

(141) 連結部の剛性低下を考慮したプレテンションホロー連結げたの解析的検討

極東工業(株) 正会員 ○中田 順憲  
 同上 大谷 圭介  
 同上 正会員 山根 隆志

1. はじめに

単純げたとして架設された複数径間のPCプレキャストげたを中間支点上で鉄筋コンクリートにより連結する構造形式(以下、連結げたと称す)は、これまで、プレテンションあるいはポストテンションTげた橋を中心に適用されてきた。このような適用形態に加えて、近年、施工の省力化や工期の短縮に有利なプレテンションホローげた(以下、ホローげたと称す)を用いた連結げたが注目され、その適用事例も漸増している。このような動向に対応すべく、ホローげたの連結構造に関する検討<sup>1)</sup>が実施され、各種連結構造が提案されるとともに力学的性状も明らかにされている。さらに、ホローげたを含めた連結げた全般に関する設計基準も概ね確立され、広範な適用に向けての技術的環境が整いつつある。

一方、ホローげたを用いた連結げたは、剛性の大きな横げたを介して連結されるTげたに比べ、連結部の剛性が径間部に対して卓越していないため、連結部におけるひびわれ発生後の剛性低下が径間中央部の断面力に影響を与え、荷重増加に伴い曲げモーメントが非線形的に増加する傾向が強くなる。本検討では、このようなホロー連結げたの構造特性を明らかにし、合理的な設計手法確立の一助とすることを目的として、連結部を非線形部材とした簡易なフレーム解析を行い、連結部の剛性低下と径間部の曲げモーメントおよび応力増加の関係を定量的に確認するものとした。

2. 連結部の剛性評価方法

連結部の非線形性を考慮したフレーム解析に先立ち、以下に概説するコンクリートの引張剛性を解析上の材料特性としてモデル化するとともに、既往の実験<sup>1)</sup>により確認された連結部の曲げ剛性とこの材料特性を用いて得られた計算値を比較することにより、モデル化の妥当性について検証した。

鉄筋コンクリート部材の変形挙動を正確に推定するためには、ひびわれが発生した後の引張領域における剛性の設定方法が重要となる。鉄筋コンクリート部材にひびわれが発生した状態においても、ひびわれとひびわれの間ではコンクリートと鉄筋の付着が存在しているため、鉄筋からコンクリートに引張力が伝達されコンクリートが引張力の一部を負担する。このことから、コンクリートも引張剛性に寄与し、部材の剛性はこれを無視した場合よりも大きなものとなる。このような鉄筋コンクリートの引張変形特性は、テンションスティフニング効果と呼ばれており<sup>2)</sup>、これを数値表現する手法として、①鉄筋の引張剛性を修正する方法と②コンクリートの引張応力に軟化領域を導入する方法がある。本検討では、簡易な関数でテンションスティフニング効果を考慮できる後者の方法<sup>3)</sup>を用いるものとした。モデル化したコンクリートおよび鉄筋の応力～ひずみ関係を図-1に示す。

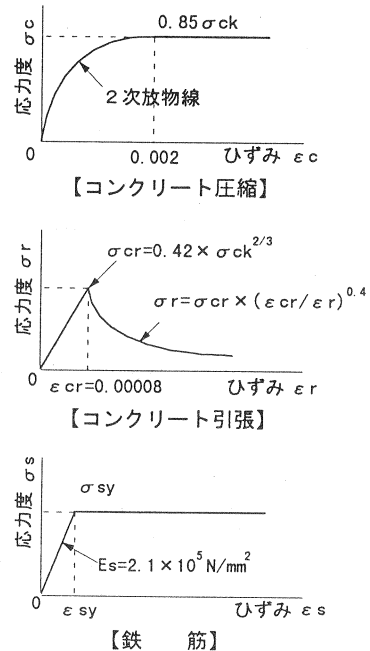


図-1 応力～ひずみ関係

これらの応力～ひずみ関係から連結部のM～φ関係を求めた後、図-2に示す荷重試験供試体<sup>1)</sup>を対象として、フレーム解析を行い、得られた供試体中央のたわみ量から供試体の平均剛性を算出した。図-3は、この平均剛性と供試体中央の曲げモーメントの関係について、計算値と実験値を比較したものである。この図から、ひびわれ発生時の曲げモーメントと平均剛性は両者で一致しているが、それ以後の剛性低下は実験値の方が顕著であることがわかる。そして、コンクリートの引張抵抗を無視した応力計算で鉄筋の引張応力度が160N/mm<sup>2</sup>となる<sup>4)</sup>モーメント(以下、設計荷重時許容モーメントMaと称す)レベルにおいて再び両者は一致してくる。このように、計算値は、ひびわれ発生レベルから設計荷重作用時レベルの間で実剛性と多少の誤差が生じているものの、全体的には実際の曲げ変形挙動を近似的に表現しており、本解析で設定した構成則は概ね妥当であると判断した。

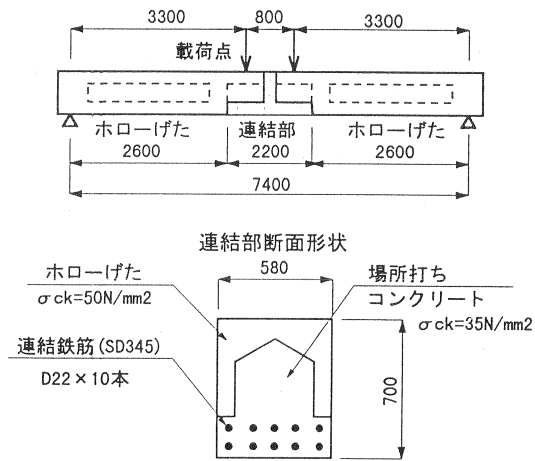


図-2 試算対象とした供試体

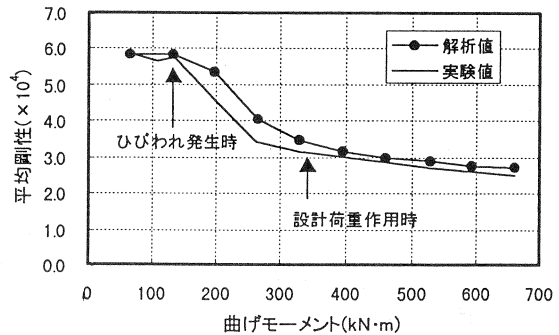


図-3 平均剛性の比較

### 3. 連結部の非線形性を考慮したフレーム解析

#### 3.1 剛性低下と曲げモーメント増加の関係

連結部の剛性低下に伴う径間部曲げモーメントの非線形的な増加傾向を明らかにするため、ホローげたと連結部からなる2径間連続ばりを対象として構造解析を行った。検討ケースは、図-4に示すとおり、支間長を16m、20m、24mとした3ケースとし、各支間に対応するホローげたの断面形状および連結部の補強鉄筋は、実際の橋梁と曲げ剛性が大きく異なるないように、事前の概略検討により決定した。この解析モデルの径間部各節点に荷重を均等に載荷し、連結部を線形部材とした場合と非線形部材とした場合の各々について、径間部および連結部の曲げモーメントを算出した。

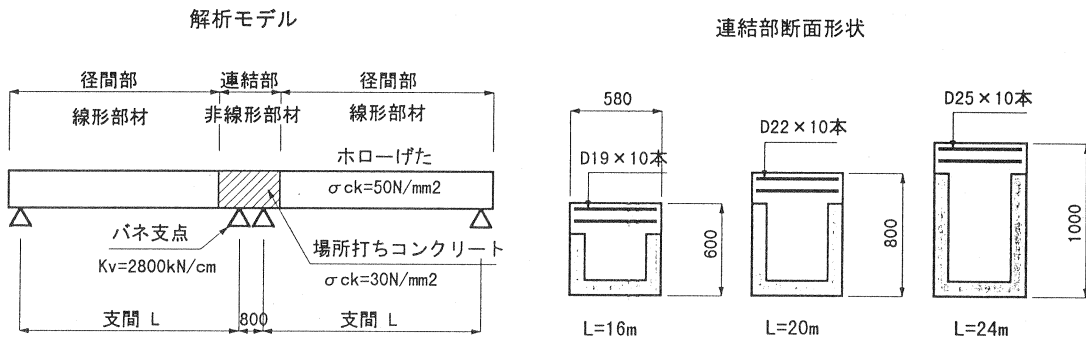


図-4 解析モデルと検討ケース

図-5は、径間部に載荷した節点荷重強度の増加に伴う連結部の剛性低下の進行を、全検討ケースについて示したものである。横軸には、連結部を線形部材とした場合に前出の設計荷重時許容モーメント  $M_a$  を生じさせる節点荷重  $P_a$  と各段階での載荷荷重  $P_i$  の比率( $P_i/P_a$ )を、縦軸にはひびわれ発生前剛性( $M_0/\phi_0$ )と各段階での剛性( $M_i/\phi_i$ )の比率を表している。連結部の剛性は、いずれの検討ケースにおいても、作用する曲げモーメントがひびわれ発生モーメントに達した後急速に低下し、設計荷重時許容モーメント  $M_a$  に達した段階で初期剛性の40~50%程度まで減少する。

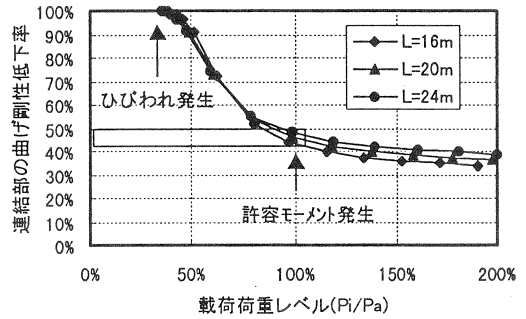


図-5 連結部の剛性低下

図-6は、連結部の剛性低下に伴う径間部および連結部の曲げモーメントの変動と載荷荷重強度の関係を示したものである。横軸には図-5と同様  $P_i/P_a$  を、縦軸には径間部および連結部の曲げモーメントの線形解析値に対する非線形解析値の増減比率を表している。この図から、線形解析値と非線形解析値との差は、連結部の剛性低下と連動して大きくなり、連結部に設計荷重時許容モーメント  $M_a$  を生じさせる載荷状態において、径間部は5~7%程度増加、連結部は8~10%程度減少することがわかる。このような連結部の剛性低下が各部の曲げモーメントに与える影響は、支間長が短くなるほど顕著に現れる傾向がみられるが、設計荷重レベルの載荷状態では、各検討ケース間でのばらつきは小さい。このことから、ホローげたを用いた連結げたの非線形的な特性は、標準的な適用の範囲内で、支間長にほとんど影響を受けないものと考えられる。

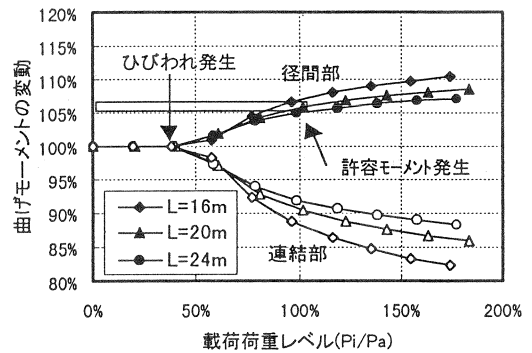


図-6 剛性低下に伴うモーメントの変動

### 3.2 剛性低下が設計計算値に与える影響

3.1で述べた連結部の剛性低下と径間部の曲げモーメント増加の関係が、実際の橋梁設計においてどの程度影響するかを具体的に把握するため、既存の基準<sup>4),5)</sup>に基づいて設計された3径間の連結げた橋を例にとり、径間部の曲げモーメントおよび応力の変動を確認した。連結部の非線形性を考慮した解析は、図-7に示すとおり、横断方向に複数列配置された上げげたのうちの1列を取り出したフレームモデルを用いた。モデルに載荷する荷重の強度は、直交異方性版理論による荷重分配を考慮して算出された設計計算値を棒理論でほぼ忠実に再現できるように、線形フレーム解析により逆算して求めた。

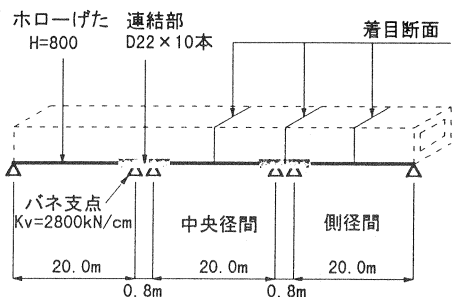


図-7 3径間連結げたの解析モデル

図-8は、図-5および図-6に示した連結部の剛性低下率と径間部曲げモーメントの非線形増加率に、実際の設計計算から引用した①橋面荷重作用時、②側径間中央部の曲げモーメントが最大となる活荷重作用時、③構造系変化に伴うクリープ二次力作用時の連結部曲げモーメントの発生状況を併記したものである。この図から、橋面荷重のみが作用する状態では連結部の剛性低下はなく、径間部曲げモーメントも非線形解

析値と設計計算値とで差は生じていないが、活荷重が作用した段階で連結部の剛性が初期剛性の約50%まで減少し、径間部曲げモーメントは設計計算値に比べ約5%増加することがわかる。この増加率は、図-7に示した3径間モデルに、橋面荷重と活荷重に相当する仮想荷重を載荷した場合の側径間中央部における非線形解析値と設計計算値の差と一致した。このような径間部曲げモーメントの増分を、主げた下縁の引張応力度に換算すると約0.3N/mm<sup>2</sup>となる。なお、中央径間部においても、側径間部と同程度の応力増加が確認された。

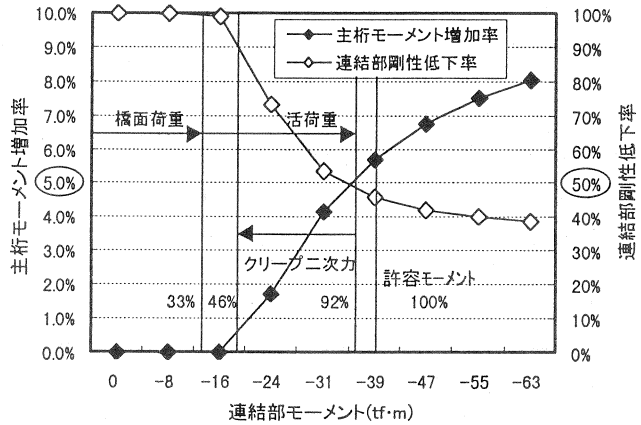


図-8 実設計における剛性低下の影響

一方、クリープによる二次力を考慮する

と、連結部に生じる曲げモーメントはひびわれ発生モーメント相当まで低減されるため、設計荷重作用時レベルの荷重状態においても、連結部は、ほとんど剛性が低下せず、線形部材として挙動することがわかる。

#### 4. まとめ

連結部の非線形性を考慮したプレテンションホロー連結げたに関する各種解析により、連結部の剛性低下が径間部の曲げモーメント値に与える影響は、支間長により大きく変動しないこと、また、活荷重作用時での主げた下縁の引張応力度に換算すると0.3N/mm<sup>2</sup>程度の微小な増加として現れることが明らかとなった。

連結部を設計する際にクリープによる二次力を考慮すると、連結部に生じる負の曲げモーメントが大きく低減され、一般的に、主鉄筋量は、終局荷重に対する検討により決定される。このことは、現行の基準にしたがって設計をすれば、設計荷重作用時において連結部の剛性が十分確保され、径間部、連結部ともにTげた橋と同等の安全性が確保できることを意味する。しかし、その一方で、クリープによる二次力は時間依存性を有していることや不測の過載荷状態下におけるプレテンションホロー連結げた特有の性状を勘案すると、設計荷重作用時の応力照査に際して、想定し得る増加応力分を許容値に対する余裕として見込むことも、特異な構造特性を設計計算に反映させる方法のひとつであると考えられる。

なお、本稿は、プレストレストコンクリート建設業協会による「PC連結げた橋 設計の手引き(案)」作成業務の一環として実施した検討とその結果をとりまとめたものである。この手引きを運用するにあたり、本検討が多少なりとも参考になれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 坂本眞徳・藤井学他：PCホローげたの連結構造に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.2，1993
- 2) 例えば，田辺忠頭・檜貝勇他：コンクリート構造，朝倉書店，pp.47-54
- 3) Hsu; Zhang: Tension Stiffening in Reinforced Concrete Membrane Elements, ACI Structural journal, pp.108-115, Vol.93, No.1, January/February, 1996
- 4) 建設省土木研究所・プレストレストコンクリート建設業協会：プレキャスト連結げたの設計法に関する共同研究報告書，平成4年2月
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編，平成8年12月