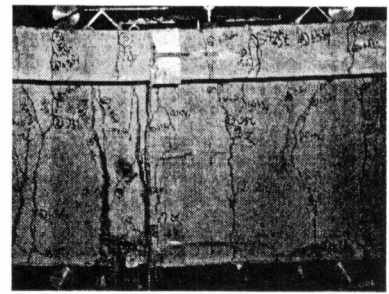
L07(11 δy)



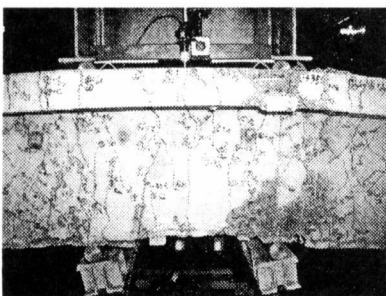
L08(11 δy)



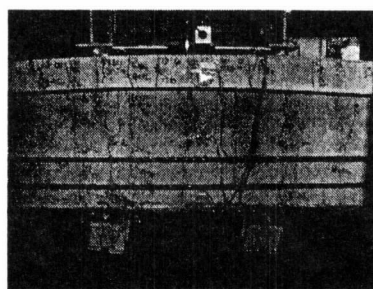
L09(20 δy)



L10(15 δy)



L11(19 δy)



L12(13 δy)

写真 16.1 破壊状況写真(実験終了後の状況)

が大きいほど、最大耐力は増加し、原点指向性はより強まる傾向にあることが分かった。

L06、L07はL03、L04のPC鋼材6本のうち、それぞれ4本をPC鋼材とコンクリートとの付着のない外ケーブルとしたもので、L12はL03を全外ケーブルとしたものである。外ケーブル供試体では、内ケーブル供試体に比べて最大耐力が若干減少した。ひずみに関しては、内ケーブルがPC降伏ひずみに達した段階においても外ケーブルはPC弾性限界にも達しておらず、終局時でも外ケーブルは降伏しなかった。L06、L07、L12で示した骨格曲線は、外ケーブルの断面積の20%を内ケーブルに付加し(寄与率20%)、残りの80%を外力として桁端に作用させた場合の計算結果である。図16.5にL06、L07における外ケーブルの寄与率に対する骨格曲線の違いを示す。図16.5より、外ケーブルの寄与率が小さくなると耐力は減少するが、その差は小さいと言える。ここに、寄与率100%は内ケーブルと同等である。

L08は、L02と同じ断面で支間中央鉄筋を重ね継手としたものであるが、耐力はL02とほぼ同程度で、支間中央鉄筋を重ね継手にすることによる耐力の減少は見られなかった。

L09は、L02の上下フランジに拘束鉄筋を配置したもので、耐力はL02とほぼ同じであった。

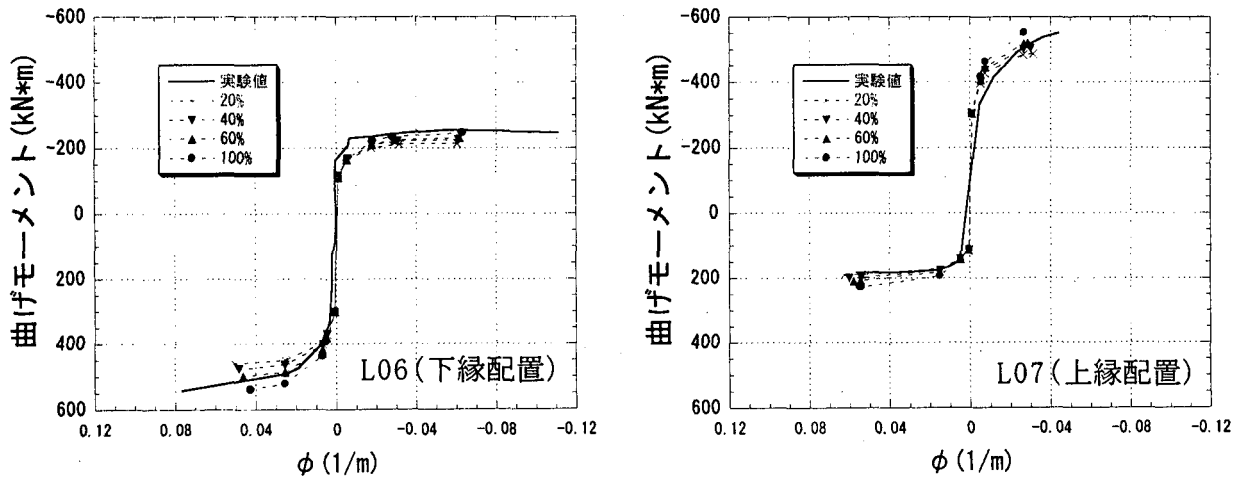


図16.5 外ケーブルの寄与率による骨格曲線の違い

(2) イベント

算出したM- ϕ 骨格曲線上の各イベント点(ひびわれ、鉄筋降伏、PC弾性限界、PC降伏、コンクリートの圧壊)と実験で計測したひずみおよび目視から推定される各イベント点を、L02供試体において比較した結果を図16.6に示す。図16.3に示すように理論値の上縁引張時では、ほとんどのケースでPC降伏時の耐力がコンクリート圧壊時の耐力を上回る計算結果となった。逆に下縁引張時では、PC降伏が先に発生した。これは、箱桁の上フランジに張り出し床版が存在するた

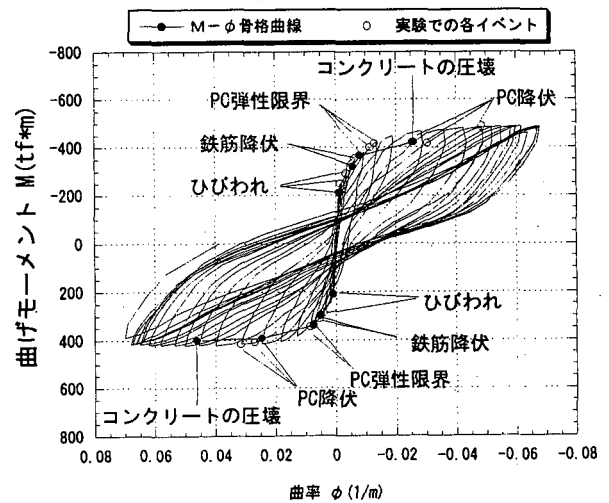


図16.6 実験での各イベント(L02)

め、上縁側が下縁側に比べコンクリートが多いことの影響と思われる。図 16.6 の L02 の場合を見る限り、理論上の終局を過ぎても実際の桁は耐力を維持し続けている。他のケースについては、図 16.3 にヒステリシスと計算上の $M-\phi$ 曲線を対比させているが、理論値は荷重スパンの終局まで測定されたデータではないことに注意すべきである。

(3) エネルギー吸収能力および減衰定数

各供試体における累積エネルギーの比較を図 16.7 に、プレストレス導入量の違いによる減衰定数の比較を図 16.8 に示す。横軸は軸方向鉄筋初降伏変位 δ_{y0} の整数倍とした荷重サイクルで示した。

図 16.7 は、プレストレス導入量の等しい (3.6MPa) PC 供試体同士で累積吸収エネルギーを比較したものであるが、エネルギー吸収能力に対する、鋼材偏心、鋼材の付着などの検討項目による差異はほとんど見られなかった。

また図 16.8 より、プレストレス導入量が増加すると、減衰定数は小さくなるのが分かる。これは、プレストレス量の増加により、残留変位が小さくなり、履歴曲線の原点指向性が強くなることに起因する。一方、RC 供試体である L01 は、他の PC 供試体に比べ、エネルギー吸収能力が優れていることが分かる。これは、RC 供試体では、作用する外力を部材自体が変形し、破壊することでエネルギーを吸収するからである。PC 供試体では、エネルギー吸収能力は低い、残留変位が小さいため荷重後の機能保持に優れていると言える。

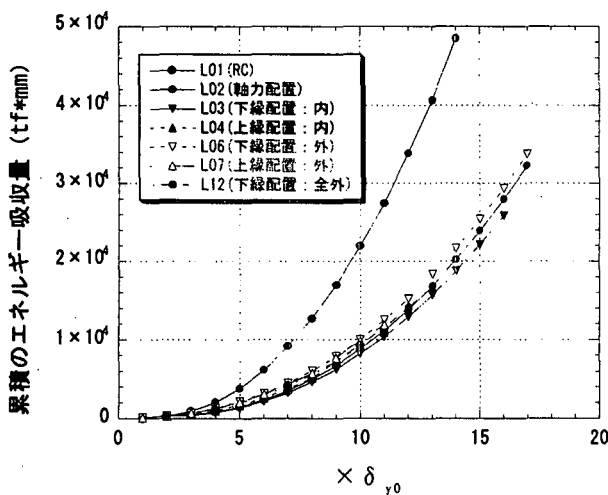


図 16.7 鋼材の偏心、付着の有無による累積エネルギー吸収量の比較

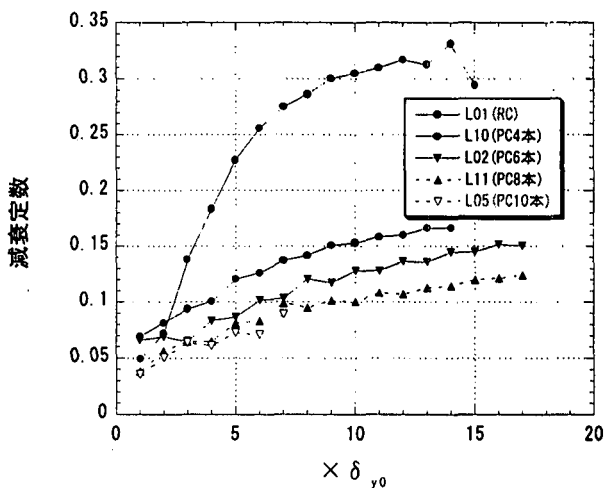


図 16.8 プレストレス量の違いによる減衰定数の比較

16.4 履歴特性

本実験で得られた履歴曲線によると、図 16.9 に示すように、ひびわれモーメントまでは、ほぼ弾性挙動を示し、その後塑性率の小さい範囲では除荷時に原点付近を指向する。降伏を超える程度に塑性率が大きくなると、戻り始めは初期剛性に近いが、除荷に従い剛性が低下する除荷剛性低下型の履歴となる。この時の戻りの最初の剛性範囲 (ΔM) は、鉄筋量または PC 量によって決まるものと思われる。曲げモーメントが 0 の所からは、 y 軸上のある点を指向するよ

うである。さらに変位が増加すると、残留変位も増加し、RC部材に似た紡錘型、あるいは平行四辺形型の履歴を示す。以上のように、塑性率の小さい範囲(第2剛性域)では原点付近を指向し、第3剛性に入ると、除荷に従い曲げモーメントが0の点まで剛性が徐々に低下し、その後最大点を指向するような履歴法則が成り立つと思われる。

これらの履歴特性は、RC部材の履歴復元力モデルとして設計で多用される武田モデル⁵⁾や、PC部材に対する岡本モデル⁶⁾とは異なる特徴を有している。したがって、既存の履歴モデルでは、本実験で得られたPC桁の挙動を適切に再現することは難しいと考えられる。

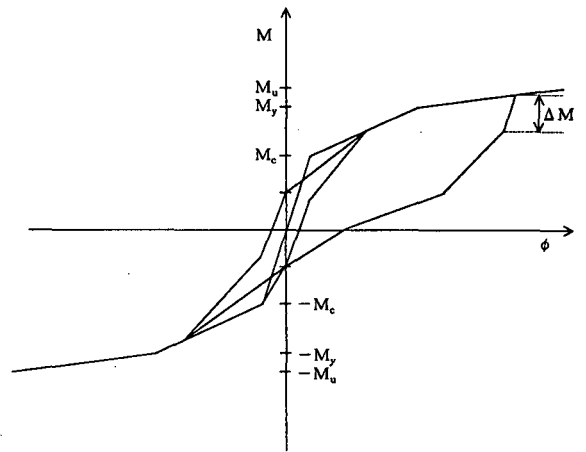


図 16.9 履歴法則(概念図)

16.5 結論

本実験により、PC上部構造の履歴特性に関して次のような知見を得た。

- ・ PC供試体は、RC供試体に比べ、エネルギー吸収能力は劣るが、残留変位が小さい。
- ・ プレストレス量の増加により、原点指向性が強まるが、耐力は増加する。
- ・ PC鋼材に付着がない外ケーブルの場合、内ケーブル供試体に比べ耐力は減少し、外ケーブルのひずみの増加は、内ケーブルに比べかなり小さい。
- ・ 道示のM-φ骨格曲線は、概ね実験を再現できたが、コンクリートの圧縮ひずみを $\epsilon_{cu} = 2000 \mu$ とした場合、終局を過小評価する結果となった。
- ・ 減衰定数は、プレストレス導入量の増加に伴い小さくなる。
- ・ 鋼材の偏心、付着、プレストレス量の違いによるPC桁のエネルギー吸収量の差はわずかである。
- ・ 既存の履歴モデルでは、PC上部構造の履歴特性を適切に再現するのは不十分であると思われる。
- ・ 実験結果の履歴曲線から、除荷時に剛性が変化し、最大点を指向するような履歴法則が必要である。

今後は、除荷時の剛性の変化や、内部ループの履歴法則を詳しく把握するために、载荷パターンを変えて行った実験の結果などを考察し、さらに詳しいPC上部工の履歴特性を提案する予定である。

参考文献

- 1) 大塚・根井・矢葺・堤・岡田：上部構造の非線形性を考慮したPCラーメン橋の耐震性照査，構造工学論文集，Vol145A，pp.967-974，1999.3

- 2) 大塚・矢葺他：交番載荷実験によるP C箱桁の履歴復元力特性，土木学会年次学術講演会概要集，1999，9.
- 3) 大塚・矢葺他：交番載荷実験によるP C箱桁の履歴特性，地震工学研究発表会講演論文集，pp697-700，1999，7.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編，1996，12.
- 5) Takeda. T. et al：Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, ST12, ASCE, pp. 2557-2573, 1970, 12.
- 6) 岡本・加藤：P C造建物の地震応答性状，プレストレストコンクリート，pp. 52-63, 1991, 6.

(執筆者：大塚久哲)