

PC箱桁橋軸直角方向の復元力特性に関する交番載荷実験

大塚 久哲^{*1}・岡田 稔規^{*2}・矢葺 亘^{*3}・角本 周^{*4}・堤 忠彦^{*5}

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震の被害と教訓を踏まえて改訂された平成8年度版「道路橋示方書」においては、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り設計することとなった。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。一般に十分な耐力と変形性能を有すると考えられている不静定構造橋梁においても、支間長が比較的長い割に幅員が狭い橋軸直角方向剛性の小さなPC連続橋や橋脚高が異なるPC連続ラーメン橋の橋軸直角方向に大きな地震力が作用した場合には、上部構造が非線形領域に入る可能性があり、上部構造の剛性変化に伴い、各橋脚が負担する地震時慣性力の変化が各橋脚の設計に及ぼす影響についての検討や上部構造自体の耐震性についての検討を含めた橋梁全体系の耐震安全性を検討する必要がある。これらを検討するためには、従来は弾性部材として扱われてきたPC上部構造に対しても非線形性を考慮した解析が必要である。さらに、上部構造の非線形履歴モデルの選定が部材の最大応答に与える影響は大きく、上部構造の非線形性を精度よく表現することは非常に重要である¹⁾。

PC橋の上部構造の非線形性に着目した研究には、文献¹⁾のほかに大場ら²⁾、二階堂ら³⁾による上部構造の初降伏状態を検討し、剛性や非線形履歴特性の選定が上部構造および下部構造に与える影響を検討した研究、保坂ら⁴⁾によるPC桁の正負交番載荷試験結果より復元力モデルを作成し、橋軸方向の弾塑性応答解析を行い構造全体の応答性状を検討した研究などがある。しかしながら、上部構造の非線形履歴特性の影響を解明し、この種の構造物の耐震性を適切に評価するには、検討例や判断材料がいまだ非常に少ないのが現状であり、今後精度の高い動的解析による耐震設計および耐震照査を行うためには、既往モデル^{5)~7)}の適用可能性の検討や新たな履歴モデルの提案を行う必要があると考える。

本文では、筆者らが先に実施したPC箱桁の橋軸方向交番載荷実験⁸⁾に引続き行ったPC箱桁の橋軸直角方向交番載荷実験により得られたPC箱桁の橋軸直角方向履歴特性に関する知見を述べる。

2. 供試体概要

2.1 供 試 体

供試体は、橋軸方向交番載荷実験⁸⁾と同様に①有効幅員

9.0 mの1室箱桁断面、②80 m～140 m程度の中央径間を有するラーメン橋のインフレクションポイント付近の桁高を想定し、載荷装置の能力を考慮して1/8.5程度の外形寸法として図-1に示すとおりとした。ただし、載荷装置への設置のために、張出し床版部には切欠きを設けた。また、かぶりやウェブ厚等は使用するコンクリートの最大骨材径(15 mm)や製作上の制約から設定した。

コンクリートの目標強度は40 N/mm²とし、鉄筋はSD295A鉄筋を使用した。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、1S15.2Aを使用した。各供試体の実験時におけるコンクリート強度と実験に使用した各鋼材の材料試験結果を表-1、2に示す。

2.2 検討ケース

検討ケースは表-3に示す6ケースである。Case 1 (T01)はRC供試体である。Case 2 (T04)、Case 3 (T02)、Case 4 (T05)、Case 5 (T03)、およびCase 6 (T06)は、それぞれプレストレスの導入量が異なるPC供試体である。プレスト

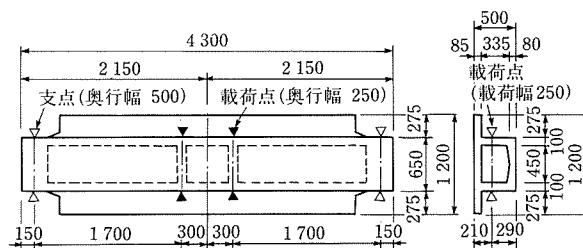


図-1 供試体概要

表-1 コンクリート材料試験結果

供試体	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
T01	48.7	26.69
T02	45.5	28.71
T03	41.9	24.20
T04	45.8	26.25
T05	47.6	27.67
T06	44.6	25.24

表-2 鋼材材料試験結果

鋼 材	降 伏 点 (N/mm ²)	引 張 強 度 (N/mm ²)	弾 性 係 数 (kN/mm ²)
鉄 筋 SD295A	D13 D6	347 361	501 536
PC鋼材	1S15.2A	1 730	1838
			191

^{*1} Hisanori OTSUKA：九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン工学部門 教授

^{*2} Toshiki OKADA：八千代エンジニアリング(株) 橋梁・構造部，九州大学大学院 工学研究科 建設システム工学専攻 博士課程在学

^{*3} Wataru YABUKI：九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン工学部門 助手

^{*4} Meguru TSUNOMOTO：オリエンタル建設(株) 技術部

^{*5} Tadahiko TSUTSUMI：(株)富士ビー・エス 技術部

表-3 検討ケース一覧

検討ケース	供試体名	構 造	プレストレス (MPa)	付着の有無	PC鋼材	軸方向鉄筋	曲げ耐力 (kN)	備 考
Case 1	T01	RC	—	あり	—	36×D13 20×D6	859.4	
Case 2	T04	PC	2.4	あり	4×1 S 15.2	36×D6	669.8	
Case 3	T02	PC	3.6	あり	6×1 S 15.2	36×D6	843.3	
Case 4	T05	PC	4.8	あり	8×1 S 15.2	36×D6	986.9	
Case 5	T03	PC	6.0	あり	10×1 S 15.2	36×D6	1 075	
Case 6	T06	PC	3.6	あり	6×1 S 15.2	36×D6	830.8	T02に横拘束筋を追加

注) 曲げ耐力は鉛直力 (終局曲げモーメント×2/支点から載荷位置までの距離) を示す。

レスの導入量は、想定した橋梁におけるプレストレス量を考慮して、プレストレスによるコンクリートの平均軸圧縮応力度をそれぞれ 2.4 MPa, 3.6 MPa, 4.8 MPa, 6.0 MPa に設定し、PC鋼材本数により調整した。

Case 1, Case 2, Case 3, Case 4, Case 5 および Case 6 は、橋軸方向交番載荷実験⁸⁾で使用した L01, L10, L02, L11, L05, および L09 の各供試体に対する橋軸直角方向載荷実験となっている。

Case 6 は、横拘束筋によるじん性の変化に着目したものであり、T03の上床版と下床版の床版支間方向鉄筋を床版端部でフレアー溶接し拘束効果を与えたうえで、載荷点付近 1.6 m にわたって、端部をフレアー溶接した横拘束筋 (D6)

を 8 cm 間隔で配置している。なお、この横拘束筋は、橋軸方向交番載荷実験⁸⁾に用いた供試体 (L09) と同じものであり、橋軸方向載荷に対して配置された横拘束筋が橋軸直角方向にも効果があるか否かを検討したものである。

せん断補強に関しては、せん断破壊が先行することがないように、せん断補強鉄筋の間隔を決定した。

PC供試体の配筋図を図-2 に、各供試体の断面を図-3 に示す。

3. 実験概要

3.1 載荷方法

本実験に用いられた実験装置および供試体設置状況を図-4 に示す。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、油圧ジャッキは押引き最大荷重 980 kN, ストローク ±150 mm のものを用いた。供試体は両端をヒンジ支承によって支持し、上下の支承は総ねじ PC 鋼棒 12 本を用いて載荷装置フレームと緊結した。なお、実験装置の関係上、鉛直方向載荷しかできないため、供試体を 90 度回転させウェブで支承に支持させる方法をとった。そのため設置の際に邪魔になる張出し床版部には切欠きを設けている。載荷スパンは支間中央部の 600 mm とし、支間中央点から 300 mm の位置に載荷用丸鋼 (直径 60 mm) を上下ウェブに設置し PC 鋼材で締め付けた。

3.2 載荷サイクル

載荷サイクルは、張出し床版部最外縁鉄筋の降伏 δ_{fy0} ま

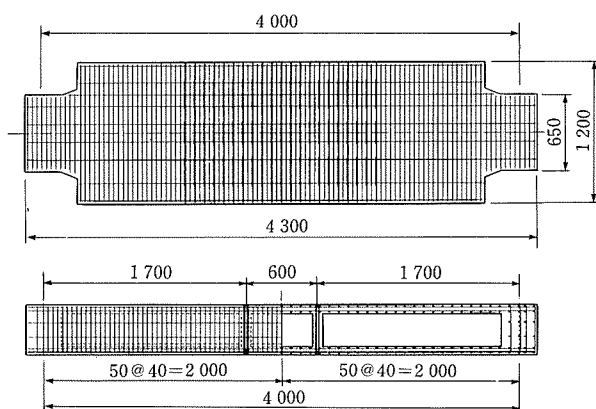


図-2 供試体配筋図

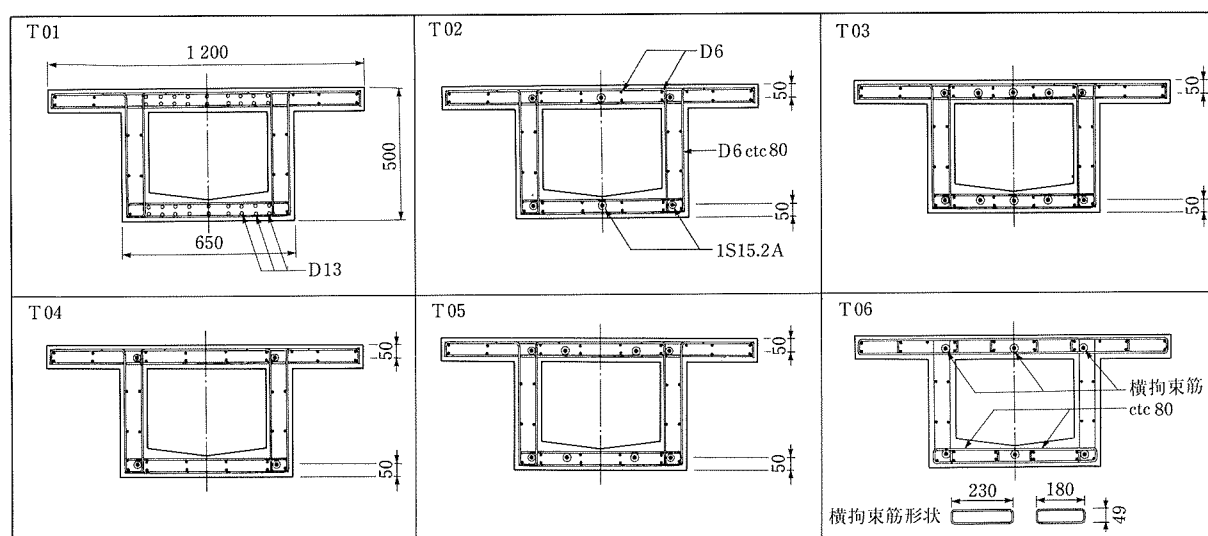


図-3 実験供試体断面

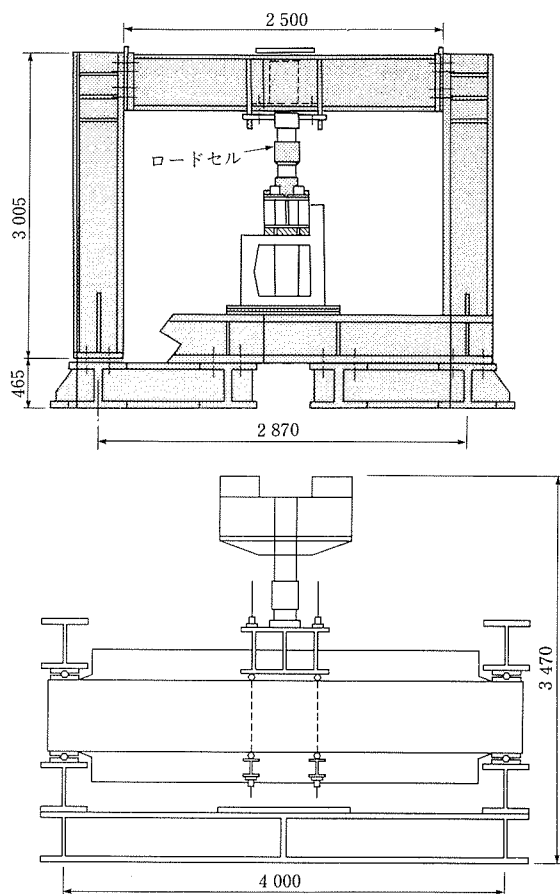


図-4 荷重装置概要

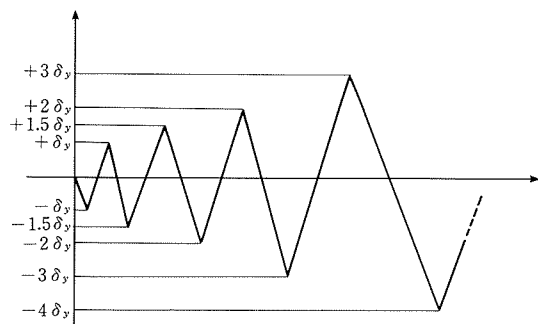


図-5 荷重サイクル簡略図

では49 kN刻みで荷重を増加させ、 δ_{fy0} からウェブ最外縁鉄筋の降伏 δ_{wy0} までは任意の変位制御、そして δ_{wy0} 以降は $\pm \delta_{wy0}$ の整数倍等を片振幅 ($\pm 1.5 \delta_{wy0}$, $\pm 2.0 \delta_{wy0}$, $\pm 3.0 \delta_{wy0}$, ...) とした交番荷重を耐力低下が δ_{wy0} 時における耐力程度になるまで荷重を継続した。図-5に簡易化した荷重サイクルの例を示す。なお、ここでの δ_{fy0} , δ_{wy0} などは、あらかじめ設計基準強度で計算した結果を用いた。

3.3 測定項目

測定項目は、① 変位、② 荷重、③ コンクリートのひずみ、④ 鋼材のひずみ、⑤ ひび割れ幅 (残留ひび割れ幅を含む)、⑥ ひび割れ分布であり、主に桁中央部の断面で測定した。曲率については、当初測定を実施したが、変位計の精度等の問題からか良好な測定データを得ることができな

かったため以後の測定を断念した。

4. 実験結果

4.1 荷重-変位 ($P-\delta$) 関係

実験で得られたCase 1 からCase 5の各供試体の $P-\delta$ 履歴曲線を図-6に示す。荷重 P の符号は、荷重ジャッキを押し下げたときの荷重を負として表している。変位 δ は供試体の鉛直変位から支点部の鉛直変位を差し引いて補正した値である。図中には「道路橋示方書 V耐震設計編」に規定されているコンクリートおよび鋼材の応力-ひずみ曲線を用いて算出した $P-\delta$ 骨格曲線を併せて示している。コンクリートの圧縮応力度等は表-1, 2に示す材料試験結果を用いた。ここでの骨格曲線は、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 2000μ としている。これ以後、降伏変位 δ_y は材料試験結果によるウェブ最外縁鉄筋の降伏時の値とし、塑性率は δ/δ_y と定義する。また、各供試体の実験終了時の破壊状況の写真およびスケッチを写真-1, 図-7に示す。本実験の供試体は荷重方向に対して鋼材配置が対称なので押し引き同等の結果が期待され、実験結果でもCase 5 (T03) を除き押し引きでほぼ同等の結果が得られた。しかし、Case 5 (T03) に関しては、油圧ジャッキの性能上、引き側が荷重不能になり、引き側は本来の最大耐力に至らず荷重を終了した。また、Case 2 (T04) は荷重中に変位計の先端がひび割れに入り込んだため、そこでの変形が急増する結果となっている。以上のことから、最終じん性率の評価はここでは行わない。以下に各供試体の $P-\delta$ 曲線の特徴を述べる。

- ① RC供試体 (T01) は、他の供試体と比較して低い荷重の段階でひび割れによる剛性低下が起きる。RC特有の紡錘型の履歴を示し残留変位が大きい。上述の骨格曲線の計算では、張出し床版部最外縁鉄筋の降伏やウェブ最外縁鉄筋の降伏による剛性の変化はほとんどない結果となったが、実験においても計算上の張出し床版圧壊までほとんど直線的に耐力が上昇しており、剛性の変化は僅かであった。計算上の張出し床版圧壊点付近で最大耐力発現後、強度劣化を生じ、解析上の骨格曲線との大きな乖離が生じた。この耐力低下の割合は他のPC供試体に比べ比較的緩やかであった。
- ② PC鋼材軸力配置 (6本) のT02は、T01に比べ最大耐力までの耐力上昇は緩やかで、除荷時の剛性は荷重の低下とともに小さくなる。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ため、PC鋼材が降伏前の領域に長く留まり鉄筋降伏後もプレストレスが有効に作用しているためであると考えられる。この結果、残留変位は小さく履歴曲線は原点付近を指向する結果を得た。T01と同様に解析上の張出し床版圧壊点付近までは解析値と実験値はおおむね一致しているが、最大耐力点以降は強度劣化を生じ、解析上の骨格曲線との大きな乖離が生じた。この傾向は、他のPC供試体も同様であったが、T05に関しては着目箇所とは異なる荷重点において局所的な破壊を起こしたため、張出し床版の破壊後の耐力の低下が著しい結果と

なった。

- ③ プレストレス量の異なる 4 つの供試体 T02 (3.6 MPa), T03 (6.0 MPa), T04 (2.4 MPa), T05 (4.8 MPa) の最大耐力の押引きの平均値は, T02 に対し, T03 で約17%増加 (ただし最大耐力に至らず), T04では約19%減少, T05では約9%増加した。したがって, プレストレスの導入量に比例して, 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。各供試体とT02供試体の最大耐力 (押引きの平均値) 比とプレストレス量の関係を図-8に示す。

図-9は, 各ケースについて実験での $P-\delta$ の包絡線を比

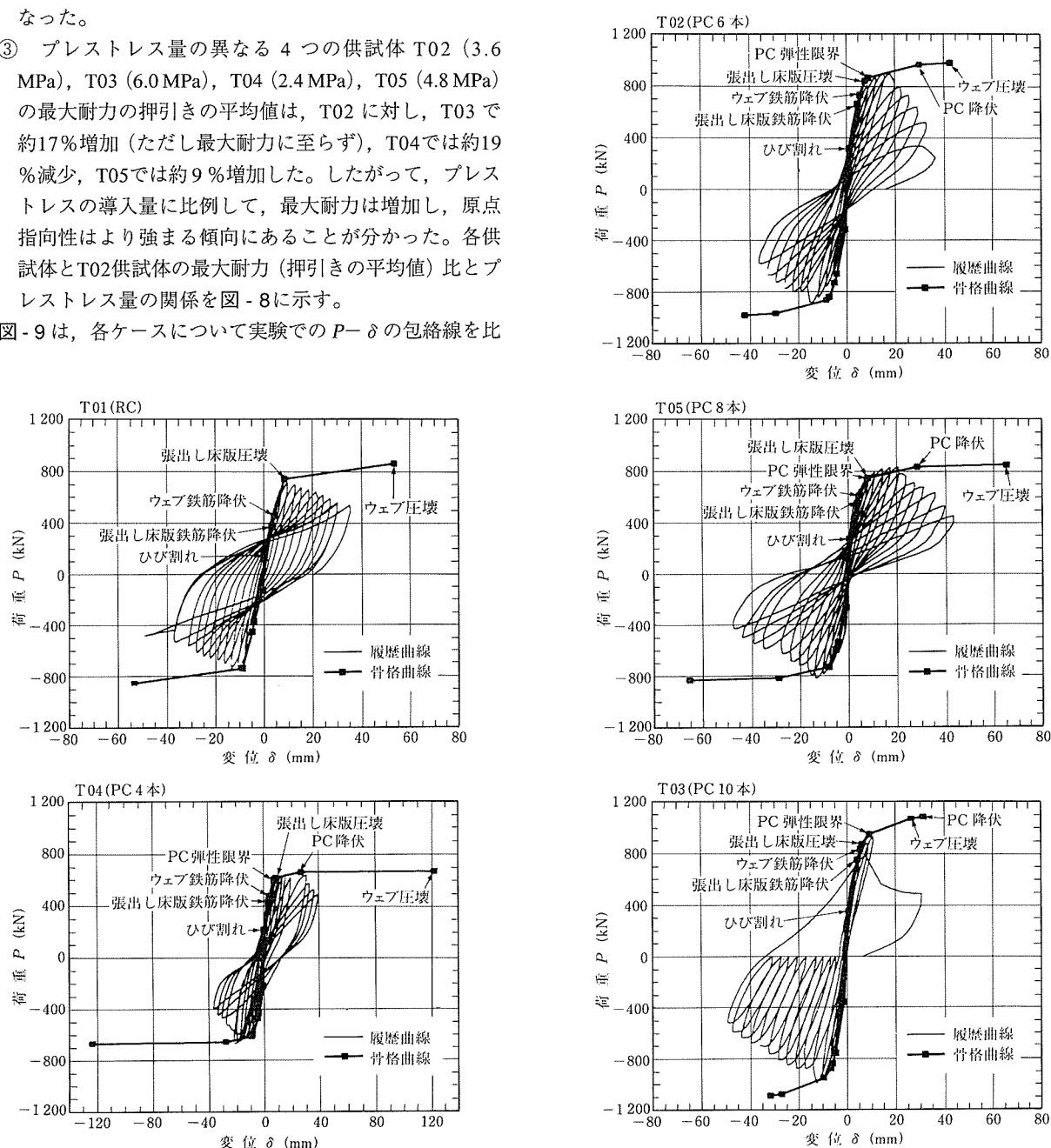


図-6 荷重-変位関係

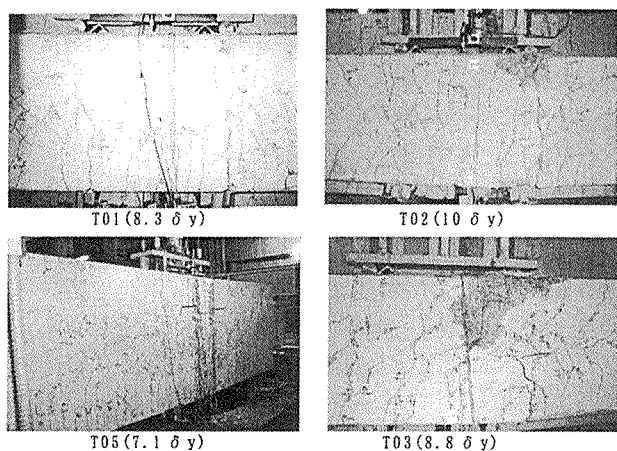


写真-1 実験終了時破壊状況写真 (主桁下面)

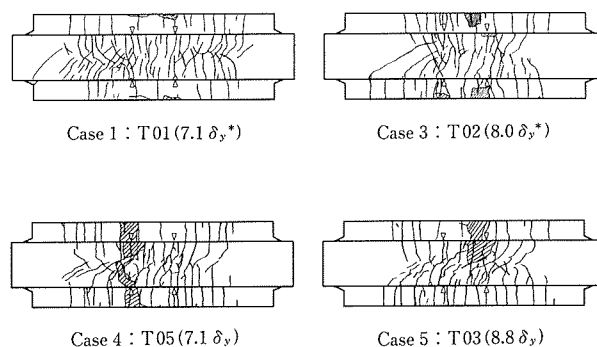


図-7 実験終了時ひび割れ損傷状況 (主桁下面, *印付きは損傷進展前にスケッチ)

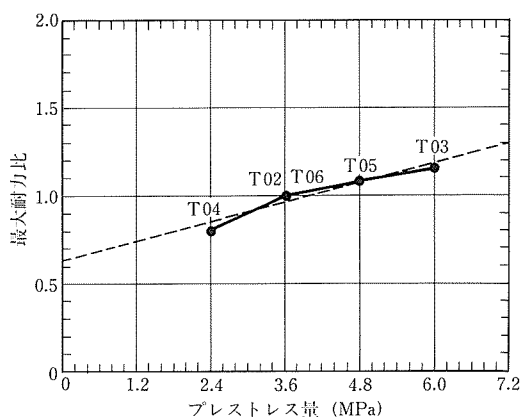


図-8 最大耐力比—プレストレス量

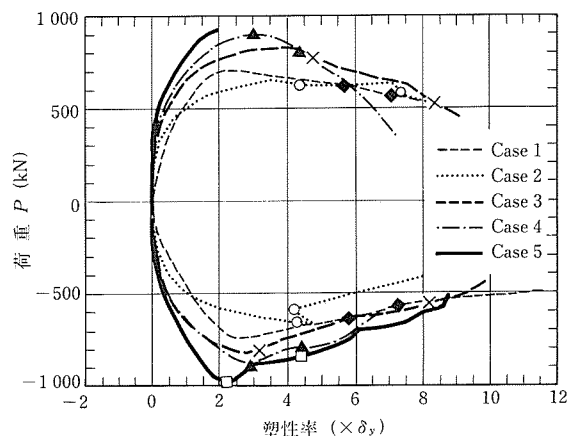


図-9 荷重—塑性率

較したものである。各曲線上の2個のマーカーは、その供試体における張出し床版最外縁部とウェブの圧壊をそれぞれ示している。RC構造であるCase 1については他の供試体と比較して低い荷重段階で、ひび割れによる剛性低下が起きる。Case 2以降のPC供試体に関しては、多少のばらつきはあるものの、プレストレス量が増えるに従い、より小さい塑性率で最大耐力に達し、その後の耐力低下も大きくなる傾向がある。また、このグラフからPC供試体のすべてにおいて張出し床版部の破壊が耐力低下に繋がっていることが分かる。

4.2 残留変位

図-10は、Case 1からCase 5までの各供試体についての残留変位を塑性率を横軸として示したものである。塑性率2程度の段階まではRC、PCともにほとんど残留変位を生じないが、耐力低下後の塑性率4以降においては、RCはPCに比べ2倍に近い残留変位を示した。一般にプレストレスの導入量が増加するに伴い残留変位は小さくなると考えられる。Case 5以外のPC供試体については、破壊が進行し耐力の低下が著しくなる塑性率7程度まではプレストレス導入量の違いにより予想どおりの残留変位量の差が生じた。Case 5については油圧ジャッキの容量を超えたため残留変位は $3\delta_y$ までの結果を示したが、プレストレスの導入量が多いにもかかわらず残留変位がRCに次いで大きくなった。これは、プレストレス導入量が多いことによりコンクリートの圧壊が早まったため、その結果、塑性率の小さい段階

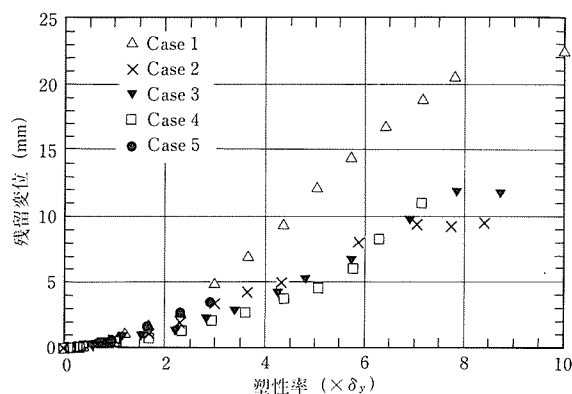


図-10 残留変位

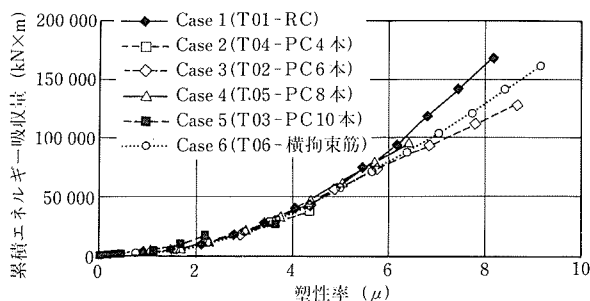


図-11 累積吸収エネルギー

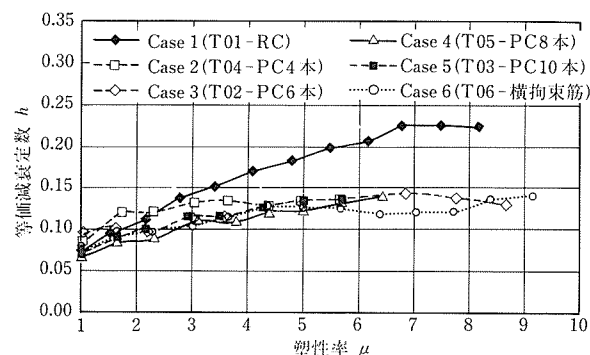


図-12 等価減衰定数

から残留変位が大きくなったものと考えられる。

4.3 エネルギー吸収能力および等価減衰定数

各供試体における累積エネルギーの比較を図-11に、等価減衰定数の比較を図-12に示す。ここに累積エネルギーとは各载荷サイクルにおける履歴ループ面積を順次加えたものである。図-11は、RC桁とプレストレス量異なるPC桁5体（横拘束筋配置供試体を含む）の累積吸収エネルギーを比較したものである。この図によれば、RC桁とPC桁におけるエネルギー吸収能力は塑性率5程度まではあまり変わらず、塑性率6以上になるとRC桁のエネルギー吸収量が卓越することが分かる。また、エネルギー吸収能力に対するプレストレス量の影響は小さいと言える。

図-12は等価減衰定数に関し、図-11と同様の比較をしたものである。ここに等価減衰定数 $h = (1/2\pi)$ (1サイクルの吸収エネルギー / 弾性エネルギー) と定義する。図-12より、RC桁とPC桁の減衰定数には明確な差があること、また、プレストレス導入量が増加すると等価減衰定数

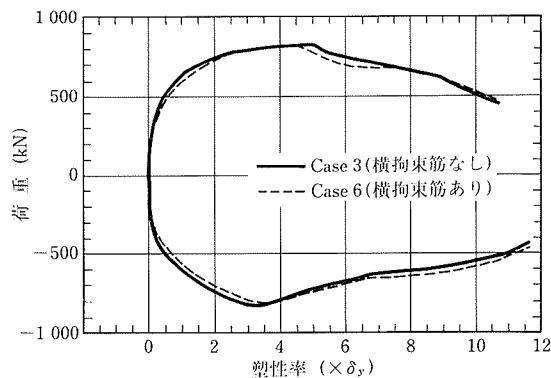


図-13 横拘束筋の効果

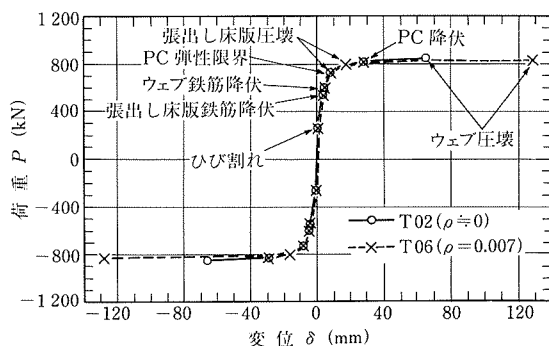


図-14 T02とT06の骨格曲線の比較

は小さくなる傾向にはあるが顕著な差は見られないことが分かる。一般にPC部材の等価減衰定数は3%~5%と言われている¹⁰⁾のに対して塑性率が低い段階から5%を超える結果となった。これは、断面が小さく、RC構造である張出し床版部が早期に損傷することで減衰が大きくなったものと考えられる。また、プレストレス導入量により減衰定数に顕著な差が生じなかったのも、プレストレス量が多いほどコンクリートの圧壊が早まり低い塑性率の状態から減衰が大きくなったからと考えられる。

4.4 横拘束筋の効果

図-13は、Case 3とCase 6で横拘束筋の有無を比較したものである。Case 6 (T06)の横拘束筋の体積比を $\rho = 0.007$ とすると、図-14に示すとおり横拘束筋の効果による骨格曲線終局変位の算定値はCase 3 (T02)の2倍程度となり、じん性の向上が期待されたが、実験ではその効果を確認できなかった。せん断補強のスターラップ等によりCase 3に関してもコアコンクリートに対する拘束効果があったとも考えられるが、拘束筋の配置方法を含めさらに検討を進めるつもりである。

5. 骨格曲線の検討

非線形動的解析において精度の良い解析を行うために、耐力低下域まで考慮した以下のような骨格曲線の決定方法を検討した。実験により得られたPC箱桁直角方向交番載荷履歴曲線の包絡線は、張出し床版の圧壊後、 $1\delta_y$ 以上にわたって耐力を維持し、その後耐力の低下が発生する。耐力低下の原因は、張出し床版位置におけるコンクリートの圧壊、圧縮鉄筋の座屈等である。とくに、張出し床版部の供

試体軸方向の鉄筋はすべての供試体で座屈が確認された。

最大耐力以降の耐力低下を骨格曲線で表現するために図-15の断面-1を用いて算定した従来の骨格曲線に加えて図-15の断面-2に示す圧縮側張出し床版のコンクリート・鉄筋を無視した断面による骨格曲線の算定を別途行った。そして断面-1による骨格曲線上の第3折れ点と断面-2による骨格曲線上のウェブ圧壊もしくはPC鋼材降伏のうち早く現れる点を結ぶことで実験の包絡線の負勾配を表現することとした。また、実験でウェブ圧壊時の張出し床版の損傷が著しいことが確認されたことから、断面-2によるウェブ圧壊もしくはPC鋼材降伏をもってPC箱桁直角方向の終局と見なし、それ以降の挙動の表現は不要と判断した。その結果が図-16に示すような骨格曲線である。各折れ点のイベントは以下のとおりである。

第1折れ点：断面-1のコンクリートのひび割れ発生

第2折れ点：断面-1の張出し床版最外縁コンクリートの圧壊 ($\epsilon_{cu} = 2000\mu$)

第3折れ点：断面-1のPC鋼材降伏とウェブ最外縁コンクリートの圧壊 ($\epsilon_{cu} = 2000\mu$)のうち早く現れる点に向かって結んだ線上に $1\delta_y$ 進行した点

包絡線は、この3点と断面-2のPC鋼材降伏とウェブ最外縁コンクリートの圧壊のうち早く現れる点を結んだ線で表現できる。

図-17に上記包絡線を各供試体の $P-\delta$ 曲線に重ね合わせた結果を示す。ここで、T03は油圧ジャッキの性能上、最

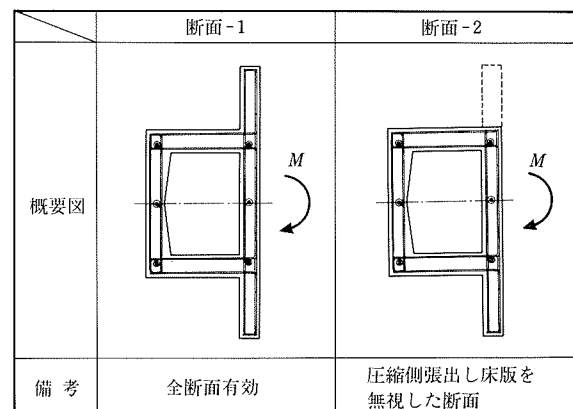


図-15 骨格曲線算定時の断面

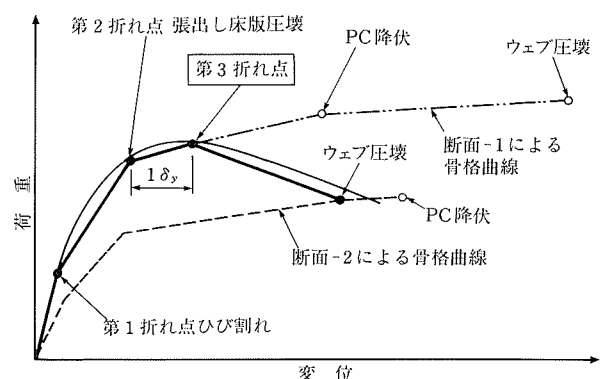


図-16 骨格曲線概念図

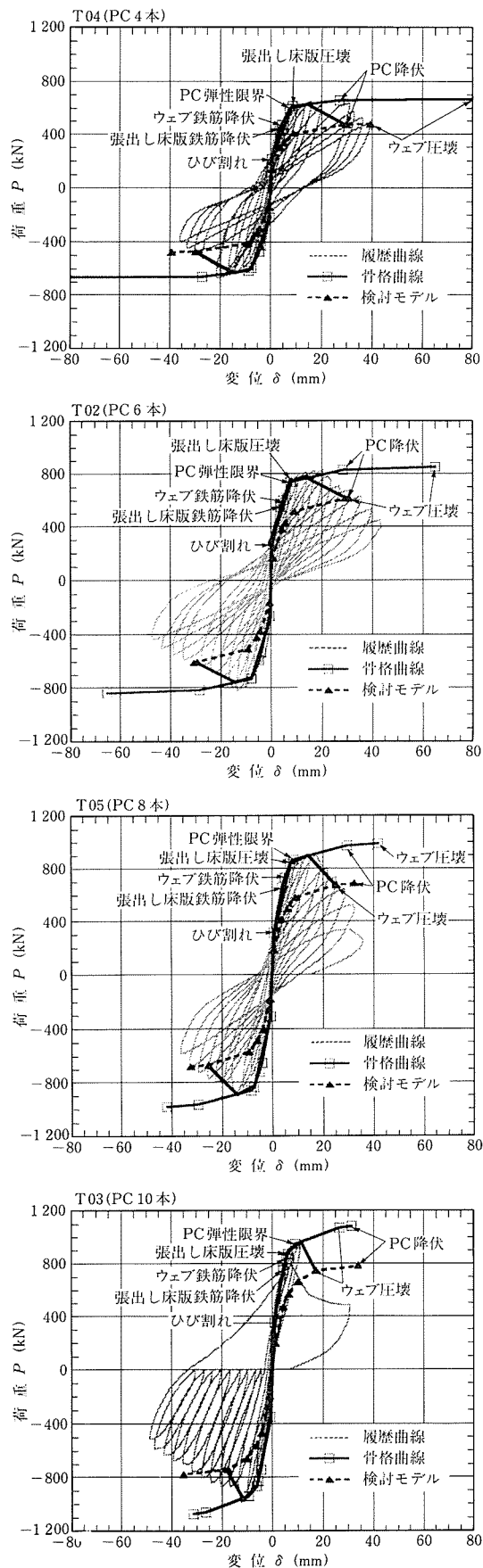


図-17 荷重—変位曲線の包絡線

大耐力に至らず片振り載荷となったため、交番載荷に比べじん性が伸びたと考えられる。T04は、実験中に変位計の先端がひび割れに入り込み、そこで変位が急激に増大したが、変位が急増した $4\delta_y$ 以降においても耐力の低下はそれ以前と同様のベースであり、そこでの履歴曲線の変位を補正移動すれば提案した骨格曲線にはほぼ一致すると考えられる。

6. まとめ

本実験により、張出し床版を有するPC 1室箱桁の橋軸直角方向の履歴特性に関して次のような知見を得た。

- ① PC桁では、プレストレス量の増加に伴って、残留変位が減少することが確認できたが、本実験では初期プレストレスが6.0 MPaと大きい供試体については、コンクリートの圧壊が早まったためか、塑性率の小さな段階から残留変位が大きくなった。
- ② RC桁とPC桁におけるエネルギー吸収能力と等価減衰定数には明確な差が観察されたが、プレストレス導入量の違いによる差はともに僅かであった。
- ③ 橋軸方向載荷に対して手当てされた横拘束筋によるじん性の向上は見られなかった。
- ④ 張出し床版の圧壊により耐力低下を起こし、従来提案されているPC部材の骨格曲線では、張出し床版圧壊以降において実験結果の $P-\delta$ 曲線の包絡線を再現できなかった。
- ⑤ 圧縮側張出し床版を無視した断面で算定した骨格曲線を併用することにより、橋軸直角方向に関する包絡線の負勾配をほぼ再現することができた。これにより橋軸直角方向の $P-\delta$ 関係の精度の良い包絡線を提案することができた。

実際の橋梁の設計においては、橋軸方向地震力と橋軸直角方向の地震力は分離してそれぞれ独立に照査、設計するのが一般的である。PC箱桁ラーメン橋は、主桁のねじり剛性も比較的高く、橋軸直角方向地震時に支配的となる作用は水平方向慣性力であると考え、本実験では主桁側方からの水平荷重を想定した交番載荷を行った。しかしながら、橋軸直角方向の検討においては、2軸曲げやねじりに対する挙動の把握も重要であることを付記する。

謝 辞

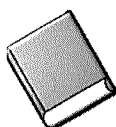
本実験の実施に際しご協力いただいた九州大学大学院修士課程の浦川洋介氏、当時、九州大学大学院修士課程の根井秀樹氏（現 日本道路公団）、当時、九州大学工学部の四元秀哲氏（現 福岡県）に感謝の意を表する。

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, Vol.45A, pp.967~974, 1999.3
- 2) 大場, 前原 ほか: PCラーメン橋の動的解析における上部構造モデル化の影響, 第1回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.61~64, 1998.1
- 3) 二階堂, 角本 ほか: PC連続ラーメン橋の上部構造の耐震性に関

- する一検討, 第1回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.65~68, 1998.1
- 4) 保坂, 睦好 ほか: プレストレストコンクリート高架橋におけるPC桁の地震応答性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.159~164, 1997
 - 5) 岡本, 加藤: PC造建物の地震応答性状, プレストレストコンクリート, Vol.33, No.4, pp.52~63, 1991
 - 6) Zatar, Mutsuyoshi: A Restoring Force Model for Partially Prestressed Concrete Piers, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.889~894, 1999
 - 7) 鈴木, 森, 山口, 池田: プレストレストコンクリート橋脚の復元力モデル, 第9回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.673~678, 1999.10
 - 8) 大塚, 岡田, 角本, 堤: PC箱桁の履歴復元力特性に関する交番載荷実験, プレストレストコンクリート, Vol.42, No.2, pp.90~97, 2000
 - 9) 大塚, 岡田, 石原, 角本, 堤: 交番載荷実験に基づくPC箱桁の復元力特性の提案, プレストレストコンクリート, Vol.42, No.5, pp.18~24, 2000
 - 10) 日本道路協会: 道路橋示方書 V 耐震設計編, 1996.12

【2000年7月4日受付】



刊行物案内

PPC構造設計規準(案)

外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法
設計施工規準(案)プレストレストコンクリート橋の耐久性向上
のための設計・施工マニュアル(案)ー抜粋ー

(平成8年3月)

頒布価格: 3点セット 5 000円 (送料 600円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会