

(59) デビエータでの摩擦を考慮した外ケーブル方式PC桁の非線形解析

(株) ピー・エス 土木技術部 正会員 ○河村 直彦  
 同 名古屋支店 正会員 大浦 隆

1 はじめに

外ケーブル方式PC桁の曲げ耐力を計算するためには、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮すべきであることはよく知られている。この時、デビエータ部での摩擦による外ケーブルのすべりについても、デビエータ左右での張力差に対して非線形な挙動を示す。しかしながら、この摩擦による挙動については、その計算方法が確立されていなかった。

今回、この計算を簡単に行う手法を用いた非線形解析プログラムを開発したので、これについて述べることにする。

2 プログラムの概要

フローチャートを図1に示す。本プログラムは、材料非線形、幾何学的非線形、デビエータでの非線形すべりの3つの非線形性を考慮していることが特徴である。

材料非線形については、任意の応力ひずみ関係を定義することができる。

幾何学的非線形については、外ケーブルと桁との相対位置の変化およびデビエータ間の距離の変化を考慮している。

デビエータでの非線形すべりについては、摩擦係数から直接すべり量を算出することができる。

3 デビエータでの非線形すべりの算出方法

次に、デビエータでの非線形すべりの算出方法について述べる。

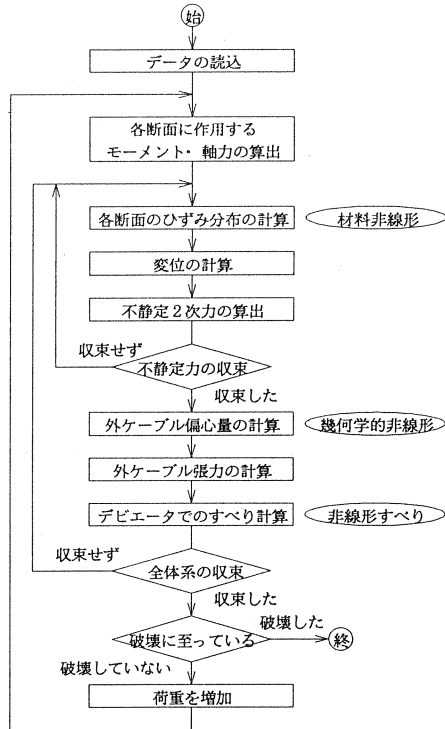


図1: フローチャート

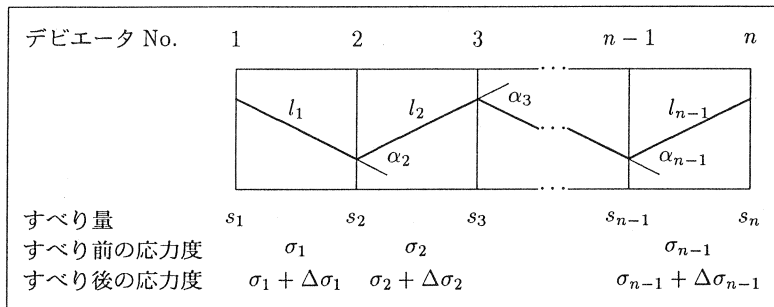


図2: 記号説明

この算出方法では、摩擦係数とデビエータ左右の張力から各々のデビエータでのすべり量

$$s = [s_1 \quad s_2 \quad \cdots \quad s_n]^t$$

を求める。ただし、 $s_i$ の符号はデビエータの左から右へすべるときを+とする。また、単純化のため、デビエータでの摩擦は角変化 $\alpha_i$ のみによるものとし、そのときの単位角あたりの摩擦係数を $\mu$ とする。

デビエータ No.  $i$  において、左右のケーブル張力とすべりとの関係は、以下のとおりである。

1. デビエータの左右の張力差が摩擦で保持できるならばそのデビエータでのすべりはないので

$$i = 1, i = n \text{ または } \sigma_{i-1}e^{-\mu\alpha_i} \leq \sigma_i \leq \sigma_{i-1}e^{\mu\alpha_i} \text{ のとき } s_i = 0$$

$$a_i = [0 \cdots 0 \quad \overset{i-1}{0} \quad \overset{i}{1} \quad \overset{i+1}{0} \cdots \overset{n}{0}], b_i = 0 \text{ とおいて,}$$

$$a_i \cdot s = b_i \tag{1}$$

2. デビエータの左右の張力差が摩擦で保持できる以上ならばその張力差まですべるので

$$\sigma_i > \sigma_{i-1}e^{\mu\alpha_i} \text{ のとき } (\sigma_i + \Delta\sigma_i) = (\sigma_{i-1} + \Delta\sigma_{i-1})e^{\mu\alpha_i}$$

$$\sigma_i e^{\mu\alpha_i} < \sigma_{i-1} \text{ のとき } (\sigma_i + \Delta\sigma_i)e^{\mu\alpha_i} = (\sigma_{i-1} + \Delta\sigma_{i-1})$$

$$\eta_i = \begin{cases} e^{\mu\alpha_i} & (\sigma_i > \sigma_{i-1}) \\ e^{-\mu\alpha_i} & (\sigma_i < \sigma_{i-1}) \end{cases} \text{ とおくと, 上式は次のように書ける。}$$

$$(\sigma_i + \Delta\sigma_i) = (\sigma_{i-1} + \Delta\sigma_{i-1})\eta_i$$

これを応力~ひずみ関係 $\Delta\sigma_i = E_p \frac{s_{i+1} - s_i}{l_i}$  を用いて変形すると,

$$\begin{aligned} (\sigma_i + E_p \frac{s_{i+1} - s_i}{l_i}) &= (\sigma_{i-1} + E_p \frac{s_i - s_{i-1}}{l_{i-1}})\eta_i \\ \therefore \frac{E_p \eta_i}{l_{i-1}} s_{i-1} - (\frac{E_p \eta_i}{l_{i-1}} + \frac{E_p}{l_i}) s_i + \frac{E_p}{l_i} s_{i+1} &= \sigma_{i-1} \eta_i - \sigma_i \end{aligned}$$

$$a_i = [0 \cdots 0 \quad \frac{E_p \eta_i}{l_{i-1}} \quad -(\frac{E_p \eta_i}{l_{i-1}} + \frac{E_p}{l_i}) \quad \frac{E_p}{l_i} \quad 0 \cdots 0], b_i = \sigma_{i-1} \eta_i - \sigma_i \text{ とおいて,}$$

$$a_i \cdot s = b_i \tag{2}$$

(1),(2) をすべてのデビエータについて求めると  $n$  個の式ができる。

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} s = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

これを解けばデビエータでのすべり量  $s$  が求められる。ただし、張力の再分配後もさらに副次的な影響が出てくるので、この計算をすべてのデビエータですべりがおこらなくなるまで繰り返し行う。

また、デビエータでの摩擦において、摩擦長による影響がある場合は、 $\mu\alpha$  のかわりに  $(\mu\alpha + \lambda l)$  を用いればよい。

## 4 実験への適用

### 4.1 対象とする実験

本プログラムの有効性を確認するため、既往の実験結果と対比する。対比する実験として、馬場らの実験 [1] との比較を行う。実験値との比較において、デビエータでの摩擦係数として、 $\mu = 0.0$ (張力が全長にわたり一定) および  $\mu = 0.3$  の2種類で計算する。

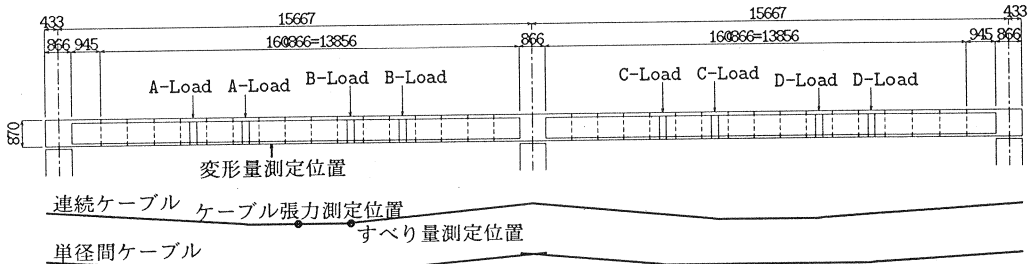


図3: 試験桁概要

### 4.2 破壊荷重および主桁の変形

計算では、破壊はコンクリートの圧縮ひずみが0.35%に達した時とした。破壊荷重は  
 $\cdot \mu = 0.0$  で A-Load=39.0tf, たわみは 146.1mm  
 $\cdot \mu = 0.3$  で A-Load=39.5tf, たわみは 149.5mm  
 となった。

一方、測定値は、圧縮ひずみが0.35%に達したときは A-Load=40.5tf, このときのたわみ量は 210.8mm であった。

実験ではさらに荷重は増加し、最終荷重は A-Load=42.4tf, このときのたわみ量は 261.8mm であった。

載荷荷重～荷重最大たわみ量の関係を図4に示す。測定値はほぼ計算値に沿っていることがわかる。

破壊時の荷重およびたわみが計算値より大きい理由については、鉄筋によるコンクリートの拘束効果、コンクリートの応力～ひずみ関係、デビエータでの摩擦による外ケーブルの張力増加(特に中間支点)等が考えられる。

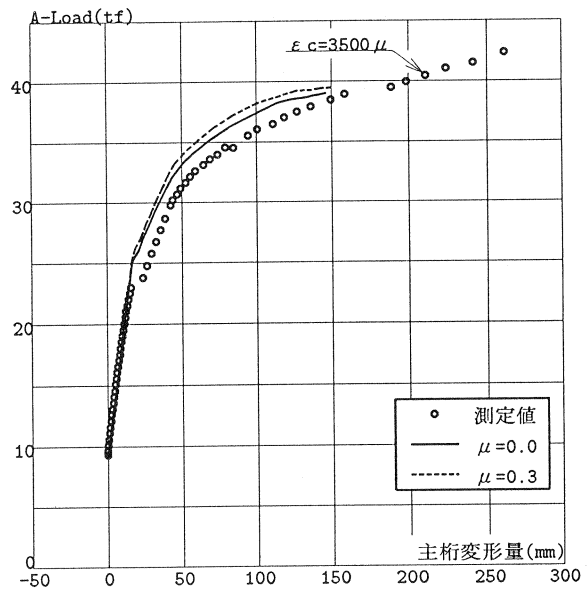


図4: 主桁の最大たわみ量

### 4.3 外ケーブル増加張力

外ケーブルの増加張力を図5に示す。計算値は、 $\mu = 0.0$  で  $20.0 \text{ kgf/mm}^2$ ,  $\mu = 0.3$  で  $27.4 \text{ kgf/mm}^2$  であった。測定値は、ほぼ  $\mu = 0.3$  での計算値に近い値となった。

#### 4.4 デビエータでのすべり量

デビエータでのすべり量を図6に示す。荷重が増加するにつれて、計算値は急激にすべりが起こる結果となったが、測定値はあまり増加していない。これは、中間支点での摩擦長が長く、この部分での摩擦が計算値よりも大きくなっているためと考えられる。支点横桁のような、摩擦長の長い部分での摩擦による挙動は、今後の検討課題であると考えられる。

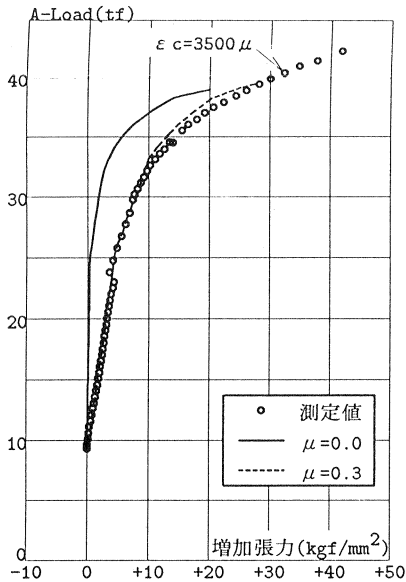


図 5: 外ケーブル増加張力

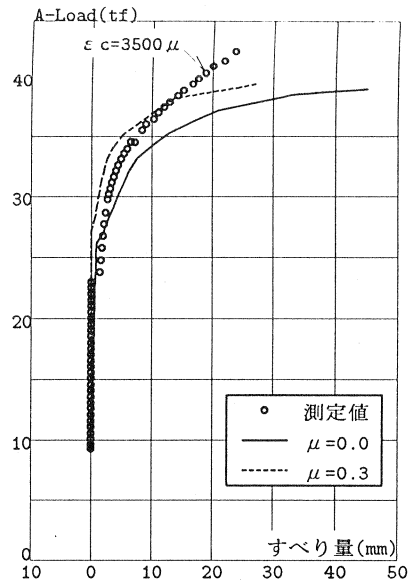


図 6: デビエータでのすべり量

### 5 まとめ

以上の議論をまとめると、以下のとおりとなる。

1. 外ケーブル方式 PC 桁の非線形解析において、外ケーブルのデビエータでの摩擦による挙動は式(3)で求められる。
2. デビエータでの摩擦を考慮すれば、より実橋に近い解析結果を得ることができる。

本研究が外ケーブル方式 PC 桁の非線形解析の発展の一助になれば幸いである。

最後に、本論文の作製にあたりデータの使用を快諾していただいた日本道路公団高松建設局、高速道路技術センターおよびピー・エス住友建設共同企業体の各位に御礼申し上げます。

### 参考文献

- [1] 馬場他, 内外ケーブル併用プレキャストセグメント連続箱桁橋の模型実験, 土木学会年次講演会 1995