

(105) 外ケーブル方式PCげたの曲げ載荷実験

建設省土木研究所

西川 和廣

同上

内田 賢一

同上

正会員 ○廣松 新

(社) プレストレスト・コンクリート建設業協会

正会員 菅谷 晃彦

1. はじめに

PC橋における外ケーブル工法は、上部工の軽量化が可能なこと、プレキャストセグメント工法との併用により施工の省力化が期待できること等の長所がある。しかし外ケーブル方式PCげたの終局時の挙動に関しては不明な点が残されており、また、国内の規準類も十分には整備されていない。そこで、建設省土木研究所と(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会は、外ケーブル工法の設計・施工指針を作成することを目標に、同工法を適用したPC橋の設計・施工の合理化に関する共同研究を平成10年度より実施している。本研究はその一環として実施されたものであり、外ケーブル方式単純PCげたの曲げ載荷実験を実施し、内外ケーブル比率、偏向部設置間隔、プレキャストセグメント工法の併用等が、曲げ破壊性状に与える影響を確認した。さらに、非線形解析により実験のシミュレーションを行った。

2. 実験概要

本研究では、外ケーブル方式単純PCげたにおいて、内外ケーブル比率、偏向部設置間隔、引張鉄筋量、プレキャストセグメント工法の併用を実験因子とし、これらの因子が、曲げ性状(終局耐力、ひびわれ発生状況、PC鋼材の増加ひずみ等)へ及ぼす影響を確認するため、供試体を8体制作し、曲げ載荷実験を実施した。

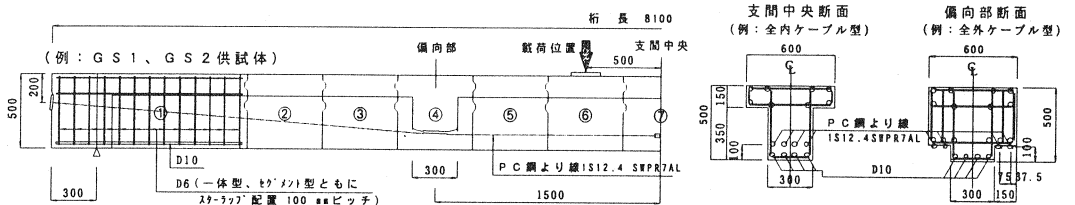


図-1 供試体形状寸法と配筋 (単位 mm)

図-1に供試体の形状寸法および配筋状態を、表-1に供試体一覧を示す。供試体は、断面をけた高0.5m、ウェブ厚0.3m、上フランジ幅0.6m、厚さ0.15mのT形状とし、けた長を8.1m、支間長Lを7.5mとした。また、各供試体ともケーブルはPC鋼より線1S12.4(SWPR7AL)を4本配置した。

ここで実験因子について補足する。内外ケーブル比率に関しては、一体型供試体(G1,G2,G3)では外ケーブル比率をそれぞれ100%、50%、0%とし、セグメント型供試体(GS1,GS2)では外ケーブル比率を100%、50%とした。偏向部設置間隔Sに関しては、Sが0とみなせる、全内アンボ

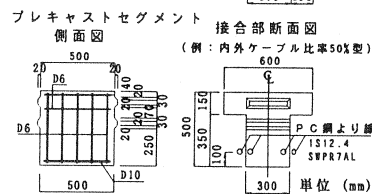


表-1 供試体一覧

| 供試体 | PC鋼材比% | | 偏向部 設置 間隔 m | コンクリート 強度 N/mm ² | 引張 鉄筋量 | 備考 |
|-----|--------|-----|-------------------|-----------------------------------|-----------|--------------|
| | 内 | 外 | | | | |
| G1 | 0 | 100 | 3.0 | 55.7 | 4-D10 | 全外ケーブル |
| G2 | 50 | 50 | 3.0 | 47.5 | 4-D10 | 外ケーブル比 50% |
| G3 | 100 | 0 | 3.0 | 51.9 | 4-D10 | 全内ボルトケーブル |
| G4 | 100 | 0 | 3.0 | 51.3 | 4-D10 | 全内アンボットケーブル |
| G5 | 0 | 100 | 5.0 | 51.3 | 4-D10 | 偏向部間隔延長 |
| G6 | 0 | 100 | 3.0 | 50.5 | 4-D16 | 引張鉄筋量増 |
| GS1 | 0 | 100 | 3.0 | 51.9(47.8) | 4-D10 | プレキャスト・セグメント |
| GS2 | 50 | 50 | 3.0 | 55.1(50.0) | 4-D10 | プレキャスト・セグメント |

※GS1,GS2セグメント供試体コンクリート強度は、奇数セグメント(偶数セグメント)の値

ンドケーブルのG4と、文献⁹⁾に示されている「標準的な構造」の範囲($S/L < 0.67$)外となるように偏向部設置間隔を延長したG5を製作した。偏向部設置間隔はG5では5m($S/L = 0.67$)、その他の供試体では3m($S/L = 0.4$)である。また、引張鉄筋量の影響を確認するため、引張鉄筋量を増加させたG6を製作した。引張鉄筋はG6ではD16を4本配置(引張鉄筋比0.41%)し、その他の供試体ではD10を4本配置(引張鉄筋比0.15%)した。写真-1にG1の配筋状態を、写真-2にGS2の製作状況を示す。

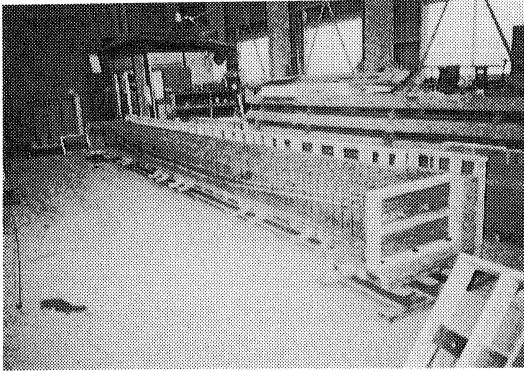


写真-1 配筋状況 (G1)

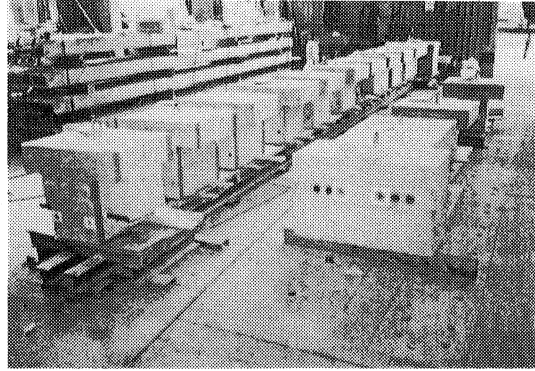


写真-2 供試体製作状況 (GS2)

各供試体とも、PC鋼材には一本当たり $929\text{N}/\text{mm}^2$ の初期応力度を導入し、その時のPC鋼材ひずみは約 4600μ であった。また、材料試験の結果、PC鋼材の降伏ひずみは 8100μ 程度であった。

セグメント型供試体の製作では、あらかじめコンクリート多段キーが施されたセグメントにエポキシ樹脂系接着剤を塗布した後、所定のプレストレスを導入し、各セグメントを一体化させた。

実験は、図-1に示すように供試体を支間長7.5mで単純支持し、荷重を支間中央から左右0.5mの位置で静的に載荷する2点単調載荷方式として、供試体が曲げ破壊を起こし最大耐力を確認するまで行った。

3. 実験結果および考察

3.1 耐力

図-2および図-3に、各供試体の荷重-変位関係と各状態の関係を示す。(図-2はG1、G2、G3、GS1、GS2、図-3はG1、G4、G5、G6) コンクリート上縁圧縮ひずみ 3500μ 時の載荷荷重を比較すると、G6(1.38)が最大で、以下、G3(1.31)、G2(1.15)、G4(1.13)、G1(1.00)、G5(0.92)、GS2(0.81)、GS1(0.66)の順であった。()内の数値はG1を1としたときの載荷荷重の比である。

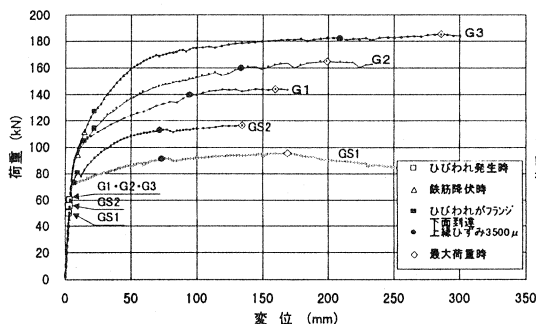


図-2 荷重-変位(支間中央) (G1~G3, GS1, GS2)

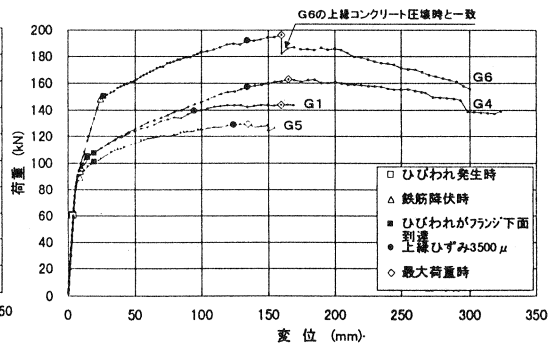


図-3 荷重-変位(支間中央) (G1, G4, G5, G6)

以下、各実験因子が耐力に及ぼした影響について述べる。

(1) 内外ケーブル比率およびプレキャストセグメント工法併用の影響

図-4にG1、G2、G3、GS1、GS2の、外ケーブル比率とコンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時の載荷荷重との関係を示す。一体型供試体、セグメント型供試体ともに、外ケーブルの比率が増えるるとほぼ同じ傾きで、コンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時の載荷荷重が低下したことがわかる。この時点での載荷荷重を比較すると、セグメント型供試体の載荷荷重は、内外ケーブル比率が同じ一体型供試体の載荷荷重の65~70%であった。また、この時点での各供試体の変位は、一体型供試体の場合は外ケーブルの比率が増えるにつれて変位が減少する傾向がみられたが、セグメント型供試体ではその傾向はみられなかった。

(2) 偏向部設置間隔の影響

図-5に、偏向部設置間隔と、各時点(ひびわれ発生時、鉄筋降伏時、コンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時)での載荷荷重の関係を、また、図-6に外ケーブルの偏心量の減少量と載荷荷重の関係を示す。ここで全内アンボンドケーブルのG4は、偏向部が無数に設置された構造と考えることができるので、偏向部設置間隔は0とみなして図中に示している。図-5より、ひびわれ発生荷重に関しては偏向部設置間隔の影響はほとんどないが、コンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時には偏向部設置間隔の影響が大きくなり、偏向部設置間隔が広がるにつれて載荷荷重が直線的に低下したことがわかる。この理由としては、図-6に示すように、偏向部設置間隔が大きい供試体ほど、鉄筋の降伏後、供試体の変形に伴いPC鋼材の偏心量が急激に減少したためと考えられる。したがって、曲げモーメントが最大となる位置に偏向部を追加し、PC鋼材の偏心量の変化を拘束すれば、外ケーブルとすることによる耐力低下を抑制できると考えられる。

(3) 引張鉄筋量の影響

引張鉄筋量以外は同一条件であるG1とG6を比較すると、G6のコンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時の載荷荷重はG1の値を約38%上回り、全供試体中の最大値を示した。また、その時点でのG6の支間中央変位もG1の値を大きく上回った。したがって、外ケーブル方式PCげたにおいても、引張鉄筋を増加配置することにより耐力とじん性の低下を補えることが確認された。

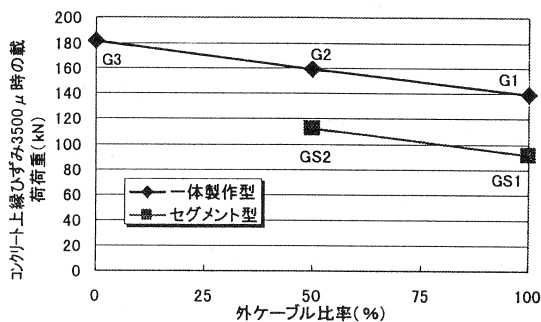


図-4 外ケーブル比率-載荷荷重(コンクリート上縁ひずみ3500 μ 時)

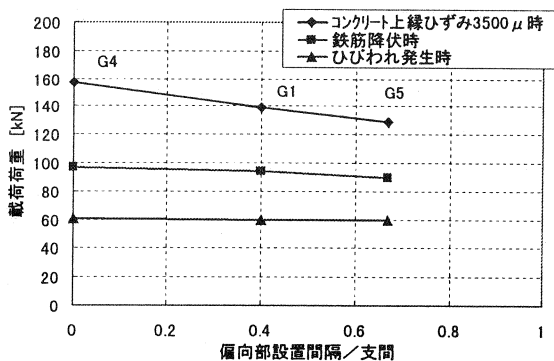


図-5 偏向部設置間隔/支間-載荷荷重

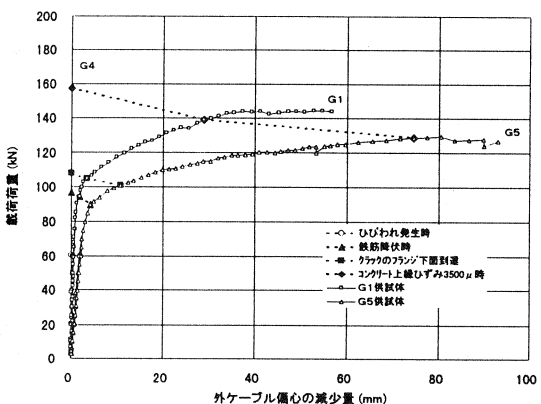


図-6 載荷荷重-外ケーブル偏心の減少量

3.2 破壊性状

図-7に各供試体のひびわれ状況を、写真-3、4にG1およびGS1の破壊状況(最大荷重記録時)を示す。各供試体の破壊性状は、G1、G2、G5、G6、GS1では、ひびわれ発生後、外ケーブルが降伏する前に上縁のコンクリートが圧縮破壊した。G3では、内ケーブルの降伏後に上縁のコンクリートが圧縮破壊した。G4では内アンボンドケーブルの降伏前に上縁のコンクリートが圧縮破壊した。GS2では、上縁のコンクリートが圧縮破壊した後、内ケーブルが破断し急激に耐荷力を失ったが、外ケーブルは降伏しなかった。また、セグメント型供試体では写真-4に示すように、セグメント継目部付近のコンクリートにひびわれが集中したため、ひびわれの本数は一体型供試体に比べて極端に少なく、たわみが増大するにつれて継目部付近のひびわれ幅が拡大した。今回の実験において、コンクリート上縁圧縮ひずみ 3500μ 時では、全ての供試体において外ケーブルは降伏まで至らなかった。

一体型供試体G1~G6のひびわれ発生時における載荷荷重、たわみはほぼ等しくなった。これより、一体型供試体においては、ひびわれ発生時までには、内外ケーブル比率、偏向部設置間隔、および引張鉄筋量の影響は小さいものと考えられる。

図-7で、ひびわれ分散性に関して、内外ケーブル比率に着目すると、一体型供試体、セグメント型供試体ともに外ケーブル比率が大きくなると、ひびわれが狭い範囲に集中したことがわかる。内外ケーブル比率以外の実験因子に着目すると、終局時のひびわれは、引張鉄筋を増加配置したG6が最も広く分散したが、断面内の鋼材量が同じであるG1、G4、G5のひびわれ分散性は同程度だった。また、P C鋼材に付着のあるG3と付着のないG4のひびわれ分散性を比較すると、G3の方が広い範囲にひびわれが分散した。したがって、ひびわれ分散性に関しては、偏向部設置間隔の影響は顕著には現れないが、断面内に配置された付着のある鋼材の量は大きく影響することがわかった。

3.3 外ケーブルP C鋼材増加ひずみ

表-2に各供試体の、曲げひびわれ発生からコンクリート上縁圧縮ひずみ 3500μ 時までの各状態における、載荷荷重値と外ケーブルP C鋼材増加ひずみを示す。また、図-8にコンクリート上縁圧縮ひずみ 3500μ 時

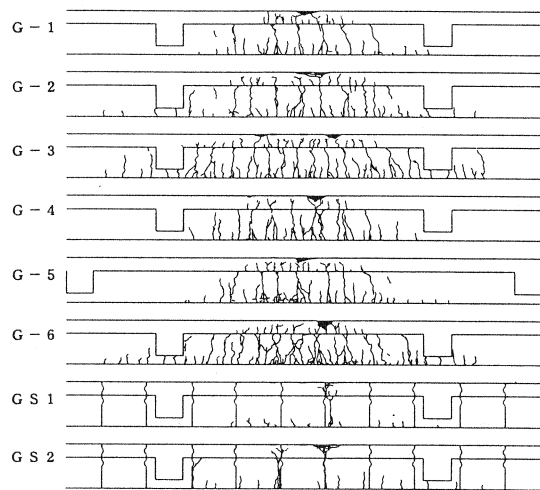


図-7 ひびわれ状況

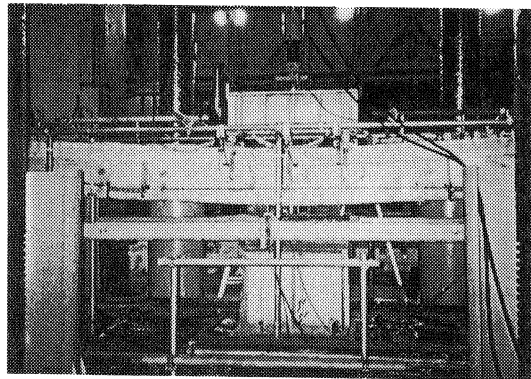


写真-3 一体型供試体の破壊状況(G1)

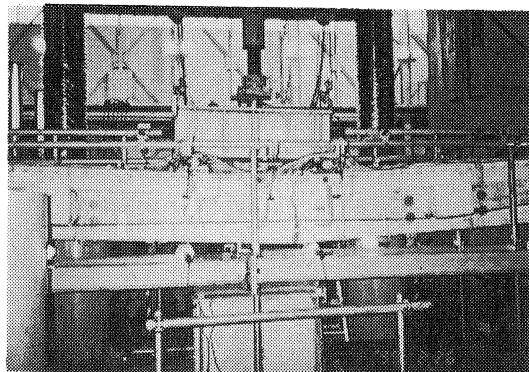


写真-4 セグメント型供試体の破壊状況(GS1)

における、支間中央変位と外ケーブルPC鋼材増加ひずみの関係を示す。図-8より、各供試体のコンクリート圧縮ひずみ3500 μ 時の外ケーブルPC鋼材増加ひずみは、その時点での変位にほぼ比例していることがわかる。

各供試体のコンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時の外ケーブルPC鋼材増加ひずみを比較すると、一体型供試体では、G1、G5が低い値を示した以外は、ほぼ同等の値となった。セグメント型供試体では、GS1、GS2の2体とも一体型供試体と比較して小さい値を示した。これはセグメント型供試体では、ひびわれが一箇所に集中し、供試体の変位が小さい状態で、コンクリート上縁圧縮ひずみが3500 μ に達したため、外ケーブルPC鋼材の増加ひずみが一体型より小さい値を示したものと考えられる。

偏向部設置間隔に着目してG1、G4、G5のコンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時のPC鋼材増加ひずみを比較すると、G4が最大で、以下、G5、G1の順であり、コンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時の載荷荷重の順とは一致しなかった。したがって、偏向部設置間隔が増すにつれて、コンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時の載荷荷重が低下する原因は、PC鋼材の増加ひずみより、偏心量の減少の方が支配的であったといえる。

引張鉄筋量に着目してG1、G6のコンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時の外ケーブルPC鋼材増加ひずみを比較すると、G6の値がG1の値を約41%上回った。これは、引張鉄筋を増加配置したG6は、G1よりもじん性が大きく、PC鋼材ひずみが十分増加してから、コンクリートの上縁圧縮ひずみが3500 μ に達したためと考えられる。

なお、コンクリート上縁ひずみ3500 μ 時での外ケーブルPC鋼材ひずみ増加量を応力に換算すると、301~598N/mm²であり、全ての供試体において、文献¹⁾の「標準的な構造」において、設計で考慮して良いとされているPC鋼材の増加応力度200N/mm²を上回った。

4. 解析値との比較

今回の実験供試体において、2種類の非線形解析により実験値に対するシミュレーションを行った。図-9および図-10に、G1およびGS1の荷重-支間中央変位の関係を示す。ここで解析値1は有限要素法の変位法に鉄筋コンクリートの非線形構成則を適用した解析法の計算値で、解析値2はファイバーモデルを用いた平面骨組み非線形解析法の計算値である。いずれの解析法においても材料の非線形性と幾何非線形を考慮できるものである。材料特性データは材料試験値を可能な限り反映させた値を入力した。

一体型供試体に関しては、解析値1の履歴は実験値とよく一致したが、コンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時の変位が、実験値を大きく上まわった。解析値2は、コンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時の載荷荷重は実験値とよく一致したが、全体的に同一変位時における荷重が実験値よりも小さくなる傾向がみられた。

表-2 荷重-外ケーブルPC鋼材増加ひずみ

| 供試体 | ひびわれ発生時 | | 鉄筋降伏時 | | コンクリートひずみ3500 μ 時 | |
|-----|----------|-----------------------------|----------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| | 載荷荷重(kN) | PC鋼材ひずみ($\times 10^{-6}$) | 載荷荷重(kN) | PC鋼材ひずみ($\times 10^{-6}$) | 載荷荷重(kN) | PC鋼材ひずみ($\times 10^{-6}$) |
| G1 | 59.9 | 72 | 94.3 | 173 | 139.1 | 1977 |
| G2 | 60.0 | 90 | 94.3 | 219 | 159.4 | 2863 |
| G3 | 59.9 | 173 | 111.5 | 1030 | 182.0 | 測定不能 |
| G4 | 60.5 | 72 | 96.7 | 167 | 157.3 | 2959 |
| G5 | 60.0 | 73 | 89.7 | 165 | 128.5 | 2604 |
| G6 | 60.0 | 80 | 148.6 | 492 | 191.9 | 2804 |
| GS1 | 49.9 | 68 | | | 91.1 | 1512 |
| GS2 | 55.0 | 88 | | | 112.3 | 1491 |

※G3、G4のPC鋼材ひずみは内ケーブルの数値である。

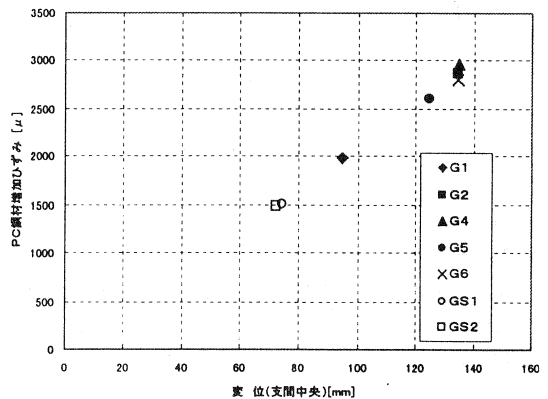


図-8 変位(支間中央)-PC鋼材増加ひずみ
(コンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時)

セグメント型供試体に関しては、同一変位における荷重が解析値1では実験値よりも大きくなり、解析値2では実験値よりも小さくなる傾向がみられた。

以上、2種類の非線形解析方法により、実験のシミュレーションを試みたが、どちらの解析方法においても、コンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時の荷重、変位および履歴を同時に一致させることはできなかった。

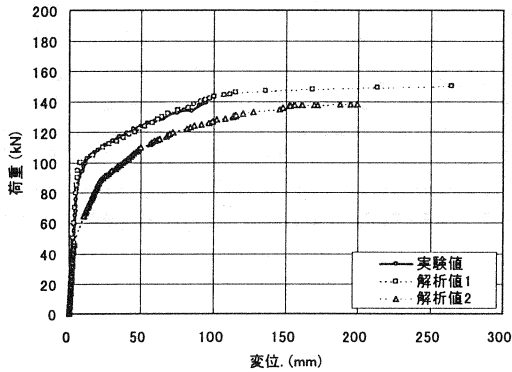


図-9 荷重-支間中央変位(G1)

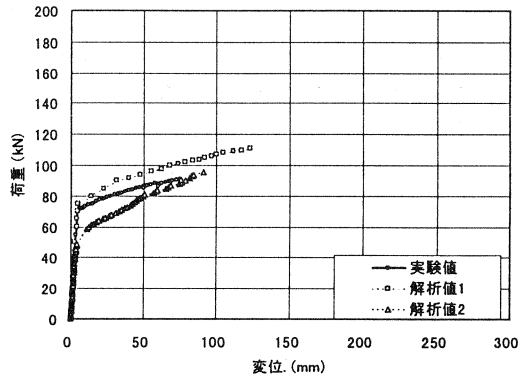


図-10 荷重-支間中央変位(GS1)

5. まとめ

外ケーブル方式PCげたにおいて、内外ケーブル比率、偏向部設置間隔、引張鉄筋量、プレキャストセグメント工法の併用を実験因子とし、これらが、曲げ性状(終局耐力、ひびわれ発生状況、PC鋼材の増加ひずみ等)へ与える影響を確認するため、供試体を8体製作し、曲げ載荷実験を実施した。本研究により以下の知見が得られた。

- 1) 同一条件の供試体において、外ケーブル比率が増すと、一体製作型供試体、セグメント型供試体ともにコンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時の載荷荷重は低下し、ひびわれも狭い範囲に集中するが、一体型供試体においては、引張鉄筋を増加配置することで耐力低下の防止、ひびわれ分散性の向上が可能である。
- 2) セグメント型供試体では、同じ内外ケーブル比率の一体型供試体に比べて、コンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時での載荷荷重は低下する。本研究では一体型の65~70%に低下した。また、ひびわれはセグメント継目部付近に集中した。
- 3) 偏向部設置間隔が増すにつれて、供試体の変形に伴うPC鋼材偏心量の減少が大きくなるため、耐力は小さくなる。
- 4) 一体型供試体においては、ひびわれ発生時点での内外ケーブル比率、偏向部設置間隔の影響は小さく、この時点までは外ケーブル方式PCげたと内ケーブル方式PCげたとの曲げ性状の差異はほとんどない。

6. おわりに

本研究では外ケーブル方式単純PCげたの曲げ載荷実験を行い、曲げ破壊に関する基本的な性状を確認したが、今後はせん断に関する実験および構造細目に関する検討を行う予定である。

<参考文献> 1) (社)プレストレストコンクリート技術協会: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) 平成8年3月