

## Strut-and-Tie Model による外ケーブル定着部の耐荷力評価法について

大成建設 (株) 土木設計部 正会員 ○白谷 宏司  
 大成建設 (株) 国際支店 正会員 市橋 俊夫  
 大成建設 (株) 東京支店 正会員 渡 貴司

### 1. はじめに

Strut-and-Tie Model は、ひび割れ後の鉄筋コンクリート構造物をトラスモデルで表し、耐荷力を評価する手法である。この手法はひび割れ後の応力再分配を考慮でき、しかも非線形 FEM 解析等より簡単に構造物の耐荷力を評価することができる場合もあるため、欧米では比較的古くから実設計に応用されており、日本でも 2002 年制定のコンクリート標準示方書 (構造性能照査編) に取り入れられている。しかしながら、我が国では実設計への適用事例は未だそれほど多くないと推察される。

そこで、本論文では、Strut-and-Tie Model の適用例として、PC 箱桁橋の外ケーブル定着部に対する載荷実験の供試体を対象として試設計を行い、載荷実験結果と比較した一例について述べる。

### 2. 検討モデル

本検討で対象とした、載荷実験供試体の模式図を図-1 に示す。これは、国土交通省土木研究所 (当時) と (社)プレストレストコンクリート建設業協会の共同研究<sup>1)</sup> として実施された、一連の実験供試体のうちの一ケースである。実橋の 1/2 スケールで、2 車線の標準的な箱桁橋が想定されているが、供試体では上床版が省略されている。供試体は主桁の構造中心に対し左右対称で、図-1 では片側半分のみ表示している。供試体の定着突起は下床版に設けられており、実験では供試体端部の反力壁側で PC 鋼材を緊

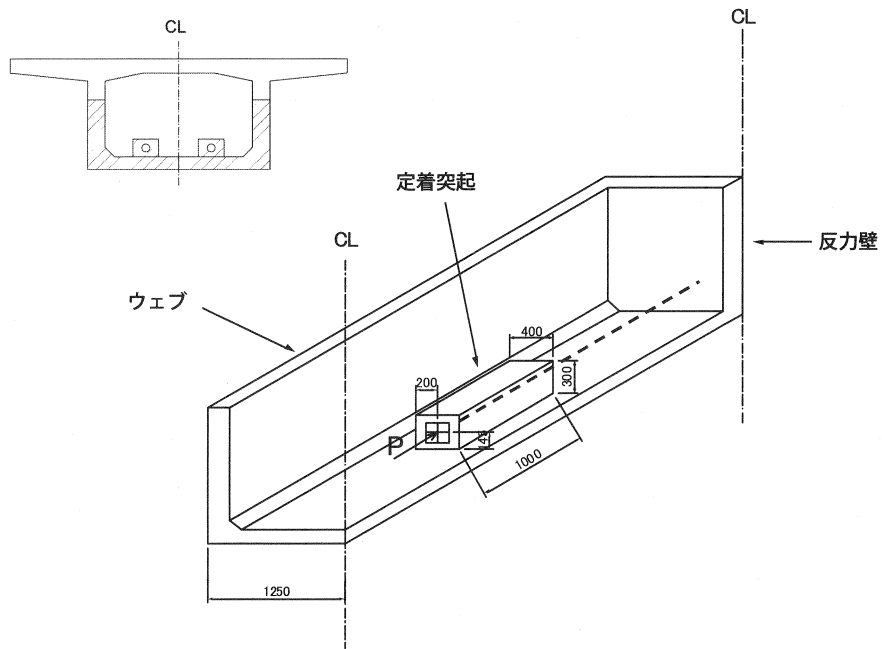


図-1 実験供試体<sup>1)</sup>

張ることにより、定着突起への载荷を行った。

### 3. 解析モデル

Strut-and-Tie Model による解析モデルを図-2 に示す。本モデルは3次元の立体トラスで、実線は Tie (引張材：鉄筋)、破線は Strut (圧縮材：コンクリート) を示す。

予備検討において、ウェブ下面の下床版を線支承として鉛直変位を拘束した場合と、鉛直変位を拘束しない場合とで比較を行ったが、定着突起周辺の部材応力には有意な差がなかったため、ウェブが定着部の挙動や耐荷力に及ぼす影響は小さいと判断し、ウェブを省略してその下側の鉛直変位を拘束することとした。また、簡便のため反力壁も省略し、その下側で鉛直・水平方向の変位を拘束している。構造中心線上では、供試体が左右対称であることを踏まえ、橋軸回りの回転を拘束している。

本解析は線形であり、単位荷重として 1000kN の緊張力を载荷した。耐荷力は、トラス材のいずれかが材料強度に達する最小荷重として、本解析結果から比例計算により算出した。供試体の鉄筋は橋軸および橋軸直角方向、鉛直方向に配置されている。Strut-and-Tie Model では、基本的には Tie は鉄筋と同じ方向にしか配置しないため、全ての斜材は基本的に圧縮材としなければならない。そこで、本解析

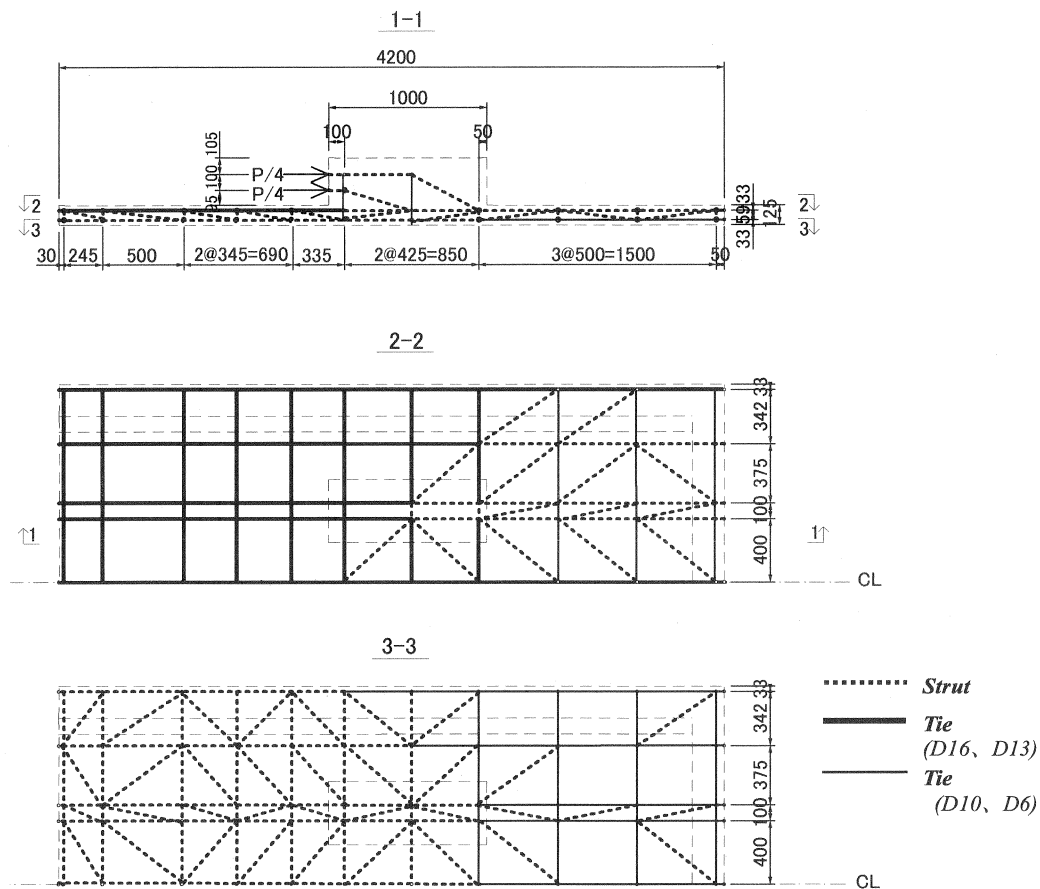


図-2 解析モデル

では、斜材が圧縮（あるいは微小な引張）となるように斜材配置に対する数回のトライアルを行って、**図-2** に示す斜材配置を決定した。

#### 4. 解析結果

本解析より得られた変形モードを**図-3** に示す。本解析では引張材として基本的に鉄筋しか考慮していないため、変位量自体は実構造物よりはるかに大きいと考えられ、比較の対象とはならない。しかし、変形状況から、下床版にはプレストレス力の偏心による面外曲げが働いている状況が理解できる。

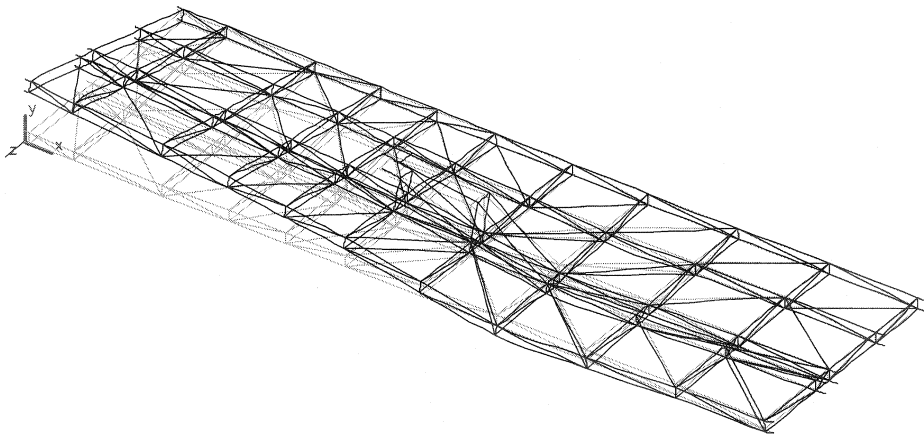
引張力が特に厳しい箇所を模式的に**図-4** に示す。これらの箇所の Tie に発生する引張力を、その位置に配置されている鉄筋の断面積で除して応力を算出すると、**表-1** に示すように突起前面の上床版側（A部）が最も厳しくなる。

本解析では単位荷重 1000kN を載荷しているため、鉄筋 (SD295) の降伏強度を  $350\text{N/mm}^2$  として各部材が降伏に達する荷重  $P_y$  ( $=\sigma_y / \sigma \cdot P$ , ここで  $\sigma_y$  : 鉄筋降伏強度,  $\sigma$  : 鉄筋応力,  $P$  : 荷重 (1000kN)) を算出すると、 $P_y$  の最小値は 663kN となる。これが本解析による定着部の耐荷力となる。

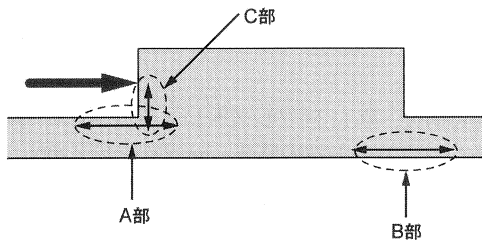
なお、本検討では *fib* の “Practical Design of Structural Concrete”<sup>2)</sup> に準じて圧縮材の照査を行ったが、全ての圧縮材の応力は制限値 ( $f_{cd,eff} = v_2 f_{cd}$ , ここで  $f_{cd}$  : 文献2) で規定されるコンクリート設計圧縮強度,  $v_2 = 0.8$ ) より十分小さいため、本論文では検討結果を割愛した。

#### 5. 実験結果との比較

実験結果と本解析結果の比較を**図-5** に示す。**図-5** の横軸は、定着突起前面の下床版上側 (**図-4** 中の



**図-3** 解析結果 (変形図)



**図-4** 主要な引張力発生箇所

**表-1** 鉄筋降伏荷重の算出結果

部位	P=1000kN に対する鉄筋応力 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏荷重 $P_y$ (kN)
突起前面下床版上側 (A部)	528	663
突起背面下床版下側 (B部)	502	697
載荷点直下 (C部)	269	1301

A部)の鉄筋のひずみで、図中の●、○は実験におけるこの箇所の2本の鉄筋の計測値である。

実験では、この箇所の鉄筋ひずみが降伏値 ( $\epsilon_y \approx 350 / (2.0 \times 10^5) = 1750 \mu$ ) に達したところで荷重の増加が止まっていることから、A部での鉄筋降伏により終局状態に至ったと推察される。実験終了時にはA部と共にB部にも多数のひび割れが生じていた。表-1に示すように、解析ではA部とB部の計算耐力に大差がないことから、Strut-and-Tie Modelによる解析結果は、実際の破壊モードをある程度再現できていたことになる。

ただし、解析で得られた耐力は実験による耐力の2/3程度でしかない。Strut-and-Tie Modelは基本的に引張材として鉄筋のみモデル化し、コンクリートのテンションスティフニングやひび割れ面でのせん断伝達などは考慮しない。本検討では、実験、解析とも、面外曲げを受けた床版の上面あるいは下面の広範囲で、床版平面の全方向で引張状態になり、床版内の鉄筋の降伏により終局状態に至ったが、解析では、全方向に引張が発生する箇所にはコンクリート Strut が配置できず鉄筋のみで引張に抵抗することになるため、耐力を過小評価する結果になったと考えられる。

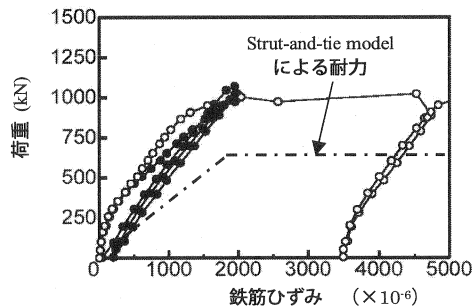


図-5 実験結果と解析結果の比較

## 6. まとめ

Strut-and-Tie Modelは原理的に安全側の耐荷力を与える計算手法であり、非線形FEM解析のように実際の挙動を忠実に再現するためのものというよりは、設計者がその設計思想に基づいて配筋を決定するための手法である。今回の実験結果との差異は、設計耐力に対する余剰耐力と考えると、ある程度妥当な範囲であると言える。

Strut-and-Tie Modelがその有用性を発揮できるのは、例えば、突起に斜めひび割れが生じ、突起内での鉄筋の降伏やコンクリートの局所的な圧壊による破壊形態のような、鉄筋による引張材とコンクリートによる圧縮材による応力分担(トラスの形成)を明確にし易い場合であると考えられる。その点では、本検討で対象とした実験供試体は必ずしも適切な検討対象ではなかったかもしれないが、Strut-and-Tie Modelがコンクリート構造物の耐荷力評価に適用できることを示す一例として、本検討結果が今後の設計技術の発展への一助となれば幸いである。

なお、本検討は、(社)プレストレストコンクリート技術協会「PC箱桁定着部の破壊解析委員会」(委員長:田邊忠顕名古屋大学名誉教授)にて行った検討<sup>3)</sup>をベースに若干の修正を加えたものです。また、筆者は、fib Commission1におけるStrut-and-Tie Modelによる試設計例集作成のTask Groupにも参加してこの検討結果を提示し、貴重な意見を賜りました。関係各位に深甚の謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 西川ら：外ケーブル定着突起の形状および配筋に関する研究，第11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，pp.237-242，2000.
- 2) FIP Recommendations (1999)： Practical Design of Structural Concrete, FIP-Commission 3 "Practical Design", Sept. 1996. Publ.: SETO, London, Sept. 1999.
- 3) (社)プレストレストコンクリート技術協会：PC定着部の破壊解析に基づく性能設計，2004.