

(83) 大偏心外ケーブルPC橋の設計の合理性

水産庁	漁港部	正会員	○高原 裕一
日本道路公団	名古屋建設局		山縣 敬二
住友建設(株)	技術研究所	正会員	藤田 学
日本大学	理工学部	正会員	山崎 淳

1.はじめに

大偏心外ケーブルを有するPC橋の耐荷機構に基づく設計の論理を述べる。この構造形式は桁の耐荷機構の効率上昇が図られ、軽量化に適する。この構造の耐荷機構を考察することによりモデル構造(PC自旋式吊橋)を導き、その過程を述べ、また現存のエクストラード橋と比較し考察を加えた。

プレストレスのためのケーブルを桁の外に大きな偏心で用いる構造は、桁内にケーブルを内蔵する構造に比べ、軽量にまた形を軽快にかつ多様にできる。軽量化は資材・エネルギーの節減と耐震性能を含めた安全性の向上に資するものであり、それを旨とした構造の1例を示し大偏心外ケーブル方式PC橋の可能性について述べる。

2.方法

(1) 設計

供用状態を対象に、力学理論に基づく理論の必然的導出過程に委ねた。

(2) 強度の検討

終局までの状態の推移を解析結果に基づき述べる強度の基準は、道路橋示方書[1]の規定の次の式によった。 $1.7 \times (D+L)$ D:死荷重、L:活荷重

(3) 構造物の比較

モデル構造とエクストラード橋との構造細部の比較により、安全性向上の要素を示す。

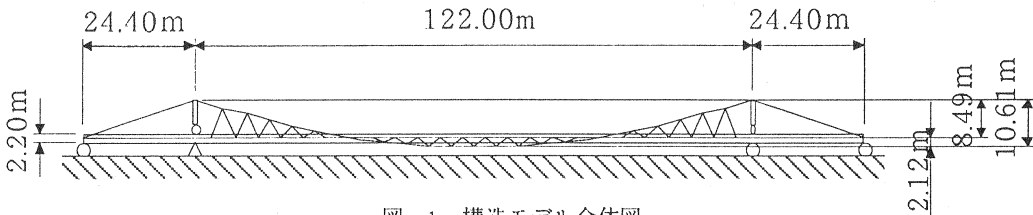


図-1 構造モデル全体図

3.軽量のPC橋梁構造物

大偏心外ケーブル方式は、橋梁の軽量のために有用な構造形式である。これはSchlaichのPC自旋式吊り橋[2]、池田らのPC吊床板自旋吊橋[3]、Mennのガンター橋[4]、Riddes橋のようなフィンバック形式[5]、Mathivatのエクストラード橋の概念図、実橋としては小田原ブルーウェイブリッジ[6]、などにより具現されている。

4. 設計されたモデル構造の特徴および耐荷機構

前述したようにさまざまな構造の耐荷機構を考察することにより、図-1のような構造が論理で導かれる。ここでこれを“モデル構造”と呼ぶ。条件は中央スパン122mの3径間連続梁、幅員10m、活荷重 400kgf/m^2 である。

4.1 全体構造

モデル構造は、等断面の箱桁と上向き力を発生できるような屈曲させたケーブルを桁の両端に定着(自碇式)した連続梁で構成され、ケーブルと桁の結合は桁上部では引張材、桁下部では圧縮材となる保持材、中間支点上では低い塔をケーブル保持材として結合した。サドル部は滑動させる構造としてもよいが同様な機構をより簡単に造るために塔の下部をコンクリートヒンジと想定した。なお、ケーブルはすべて外ケーブルで二面吊りとした。

4.2 耐荷機構

供用状態では、(活荷重の $1/2$ +死荷重)の荷重に対しロードバランス(Load Balance: 下向き荷重とプレストレスによる上向き荷重が等しい)となり、桁は純圧縮部材となっている。活荷重の変動に対しては、桁とケーブルが協調して応答する。

4.3 桁断面形状と自重

断面形状は図-2に示すように幅員10m、桁高2.2mの2室箱桁コンクリート断面とする。また、全スパン一様断面とする。この桁断面による死荷重は舗装を含め 24tf/m である。

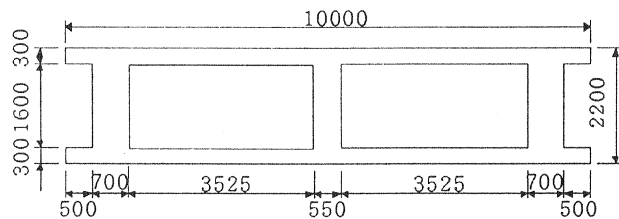


図-2 桁断面図

4.4 ケーブル断面、ケーブルサグ

ケーブルは $\phi 15.2$ のストランドを304本使用する。また、ケーブル形状は、サグが10.61mの2次曲線に近似される。

4.5 ケーブル位置の上下移動

リニアトランスフォーメーションによりケーブル形状を変えず上下方向に移動させても、上向き力が一定のため応力状態は不変である。例えば後述の図-8のような構造も同じ力学理論を適用できる。

5. 設計

5.1 概要

モデル構造の耐荷機構について、荷重が桁とケーブルに分担される考えによって、まず桁を設計する。ついで、上向き力と桁への導入応力の要求からケーブル張力とケーブルサグを決めることができる。この手順に戻りは少ないが、桁とケーブルの荷重の分担割合は当初仮定する必要がある。

供用状態での設計は、活荷重が死荷重に対して小さいことから(死荷重+活荷重の $1/2$)に対してロードバランスさせると考えると簡単である。その場合PCケーブルの機能は上向き力を発生させることと、桁への定着(自碇式)により桁に圧縮応力を導入することであり、桁はPCケーブルの張力の軸力成分を支える純圧縮部材として機能する。桁内の圧縮応力は、活荷重の変動による曲げ引張応力を打ち消すために必要である。

ケーブルと桁との荷重分担を前提として、先ず桁高 h 、断面係数 Z の理論値、次いでプレストレス F およびケーブルサグ B の理論値が順に決まる。断面積はロードバランス時の軸力を支えるために必要であるが、設計の手順の中では用いなかった。

モデル構造の耐荷機構は、供用状態については縮小供試体の載荷実験(佐々木ら[7])により確認している。実験では、スパンと桁高の縮小比はそれぞれ1/24.4である(スパン5m、桁高10cm)。断面積と断面係数は忠実な縮小ができず約2倍となっている。

5.2 供用限界状態と終局限界状態、RCとPC

モデル構造の設計は、供用状態に対しては弾性体力学で決まる。その状態では桁に引張力は発生せず無筋コンクリートでよい理論である。

供用状態を超え、終局状態までの推移と強度安全性の照査には、設計に用いたものとは全く異なる論理を用いる(山崎啓治ら[8])。設計荷重を超える状態では桁にひび割れ後の変形能力を与える必要があるが、その方法は通常のRCで差し支えない。内ケーブルによるプレストレスは必要無いが、剛性や強度を高めるために有効であることは通常の桁と変わらない。

5.3 桁高

最小桁高さは活荷重によるたわみにより制限される。その場合、活荷重による桁の曲率変化を用いて計算すると便利である。例えば、活荷重に対するたわみ制限がスパンの1/1000の場合、桁高 h 、スパン ℓ 、コンクリートの圧縮許容応力度を σ 、弾性係数を E 、スパン比0.2:1:0.2の3径間連続梁とすると、桁の応力変化を上縁・下縁それぞれでゼロから許容応力 σ までとして
$$\frac{h}{\ell} = \frac{1}{4} \cdot \frac{5}{48} \cdot \frac{2\sigma}{E} \cdot 1000$$
 となる。

$\sigma=100 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $E=2.8 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ の場合 $\frac{h}{\ell} = \frac{1}{53.6}$ したがって $\ell=122\text{m}$ のときの最小桁高 $h=2.28\text{m}$ となる。

上記は桁のみのたわみであり、モデル桁では外ケーブルの上向き荷重抵抗によりたわみは更に減少されるので桁高さは更に小さくてよい。その他は桁と外ケーブルの荷重分担割合が決まれば定まる。桁分担割合が60%ならば最小桁高は $2.28 \times 0.60 = 1.37\text{m}$ と決まる。ここでは安全の余裕を大きめに考えて、ケーブルの効果を無視し、桁高 $h=2.20\text{m}$ と決める。

5.4 断面係数 $Z(I/y)$ 、最小断面積 A

活荷重と死荷重の比が小さくなることが予想される(モデルでは後に1/6と判明する)。このような場合のPC桁の設計は最小荷重と最大荷重の平均に対しロードバランスさせると考え、その応力状態を基準に活荷重の変動分に対応する応力変動が許容応力以内となるように断面係数 Z を決めるのが簡単である。従って、応力が最も厳しい断面についてこれを行えばよい。このためには桁と外ケーブルの荷重の分担割合が分かる必要がある。外ケーブルはまだ決定されていないのでこの分担割合を仮定し、後に外ケーブルが決定されてから仮定の是非を確かめる必要がある。桁の荷重分担割合を60%と仮定する(後にこれでよいと判明する)。桁の曲げモーメントは全モーメント $M_0 = \frac{\omega \ell^2}{8}$ に対し、支点で0.625、スパン中央で0.375となる。よって、支点での活荷重曲げモーメントの変化(ロードバランスでの応力状況を基準として)に対して断面係数 Z を決めればよい。この時点で断面積 A を考える必要がある。後に外ケーブルの張力を最小とするためには断面積は小さい程良い。その断面積に基づいたプレストレスによる図心での応力に関連して曲げ応力との和が許容応力度以内となるように Z が決められる。ロードバランス(D+1/2L)から活荷重の変動は $\pm 1/2L$ である。ロードバランス時の応力を許容応力度の1/2、つまり活荷重の1/2による変動応力を許容応力度の1/2とするのがよい。次の式の M, σ に表-1の値を代入して、支点断面での断面係数 $Z = \frac{M}{\sigma} = 2.79\text{m}^3$ となる。様々な未知要因に対して余裕度を2とすると $Z=5.58\text{m}^3$ となる。

5.5 桁断面の決定

桁高と断面係数の最小値を基準にし、上床板、下床版、腹部それぞれを考慮して断面形状寸法を決める。桁高 $h=2.20\text{m}$ 、断面係数 $Z=5.58\text{m}^3$ 、上下床版厚さ 0.30m 、腹部最小厚さ 0.55m とし、2室箱桁断面を決めた。

5.6 プレストレス力(ケーブル張力)の決定

ケーブル張力 F は所要プレストレス応力から $F=\sigma A$ である。ここで σ は断面図心での所要プレストレス力であり、ロードバランス時の応力状態である。一様圧縮を許容応力度の $1/2$ とする前項の考えより $\sigma=50\text{kgf/cm}^2$ である。従って $F=4560\text{tf}$ となる。(図-2)

5.7 緊張材の決定

緊張材を公称直径 $\phi 15.2\text{mm}$ 、公称断面積 1.387cm^2 、設計基準強度(引張強度) $f_{\text{pu}}=19000\text{kgf/cm}^2$ 鋼より線と仮定する。許容応力度は $0.6f_{\text{pu}}$ である。活荷重による応力変動はこの段階では未知であるので 5% とすると、許容応力度 10.83tf/cm^2 、より線一本あたり 15.02tf 、必要本数 304 本、断面積 421.6cm^2 という結果になる。

5.8 ケーブルサグ

ケーブルの形状を比較的勾配変化の緩やかな2次放物線とすると、屈曲したケーブルの曲率中心へ向かう力の鉛直成分である上向き力は、1次近似として等分布荷重 q となりスパン長 ℓ 、ケーブルサグ B 、張力 F で $q = \frac{8FB}{\ell^2}$ と表せる。この上向き力で荷重をロードバランスさせることは既に述べた。ロードバランスさせる荷重は $q = W_D + \frac{1}{2}W_L$ である。 $W_D=24\text{tf/m}$ である。従って $q=26\text{tf/m}$ となる。よって、サグ $B = \frac{q\ell^2}{8F} = 10.61\text{m}$ なお、サグスパン比は $\frac{B}{\ell} = \frac{1}{11.5}$ となる。

6. 終局限界状態までの挙動

有限変位を考慮した解析(山崎啓治ほか[8])による荷重-たわみ関係図(図-3)に示されるように、剛性の変化は緩やかであり、終局限界状態での安全(荷重は(死荷重+活荷重)の1.7倍)は確保されることがわかる。

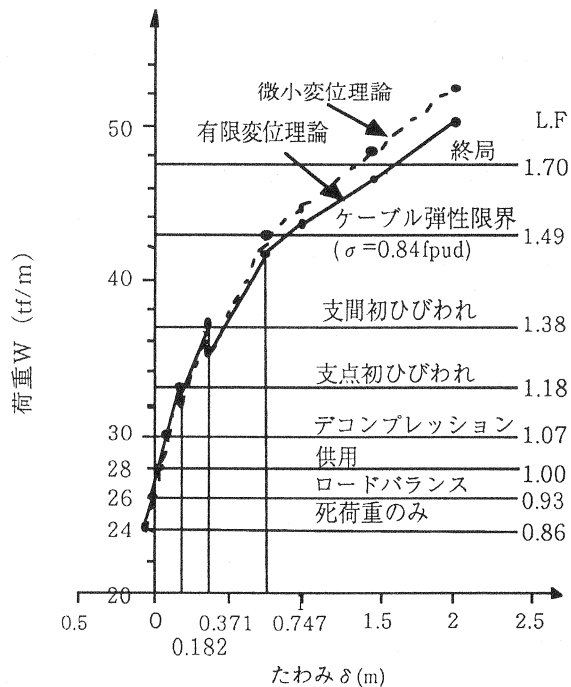


図-3 荷重-変位関係

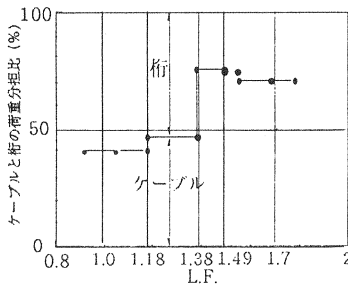


図-4 荷重分担割合

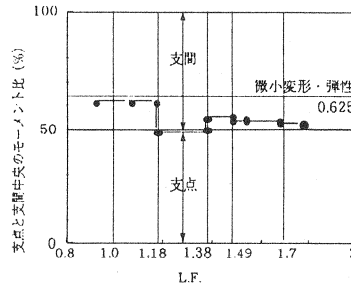


図-5 支点・スパンモーメントの比

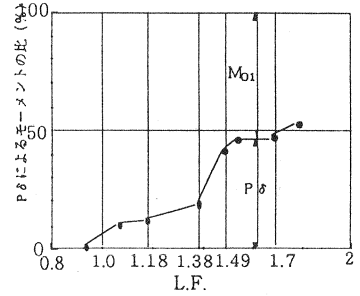


図-6 桁モーメントにおけるPδの割合

挙動の非線形性は強く、①ケーブルの荷重分担割合は40%から70%へ、②桁のモーメントの支点とスパンの割合は60%から50%へ、また③桁の曲げモーメントに占めるPδの割合は0%から50%へと変化する。詳細については、山崎啓治ら [8] による。

7. 小田原ブルーウェイブリッジ (エクストラロード橋) の強度の優位点

本橋で示したモデル構造は、供用状態・終局状態において鉛直荷重に関する示方書の安全基準を満たす。このモデル構造と比較して現在供用中のエクストラロード橋 (小田原ブルーウェイブリッジ) は下記各項の強度上の優位点を有する。

- (1) 桁の強度と剛性がより大きく桁自体の強度が高い。①桁と橋脚の剛結、②中間支点部で桁断面がより大きい、③内ケーブルが配置されている、ことによる。
- (2) 桁の強度・剛性が大きいので、ケーブル (斜材) への負担が軽減される。
- (3) ケーブル (斜材) がサドルで固定されているので、剛性がより大きい。

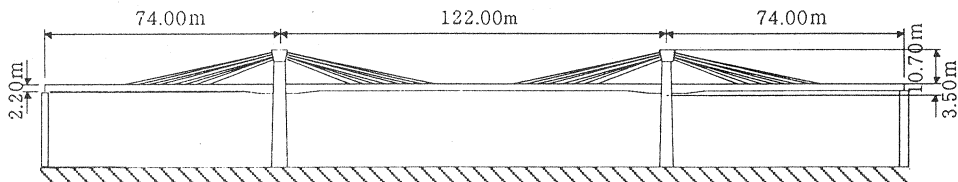


図-7 エクストラロード橋概略図 (小田原ブルーウェイブリッジ)

8. 将来の展望および課題

8.1 構造原理の応用

ケーブルの上下方向へのリニアトランスフォーメーションおよび桁の支持方法変え図-8のような構造が可能である。

この構造は斜ケーブルにすることにより、ひび割れ発生以後の支点に対しスパンモーメントの割合が大きくなる。これは桁の支点・スパンモーメント比が均一比の傾向にあることから問題ない。一方、斜ケーブルにおいて荷重により軸力が発生することは、供用時において応力が圧縮側に厳しくなる。また終局時においてはP-δ効果を増大し、桁は軸力とモーメントの相互作用によりさらに圧縮側に厳しい状態になることは好ましくない方向への変化である。

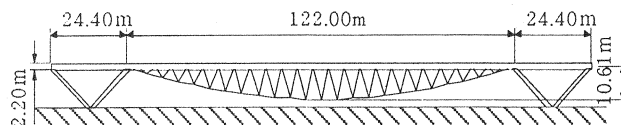


図-8 構造応用例

8.2 クリープ、乾燥収縮

クリープ、乾燥収縮により桁の各部が収縮することは桁の軸力および曲げ剛性を減ずる意味で、ケーブルの荷重負担を増大させるなど、全体系への影響は無視できない。本報告で引用した解析方法で、ひび割れによる剛性変化を考慮した手法を応用し、これらの影響を考慮することが別途必要である。

8.3 施工

現段階で、このモデル構造の施工に関する考察はできていない。具体的な問題点として大容量のプレストレス力(約5000tf)の定着、桁の結合方法及び架設工法なのである。しかしながら、レオンハルト工法にみるループ定着、ブロック押し出し定着やSchlaichの吊り橋や宇田川らの吊り床板においてケーブルにプレキャスト桁をつり下げて最終位置へ移動する方法などの応用が可能であると思われる。

9. まとめ

- (1)PC自碇式吊橋のモデルとして、既存のエクストラード橋より断面が小さく、外ケーブルの容量および高低差が同程度で、桁内にプレストレスのためのケーブルを配置しない構造を示した。
- (2)PC自碇式吊橋は完成系構造形式に限っていえば、鉛直荷重に対する道路橋示方書の終局限界状態の強度の規定を満たす。
- (3)有限変位を考慮した強度の基準を満たすことが理論上可能であることが確認された。
- (4)構造モデルとの対比によりエクストラード橋での強度の優位性の要因を示した。

謝辞

本稿は第一著者(高原裕一)の日本大学大学院理工学研究科修士論文をもとに加筆したものであるが、研究の契機は、日本道路公団がエクストラード橋の建設に世界で初めて踏切ったことに発する。日本道路公団の池田甫、風間徹、城野嘉明の各氏を始め、「西湘バイパス(改築)橋梁構造物に関する技術検討委員会」の委員各位より賜った多くの御教示と啓発に厚く御礼申上げる。

参考文献

- [1] 道路橋示方書(Ⅰ共通編・Ⅲコンクリート橋編)・同解説書
- [2] Schlaich, J. und R. Bergermann: Fußgängerbrücken, 1977-1992, ETH Zurich, 1992.
- [3] 池田、則武、山口、南: 吊床版構造を活用した自碇式複合PC橋に関する研究、第3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、プレストレストコンクリート技術協会(1994)
- [4] Leonhardt, F.: Brücken/Bridges, Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, Stuttgart, 4. Auflage, 1994.
- [5] 新しいPC技術の実用化、第22回PC技術講習会、プレストレストコンクリート技術協会(1994)
- [6] 城野、多久和、春日、岡本: エクストラードPC橋の計画と設計、橋梁と基礎(1992.12)
- [7] 佐々木、山崎、高原、山崎: 大偏心外ケーブルPCモデル桁の載荷実験、PC技術協会第6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、1996.10
- [8] 山崎、高原、佐々木、山崎: 大偏心外ケーブルPC桁の耐荷機構の解析、PC技術協会第6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、1996.10