非線形有限要素解析法の利用に関する一考察

(株) 富士ピー·エス 技術製造本部 正会員 〇岡 篤司 (株) 富士ピー·エス 技術製造本部 正会員 堤 忠彦 JIP テクノサイエンス(株) システム技術研究所 佐藤 知明 JIP テクノサイエンス(株) システム技術研究所 狩野 正人

1. はじめに

PC上部工のウエブは上部工全体重量の 20~40%程度を占めることから、ウエブの軽量化を図ることは橋の建設コストを低減するための重要なポイントとなる。このことから、波形鋼板や複合トラス、プレテンションウエブなど合理的なウエブ形式の技術開発について多くの研究が行われ、その実用化が試行されている。そのなかでも、近年の国内外の鋼材価格高騰も相まって、コンクリートウエブの合理化形式のひとつとして、プレテンションウエブが注目されている。しかし、現在の道路橋示方書Ⅲ コンクリート橋編¹ (以下道示Ⅲ) に準拠したせん断に対する設計では、設計荷重時においては鉛直プレストレスの効果を考慮した設計が可能であるが、終局破壊耐力の照査においては、プレストレスの効果を考慮するには至っておらず、その効果を評価できれば効果は大きい。そこで、非線形有限要素解析法を活用し、終局破壊耐力におよぼすプレストレスの効果について実橋をモデル化し、解析的に検討したので報告する。

2. プレテンションウエブ構造

プレテンションウエブ構造は、高強度コンクリートを使用したプレテンション部材をウエブに用いることで、高いせん断抵抗性が確保されるため、ウエブ厚を減じることが可能になる。これにより主げたの自重が軽減できて上下部構造の規模が縮小され、橋梁建設の低コスト化が期待できる構造である。図ー1、図ー2にプレテンションウエブの構造概要図と、実橋で採用された例として、錐ヶ瀧橋の断面図を示す。錐ヶ瀧橋の設計²⁾においては、非線形解析を活用してプレストレスの効果を確認し、道示IIIにおける平均せん断応力度の最大値を上げる方法、すなわち許容応力度設計法の延長線上の仮定により、終局破壊耐力を向上させている。また、2室箱桁の中ウエブのみに限定しているが、そのウエブ厚は150mmと非常に薄くなっている。

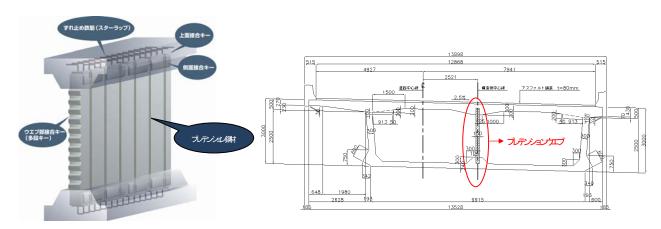


図-1 プレテンションウエブの概要図

図-2 プレテンションウエブの概要図

3. 検討の概要

道示Ⅲに準じた主桁のせん断力に対する部材の照査では、図-3 に示すように設計荷重作用時においてコンクリートの斜引張応力度の照査、また終局荷重作用時においては、斜引張破壊および斜圧縮破壊に対する照査を行う。斜引張応力度および斜引張破壊に対しては、式(1)および式(2)に鉛直プレストレスを代入することにより、プレストレスの効果を考慮でき、プレテンションウエブの合理性が発揮される。

$$\sigma_I = \frac{1}{2} \left\{ \left(\sigma_x + \sigma_y \right) - \sqrt{\left(\sigma_x - \sigma_y \right) + 4\tau^2} \right\}$$
 (1)

$$S_{uc} = S_c + S_s + S_p + S_{spi} \tag{2}$$

$$S_{uc} = \tau_{max} \cdot b_w \cdot d + S_p \tag{3}$$

一方,斜圧縮破壊に対する耐力の照査においては,式(3)に示すようにコンクリートの平均せん断応力度の最大値を大きく出来ない限りプレストレスの効果を考慮できないため,終局荷重作用時の斜圧縮破壊耐力により部材厚さが決定される場合には、プレテンションウエブを適用することの効果を発揮できない。

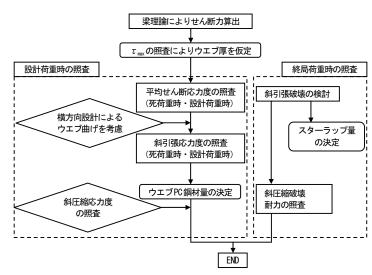


図-3 せん断に対する設計フロー

本検討では、非線形解析を利用することにより、プレテンションウエブ橋設計施工ガイドライン(案)³⁾ において、**図-4** に示すプレテンションウエブ橋の試設計として検討された3径間連続プレテンションウエブ PC 箱桁橋のモデルを対象として、終局破壊耐荷力を算定した。試設計においては、ウエブ厚を支点部において増厚しているが、今回の検討では、ウエブ厚さを全区間150mmとした場合の成立性の検討をプレストレス 導入の有無に着目し行った。また、主要な使用材料および諸物理定数は以下に示すとおりである。

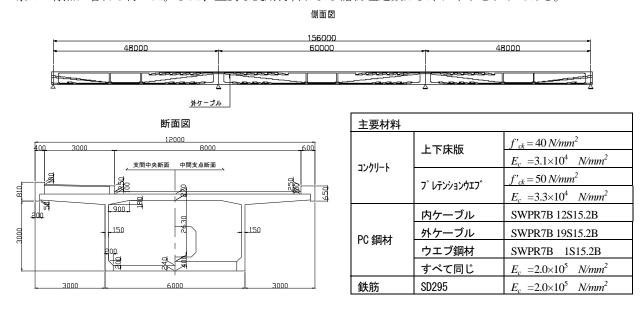


図-4 試設計モデルの概要図

4. 解析的検討

4. 1 解析モデルおよび荷重の載荷方法

解析モデルは、中央径間における支間中央を中心として、橋軸方向に対称構造であること、また地覆および舗装は無視して活荷重は偏載しない状態を仮定することにより、横断方向へも対称構造と考え、図-5 に示すように1/4モデルとした。上下床版ならびにウエブコンクリート部材は、4節点のシェル要素でモデル化し、PC 鋼材および鉄筋は、埋め込み鉄筋要素を用いてモデル化した。なお、同図には、後述する解析結果の着目点も図示しており、本解析での着目点は、たわみが最大となる中央径間における支間中央、および同径間における隔壁間中央とした。



図-5 解析モデル図

本検討では、自重に加え活荷重を載荷した。活荷重の載荷にあたっては、図-6 に示すように3径間の橋梁において、ウエブせん断力が卓越するような荷重状態を想定し、p1 荷重は中間支点近傍に載荷させた。また、今回の解析は、ウエブに着目した解析であること、橋軸直角方向にもハーフモデルを採用していることから、p1 荷重の偏載は考慮できない。そのため、活荷重の載荷位置は、図-7 に示すように、ウエブ直上に線荷重的に載荷させることとした。境界条件は、橋軸方向へのハーフモデルの対称性から、支間中央側の全節点に対してX 方向を拘束し、さらに支点の支承位置の鉛直方向を拘束した。荷重の初期状態は、設計荷重を想定し、死荷重+活荷重(D+PS+L)とした。その後、死荷重と活荷重のみを漸増載荷して(α (D+L)+PS)、終局荷重時相当の荷重倍率 1.7(D+L)+PS を載荷した。また、鉛直プレストレスの効果を確認するために、鉛直プレストレスを行わないモデルも作成し、終局耐力の比較を行った。

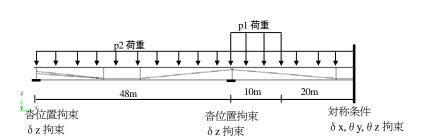


図-6 活荷重載荷状態および境界条件

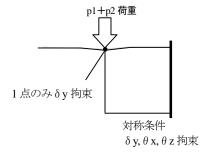


図-7 活荷重載荷状態位置図

4. 2 材料構成則

コンクリートの圧縮側の応力-ひずみ関係には、図-8 に示す圧縮軟化を考慮した Thorenfelt 型曲線 4 を使用し、引張側については、図-9 に示す Hordi jk 型引張軟化特性 4 を使用した。ひび割れモデルは、回転ひび割れモデルを採用した。鉄筋および PC 鋼材の構成則は、トリリニア型の構成関係を用いてモデル化した。この際、引張強度時のひずみ量は、第 2 勾配を初期勾配の 1 00 となるように構成関係を定めた。

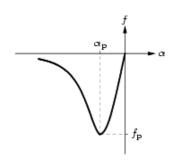


図-8 コンクリートの圧縮側構成則

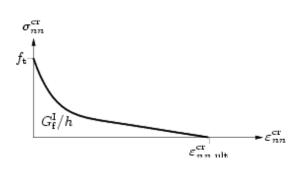


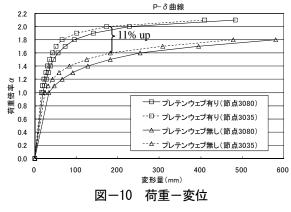
図-9 コンクリートの引張軟化特性

4. 3 解析結果

図-5のモデル図中に示した、中央径間における支間中 央ならびに隔壁間中央点での荷重-変位関係を図-10 に 示す。この結果より、プレストレスを導入しているモデル は、終局荷重作用時の荷重倍率1.7を超える付近から荷重 -変位関係が非線形的な挙動を示すのに対し、プレストレ スを導入していないモデルでは、かなり低い荷重レベルか ら変形が増大することが確認できる。また、終局破壊耐力 のプレストレスの効果は11%程度であった。

鉛直プレストレスが、せん断耐力の向上に対する効果を 確認するために、図-12に示す着目断面に発生する平均せ ん断応力度の比と荷重倍率の関係を図-11に示す。

これにより,同一荷重倍率における平均せん断応力度は, 後述するひび割れ角度の影響によって増加しており、終局 荷重倍率の最終値の増加量は、圧縮劣化の影響により、荷 重倍率2.0まで向上した。またせん断ひび割れの角度をひ び割れひずみの矢線で表したものを図-12, 図-13 に示す。 これらにより、鉛直プレストレスによりひび割れ角度が立 っていることがわかる。



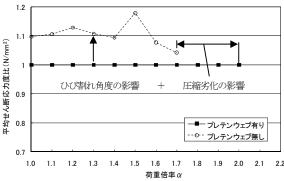


図-11 平均せん断応力度比-荷重倍率

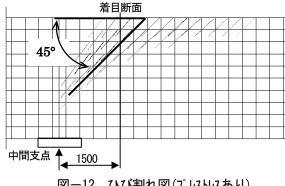


図-12 ひび割れ図(プレストレスあり)

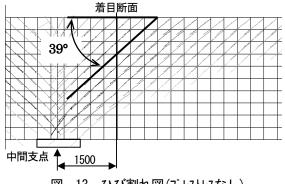


図-13 ひび割れ図(プレストレスなし)

5. まとめ

本検討では、部材のもつ性能を正しく評価する手段として非線形有限要素解析法を活用することにより、 プレテンションウエブ橋の終局耐力評価を行った。その結果、通常の RC ウエブ現場打ちのウエブ厚 250~ 300mm を想定した PC 橋が, プレテンションウエブとすることにより 150mm で設計耐力を満足する結果となっ た。これは非線形解析技術の進歩と信頼性の向上により、構造物の特性に応じた合理的な設計が可能となる ことを一例として示している。ただし、今回の検討では、PC 橋の合理化の可能性について解析的に相対的な 比較を行うことを目的としたので、今後結果の妥当性についての詳細な検討を加えていきたいと考えている。

【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, 丸善,
- 2) 坂本健俊ら:第二名神高速道路 錐ヶ瀧橋(上り線)の設計,第15回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集
- 3) (社)プレストレストコンクリート技術協会:プレテンションウエブ橋設計施工ガイドライン(案)
- 4) DIANA9 ユーザーマニュアル 日本語参考資料 <材料ライブラリー>