

連続する滑車要素を用いた構造物の大変形解析

(株)リョーセンエンジニアズ技術計算センタ構造解析課 正会員 ○田口 和宏
 (株)リョーセンエンジニアズ技術計算センタ 正会員 山本 利弘
 三菱重工業(株)広島研究所鉄構・土木研究室 正会員 井上 幸一
 三菱重工業(株)広島製作所橋梁・鉄構部橋梁設計課 正会員 上平 悟

1. はじめに

本報告では大ブロック吊り上げ等の一括架設で使われる滑車に着目し、これを含む構造物の大変形解析を効率良く解析するための手法を提案して解析例を紹介する。滑車はこれを通る両側のケーブル張力が等しくなるように回転するが、通常要素ではこのような特性を表現することが煩雑で、例えば温度荷重による張力の調整が必要になる。滑車を含んだケーブル要素の剛性行列は文献(1)に示されているが滑車が1個の場合である。文献(2)には連続する滑車の条件を考慮した形状決定手法が提案されているが要素の剛性行列は示されていない。今回提案する要素は連続する滑車の特性を接線剛性行列として表したもので、これを大変形解析の収束過程に導入することで要素内の全ケーブル張力が等しく調整された解を直接的に求めることができる。

2. 連続する滑車要素の接線剛性行列

滑車が2つある4節点要素の場合を例にとって説明する。

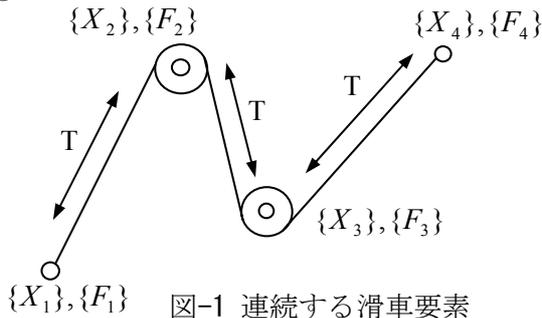


図-1 連続する滑車要素

節点の位置および反力ベクトルを次式で表現する。ただし、滑車の摩擦・大きさとケーブルの重量については考えない。

$$\{X_i\} = \{x_i, y_i, z_i\}^T, \{F_i\} = \{fx_i, fy_i, fz_i\}^T \quad (1)$$

ケーブルの全長を L とすると、変形に伴うケーブルの伸び ΔL は全微分の考え方で近似的に次式により与えられる。

$$\Delta L = \{g\}^T \{\delta\} \quad (2)$$

$$\{g\} = \left\{ \begin{array}{l} -l_1, -m_1, -n_1, (l_1 - l_2), (m_1 - m_2), (n_1 - n_2), \\ (l_2 - l_3), (m_2 - m_3), (n_2 - n_3), l_3, m_3, n_3 \end{array} \right\}^T$$

$$\{\delta\} = \left\{ \begin{array}{l} \Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1, \Delta x_2, \Delta y_2, \Delta z_2 \\ \Delta x_3, \Delta y_3, \Delta z_3, \Delta x_4, \Delta y_4, \Delta z_4 \end{array} \right\}^T$$

ここで l_i, m_i, n_i は、 i と $i+1$ 番目の節点の方向余弦を表す。また $\{\delta\}$ は変位ベクトルである。ケーブル張力の増分は次式で表される。

$$\Delta T = \frac{EA}{L} \Delta L \quad (3)$$

EA はケーブルの軸剛性を表す。

節点に作用する反力の増分 $\{F\}$ は次式で表される。

$$\{F\} = \{g\} \Delta T = \frac{EA}{L} \{g\} \{g\}^T \{\delta\} \quad (4)$$

下線の部分が接線剛性行列になる。

一般的な接線剛性行列は、節点の数を np 、滑車の数を $np-2$ として下記の要領で算出する。

$$[K] = \frac{EA}{L} \{g\} \{g\}^T \quad (5)$$

$$\{g\} = \{\bar{l}_1, \bar{m}_1, \bar{n}_1, \dots, \bar{l}_{np}, \bar{m}_{np}, \bar{n}_{np}\}^T$$

ただし、 $\bar{l}, \bar{m}, \bar{n}$ は下記で表される。

$$\bar{l}_1 = -l_1, \bar{m}_1 = -m_1, \bar{n}_1 = -n_1$$

$$\bar{l}_j = l_{j-1} - l_j, \bar{m}_j = m_{j-1} - m_j, \bar{n}_j = n_{j-1} - n_j \quad (6)$$

$$: j = 2 \sim np - 1$$

$$\bar{l}_{np} = l_{np-1}, \bar{m}_{np} = m_{np-1}, \bar{n}_{np} = n_{np-1}$$

キーワード 滑車, 滑車要素, 大変形, 吊り上げ
 連絡先 〒733-0036 広島市西区観音新町 1-20-24
 〒730-8642 広島市中区江波沖町 5-1
 〒730-8642 広島市中区江波沖町 5-1

TEL 082-295-7148
 TEL 082-294-3626
 TEL 082-292-3124

3. 大変形解析

変形後の局所座標系に対する各要素の断面力から計算した節点力を仮に内部節点力と称す。一方、外力等で与えた節点力を外部節点力と称す。大変形解析では、内部節点力と外部節点力の差（不平衡力）がゼロに収束する変位増分を求めるために接線剛性行列を逐次計算する必要がある。この接線剛性行列に対して前節の連続する滑車要素を適用することで要素内の全ケーブル張力が等しく調整された収束解が直接得られることになる。

4. 解析例

ここでは、解析例を2ケース紹介する。図-2のモデルでは力学的な力のつり合いを検証し、図-5では大ブロック吊り上げ解析を行った結果を示す。

図-2は、両端が支持されたケーブル系である。上部の滑車は水平移動のみ、下部の滑車は上下、水平可動であり、100kNの荷重が載荷されている。

つり合い後の状態が図-3の実線である。変形後の座標から計算した各節点間の方向余弦はすべて $(X, Y) = (0.66494, 0.74689)$ となり、力のつり合いが取れている。また、ケーブル張力は全箇所 66.94kNで、この値はケーブル伸び量と整合している。

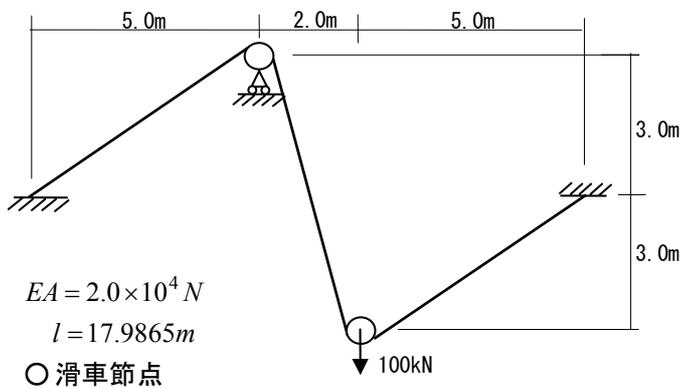


図-2 検証モデル

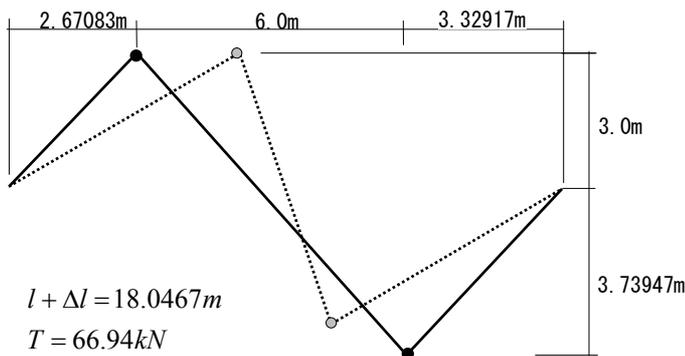


図-3 つり合い変形後の座標

次に、実際の構造に近いモデルで吊り上げ解析を行った結果を示す。この構造は曲線桁を想定したモデルである。全重量は 4000kN で、全長は 102.6m である。吊り点は 8 点で、図-4 のようなワイヤリングを 4 個セットした。外側のケーブルは連続しており、中央のケーブルは真中の滑車を吊り下げる役目をする。

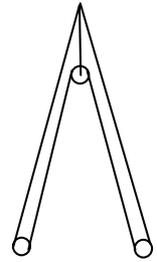


図-4 ワイヤリング

構造の重心が中央にあることから、つり合い後（変形後）の左右の張力は等しく、また、同ワイヤリング中の外側ケーブル張力は同一である。（⑨～⑫）変形後の形状は、構造体の弾性変形が考慮されたつり合い形状になる。

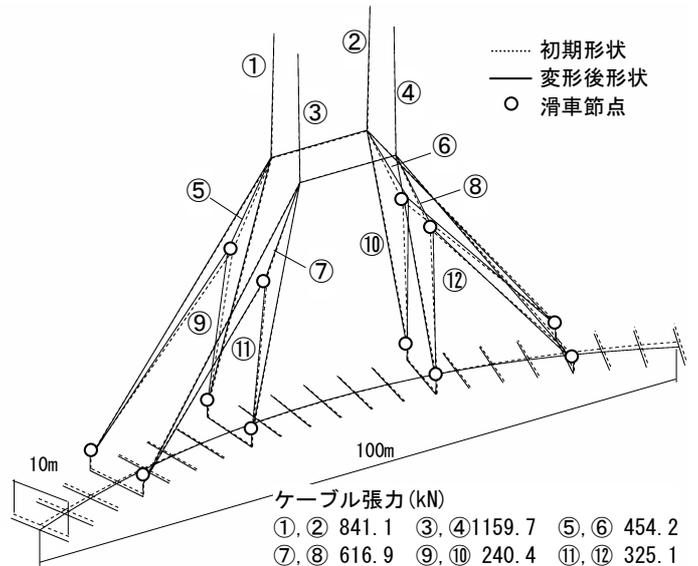


図-5 大ブロック吊り上げ解析

5. まとめ

本報告で連続する滑車を含む構造物の大変形解析を効率良く解析するための手法を提案して解析例を紹介した。今後は、滑車の摩擦と大きさやケーブルの重量の影響についても検討したいと考えている。

参考文献

- (1) M.Aufaure, A Finite Element of Cable Passing Through A Pulley, Computers & Structures Vol.46 No.5 pp.807-812, 1993
- (2) Dang Tung Dang, 岩崎英治, 長井正嗣, 滑車を含んだ要素によるケーブル構造の解析, 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部, 58巻, 423~424頁, 2003