

論文

[2155] 引張軸力を受けるPC部材の耐荷力特性

森田信彦^{*1}・岩永巧^{*2}・幸左賢二^{*3}・金海鉦^{*4}

1. はじめに

圧縮軸力および曲げモーメントが作用するPC部材については、種々の実験・解析が実施され、その部材耐荷力および変形挙動の評価手法はある程度確立されている。一方、引張軸力および曲げモーメントが作用するPC部材については、従来その適用例が少なかったこともあり、終局時挙動の実験的検討はきわめて少ない状況にある。しかしながら、最近の新構造形式の開発に伴って、斜版付箱桁橋や吊床版橋のように、使用状態（設計荷重時）ではPC部材として圧縮力が卓越しているものの、終局状態では引張軸力によって断面が決定される構造が増加しつつあり、引張軸力により部材全断面もしくはその大部分が引張状態となることによって破壊に至る構造形式が増えている。このような構造形式の終局時挙動を適切に評価するためには、引張軸力作用下における部材耐荷力・変形挙動等について十分把握しておく必要がある。本研究は、現在計画中の斜版付箱桁橋をモデル橋とし、引張軸力と曲げモーメントの比率をパラメーターとして、引張軸力を受けるPC部材の耐荷力・変形挙動について評価したものである。

2. 実験方法

2.1 実験目的

(1) 耐荷力確認

終局時の部材挙動は、引張軸力と曲げモーメントの作用比率によって異なるものと考えられるため、この比率をパラメータとして実験を実施した。図-1に示すように、PC部材として圧縮力が卓越する部材断面に、実橋における低軸力比荷重増加タイプ（ $\beta(D+L)$ ： β =荷重係数、 D =死荷重、 L =活荷重、以下低軸力タイプという）と高軸力比荷重増加タイプ（ $D+\alpha L$ ： α =荷重係数、以下高軸力タイプという）および引張軸力のみを増加させる3種類の作用荷重を組み合わせた。

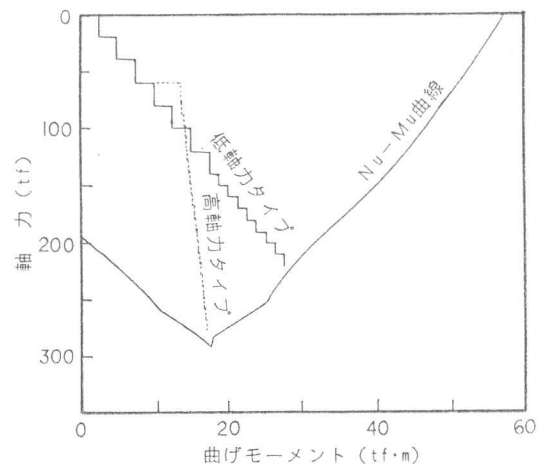


図-1 載荷経路図

(2) 変形挙動確認

引張軸力作用下での曲げ変形および伸び性状には、ひびわれ発生状況、鉄筋の抜け出し等が大きく影響するものと考えられる。構造物全体の終局時挙動解析には、部材耐荷力のみならず変形性能も大きく影響することから、実験的に引張軸力および曲げモーメント作用下での変形状態を把握し、作用荷重の変化に伴う変形挙動を評価した。

2.2 実験供試体

供試体は表-1に示す3体を作成した。供試体形状は図-2に示すように実部材の1/3モデルとし、実橋における終局耐力決定断面である斜版主塔接合部断面 $800 \times 1500\text{mm}$ を $250 \times 500\text{mm}$ の寸法に置換した。また、柱高さは、ひびわれや変形状態を計測するため、部材断面高さの6倍程度

*1 (株)オリエンタルコンサルタンツ 大阪支社 技術第二部 主任技師（正会員）

*2 阪神高速道路公団 神戸建設部 設計課 設計第三係長

*3 阪神高速道路公団 工務部設計課 技術係長、Ph.D.（正会員）

*4 (株)国際建設技術研究所 技術部（正会員）

の3.0mとした。導入プレストレスはSEE工法のF130T（断面積6.91cm²、引張荷重130.9tf）を2本使用し、基部側を固定端、頂部側を緊張端とした。部材断面の応力分布は、P C鋼材の偏心距離を6.7cmとすることで、実橋とほぼ同じ上縁側219kgf/cm²、下縁側23kgf/cm²とした。表-2に使用材料の物理定数を示す。

表-1 実験要因組合せ

供試体No	荷重 タイプ	P C鋼材	せん断補強		
			補強方法	スターラップ*	軸方向鉄筋
N o. 1	低軸力	2-F130T	せん断補強のみ	D10 @150mm	6本-D10
N o. 2	高軸力	2-F130T	現行設計	D10 @100mm	10本-D10
N o. 3	軸力のみ	2-F130T	〃	D10 @100mm	10本-D10

(注1) 高軸力タイプとはD+αLに相当する荷重組合せを示す。
(注2) 低軸力タイプとはB(D+L)に相当する荷重組合せを示す。
(注3) 軸力のみとは外力として引張力のみを加えた場合を示す。
(注4) せん断補強の現行設計とは、ねじりとせん断に対する鉄筋量を配置した場合である。

表-2 使用材料の物理定数

コンクリートの物理試験結果

供試体No	圧縮強度 (kgf/cm ²)	静弾性係数 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)
N o. 1	597	349,000	39	66
N o. 2	618	380,000	42	69
N o. 3	500	325,000	40	60

P C鋼材の材料試験結果 (SWPR7B)

引張強度 (kgf/mm ²)	降伏強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/mm ²)	伸び (%)
200	171.20	19,400	6.7

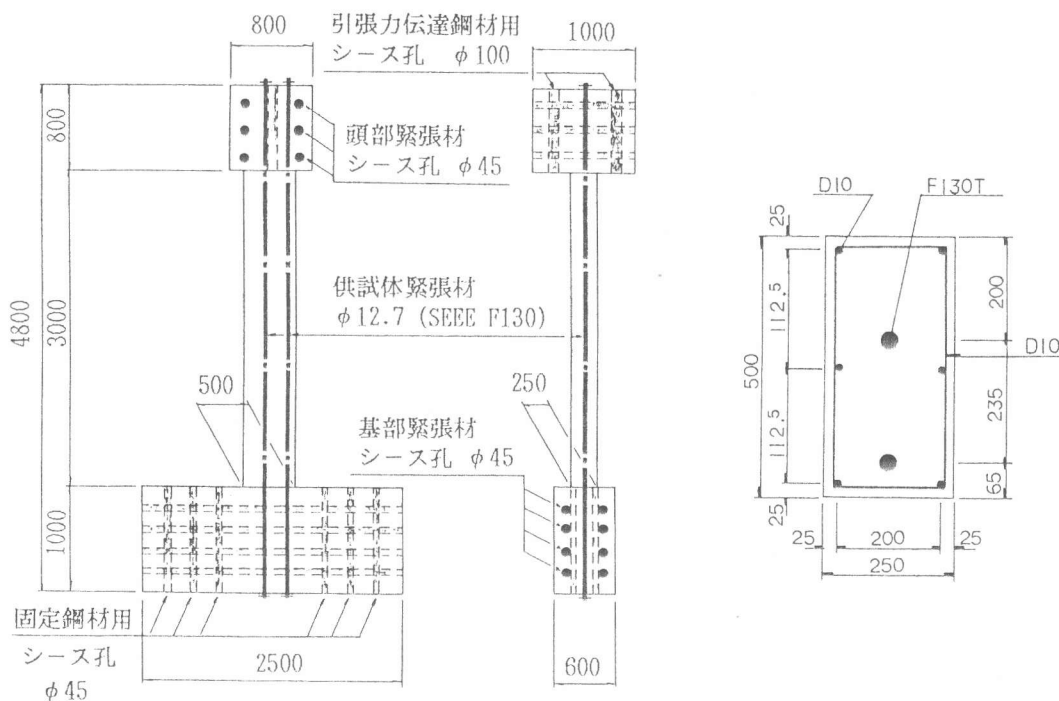


図-2 実験供試体

2. 3 荷重方法および測定項目

荷重装置の概要を図-3に示す。同図のように水平荷重フレーム内に供試体を水平に設置し、供試体基部をP C鋼棒（φ32mm）で荷重フレームに固定した。作用荷重のうち、引張軸力は供試体頂部に配置したP C鋼材（F270）を緊張することによって、曲げモーメント（水平力）は油圧ジャッキによって荷重した。なお、引張軸力の作用方向は、供試体頂部の変形に伴って変化させ、部材軸と一致するようにした。荷重順序は、図-1に示すようにまず軸力増分を、続いて曲げモーメント増分を荷重し、これを1サイクルとして、荷重経路前半部は20tfピッチで、後半部は10tfピッチで軸力を増加させた。計測方法を図-4に示す。

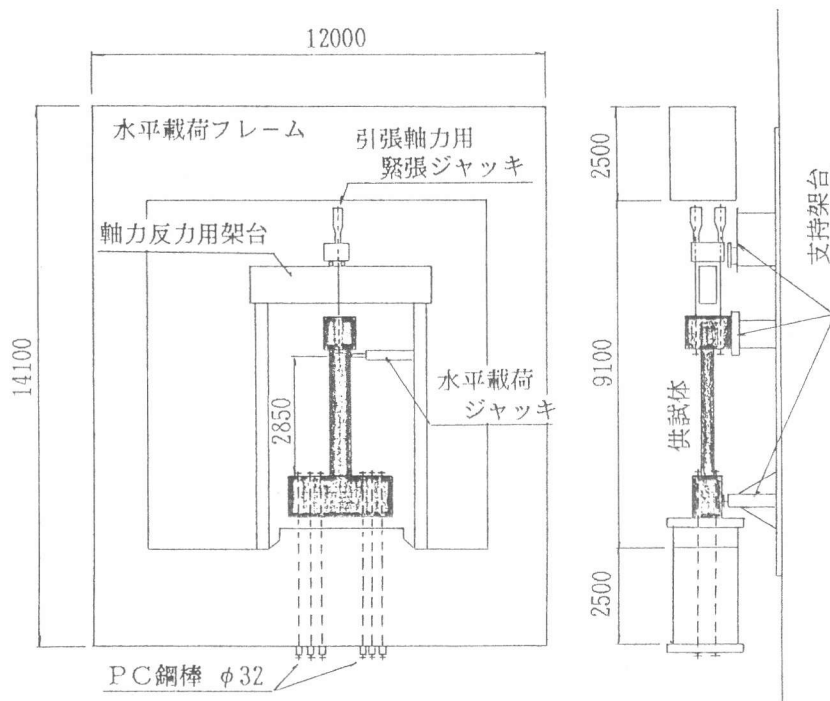


図-3 荷重装置

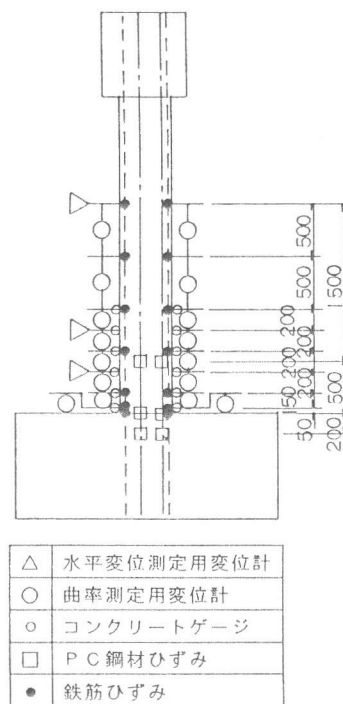


図-4 計測方法

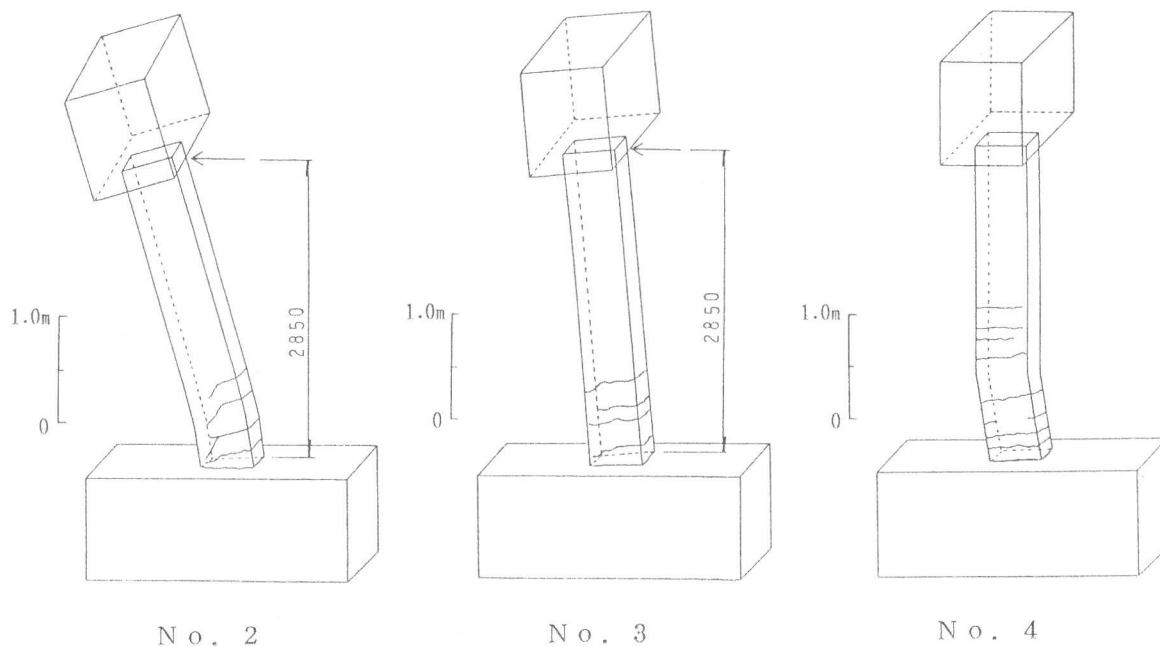


図-5 ひびわれ状況図

3. 実験結果および考察

3. 1 実験結果

実験における終局状態の判定は、大型実験実施時の安全性に配慮して、次のような状態とした。

① コンクリートの圧縮縁ひずみがほぼ 3000μ （道路橋示方書¹⁾の圧縮終局ひずみの90%）に達した時点

② P C 鋼材の全引張ひずみ（有効ひずみ+計測ひずみ）がほぼ 12000μ （P C 鋼材F130Tの0.2%耐力に相当）に達した時点

③ひびわれが供試体全周に到達し、P C部材としての挙動を呈し得なくなった時点

図-5に各供試体のひびわれ状況図を示す。

(1) N o. 1 供試体

ひびわれ発生は軸力150tfであった。その後軸力の増加とともにひびわれが増加し、軸力207tf、曲げモーメント28.6tf・mの段階で、P C鋼材の全引張ひずみが11650 μ に達するとともに接合部のひびわれ幅が3mmとなったため、終局状態に至ったものと判定した。

(2) N o. 2 供試体

ひびわれ発生は軸力167tfで接合部に生じた。その後ひびわれはいずれもほぼ水平方向に進展したが、接合面から70cmの位置に発生したひびわれは軸力226tf、曲げモーメント19.7tf・mで圧縮縁まで到達したため終局状態に至ったものと判定した。

(3) N o. 3 供試体

ひびわれ発生は軸力100tfであり、他の供試体とは異なり接合面から1.0m、1.5mの位置に生じた。その後軸力の増加とともにひびわれが増加し、P C鋼材の全引張ひずみが12500 μ に達したため終局状態に至ったものと判定した。このときの平均ひびわれ間隔は約20cmであった。

3. 2 耐荷力およびNu-Mu関係の評価

(1) 解析手法

引張軸力および曲げモーメント作用下での耐荷力を評価するために、Nu-Mu相関図を作成して実験結果と比較した。Nu-Mu相関図の作成は、有効プレストレスによる断面内のひずみ分布を求め、これに荷重(N、M)によるひずみ分布を加えて、合成ひずみ分布を求める。この合成ひずみ分布の状態で、①コンクリートの圧縮縁ひずみが3500 μ に達したとき、②P C鋼材の引張縁ひずみが6.7%に達したとき、③鉄筋のひずみが2.0%に達したときのいずれかの終局条件を満足する荷重(N、M)を求めてNu、Muとした。

使用材料の応力-ひずみ関係を図-6に示す。同図でコンクリートの圧縮側2次放物線区間は、 $\sigma' = 1/3 f_c'$ の割線勾配が各供試体弾性係数と一致するように $\sigma' = f_c'$ となる点のひずみ $\epsilon_{x'}$ を決定した。

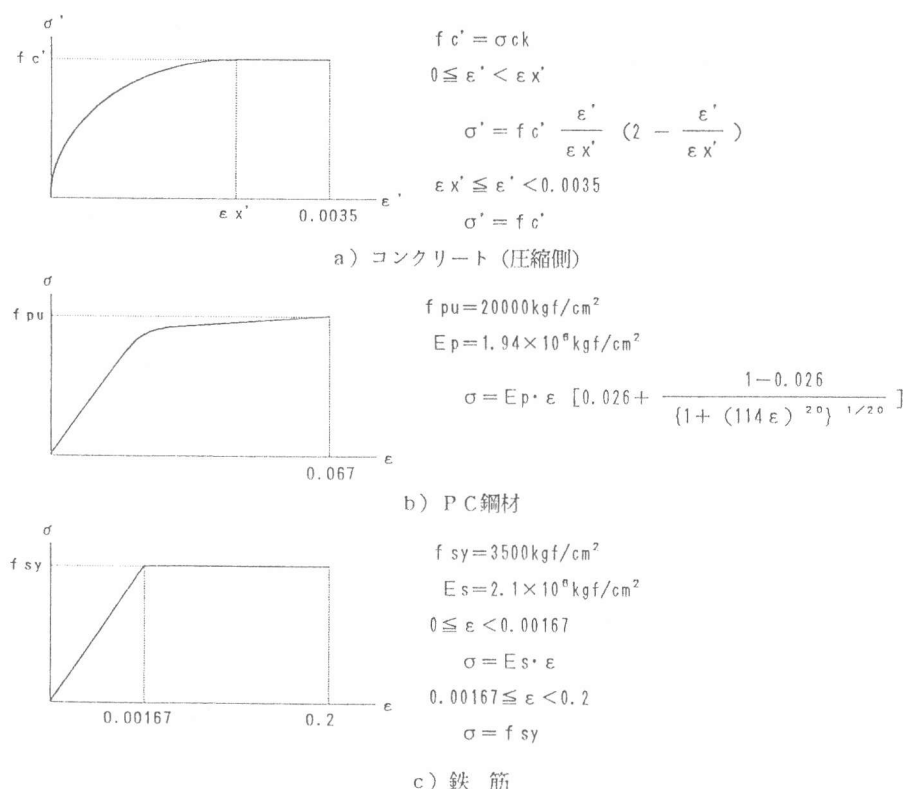


図-6 使用材料の応力-ひずみ関係

コンクリートの圧縮側応力-ひずみ関係については軟化域を考慮した関係が種々提案されているが、本研究では道路橋示方書に示されている関係を用いた。またさらに、耐荷力の定義としては、本研究のように使用材料の終局ひずみで定義する方法と、軸力 N が作用する時の部材の曲げモーメント-曲率関係 ($M-\phi$ 関係) における最大曲げモーメント M_{max} で定義する方法とが考えられるが、これらについて $Nu-Mu$ 相関図の比較を行ったところ、図-7 に示すように両者には有意な差が認められなかったため、前述の方法で評価することとした。

引張軸力作用下においてはコンクリートの引張剛性が変形性能に有効に寄与するものと考えられるため、引張側応力-ひずみ関係は Collins らによって提案²⁾ されている、ひびわれ間のコンクリート剛性を考慮した関係式 (1) を採用した。

$$\sigma = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot f_{ct}}{1 + \sqrt{500\varepsilon}} \quad \varepsilon > \varepsilon_{ct} \quad (1)$$

ここに、 f_{ct} : コンクリートの引張強度、 α_1 : 鋼材の付着特性に関する係数 (異形鉄筋 1.0、鋼より線 (付着有) 0.7)、 α_2 : 荷重の種類に関する係数 (短期単調載荷 1.0)、 ε_{ct} : $\sigma = f_{ct}$ となる点のひずみである。

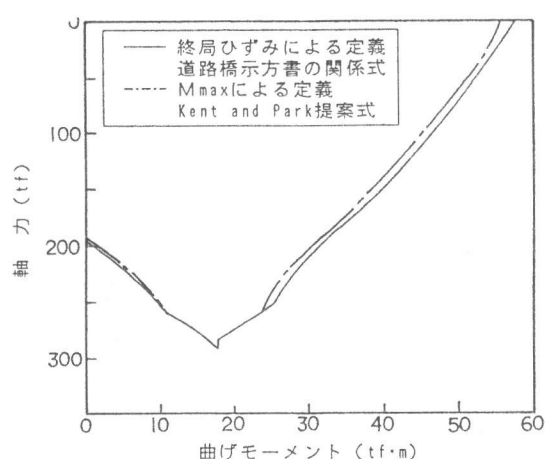
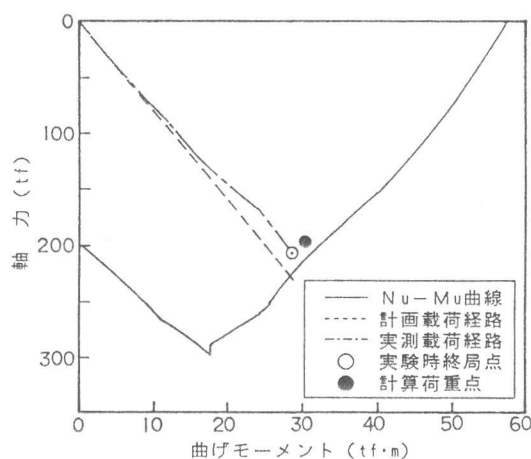
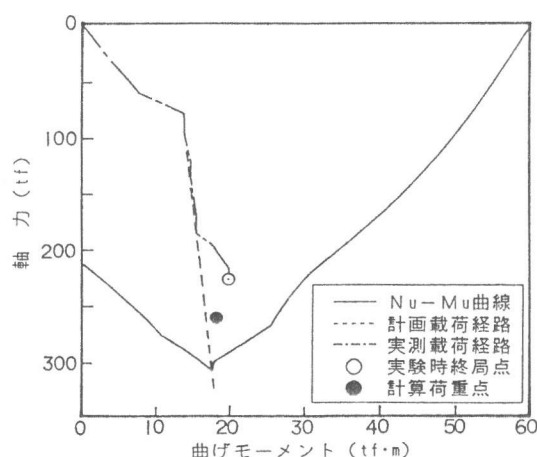


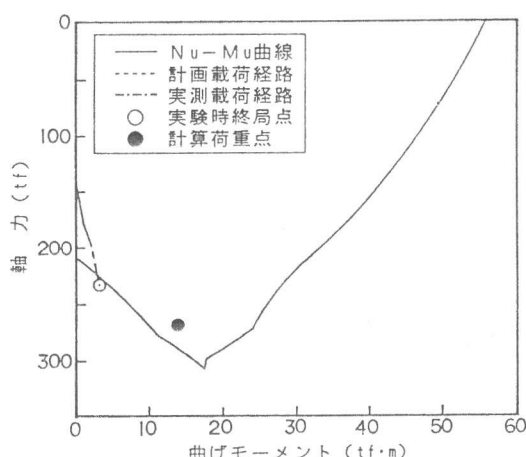
図-7 $Nu-Mu$ 関係の定義比較



No. 1



No. 2



No. 3

図-8 $Nu-Mu$ 相関図

(2) 解析結果

図-8 に No. 1 ~ 3 供試体の $Nu-Mu$ 相関図を示す。同図の実験載荷経路における曲げモーメントは、次式により算出した。

$$M = H \cdot y_1 + N \cdot y_2 \cdot \sin \theta$$

ここに、 H 、 N : 載荷水平力および軸力 (tf)、 y_1 、 y_2 : 作用高 (m)、 θ : 載荷軸力の傾斜角で

ある。また、同図には実験における終局判定時のコンクリート圧縮ひずみ量およびP C鋼材引張ひずみ量を用いて計算した場合のN、M荷重点も示している。No. 1 供試体は低軸力タイプであるが、計算値はほぼ実験値と対応していることが分かる。No. 2 供試体は高軸力タイプであり、変形に伴う2次モーメントの発生により載荷経路が大きく傾く結果となったが、計算値と実験値は定性的には一致しているものと考えられる。No. 3 供試体は引張軸力のみを作用させた場合であるが、供試体頂部の変形に伴う軸力水平成分による曲げモーメントが生じている。計算値と実験値にはかなりのずれが認められるが、この原因としては、引張軸力の増加およびひびわれ発生とともに供試体が鋼材のみの図心方向へと変形しようとし、この変形を軸力載荷装置が拘束したため、供試体基部に15tf程度の曲げモーメントが発生したことによるものと考えられる。

3. 3 変形挙動の評価

(1) 解析手法

プレストレスおよび荷重による作用断面力(N、M)から断面の上下縁ひずみを求める。このひずみからプレストレスによるひずみを控除した荷重によるひずみを求め、曲率 ϕ を算出する。さらに、 ϕ を積分することによって水平変位 δ を求める。

(2) 解析結果

図-9にNo. 1、2 供試体の代表的載荷状態における曲率分布図を示す。同図にはひびわれ発生位置も示している。No. 1 供試体は、 $N=200\text{tf}$ でひびわれ発生位置において急激な曲率変化が発生しているものの、実験値の平均的挙動は計算値と対応しており、全体に計算値はほぼ実験値と一致しているものと考えられる。No. 2 供試体では特に大きなひびわれは発生していないため、計算値と実験値はよく一致している。供試体基部では計算値と実験値とが大きく相違しているが、これは実験値に基部の鋼材の抜け出しが影響したものと考えられる。図-10は、図-9と同様の載荷状態における水平変位分布図である。同図の計算値は荷重および鋼材の抜け出しによる変形の影響(2次モーメント)を考慮しているが、実験値と比較的よく一致している。

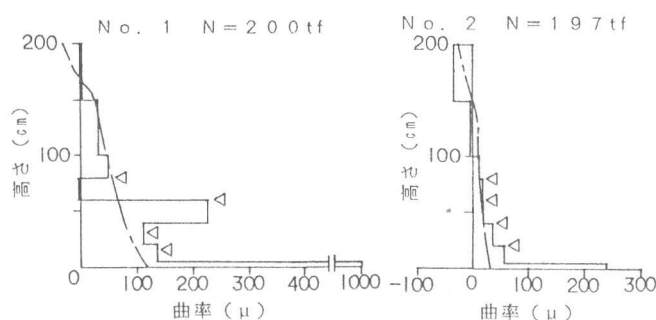


図-9 曲率分布図

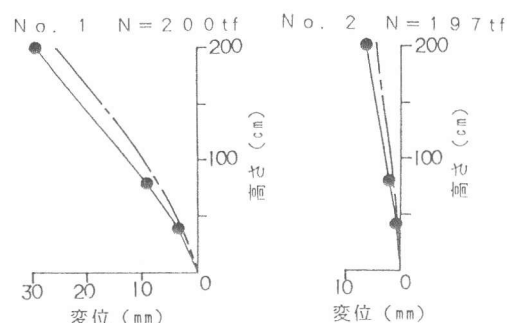


図-10 水平変位分布図

4. まとめ

- (1) 引張軸力および曲げモーメント作用下での部材挙動に着目した実験を実施したが、いずれも基部における曲げ破壊であった。
- (2) 既存の応力-ひずみ関係および使用材料の終局ひずみにより定義した N_u-M_u 関係の計算値は、低軸力タイプおよび高軸力タイプの実験値と比較的よい一致を示した。軸力の場合については、軸力載荷装置の変形拘束により計算値と実験値はかなりのずれが認められた。
- (3) 変形挙動の計算値についても、低軸力タイプおよび高軸力タイプの実験値とよい一致を示した。ただし、鋼材の抜け出しの影響が顕著であり、部材の変形性能を評価する上で重要な要因であると考えられる。

今後は、以上の結果を実橋の詳細な耐荷力解析に反映させていく予定である。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編、pp.116-126、平成2年2月
- 2) Michael P. Collins, Denis Mitchell: Prestressed Concrete Structures, Prentice Hall