

(155) 外ケーブルPC梁の繰返し载荷実験

鹿島技術研究所 ○新井 崇裕
 同上 正会員 日紫喜剛啓
 同上 夏目 忠彦
 同上 吉田健太郎

1. はじめに

PC橋梁の上部工はこれまで設計的には地震時にクリティカルになることが少なく、そのためPC梁部材の耐震性能について論じられることはほとんどなかった。しかしながら、最近の下部工の耐震性能の強化に伴い、大規模な橋梁では上部工についても耐震性能を検討する例も増えてくるものと考えられる。また、近年省力化の観点から外ケーブル構造やプレキャストセグメント(以下、セグメントと略す)工法が注目されているが、これらの履歴復元力特性について検討された例は少ない。そこで、本研究では、PC上部工の橋軸直角方向を対象に、部材の製作方法とケーブル方式の違いがPC梁部材の耐震性能に与える影響を調べることを目的に、小型模型供試体を用いて静的正負交番載荷実験を行った。実験の結果、各要因による履歴復元力特性とエネルギー吸収性能の違いが明らかになった。

2. 実験概要

2.1 実験目的

地震時に上部工に作用するエネルギーは、運動エネルギーとして消散される以外のエネルギーは主に軸方向鋼材の塑性化により消散される。場所打ち工法で構築する従来のPC上部工(内ケーブル構造)では、橋軸直角方向に地震による慣性力が作用した場合、地震エネルギーは主に内ケーブルや軸方向鉄筋が塑性化することにより消散されることになる。しかしながら、外ケーブル構造では、外ケーブルが塑性化しにくいため、外ケーブルが消散しないエネルギーは運動エネルギーとして消散されることになり、塑性化による吸収エネルギー的には内ケーブル構造より劣ることが予想される。また、セグメント工法を用いた外ケーブル構造では、セグメント接合面に軸方向鋼材が存在しないため、その傾向はより顕著となることが予想される。

そこで、本研究では内ケーブル構造に比べて、外ケーブル構造、セグメント構造がどのような基本的耐震性能(履歴復元力特性・エネルギー吸収性能)を示すかを調べることを目的に、橋軸直角方向地震時を想定した繰返し模型実験を行うこととした。

2.2 実験要因

実験要因は実験目的に則して部材の製作方法とケーブル方式の2つとし、その他の要因は全て一定となるようにした。供試体は、内ケーブル構造の場所打ち部材を基準供試体(P I)とし、外ケーブル構造の場所打ち部材(P E)・外ケーブル構造のセグメント部材(S E)の2体に、内外ケーブル併用構造のセグメント部材(S C)を加えた全4体とした。セグメント部材のみ内外ケーブル併用構造を

表-1 実験要因

供試体 No.	記号 ^{*1}	部材の製作方法	ケーブル方式	ケーブルの様	コンクリート ^{*2}		グラウト ^{*2}
					圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)
1	P I	場所打ち部材 (一体部材)	内ケーブル構造	内:SWPR7A 10.8 4本	47.8	25.4	32.2
2	P E		外ケーブル構造	外:SWPR7A 10.8 4本	47.6	26.9	—
3	S E	セグメント部材 (分割部材)	内外ケーブル併用構造	内:SWPD3 4本 外:SWPR7A 9.3 4本	51.7 ^{*3}	25.8 ^{*3}	—
4	S C				51.7 ^{*4}	26.1 ^{*4}	
					52.4 ^{*3}	28.0 ^{*3}	29.1
					52.0 ^{*4}	28.0 ^{*4}	

*1 記号について

*2 コンクリート及びグラウトの物性は、載荷実験時における材料試験結果を示す。

*3 ロングライン=マッチキャスト方式における先行打設セグメントのコンクリートの物性

*4 後行打設セグメントのコンクリートの物性

加えたのは、我が国においてセグメント工法により構築されているPC上部工は全て内外ケーブル併用構造であるためと、セグメント接合面に付着のある内ケーブルが存在することによって、そこでエネルギーが消散され、耐震性能が向上するかを調べるためである。実験要因を表-1に示す。

2.3 供試体

供試体の断面形状は、1室箱桁断面を対象とし、図-1に示すように、橋軸直角方向に地震による慣性力が作用した場合に鉛直軸回りの曲げ剛性が等価となるようにモデル化した。

各供試体の設計においては、まず、基準供試体(PI)を上述の考え方によって設計し、その他のPE, SE, SC供試体は、PI供試体と同じ断面形状、鉛直軸回りに同じ軸方向鉄筋・PC鋼材の配置で外ケーブル構造化やセグメント構造化を行い、特に各供試体の曲げ耐力を合わせるような設計は行わなかった。

PI・SC供試体の形状寸法を図-2に示す。供試体は、I型断面を有し、軸方向鉄筋(以下、軸筋と略す)及びPC鋼材を対称複筋配置した全長3,400mmの単純梁とした。軸筋には引張鉄筋比及び圧縮鉄筋比とも0.28%(SD345 D6×4本)の異形鉄筋を、横方向拘束筋にはせん断補強筋比1.58%(SD345 D6@50mm)の異形鉄筋を配置した。横方向拘束筋の間隔は、せん断破壊が先行しないよう「土木学会コンクリート標準示方書・設計編」¹⁾の規定に基づいて設計した。また、PC鋼材(ケーブル)はA種のPC鋼より線を使用(表-1)し、PC鋼より線一本あたりに0.55Pu(Pu:PC鋼より線の引張強さ)の緊張力を与えて、6.0N/mm²のプレストレスを導入した。鋼材の機械的性質を表-2に示す。セグメント部材(SE,

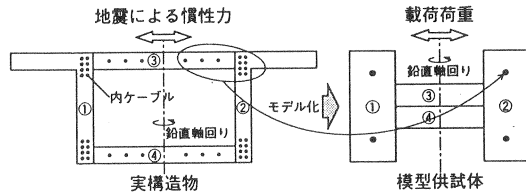
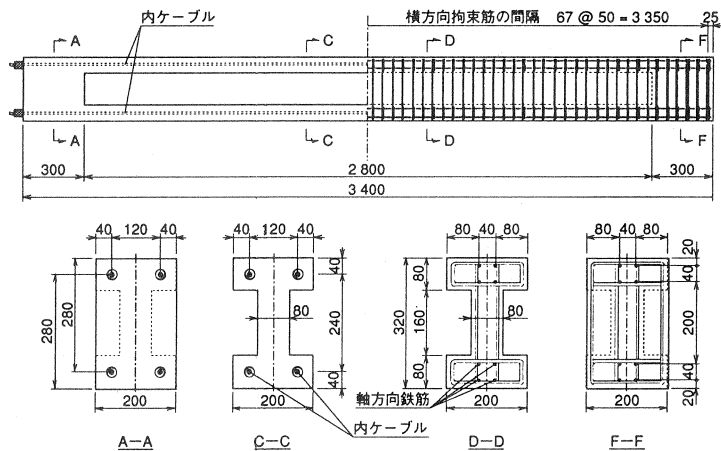


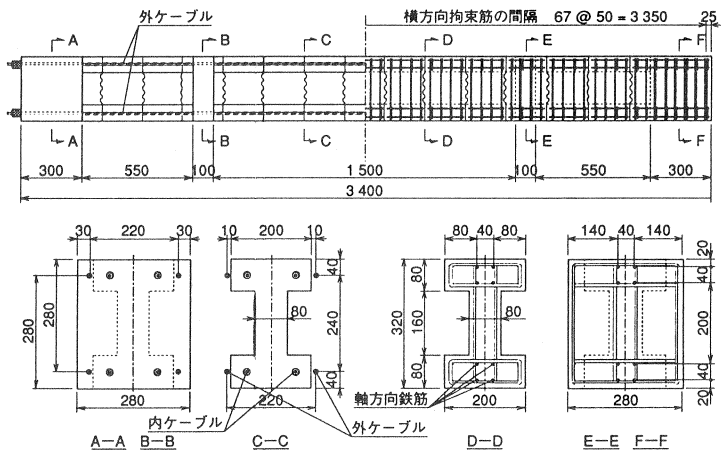
図-1 断面形状のモデル化の考え方

表-2 鋼材の機械的性質

鋼材の種類	断面積 (mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	伸び (%)
SWPD3	19.82	1917	2023	188	3.5
SWPR7A 9.3	51.73	1730	1887	194	3.5
SWPR7A 10.8	70.02	1642	1828	194	3.5
SD345 D6	31.67	442	558	210	20



① 場所打ち部材 (PI供試体の例を示す)



② セグメント部材 (SC供試体の例を示す)

図-2 供試体の形状寸法

S C) はロングライン=マッチキャスト方式で製作し、一般部のセグメント長は200mmとした。セグメントを組み立てる際には、接合面にエポキシ樹脂(圧縮強度:70.8N/mm²,引張強度:22.1N/mm²)を塗布した後、圧着接合(圧縮応力度:0.28N/mm²)した。内ケーブルには、プレストレス導入後セメントペーストによるグラウトを行った。コンクリート及びグラウトの圧縮強度を表-1に示す。

2. 4 載荷方法と計測項目

載荷位置は、スパン長3,000mm, 載荷スパン長900mmとし、せん断スパン比(せん断スパン/桁高)を3.3とした(図-3)。載荷は押し引き用の油圧ジャッキを用いて正負交番で行い、回転角(スパン中央鉛直変位/(スパン長/2))で制御した。載荷サイクルは、ひび割れ発生時、計算上の軸筋降伏時(場所打ち部材のみ)、それら以降は回転角1/200(rad)(以下、1/200と略す)の整数倍とし、同じ回転角での繰り返し載荷は2回とした。また、最大荷重の80%を下回った場合を部材の終局と定義し、実験を終了した。

実験時には、載荷荷重、外ケーブル張力、鉛直変位、軸筋のひずみ、ケーブルのひずみを図-3に示す位置で計測した。

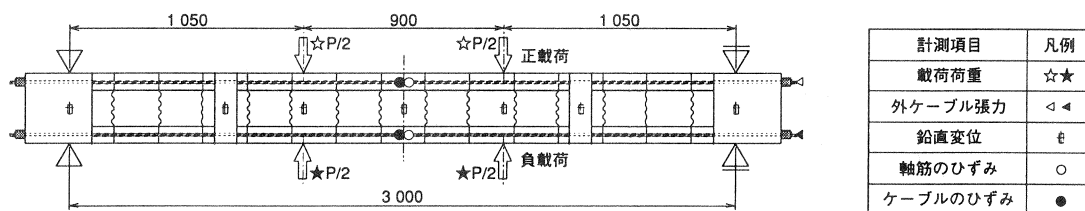


図-3 載荷位置と計測項目

3. 実験結果と考察

全供試体の載荷荷重とスパン中央鉛直変位の関係を図-4に示す。図中には、ファイバーモデル²⁾による解析結果を併記する。図中の記号は軸筋の降伏(●)破断(▲)P C鋼材の降伏(○)破断(△)コンクリートの圧壊(X)を示している。また、実験終了後のひび割れ状況を図-5に示す。

3. 1 破壊性状

(a) 場所打ち部材/内ケーブル構造(P I 供試体)

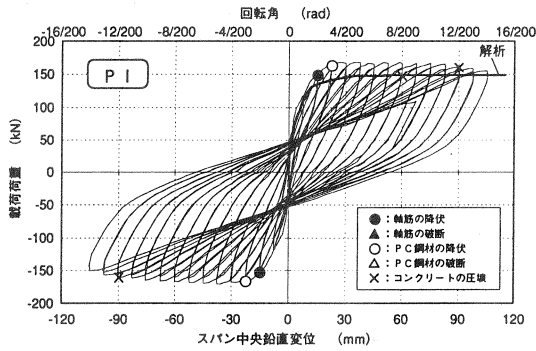
基準供試体であるP I 供試体では、曲げひび割れが発生した後、2/200サイクルで軸筋が、続いて3/200サイクルで内ケーブルが降伏し、12/200サイクルの時に載荷点で軸筋の座屈とコンクリートの剥離が起こった。その後、載荷を続行したが、載荷点での損傷が大きくなり、載荷不可能となって14/200サイクルで実験を終了した。実験を終了したサイクルでは、荷重は最大荷重の92%で部材の終局に至っておらず、軸筋、P C鋼材の破断は観察されなかった。

(b) 場所打ち部材/外ケーブル構造(P E 供試体)

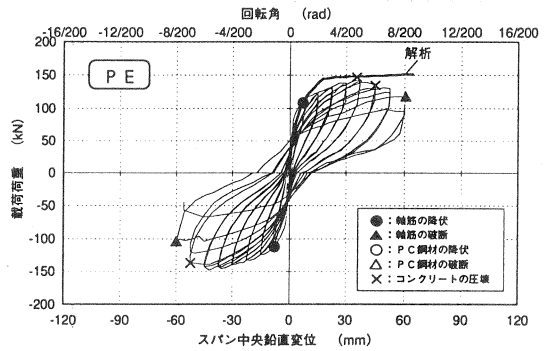
P E 供試体はP I 供試体の内ケーブルを外ケーブルに置き換えた供試体で、場所打ち部材におけるケーブル方式の違いを比較するためのものである。P E 供試体では、曲げひび割れが発生した後、1/200サイクルで軸筋が降伏、6/200サイクルで軸筋が座屈してコンクリートが圧壊、8/200サイクルの時に軸筋が破断し、急激に耐力が低下して終局に至った。なお、終局状態においても外ケーブルは降伏ひずみに達していなかった。

(c) セグメント部材/外ケーブル構造(S E 供試体)

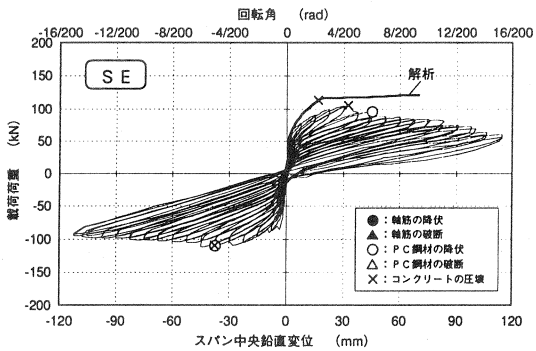
S E 供試体はP E 供試体をセグメント工法で製作した供試体で、部材の製作方法の違いを比較するためのものである。S E 供試体では、載荷スパン内の接合面近傍で曲げひび割れが発生した後、5/200サイクルでコンクリートが圧壊し、6/200サイクルの時に外ケーブルが降伏したが、耐力は急激には低下せず緩やかに低下して終局に至った。なお、終局状態において外ケーブルの破断はなかった。



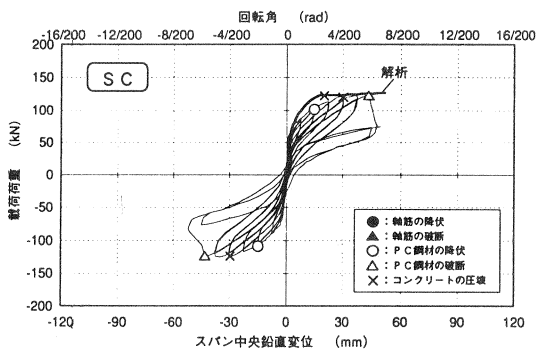
(a) 場所打ち部材/内ケーブル構造



(b) 場所打ち部材/外ケーブル構造

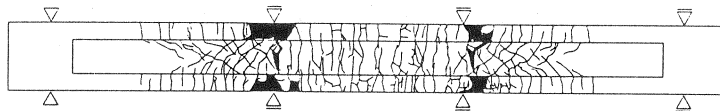


(c) セグメント部材/外ケーブル構造



(d) セグメント部材/内外ケーブル併用構造

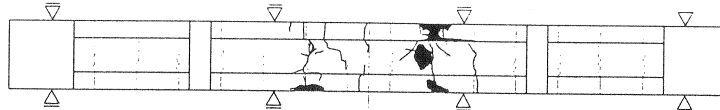
図-4 載荷荷重とスパン中央鉛直変位の関係



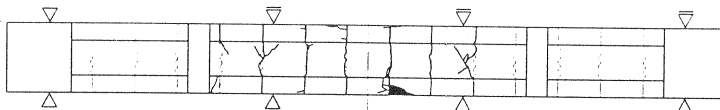
(a) 場所打ち部材/内ケーブル構造 (PI 供試体)



(b) 場所打ち部材/外ケーブル構造 (PE 供試体)



(c) セグメント部材/外ケーブル構造 (SE 供試体)



(d) セグメント部材/内外ケーブル併用構造 (SC 供試体)

図-5 実験終了後のひび割れ状況

(d) セグメント部材/内外ケーブル併用構造 (SC 供試体)

SC 供試体は、SE 供試体の外ケーブルの28%を内ケーブルに置き換えて内外ケーブル併用構造とし、エネルギー吸収性能の改善を目的とした供試体である。SC 供試体では、載荷スパン内の接合面近傍で曲げひび割れが発生した後、2/200サイクルで内ケーブルが降伏、4/200サイクルでコンクリートが圧壊、6/200サイクルの時に内ケーブルが破断し、急激に耐力が低下して終局に至った。実験終了後に、内ケーブルの破断面を観察したところ、グラウトと内ケーブルの間の付着切れは全く見られなかった。なお、終局状態においても外ケーブルは降伏はずみに達していなかった。

3. 2 ひび割れ性状

図-5によれば、ひび割れ性状は、場所打ち部材とセグメント部材で大きく異なり、場所打ち部材ではひび割れ分散性が良好であるのに対し、セグメント部材ではセグメント接合面近傍にひび割れが集中する傾向が見られる。また、場所打ち部材においては、内ケーブル構造 (PI) と外ケーブル構造 (PE) でひび割れ分散性に差が見られ、付着のある鋼材の多いPI 供試体の方が良好なひび割れ分散性を示している。セグメント部材においては、外ケーブル構造 (SE) と内外ケーブル併用構造 (SC) でひび割れの分散性に差は見られない。

3. 3 履歴特性

図-4によれば、各供試体で履歴特性に大きな差が見られ、PI 供試体では除荷後の残留変位が大きく、履歴曲線が平行四辺形型であるのに対して、PE 供試体では残留変位が小さく原点指向性の強いS字型の履歴特性を示している。また、セグメント部材であるSE 供試体、SC 供試体ではさらに残留変位が小さくなり、より原点指向性が顕著となっている。

変形性能についても大きな差が見られ、PE 供試体では軸筋が、SC 供試体では内ケーブルが破断し、急激に耐力が低下して脆性的な性状を示しているのに対し、付着のある軸方向鋼材に破断の見られなかったPI 供試体とセグメント接合面に付着のある軸方向鋼材が存在しないSE 供試体では終局までに大きな変形性能を有し、じん性に富んだ性状を示している。

全ての供試体でコンクリートは圧壊しており、その後の変形性能が劣っているのは付着のある軸方向鋼材に破断の見られた供試体のみであった。即ち、今回のように最大荷重からの低下率で部材の終局を定義した場合、変形性能に大きく影響するのは、コンクリートの圧壊ではなく、付着のある軸方向鋼材の破断であるといえる(ただし、コンクリート圧縮域が十分に補強されている場合)。従って、コンクリート圧壊以後の変形性能を期待するためには、特に、外ケーブル構造やセグメント構造においては軸方向鋼材の破断に留意する必要があると考えられる。なお、付着のある軸方向鋼材が破断したのは、ひび割れが分散せずに破壊面に曲率が集中したことによるものと推察される。

3. 4 累積吸収エネルギー

耐震性能を評価する際の一つの指標となる累積吸収エネルギーを用いて各供試体を比較する。部材が吸収するエネルギーは、荷重-変位履歴曲線で囲まれる面積で表されるが、各供試体で曲げ耐力が異なっているため、各供試体の累積吸収エネルギーを直接比較し、各種構造の耐震性能について論じることはできない。そこで、累積吸収エネルギーを最大荷重 P_{max} で除して正規化し(以下、正規化累積吸収エネルギーと略す)、これを用いて比較を行うこととした。正規化累積吸収エネルギーと載荷点変位の関係を図-6に示す。

図-6より、載荷点変位が45mm (6/200) の時点で1サイクルの正規化累積吸収エネルギーを比較すると、基準供試体であるPI 供試体に対してPE 供試体は111%、SE 供試体は47%、SC 供試体は68%であり、場所打ち部材における内ケーブル構造 (PI) と外ケーブル構造 (PE) では大きな差はないが、場所打ち部材 (PI, PE) とセグメント部材 (SE, SC) では大きな差があることがわかる。これは、セグメント部材ではセグメント接合面に軸筋が無いことが1サイクル毎のエネルギー吸収性能に大きく影響していることを示している。また、SE 供試体に対して、外ケーブルの28%を内ケーブルに変更することでエネルギー

吸収性能の向上を期待したSC供試体では、正規化累積吸収エネルギーが47%→68%で21%の増加となり、その効果が確認できた。

しかしながら、終局状態までに吸収するトータルのエネルギー(図中に●で示す)を比較すると、PI供試体がもっとも大きく、次いで、SE供試体、PE供試体、SC供試体の順となっている。最も吸収エネルギーが小さくなると予想されたSE供試体がPE供試体、SC供試体を上回ったのは、PE供試体、SC供試体が早期に軸筋あるいは内ケーブルが破断して終局状態に至り、変形性能が劣ったためである。

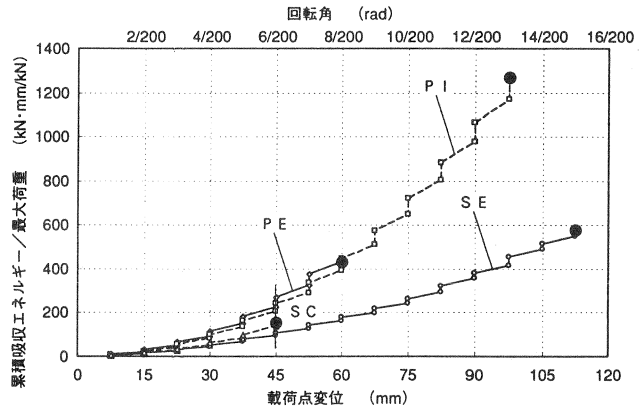


図-6 正規化累積吸収エネルギーと載荷点変位の関係

4. まとめ

PC上部工の橋軸直角方向を対象に、部材の製作方法とケーブル方式の違いがPC梁部材の耐震性能に与える影響を調べることを目的に、小型模型供試体を用いて静的正負交番載荷実験を行った。本実験の範囲内で得られた知見を以下に記す。

- (1) 場所打ち部材における内ケーブル構造と外ケーブル構造では履歴復元力特性に大きな差が見られ、内ケーブル構造では除荷後の残留変位が大きく履歴曲線が平行四辺形型であるのに対し、外ケーブル構造では残留変位が小さく原点指向性の強いS字型の性状を示す。また、セグメント部材では、場所打ち部材に比べてより顕著な原点指向性を示す。
- (2) コンクリートの圧壊以降の変形性能は付着のある軸方向鋼材の破断により決定される(ただし、コンクリート圧縮域が十分に補強されている場合)。
- (3) 場所打ち部材における内ケーブル構造と外ケーブル構造では1サイクル毎の累積吸収エネルギーに大きな差はない。
- (4) 場所打ち部材に比べてセグメント部材では、1サイクル毎の累積吸収エネルギーは大きく低下する。これは、セグメント部材ではセグメント接合面に軸筋が存在しないことによるものと考えられる。
- (5) 外ケーブル構造のセグメント部材では、セグメント接合面に付着のある軸方向鋼材が全く存在しないため、エネルギー吸収性能が低下すると予想されたが、1サイクル毎の吸収エネルギーは小さいものの、大きな変形性能を有し、トータルの累積吸収エネルギーでは大きな値を示す。
- (6) 外ケーブル構造のセグメント部材に対して外ケーブルの28%を内ケーブルに変更することでエネルギー吸収性能の向上を期待した内外ケーブル併用構造のセグメント部材では、1サイクル毎の吸収エネルギーは増加するものの、早期に内ケーブルが破断し、トータルの累積吸収エネルギーは反対に低下する。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，平成8年 制定
- 2) 沖見芳秀，右近一郎：複合非線形フレーム解析システムの開発，土木学会誌 技術最前線，Vol.80，pp.14～17，1995.1