

(9) 全外ケーブル方式による波形鋼板ウェブPC橋の終局耐力に関する検討

日本道路公団	本社	角谷 務
同	上	○青木 圭一
オリエンタル建設(株)	本社	正会員 正司 明夫
同 上	東北支店	正会員 丸山 正志

1. はじめに

外ケーブル構造は、供用後のメンテナンスを容易にする等の観点から、近年、その採用が増えつつある。その外ケーブル構造の設計上の課題の一つとして、終局耐力の算定方法がある。

外ケーブル構造の終局耐力は、内ケーブル構造と比較すると、デビエータの配置されていない断面では、断面図心からの偏心量が小さくなるため低下する。また、一般に平面保持の仮定で算定する付着のある内ケーブルと同様の扱いができない外ケーブルは、終局荷重作用時の鋼材の伸びを算定することが困難であるため、これを無視すると計算上の終局耐力は低下する。この計算上の終局耐力を増加させるために、引っぱり抵抗材として鉄筋を配置することとなるが、終局荷重作用時に部材が変形し、外ケーブルが伸びることによって発生する張力増加を見込んで設計しない場合、鉄筋量が增大することから不経済な設計となる可能性がある。そこで、近年、その張力増分を見込んで終局荷重作用時の検討が行われるようになってきている。張力増分量の算定に関しては、海外規準では、DIN<sup>1)</sup>、や AASHTO<sup>2)</sup>など、国内の規準では、外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工規準(案)<sup>3)</sup>等、国内の研究では、幸左ら<sup>4)</sup>や小坂ら<sup>5)</sup>によるものがあるが、これらはいずれも単純桁形式や、連続桁および連続ラーメン構造であっても等断面桁形式に関するものである。

日本道路公団発注の勝手川橋、前谷橋は変断面構造であり、かつウェブに波形鋼板を有するPC箱桁橋である。また、これら2橋は、異形PC鋼棒を使用し、順次外ケーブルに置き換えていく張出し架設工法を採用しているが、張出し架設に用いる鋼材および閉合時に用いる鋼材とも外ケーブルを使用した全外ケーブル構造である。このような構造に対する終局耐力の検討は現在まで行われておらず、外ケーブルの張力増加量の算出は、今のところ、複合非線形解析(材料非線形+幾何学的非線形)により行う必要がある。本論文では、本構造形式の張力増分量の算定式を定式化するために行った、上記2橋の複合非線形解析の結果を報告するものである。定式化に関しては、外ケーブルの張力増加量が外ケーブルの固定間距離と有効高さの関数となることを提案した、小坂らによる算定式を参考として行った。小坂らの算定式を式(1)、(2)、(3)に示す。

$$f_{ps} = f_{pe} + \Delta f_p \leq f_{py} \quad (1)$$

$$L/d_p > 50 \text{ の場合} \quad \Delta f_p = 0 \quad (\text{N/mm}^2) \quad (2)$$

$$L/d_p \leq 50 \text{ の場合} \quad \Delta f_p = k/(L/d_p) \quad (\text{N/mm}^2) \quad (3)$$

ここに、 $f_{ps}$  : 終局時における外ケーブルの引張応力度

$f_{pe}$  : PC鋼材の有効引張応力度

$f_{py}$  : PC鋼材の降伏点応力度

$\Delta f_p$  : 外ケーブルの張力増加量

$L$  : 外ケーブルの定着間距離

$d_p$  : 外ケーブルの有効高さ

$k$  : 係数

連続桁、連続ラーメン支間断面照査の場合	=4000
連続桁の中間支点断面照査の場合	=1000
連続ラーメンの中間支点断面照査の場合	=1500

2. 解析方法

2.1 解析モデル

終局耐力を算定する際の解析方法は、断面をファイバー要素に分割した非線形フレーム解析を行うが、断面分割は、上・下床版とも20分割程度とし、波板鋼板部はせん断剛性だけ考慮する。なお、せん断剛性に関しては、波形鋼板ウエブのせん断剛性の低下を考慮するために、見かけの長さSと実長Lとの比に応じてウエブ鋼板の断面積を低減した有効断面積を使用する<sup>6)</sup>。

鉄筋は上・下床版とも2段配置とし、外ケーブルは全て部材として評価する。その外ケーブルは剛な部材の定着部と、鉛直方向のみ剛なデビエータで支持するものとする。また、今回の解析においてはデビエータでの摩擦は考慮していない。3径間連続ラーメン橋である勝手川橋の解析モデルを図-1に、T型ラーメン橋である前谷橋の解析モデルを図-2に示す。解析モデルに示すように2橋とも主桁の軸線の変化を考慮したモデルとした。

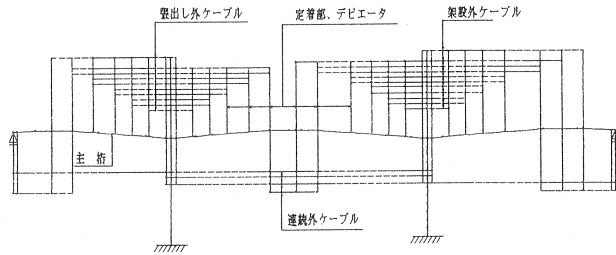


図-1 勝手川橋解析モデル

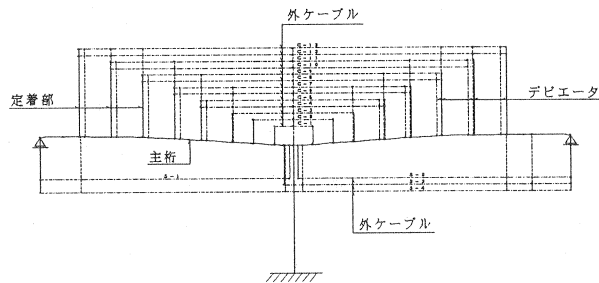


図-2 前谷橋解析モデル

2.2 材料モデル

各ファイバーの材料モデルは、道路橋示方書Ⅲにしたがい、図-3に示すようにモデル化する。コンクリートの終局ひずみは  $3500\mu$  とし、PC鋼材はトリリニア、鉄筋はバイリニアでモデル化する。解析に用いた材料諸数値を表-1に示す。

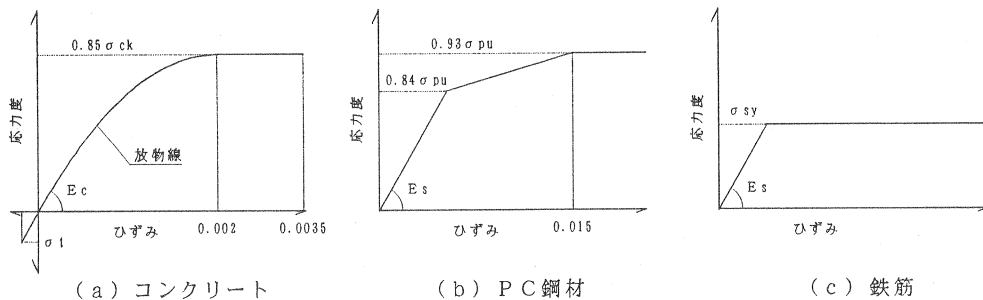


図-3 材料のモデル化

表-1 解析に用いた材料の諸数値

コンクリート	設計規準強度 $\sigma_{ck}$	40 N/mm <sup>2</sup>
	終局ひずみ $\epsilon_{cu}$	0.0035
外ケーブル	引張強度 $\sigma_{pu}$	1850 N/mm <sup>2</sup>
	ヤング係数 $E_s$	$2.0 \times 10^5$ N/mm <sup>2</sup>
鉄筋	引張強度 $\sigma_{sy}$	345 N/mm <sup>2</sup>
	ヤング係数 $E_s$	$2.0 \times 10^5$ N/mm <sup>2</sup>

2. 3 荷重モデル

2橋はともに張り出し施工を行い、構造系が変化する。また、橋体完成以降も、クリープ・乾燥収縮により断面力が変化するため、設計荷重状態の部材の応力を再現するためには、構造系を変化させて部材の応力を累計していく必要がある。厳密には外ケーブルで張り出し施工を行うため、施工段階毎に構造系が変化するが、これらを考慮して累計計算を行うと、計算が非常に煩雑になり実用的でない。そこで、本解析においては、外ケーブルによる構造系変化は考慮せず、主桁全体の構造系変化のみを考慮して初期応力状態を再現するものとする。また、クリープによる断面力は、着目点に発生する断面力が同じとなるような外荷重を加えることで、これを再現するものとする。図-4に一例として勝手川橋の計算において考慮した構造系の変化を示す。

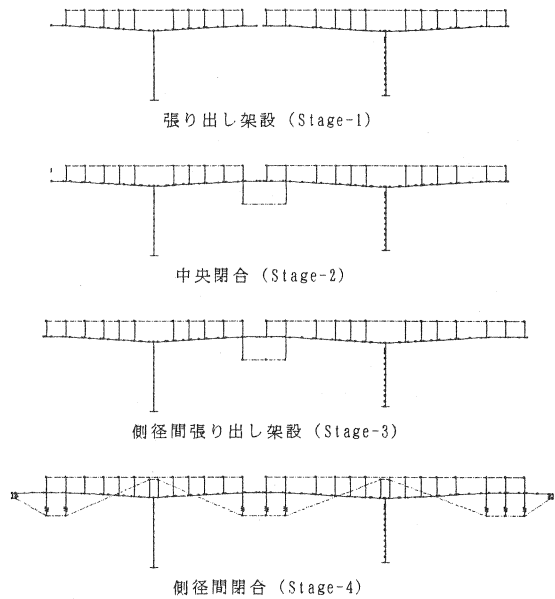


図-4 構造系変化(勝手川橋の場合)

終局荷重作用時の着目断面としては、中間支点断面照査の場合(Case-1)と、支間断面照査の場合(Case-2)の2ケースとし、設計荷重作用時以降は死荷重を一様に載荷する。また、活荷重に関しては、各々、着目断面が最も厳しい応力状態となるように荷重を載荷する。荷重載荷状態および着目断面を図-5に示す。前谷橋の場合は、Case-1がP1橋脚のA2側橋脚前面、Case-2がP1-A2径間、勝手川橋においてはCase-1がP2橋脚のA2側橋脚前面、Case-2がP1-P2径間支間中央断面とする。

終局時荷重係数は、設計計算において  $1.7 \times (\text{死荷重} + \text{活荷重}) + 1.0(\text{クリープ} \cdot \text{乾燥収縮}) + 1.0(\text{プレストリス})$  のケースが終局耐力が最も厳しくなるため、設計荷重作用時以降は、死荷重および活荷重を同じ比率で増加させるものとする。また、クリープ・乾燥収縮およびプレストリスによる断面力は設計荷重作用時以降増加させないものとする。

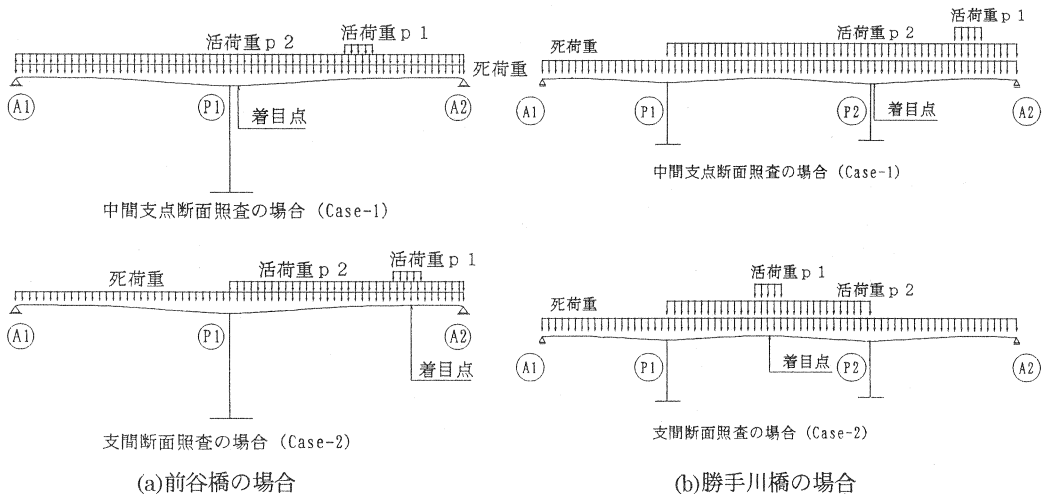


図-5 荷重モデルおよび着目断面

3. 解析結果

3.1 終局耐力について

複合非線形解析を行った計算結果を表-2に示す。曲げによる破壊の判定は、ある断面でコンクリートの圧縮ひずみが $3500\mu$ に達した時点とする。解析結果より、2橋とも終局荷重作用時の組み合わせに乗ずる係数1.7に比較し、十分な耐力を有していることが判明した。

2橋とも、コンクリートの圧縮ひずみが $3500\mu$ に達する位置は、中間支点付近である。従って、前谷橋については、2ケースの差はあまり認められなかった。勝手川橋のCase-2の耐力が大きくなった要因としては、連続ケーブルを途中定着せず中間支点上まで伸ばして定着したため、断面耐力に余裕ができたためと考えられる。

表-2 終局荷重作用時荷重倍率

橋梁名	Case-1	Case-2
勝手川橋	2.49	3.23
前谷橋	2.18	2.16

3.2 張力増分量の検討

3.2.1 ラーメン構造の場合

複合非線形解析により算出した張出しケーブルの張力増加量を図-6に、連続ケーブルの張力増加量を図-7に示す。

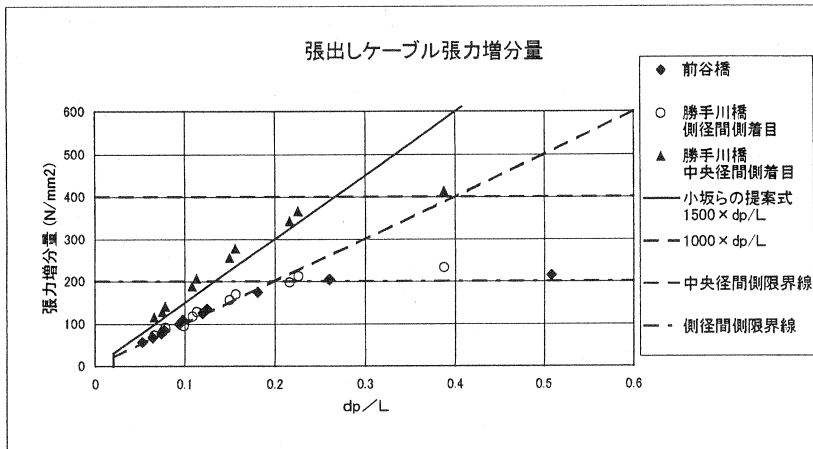


図-6 張出しケーブル張力増分量(ラーメン構造)

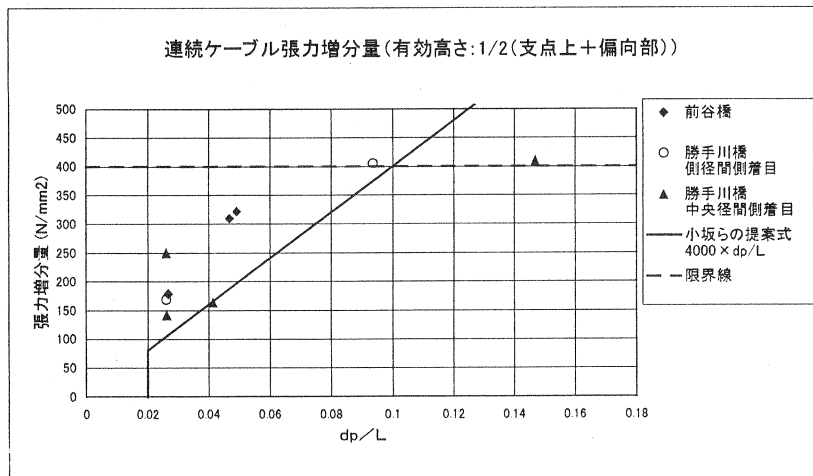


図-7 連続ケーブル張力増分量(ラーメン構造)

小坂らの提案式は、部材内に配置された鉄筋を考慮していないが、考慮した場合終局耐力が増大し、終局時の変形量が大きくなるため1割程度張力増分量が大きくなるとされている。この提案式と勝手川橋、前谷橋の張力増分量を比較すると、図-6に示すように張出しケーブルは、中央径間側に着目すると提案式の数値(鉄筋無視)がほぼ当てはまる。しかし、400N/mm<sup>2</sup>で張力増分量は増加しなくなった。また、側径間側に着目すると、提案式より2割程度張力増分量が少なく、200N/mm<sup>2</sup>で張力増分量は増加しなくなった。

連続ケーブルに関しては、小坂らの提案式は偏向部での有効高さを用いて  $d_p/L$  を算出しているが、本橋が変断面構造であり  $d_p$  は中間支点上と偏向部の平均値を用いた場合、図-7のような結果が得られた。平均値を用いると安全側の設計となる。また、勝手川の連続ケーブルの内、支点を通過しないものに関しては、偏向部のみの有効高さを用いて検討している。2橋の検討結果では、張力増分量は 400N/mm<sup>2</sup> で増加しなくなった。

表-3に今回の検討で得られた張力増分量より、全外ケーブル構造の波形鋼板ウェブPC橋における張力増分量の簡易算定式を提案する。

表-3 張力増分量の簡易算定式

検 討 部 位		提案式(N/mm <sup>2</sup> )
張り出しケーブル	側径間(T型ラーメンを含む)を検討する場合	$\frac{L}{d_{p1}} \geq 50 : \Delta f_p = 0$ $\frac{L}{d_{p1}} \leq 50 : \Delta f_p = 1000 \times \frac{d_{p1}}{L}, \Delta f_p \leq 200 \text{ N/mm}^2$
	中央径間を検討する場合	$\frac{L}{d_{p1}} \geq 50 : \Delta f_p = 0$ $\frac{L}{d_{p1}} \leq 50 : \Delta f_p = 1500 \times \frac{d_{p1}}{L}, \Delta f_p \leq 400 \text{ N/mm}^2$
連続ケーブル		$\frac{L}{d_{p2}} \geq 50 : \Delta f_p = 0$ $\frac{L}{d_{p2}} \leq 50 : 4000 \times \frac{d_{p2}}{L}, \Delta f_p \leq 400 \text{ N/mm}^2$

3. 2. 2 連続桁構造の場合

表-3の簡易算定式はラーメン構造に対するものであり、連続桁構造の張力増加量が当てはまるか確認する必要がある。この検討を行うために、勝手川橋の橋脚を沓に置き換えて、連続桁構造として解析を行った。検討結果を図-8および図-9に示す。

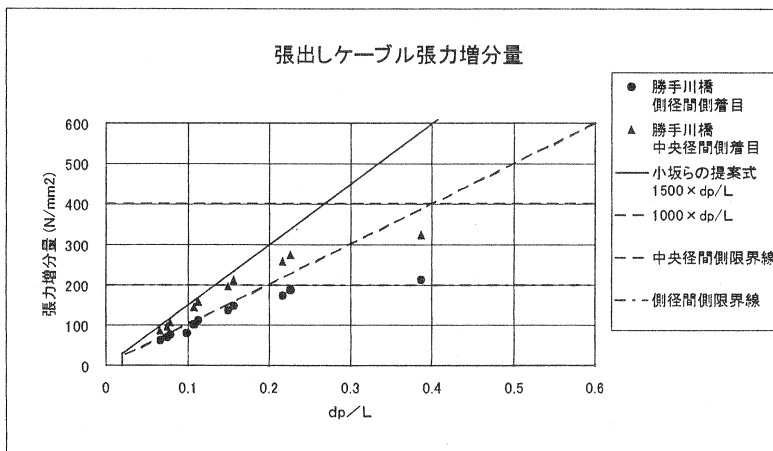


図-8 張出しケーブル張力増分量(連続桁構造)

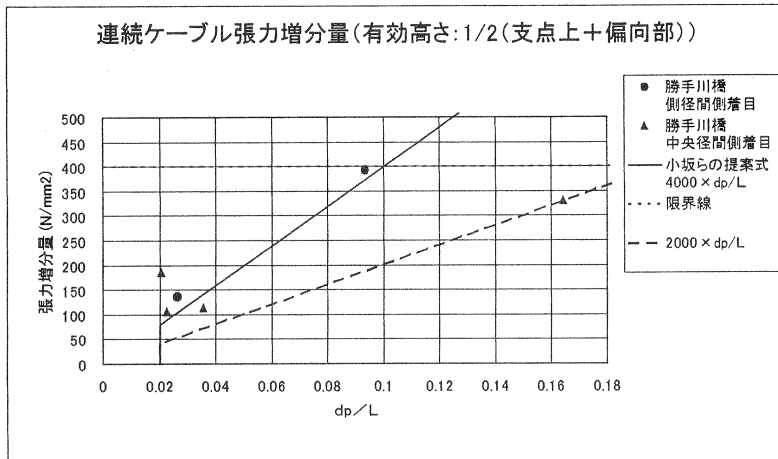


図-9 連続ケーブル張力増分量(連続桁構造)

張出しケーブルに関しては、ラーメン構造と比較して連続桁構造は張力増分量が少ない結果となった。また、連続ケーブルに関しては、中央径間着目の場合、張り出しケーブルと同様に張力増分量が少ない結果となった。しかし、側径間着目に関しては、ラーメン構造と同じ程度の張力増分量となっている。したがって、連続桁形式においては、張出しケーブルおよび連続ケーブルの中央径間着目の場合における張力増分量は、表-3で用いた算定式より、少なく見積もる必要がある。これは、式(1)~(3)に示す小坂らの式においても、ラーメン構造と連続桁構造では、係数を変える必要があるものとして考慮されている。

勝手川橋を連続桁構造とした場合の一例のみの検討結果ではあるが、張出しケーブルの場合、中央径間着目の場合と側径間着目の場合のほぼ中間にあたる張力増分量となり、限界線もその中間にあるものと思われる。

#### 4. おわりに

本検討より、全外ケーブル構造の波形鋼板ウエブP C橋に関する終局耐力、張力増分量の傾向は確認できた。外ケーブルの張力増加量を簡易的に算出する事は、設計的にも合理的であり、配置鉄筋量を減らせることから経済的であると言える。従って、本検討では張出し工法で施工される代表的な形式である2橋について結果をまとめたが、今回の解析ではデビエータ部での摩擦を考慮した解析や、断面内に配置された鉄筋量が異なった場合の検討は行われていない。しかし、さらに数例検討することにより、本構造の一般的な規模を有する橋梁に関しては、張力増分量の簡易算定式がほぼ確立するものと考えられる。

#### 【参考文献】

- 1) DIN4227, Spannbeton, Bauteil mit Vorspannung ohne Verbund, Teil6, 1980
- 2) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications SI Units First Edition, 1994
- 3) (社)プレストレストコンクリート技術協会: 外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工規準(案), 1996.3.
- 4) 終局荷重時における外ケーブル応力増加量算定式に関する検討、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, 1997
- 5) 外ケーブルを用いたP C橋の終局曲げ挙動に関する研究、土木学会論文集 No.613/V-42, 147-164, 1999.2
- 6) 田川ら: コルゲートウエブガダーの研究、日本鋼管技報, Vol.71, pp25~33, 1976.10