

(115) 大偏心外ケーブル PC 桁の終局限界状態の実験

日本大学	大学院	正会員	○大熊康広
日本大学	大学院	正会員	井戸功誠
住友建設(株)	技術研究所	正会員	藤田 学
日本大学	理工学部	正会員	山崎 淳

1. はじめに 目的・方法・結果

緊張材の偏心を桁高さを越えて大きく取った構造(大偏心外ケーブル PC 桁)の終局限界状態の挙動を載荷実験により調べ、解析結果と比較し、理論上の予測に合った結果を得た。

PC 緊張材の応力～ひずみ関係は、トリリニア型であって、付着のある従来の桁では終局状態において、鋼材の応力～ひずみ関係は、トリリニア型の最終段階として、応力の増加がなく、ひずみが増加する領域となることが多い。

本報告に述べる実験では、緊張材は、断面積に必要な以上の余裕を持たせ、かつ、組み合わせバネを途中に挿入し、最終段階まで応力～ひずみ関係が線形となるものを用いた。

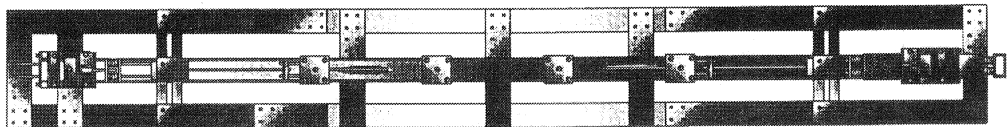
その理由の第1は、大偏心外ケーブル PC 桁の桁とケーブルの荷重増加に伴う分担の割合の推移を調べるために、ケーブルと桁の両方の荷重～たわみ関係が非線形となると、実験結果の解析の困難の度が増すため、ケーブルの荷重～たわみ関係の線形性が保たれるようにしたためであり、理由の第2は、実験の安全性が増すためである。

このようなケーブルの荷重～たわみ関係の線形への置き換えにより、実験の大偏心外ケーブル PC 桁の荷重応答特性は、供用限界状態と終局限界状態の途中では、実際のトリリニア型 PC 緊張材を用いた場合と異なる。しかし、終局限界状態での緊張材の応力～ひずみ関係は、実際の PC 緊張材のものと極力近くなるようにしてあるので、たわみとケーブルと桁の間での荷重分担割合も、実際の PC 緊張材を用いた場合と近いものであると判断して良いと思われる。

解析で予測されたように、ケーブルと桁の荷重分担割合は、終局に近づくにしたがって、ケーブルへの分担割合が多くなること、また、たわみの増加にしたがって、外ケーブルによるプレストレスの軸力成分が曲げモーメントを付加する効果(P $\delta$ 効果)が増加することが示された。それでも終局限界状態における荷重倍率(Load Factor)は供用限界状態を基準とした場合の内ケーブルと桁に対する要求値の1.7に近い値が得られた。

なお、実験装置は既報[1]と同じである。

平面図



側面図

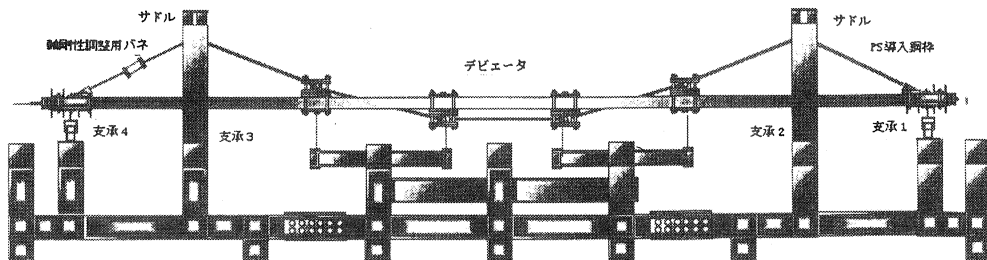


図-1 載荷装置平面図(上)及び正面図

2. 終局実験に向けての実験装置の検討

2-1 緊張材について

PC鋼線を使用するには、断面積が小さすぎ、取り扱いが困難になってしまうため、緊張材は7連の高剛性の鋼棒両端を含め8個のヒンジで連結し、全体が8個の関節でまがるようにしてある。ここで、この鋼棒の剛性について述べる。

ケーブル端部に軸剛性調節用バネを取りつけ、実験目的に応じてバネの個数を調節することにより高剛性の鋼棒の応力-ひずみ曲線が得られた。(図-3) これは軸剛性用バネの限界量に対する支間中央たわみを予測し、そのたわみが生じたときのケーブル張力を予測することによって鋼棒の換算ひずみを算出している。今回の実験では終局限界までの挙動の確認であり、バネの個数を10個にしている。

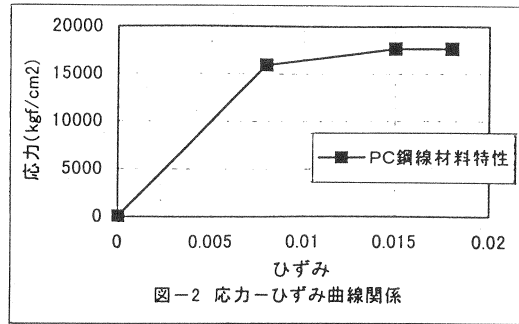


図-2 応力-ひずみ曲線関係

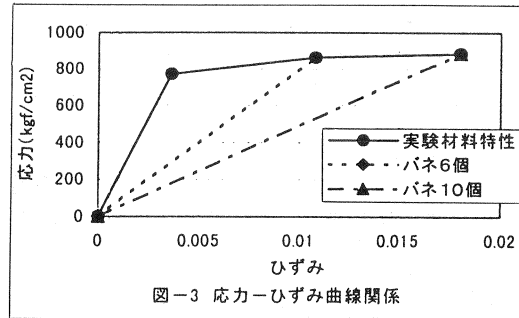


図-3 応力-ひずみ曲線関係

一方、(図-2)にはコンクリート標準示方書によるPC鋼材の応力-ひずみ曲線を示している。これら2つの図より、鋼棒の換算終局ひずみは0.01799であるのに対し、示方書によるPC鋼材の終局ひずみは0.018である。よって、終局におけるケーブル剛性は一致したことが確認され、終局限界実験を行える段階であるといえる。

2-2 サドル・デビエーターについて

位置決定の精度、容易さと載荷時の安全性向上を考慮し、外的支持をさせているサドルと、各ヒンジと桁の結合部で水平移動するヒンジ内蔵ブロックのデビエーターは、今回の実験でかなり大きな載荷荷重を作用させることを想定して、最大限に可動できるよう調節を行った。

2-3 たわみ限界について

実験供試体の構造上の問題で、ジャッキによる荷重により実験中浮き上がらないよう安全を考慮した、支間中央の下に設けてある防止鋼板により、たわみ限界が発生してしまう。今回予想された支間中央たわみ量は、防止鋼板に接触はしないが、実験状況に応じてこの鋼板を取り外して実験を行うこととした。

3. 載荷実験条件と今回の実験の位置づけ

3-1 実験条件

初期実験条件を表-1に示す。今までの載荷実験は、設計ロードバランス(桁に曲げが働かない状態:注1)を基準として行ってきた。今回終局実験を行う上で、できる限り張力増加量に余力を持たせなければならぬため、設計ロードバランスを基準にはできない。よって自立ロードバランス

表-1 初期実験条件

実験供試体	スパン長(cm)	500
	断面積(cm <sup>2</sup> )	200
	初期ケーブル偏心量(cm)	72.5
	内ケーブルプレストレス力(kg)	5000
ケーブル	鋼棒	M20
	バネ係数(tf/cm)	0.32
	外ケーブルプレストレス力(kg)	910

注1:設計ロードバランス

= 自重補正荷重 + 1/2 活荷重

注2:自立ロードバランス

= 桁の重さ + 実験装置の重さ

(注2)を基準として実験を行った。そのときの外ケーブルプレストレスト導入量を910kgfとしている。また、実験供試体の構造上のたわみ限界を考慮して、桁の剛性を増加させるために、内ケーブルプレストレス力を5000kgf導入した。

この条件のもと、載荷実験を行い、実験供試体における終局状態は、支点が圧壊し、さらに支間中央が圧壊したときとする。しかし、実験供試体の状態に関係なく、たわみ限界( $\delta = 16\text{cm}$ )に達した時点で実験を終了とする。

### 3-2 終局載荷実験理論

今回の終局限界状態の全荷重-たわみ関係の理論値を示している。L.F(ロードファクター)は(荷重/(死荷重+活荷重))である。このときの死荷重はモデル構造からの縮小という問題から自重補正荷重2.40tfとしている。また、活荷重は0.4kgfとしている。

理論上では、L.F=1.70に相当する全載荷荷重4772kgf、たわみが8.9cmのとき、スパン中央の鉄筋降伏が起り、L.F=1.98に相当する全載荷荷重5540kgf、たわみ10.7cmのとき、スパン中央上縁で圧壊が起こる。この時点をも今回の終局限界とする。

この理論をもとに、次節では載荷実験における、サイクル(載荷~除荷)ごとの実験状況を簡略的に述べる。ここからの載荷荷重の表現は、L.Fと実験荷重の両方で示す。

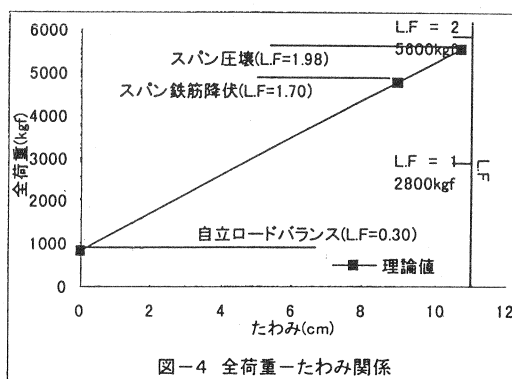


図-4 全荷重-たわみ関係

## 4. 終局実験における時系列的な挙動

### 1 サイクル目

初期条件(外ケーブル910kgf、内ケーブル5000kgf)で、理論値であるL.F=1.98までの載荷荷重を予定して行った。両支承と支間中央下縁に少しのひび割れが確認されただけで、実験供試体に大きな変化がなかった。さらに理論値を越えて、L.F=2.30に相当する載荷荷重5960kgf、実験供試体のたわみ限界寸前のたわみ12.6cmまで行った。しかし、実験供試体に大きな変化は見られなかった。この時点で、たわみ限界に到達寸前であったため、防止鋼板を撤去し、たわみ限界を約16cm確保した。

### 2 サイクル目

1サイクル目と同じ実験条件で行い、たわみ15.8cmまで載荷を行った。L.F=1.90に相当する載荷荷重5333kgf、たわみ13.6cmのとき、支承3部(図-1参照)でコンクリートの剥離が発生した。支承2や支間中央では大きな変化が見られなかった。

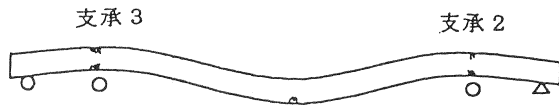
この時点で、1サイクル目はL.F=2.30、たわみ12.6cmであったことから、桁の剛性が弱まったといえる。

### 3 サイクル目

1, 2サイクル目で実験供試体に大きな変化がなかったため、軸圧縮力を強くするために内ケーブルプレストレス力を6000kgfまで増加させて、実験を行った。載荷荷重が増加するにつれ、支承3部でのコンクリート剥離がさらに進んだ。支承2部でも剥離が発生し、桁内部からなんらかの接触音が聞こえてきた。また、支間中央のひび割れが大きくなった。

4 サイクル目

3 サイクル目で桁の大きな変化が見られたので、さらに軸圧縮力を 10 tf まで増加させて行った。荷重が増加するにつれ、両支承部で激しい音がした。そして、ますます両支承のコンクリートの剥離が進んでいった。とくに支承 3 部のコンクリート上縁下縁とも剥離がひどくなっていったが、支承 2 はあまり変化が見られなかった。また、支間中央では、ひび割れが 3 サイクル目とあまり変化がなかった。



1 サイクル目～2 サイクル目  
(支承 3 部で小さなコンクリートの剥離)



3 サイクル目～4 サイクル目  
(支承 2 部で小さなコンクリートの剥離)



5 サイクル目以降  
(終局状態)

図-5 荷重実験による桁の変形図

5 サイクル目以降

1～4 サイクル行った結果、コンクリートの破壊までには至らないと判断し、4 サイクル目と同じ条件 (外ケーブルプレストレスト 910kgf、内ケーブルプレストレスト 10tf) で、 $L/F=2.07$  に相当する荷重 5800kgf ぐらいまで一気に荷重～除荷を繰り返した。徐々に両支承上からコンクリートが浮き上がり始めた。そしてついに荷重 4133kgf ( $L/F=1.48$ 、たわみ 15.5cm) の時、支承 3 部のコンクリート下縁が完全に圧壊し、鉄筋が露出してこの時点で実験を終了した。(図-6 参照) このときの支間中央部コンクリート下縁部には、ひび割れが確認されただけであった。また、支承 2 部の破壊は、図-7 のようにコンクリート下縁がすこし破壊しただけだった。

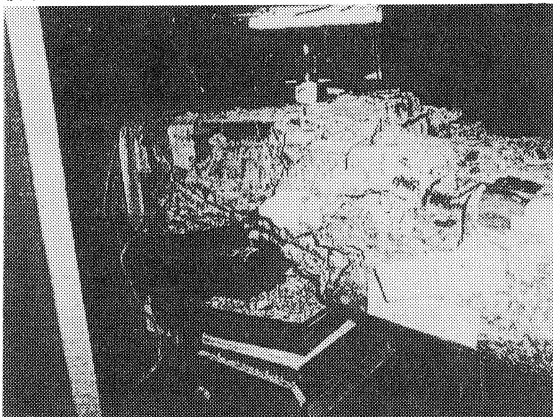


図-6 支承 3 部の破壊状況

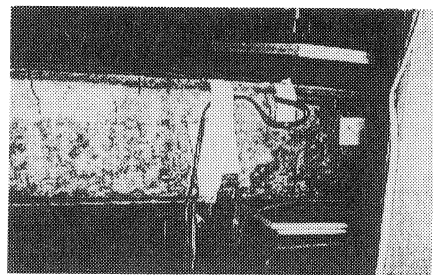


図-7 支承 2 部の破壊状況

5. 荷重実験結果と考察

4で記述した実験の時系列経過のすべてのデータはとったが、実験条件が各サイクルで異なり、後半は解釈不可能な荷重データになってしまったことから、もっとも実験データの状態が良い1サイクル目の実験データについて検討を行う。

図-8 荷重～たわみ関係

理論値の算出には次の仮定から求めた。

中央スパンに全荷重したときの、桁とケーブルのたわみはスパン中央でのみ等しい値として、桁は通常のとわみ曲線となり、ケーブルは2次放物線の形状を維持すると仮定して、荷重～たわみ関係を計算した。

理論値との対比は、ほぼ一致していた。理論上における終局たわみは 10.67cm であったが、1サイクル目の実験最大たわみ 12.6cm になってもコンクリートの圧壊にはいたらなかった。

これは予想以上に曲げ変形に対する桁のねばりがあったことが原因であると思われる。全荷重～たわみ関係は、理論値との一致より良好な結果であるといえる。

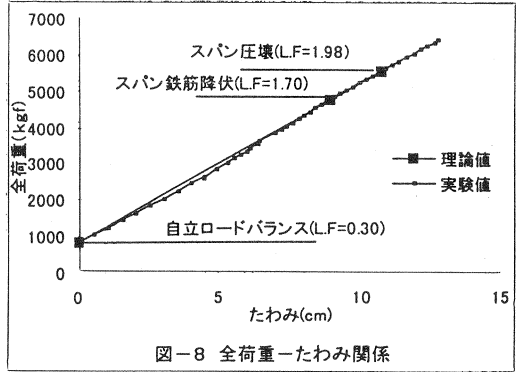


図-8 全荷重～たわみ関係

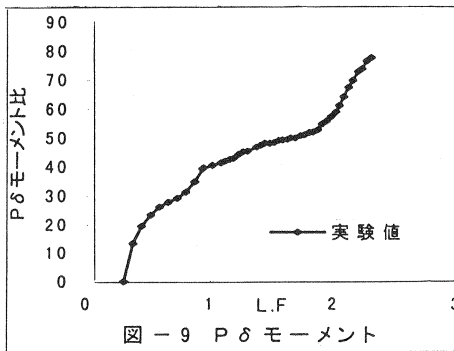


図-9 Pδ モーメント

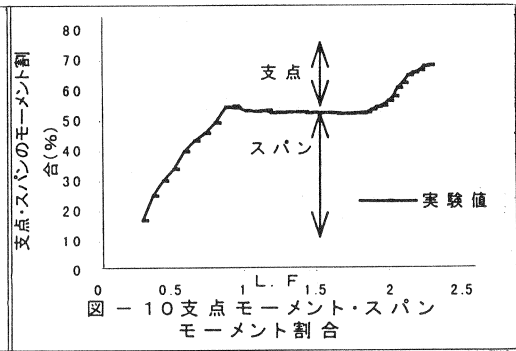


図-10 支点モーメント・スパンモーメント割合

図-9 桁に働くモーメントに対するPδモーメントの割合

Pδの算出方法は、荷重実験によって得られたデータを用いて算出した断面力(全モーメント)を求める。そして、荷重によって変化した端ケーブルの傾きを前もって検討しておくことで、ケーブル張力増加に対してどれくらいの軸力が発生しているのかがわかる。

桁の曲げモーメントに占めるPδの割合は、徐々に増加し、L.F=1.9、50%越えた付近で急激に増加している。また、最大たわみ $\delta=12.6\text{cm}$ 時のPδモーメントの割合は78%であった。

この増加の原因を、図-10の支点モーメント・スパンモーメントの割合もふまえて、次で検討している。

図-10 支点モーメント・スパンモーメントの全モーメントに対する割合

この図より、L.F=1.0付近まで比例関係に増加し、L.F=1.0~L.F=1.9までは55%の割合を保っていた。L.F=1.87のときにスパンモーメントが負に転じたので、この時点で支間中央の鉄筋が降伏していると思われる。これは、供用限界状態を基準とした場合の、内ケーブルと桁に対する要求値の1.7に近い値となった。

この結果より、図-9でL.F=1.90, 50%越えた時点で急激に増加したのは、スパンの鉄筋降伏に原因があると推測できる。

図-11 荷重分担割合

実験によって得られたコンクリートのひずみデータと鉄筋応力データを用いて桁の断面力を算出し、支点・スパンモーメントを求める。それらを足しあわせた全モーメントにより桁分担荷重を算出し、載荷荷重から引いた数値をケーブル分担荷重として表している。理論荷重 2633kgf (L.F=0.94) に対して実験荷重 3033kgf(L.F=1.08)のときに、それぞれでケーブル分担荷重と桁分担荷重の割合が等しいことがわかった。また、載荷荷重 5300kgf 付近 (L.F=1.90) で桁分担荷重の割合が低下したことより、桁が破壊するのではないかと推測できる。

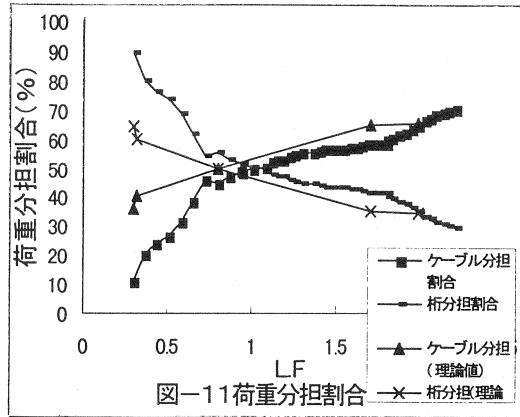


図-11 荷重分担割合

まとめ

- ・終局までの挙動が確認できた。(支承3、支承2が圧壊)
- ・Pδモーメントは、終局限界状態に近づくにつれ増加する。終局限界状態における全モーメントに対して、ほとんどPδモーメントが占めた。(約80%)
- ・ケーブル分担荷重は、終局限界状態に近づくにつれ増加する。(終局時の載荷荷重に対するケーブル分担荷重 約70%)
- ・スパン長に対する終局たわみは、理論値では1/47であるのに対し、実験値は1/40であったことより、予想以上に桁のねばりが強いことがわかった。
- ・今回の終局限界状態に達したときL.Fは1.90(データで大きな変化があった付近)であり、供用限界状態を基準とした場合の内ケーブルと桁に対する要求値の1.7倍にかなり近い結果が得られた。

謝辞

本研究は過去数年にもわたる月日のもと、日本大学理工学部土木工学科実験室で行われてきた。卒業研究における共同研究者である平成10年3月に卒業した野代繁之氏(建設省関東地方建設局)、山下 亮氏(PC橋梁)、張文耀(本学理工学研究科)の各氏の協力によって実現できたことに厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1: 佐々木・高原・山崎(啓)・山崎: 大偏心外ケーブルPCモデル桁の載荷実験、PC技術協会第6回シンポジウム論文集、1996年10月、pp.439-444
- 2: 山崎(啓)・高原・佐々木・山崎: 大偏心外ケーブルPC桁の耐荷機構の解析、PC技術協会第6回シンポジウム論文集、1996年10月、pp.433-438
- 3: 高原・山縣・藤田・山崎: 大偏心外ケーブルPC桁の設計の合理性、PC技術協会第6回シンポジウム論文集、1996年10月、pp.427-432
- 4: 佐々木(平成9年3月修士卒): 大偏心外ケーブルPC桁の載荷実験、平成8年修士論文、1997年2月
- 5: (社)日本道路協会: 道路橋示方書(I共通編・IIIコンクリート橋編)同解説、1994年2月
- 6: 土木学会: コンクリート標準示方書、1996年