

懸垂工法で架設する張弦桁橋について

住友建設(株)土木本部技術部 正会員 ○ 近 藤 真 一
 同 上 正会員 伊 藤 公 彦
 同 上 正会員 兼 信 真

1. まえがき

張弦桁橋は、ケーブルで主桁を下方から支持した構造の橋である。主桁がコンクリート構造の張弦桁橋としては、1994年にフランスで支間53mのTruc de la Fare overpass¹⁾、1998年に静岡県で支間40mのあゆみ橋²⁾が建設されている。また、同様な構造として、ケーブルで下方から床版を支持した支間39mの自碇式上路吊橋も、1998年に長野県で建設されている³⁾。

これらのケーブル(以下、張弦ケーブルという)で主桁あるいは床版を下方から支持した橋(以下、張弦桁橋という)は、主桁あるいは床版を支保工や架設ガーダーを用いて施工した後に、張弦ケーブルを緊張するという順序により建設されていた。しかし、架設設備あるいは架設機械としての支保工や架設ガーダーの費用は、橋の工費に大きな割合を占めるばかりでなく、この形式の橋の適用支間を制約する条件となっていた。

この問題を解決するために、筆者らは吊床版橋の架設に用いられてきた懸垂架設工法を張弦桁橋の架設に適用し、初めに橋台の間に張り渡したPC鋼材を用いて主桁を他碇構造として懸垂架設し、次に張弦ケーブルを緊張し、最後に張り渡したPC鋼材の定着を橋体端部に盛り替えて自碇構造の張弦桁橋を完成させる新しい架設工法を考案し、その実現性について検討を加えてきた。

本稿は、懸垂工法で架設する張弦桁橋について、その概念および設計上限界となる基本的な構造特性を、試設計結果および非線形解析結果などにより示すものである。

2. 懸垂工法で架設する張弦桁橋の概念

張弦桁橋は、自碇構造であるため、従来から主桁あるいは床版を支保工や架設ガーダーを用いて施工した後に、張弦ケーブルを緊張するという順序で建設されていた。Truc de la Fare overpass は支保工、あゆみ橋は架設ガーダー、長野県に建設された自碇式上路吊橋は支保工をそれぞれ用いて施工された。

一方、上路式吊床版橋は、他碇構造であるため、初めに橋台の間に吊床版ケーブルを張り渡し、次に鉛直材を取り付けた吊床版セグメントを、張り渡したケーブルを用いて懸垂架設し、最後に上床版セグメントを送り出し架設する方法がとられている。すなわち、橋体を架設するために、支保工や架設ガーダーが不要なことから、渓谷に単径間の橋を建設するケースなどでは有利な工法である。

懸垂工法で架設する張弦桁橋(以下、懸垂架設張弦桁橋という)は、上路式吊床版橋と同様に、支保工や架設ガーダーを用いずに架設することを可能とし、張弦桁橋の架設の自由度を拡大することを目的として考案した構造および工法である。

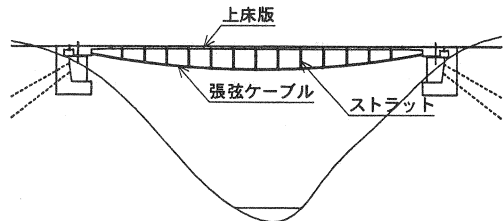


図-1 懸垂架設張弦桁橋の側面図

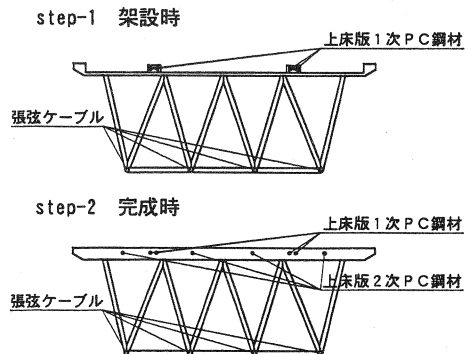


図-2 懸垂架設張弦桁橋の断面図

懸垂架設張弦桁橋の構造は、主桁あるいは上床版(以下、上床版という)、ストラット、張弦ケーブルおよび端部セグメントから構成されている。その構造は従来の張弦桁橋と基本的には変わらないが、上床版の剛性は従来のものより小さくなる。懸垂架設張弦桁橋の概念を、図-1および図-2に示す。

上床版は、懸垂架設の際(step-2)は、型枠兼用の薄いプレキャストパネルであり、後でコンクリートを打ち込んで剛性の高い上床版とする。上床版には、主PC鋼材が配置される。主PC鋼材のうち、初めに張り渡す懸垂架設用のPC鋼材を、1次PC鋼材と呼ぶ。

張弦ケーブルは、現場製作ケーブルあるいは工場製作ケーブルを用いる。

懸垂架設張弦桁橋の架設方法(図-3)は、まず、橋台上に橋体の端部セグメントを設け、橋台の間に上床版1次PC鋼材を張り渡す(step-1)。次に、あらかじめストラットを取り付けた上床版セグメントを懸垂架設する(step-2)。次に、張弦ケーブルを架設し、緊張する(step-3)。この作業は、吊り足場を利用して容易に行うことができる。続いて、上床版の後打ち部を施工する(step-4)。ここまでは、他碇構造である。最後に、上床版1次PC鋼材の定着を、橋台から橋体端部セグメントに盛り替え、自碇構造として橋体が完成する(step-5)。

架設の特徴は、張弦ケーブルの緊張により、下方に撓んでいた上床版の線形を、調整する工程(step-3)にある。この工程では、既に上床版が接合されている場合には、上床版に負の曲げモーメントが生じる。この曲げモーメントをできるだけ小さくするために、上床版はstep-3まで薄いプレキャストパネル構造となっており、次工程でプレキャストパネルにコンクリートを打ち込むことにより、剛性の高い上床版とする方法をとる。また、すべてプレキャスト化せず後打ちコンクリート施工とすることにより、上床版天端の線形を自由に設定することができる。

上床版1次PC鋼材は、端部セグメントで定着しているが、上床版セグメントを懸垂架設する際には、さらにロッドなどを接続して橋台で定着させている。この機構により、懸垂架設時に生じる水平力は、橋台に作用し、さらにグラウンドアンカーなどにより地盤に伝達されることにより、他碇構造が成立している。

他碇構造から自碇構造に変換する際には、橋台での1次PC鋼材の定着を解放することで、水平力は自動的に橋体で受け持たれることになる。

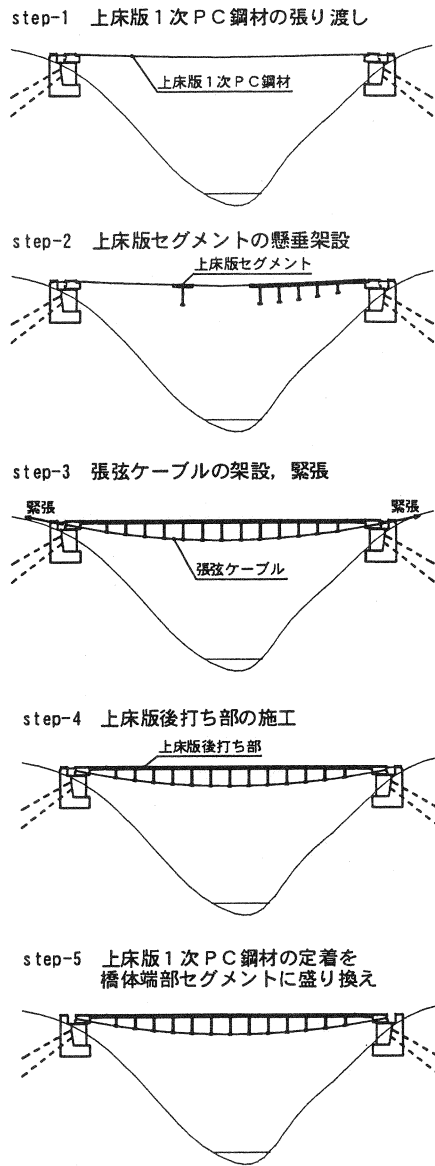


図-3 懸垂架設張弦桁橋の架設の概念

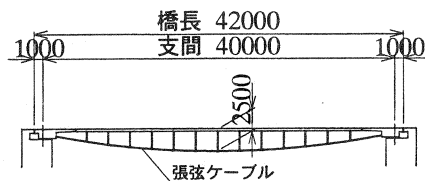


図-4 試設計モデルの側面図

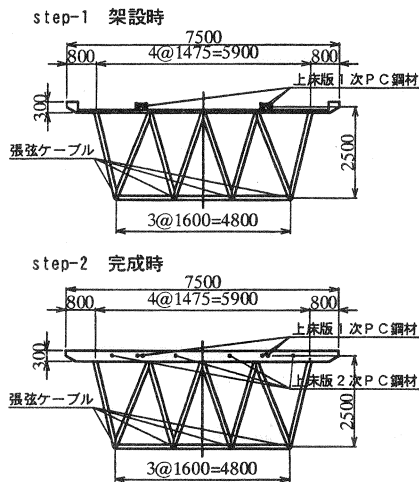


図-5 試設計モデルの断面図

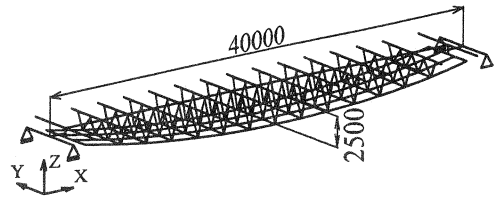


図-6 解析モデル

表-1 設計条件

橋種	歩道橋
橋長	42.0 m
支間	40.0 m
有効幅員	7.0 m
活荷重	3.5 kN/m ²
コンクリート	50 N/mm ²
P.C鋼材	SWPR7A, SWPR7B

3. 試設計

懸垂架設張弦桁橋の実現性を検討するために、試設計を行った。試設計モデルの側面図を図-4に、断面図を図-5に示す。また、設計条件を表-1に示す。

上床版厚は30cmと薄くしている。これは、橋台には架設時に自重による水平力がすべて作用するので、上床版をできるだけ薄くする方が有利となるからである。上床版図心から張弦ケーブル図心までの距離(縦距)は、支間中央で2.5mである。

上床版は、懸垂架設の後、張弦ケーブルを緊張するまでは、厚さ8cmのプレキャストパネルのみの構造であり、その後22cmの部分を後打ちすることとしている。

構造解析は、有限変位理論による骨組解析プログラムを用いて行った。構造モデルは、図-6に示す骨組モデルである。また、図-7に供用時活荷重の荷重方法を示す。なお、死荷重(D)の平均荷重強度は $w=72.6\text{ kN/m}$ 、活荷重(L)は $w=24.5\text{ kN/m}$ である。

張弦ケーブルは、SWPR7B 19S12.7の4本構成である。上床版1次PC鋼材は、厚さ22cmの後打ち部にSWPR7A 19S10.8を4本配置している。2次PC鋼材は、SWPR7B 12S12.7を4本配置している。主鉄筋は、後打ち部にD22を10cmピッチで配置している。

完成系における供用限界状態に対する検討は、PC吊床版橋設計施工規準(案)⁹⁾を参考にして、厚さ22cmの後打ち部のみ有効とし、永久荷重作用時におけるコンクリートの圧縮応力度、変動荷重作用時におけるコンクリートのひび割れ幅の照査などについて行った。終局限界状態における設計断面力は、供用限界状態における断面力に荷重係数を乗じることにより、簡略的に算出した。

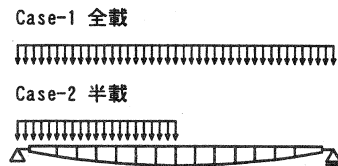


図-7 活荷重の荷重方法

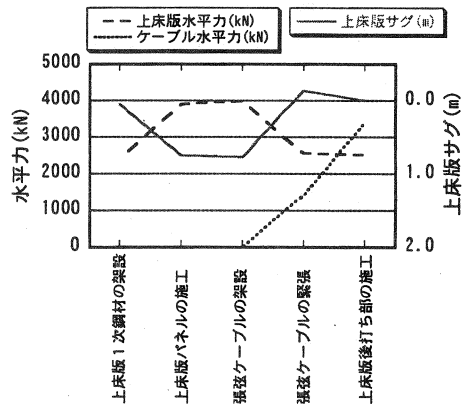


図-8 架設時における水平力および上床版サグ

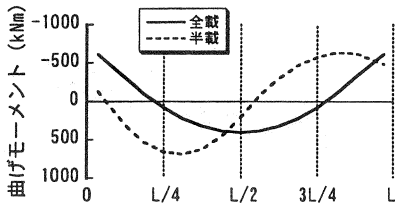


図-9 活荷重による上床版の曲げモーメント

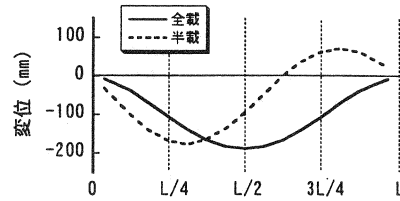


図-10 活荷重による上床版の変位

架設時における上床版と張弦ケーブルの水平力、および上床版のサグを、図-8に示す。図-8によると、張弦ケーブルを架設し緊張することにより、上床版の水平力とサグがそれぞれ減少していることがわかる。

活荷重を全載させた場合、および支間の左側に半載させた場合における上床版の曲げモーメントおよび変位を、図-9, 10に示す。試設計モデルは、上床版厚が30cmと薄いため、活荷重半載時における曲げモーメントおよび変位が、逆対称形に生じている。これは、単純桁の特性とは異なり、吊構造などにみられる特性である。

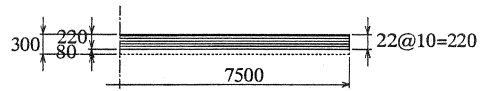


図-11 上床版断面のファイバーモデル

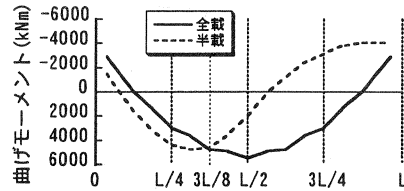


図-12 破壊時の上床版曲げモーメント

4. 曲げ破壊時における挙動

懸垂架設張弦桁橋は、本試設計モデルのように、従来の張弦桁橋と比べて、上床版の剛性が小さく設定されることから、終局限界状態においても供用限界状態の場合と同様に、単純桁とは異なる挙動を示すことが考えられる。そこで、曲げ破壊時における挙動を把握するために非線形解析を実施することとした。

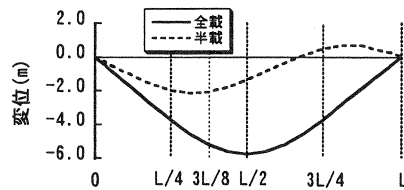


図-13 破壊時の上床版変位

(1) 解析の方法および条件

解析は、ファイバーモデルを用い、個々の材料要素の非線形性を入力することで、荷重載荷状態に応じた断面の剛性および図心軸の移動を考慮し、荷重増分法を用いて幾何学的非線形性を考慮する、変位法による骨組解析プログラム(Say-NAP)を用いた⁹⁾。

構造モデルは、図-6と同一である。上床版断面のファイバーモデルを図-11に示す。ここでも、厚さ22cmの後打ち部のみ考慮している。材料の応力度-ひずみ関係は、道路橋示方書に従った。コンクリートの引張強度は0とした。荷重の載荷方法は、 $\beta \cdot (D+L)$ とした。ここで、Dは死荷重、Lは活荷重である。 β は荷重倍率であり、1.0から漸増させていき、上床版のいずれかの断面において圧縮縁が終局ひずみ($\epsilon = 0.0035$)に達した時点を曲げ破壊とした。

(2) 解析の結果および考察

曲げ破壊時における上床版の曲げモーメントを図-12に、変位を図-13に示す。

図-12によると、活荷重を半載した場合における曲げ破壊時の曲げモーメントが逆対称形となっている。同様に、図-13によると、活荷重を半載した場合における曲げ破壊時の変形が逆対称形となっている。

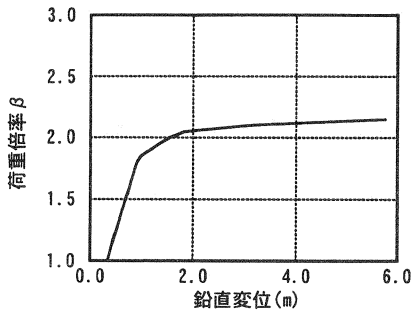


図-14 全載時におけるL/2点の鉛直変位

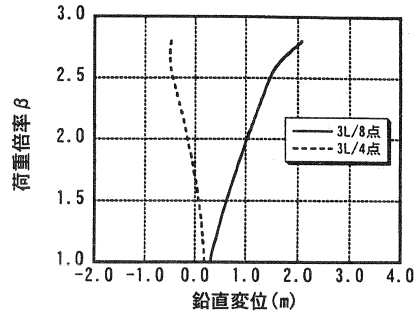


図-15 半載時における3L/8点, 3L/4点の鉛直変位

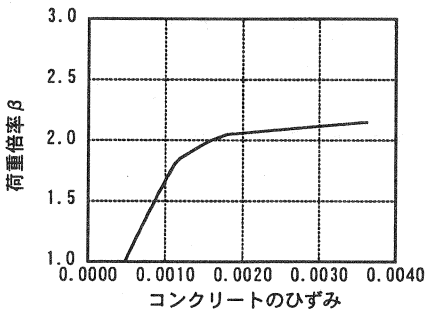


図-16 全載時L/2点における上床版上縁のコンクリートひずみ

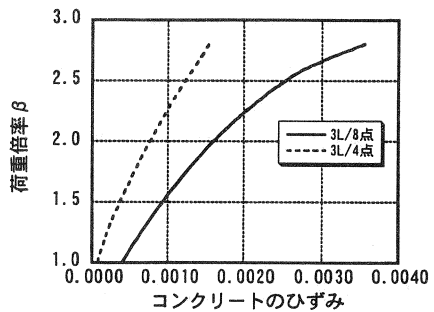


図-17 半載時3L/8点, 3L/4点における上床版圧縮縁のコンクリートひずみ

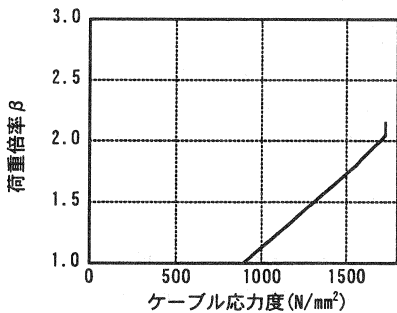


図-18 全載時における張弦ケーブルの応力度

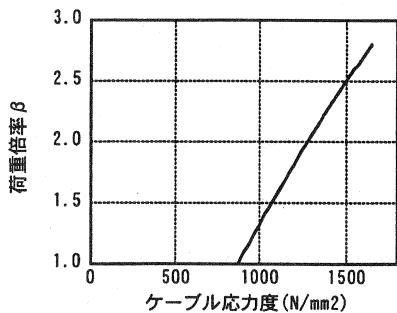


図-19 半載時における張弦ケーブルの応力度

これらは、供用限界状態における特性と同様であり、単純桁の曲げ破壊性状とは異なる特性である。

荷重倍率と鉛直変位の関係を図-14, 15に示す。荷重倍率とコンクリート圧縮縁のひずみの関係を、図-16, 17に示す。荷重倍率と張弦ケーブル応力度の関係を、図-18, 19に示す。

まず、活荷重全載時における挙動について述べる。

張弦ケーブルの応力度(図-18)は、供用限界状態(D+L)から終局状態に至るまで、荷重を漸増させていくと、荷重倍率 $\beta = 1.8$ を超えると第1降伏点 (1562N/mm^2) に達し、鉛直変位(図-14)およびコンクリートひずみ(図-16)の増加率も大きくなる。しかし、張弦ケーブル応力度の増加率はそれほど増加しない。

荷重倍率 $\beta = 2.05$ で張弦ケーブルが降伏し (1730N/mm^2)、鉛直変位およびコンクリートひずみの増加率が急激に大きくなり、 $\beta = 2.15$ で、L/2点の上床版上縁ひずみが終局ひずみ ($\varepsilon = 0.0035$) に達して破壊する。

次に、活荷重半載時における挙動について述べる。

活荷重半載時における3L/4点の鉛直変位は、供用限界状態に対応する活荷重のみによる変位 (図-10) から想定できるように、荷重倍率の小さい段階から、上方 (負の方向) に進んでいる (図-15)。供用限界状態 (D+L) から終局状態に至るまで、荷重を漸増させていくと、荷重倍率 $\beta = 2.6$ を超えると、張弦ケーブルの応力度 (図-19) が第1降伏点 (1562N/mm^2) に達し、鉛直変位 (図-15) およびコンクリートひずみ (図-17) の増加率が若干大きくなる。しかし、張弦ケーブル応力度は、ほぼ線形的に増加する。 $\beta = 2.79$ で、3L/8点の上床版上縁ひずみが終局ひずみ ($\varepsilon = 0.0035$) に達して破壊する。

試設計モデルの死荷重Dと活荷重Lの比は 1 : 0.34 であるので、PC吊床版橋設計施工規準 (案)⁹⁾ を参考にして、終局限界状態における活荷重に対する荷重修正係数 $\rho_f = 1.65$ を考慮すると、 $D + 1.65 L = 1.16 (D+L)$ となる。これに、終局限界状態における荷重係数 $\gamma_f = 1.2$ 、構造物係数 $\gamma_i = 1.1$ を考慮すると、終局荷重は $1.1 \cdot 1.2 \cdot 1.16 (D+L) = 1.53 (D+L)$ となる。さらに、断面耐力側の安全係数である部材係数 $\gamma_b = 1.15$ を考慮すると、 $1.76 (D+L)$ となり、試設計と同程度の安全度を確保するためには、今回の非線形解析において荷重倍率 β が 1.76 程度あればよいことになる。非線形解析結果では、この構造に曲げ破壊が起こる時の荷重倍率 β は 2.15 となったので、試設計における設計手法によれば安全側の設計になることが確かめられた。

5. まとめ

懸垂架設張弦桁橋の試設計および構造特性把握のために行った検討をまとめると、以下のようになる。

- (1) 初めに橋台の間に張り渡したPC鋼材を用いて上床版を他碇構造として懸垂架設し、次に張弦ケーブルを緊張し、最後に張り渡したPC鋼材の定着を橋体端部に盛り替えて自碇構造の張弦桁橋を完成させる、新しい架設工法の実現性を、試設計を行い確かめた。
- (2) 懸垂架設張弦桁橋は、従来の張弦桁橋と比べて上床版の剛性を小さく設定せざるを得ない場合があるが、この時、活荷重半載時に上床版の変形が逆対称形となって破壊することのないように補強する必要がある。
- (3) 終局限界状態に対する検討は、有限変位解析に基づいて供用限界状態における断面力を算出し、この断面力に終局限界状態の荷重係数を乗じることにより算出した設計断面力を、設計断面耐力と比較することにより断面破壊に対する照査を行えば安全側の設計となることを、試設計および非線形解析により確認した。

懸垂架設張弦桁橋は、支保工や架設ガーダーを用いずに架設できることから、従来の張弦桁橋では適用することが困難であった比較的大規模な橋に採用される可能性も考えられ、今後このような観点からも検討を加えていきたい。本稿が、張弦桁橋を計画する際の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) Virlogeux, M., et al. : A Prestressed Concrete Slab Supported from Below, The Truc de la Fare Bridge, La Technique Francaise, The 12th FIP Congress, pp.403-417, 1994.
- 2) 清水政和, 竹内禎禮, 近藤真一, 奥村一彦: 高流動コンクリートを用いたプレキャストセグメント張弦げた橋の構造と施工, コンクリート工学, Vol.36, No.10, pp.31-35, 1998.10
- 3) 大沼孝司, 堀 達浩, 請川 玲, 大信田秀治: 自碇式吊橋の設計・施工, プレストレストコンクリート技術協会第8回シンポジウム論文集, pp619-624, 1998.10
- 4) 池田尚治, 則武邦具, 山口隆裕, 当真正夫: コンクリート吊床版構造の応用について, プレストレストコンクリート技術協会第2回シンポジウム論文集, pp41-46, 1991.11
- 5) PC吊床版橋設計施工規準 (案), プレストレストコンクリート技術協会, 2000.11
- 6) 玉置一清, 新井英雄, 板井栄次, 山崎 淳: 非線形解析プログラムの外ケーブル構造への適用と今後の標準化について, プレストレストコンクリート技術協会第5回シンポジウム論文集, 1995.10