

(80) 全外ケーブル方式の連続ラーメン橋の設計・施工

|         |        |         |            |
|---------|--------|---------|------------|
| 日本道路公団  | 名古屋建設局 | 一宮工事事務所 | 村田 正則      |
| 鹿島建設(株) | (株)熊谷組 | 共同企業体   | 野田 進       |
| 鹿島建設(株) | 土木設計本部 | 第二設計部   | 正会員 山村 正人  |
|         | 同 上    |         | 正会員 ○矢野 一正 |

1. はじめに

本橋は、東海北陸自動車道 開明高架橋のP10~P13 区間にあたる3 径間連続ラーメン橋である。主桁は6 室を有する多重箱桁であり、全幅は21.4 m と広幅員であるのに対し、隣接する中空床版橋と連続させるため、桁端では桁高が1.3 m となる非常に偏平な形状である。主桁主方向のPC 鋼材は、基本設計では通常の内ケーブルであったが、施工条件および経済性から、全て外ケーブルとしたいわゆる「全外ケーブル方式」を採用した。全外ケーブル方式のPC 橋梁は、道路橋としてはわが国で初めてである。

本報文では、全外ケーブル方式PC 橋梁の設計、および終局荷重作用時の挙動を確認するために実施した非線形解析について報告し、外ケーブルの施工概要を紹介するものである。

2. 開明高架橋 (P10~P13) の概要

開明高架橋 (P10~P13) の諸元は次のとおりである。

|                       |                             |
|-----------------------|-----------------------------|
| 橋 梁 名：開明高架橋           | 架設工法：全支保工施工                 |
| 路 線 名：高速自動車国道東海北陸自動車道 | 橋 長：147.5 m                 |
| 工事位置：愛知県尾西市開明         | 支 間 長：39.2+67.0+39.2 m      |
| 道路規格：第1種第3級A規格        | 幅 員：21.4 m (車道 9.74+9.74 m) |
| 橋 種：プレストレストコンクリート道路橋  | 活 荷 重：B活荷重                  |
| 構造形式：3 径間連続PC 箱桁ラーメン橋 | 平面線形：R = 1500 m             |

本橋の一般図を図-1 に示す。

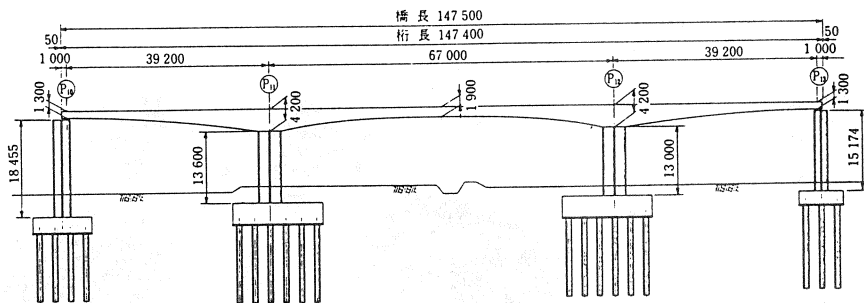


図-1 一般図

使用材料は以下のとおりである。

- |  |                      |       |
|--|----------------------|-------|
| 1) コンクリート                                | 2) PC 鋼材             | 3) 鉄筋 |
| 主桁： $\sigma_{ck} = 350 \text{ kgf/cm}^2$ | 主桁主方向：SWPR7B 19S15.2 | SD345 |
| 橋脚： $\sigma_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$ | (全外ケーブル 32 本；全て連続)   |       |

### 3. 外ケーブル方式の採用

PC鋼材を外ケーブル方式とすることは、設計的・施工的に有利な点が多く、また維持管理が容易であること等から、近年多くの橋梁に積極的に採用されている。設計的には、①部材厚を薄くでき軽量化が図れること、②鋼材緊張時の摩擦損失が大幅に低減できるため高い導入力が得られること、③大容量のPC鋼材が使用できること、等から経済性に優れた構造形式と言え、施工的には①コンクリート打設、②PC鋼材配置、等において省力化が図れることが利点である。

本橋の場合には、①全支保工施工であること、②P13において既設橋梁と隣接するためPC鋼材は片側緊張しかできないこと等、特に外ケーブル方式に有利な前提条件があった。本橋の連続ケーブルを内ケーブルとして片側緊張する場合、主桁に必要なプレストレスを導入するには、主桁を分割施工とし、PC鋼材を途中緊張する必要がある。これに対し、PC鋼材を外ケーブル方式の連続鋼材とすることで、緊張作業をP10桁端のみとしながらも、全橋に渡って高い導入力を与えることができ、経済的な設計が可能となった。

詳細設計では、外ケーブルの利点を最大限生かせるように主桁主方向の全てのPC鋼材を外ケーブルとし、ウェブ厚を薄くすることで基本設計に対してコンクリート数量を約10%低減することができた。基本設計と詳細設計の主桁断面の比較を表-1に示す。

また、外ケーブルの防錆処理方法としては、従来多用されてきたポリエチレン保護管+セメントグラウト方式に代えて、維持管理および施工性の観点からエポキシ樹脂塗布型ストランドを保護管無しで使用することとした。これにより、ケーブルの自由長部のグラウトが必要なくなり、経済性・施工性が向上するとともに、保護管およびグラウト材に遮られることなく目視によるケーブルの点検・管理が可能となった。写真-1にその設置状況を示す。

表-1 主桁断面比較表

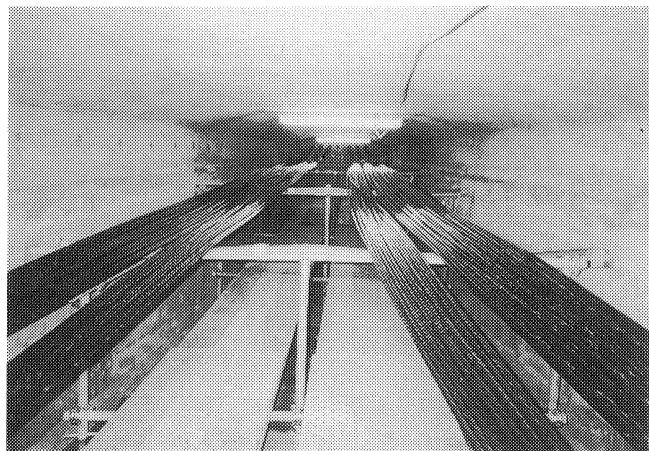
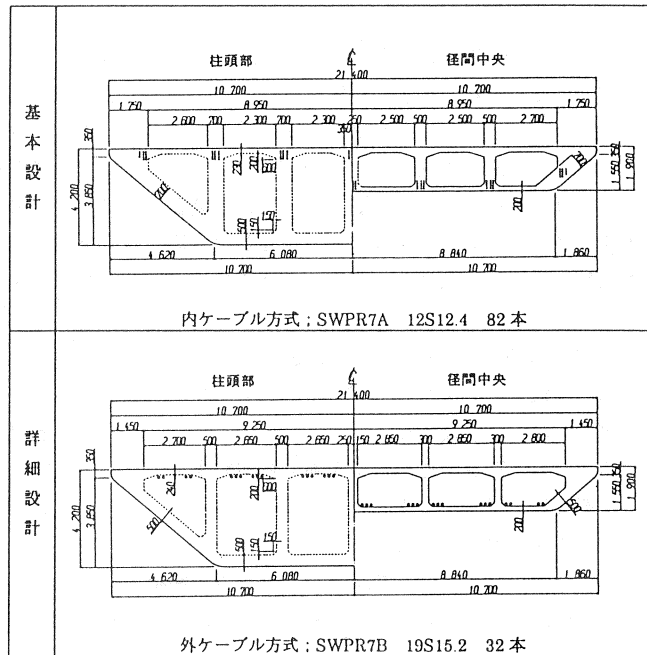


写真-1 外ケーブル設置状況(緊張前)

図-2に外ケーブルの配置形状を示す。

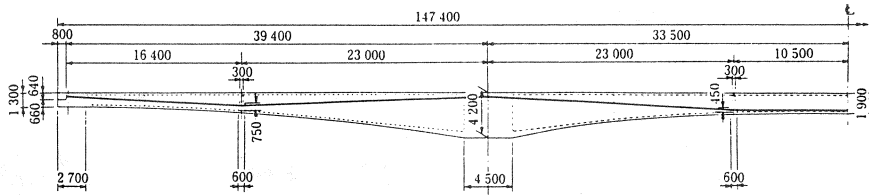


図-2 外ケーブル配置図

4. 設計概要

設計において外ケーブル構造に特有な事項については、「外ケーブルを用いた PC 橋梁の設計マニュアル」  
1) (以下、外ケーブルマニュアルと略す。)に従った。

4. 1 構造モデル

設計計算において断面力算出に用いる構造モデルは、平面フレームモデルとした。ここで、外ケーブルは部材として評価せず、外ケーブルの応力度変化を従来の内ケーブルと同様にプレストレス力として取り扱う「換算内力載荷法」により解析を行った。

4. 2 設計荷重作用時の照査

設計荷重作用時の外ケーブル PC 鋼材の許容引張応力度は、偏向部での曲げ配置による付加応力度を考慮した上で  $0.6 \sigma_{pu}$  ( $\sigma_{pu}$  は PC 鋼材の引張強さ) とした。

設計荷重作用時における柱頭部および支間中央断面の主桁曲げ応力度を表-2に示す。

表-2 主桁主要断面の曲げ応力度

|       |           | (kgf/cm <sup>2</sup> ) |      |       |       |             |      |
|-------|-----------|------------------------|------|-------|-------|-------------|------|
|       |           | 柱頭部 (P11 側)            |      | 中央径間  |       | 柱頭部 (P12 側) |      |
|       |           | 上縁                     | 下縁   | 上縁    | 下縁    | 上縁          | 下縁   |
| 静荷重時  |           | 36.2                   | 33.3 | 82.9  | 36.7  | 33.3        | 34.1 |
| 設計荷重時 | 活荷重最大     | 24.3                   | 34.3 | 94.6  | 0.9   | 21.7        | 35.2 |
|       | 活荷重最小     | 11.5                   | 50.5 | 76.9  | 18.3  | 8.9         | 51.3 |
| 温度荷重時 | 全体温度+     | 32.1                   | 62.3 | 76.0  | 22.7  | 29.4        | 53.3 |
|       | 全体温度-     | 11.4                   | 32.7 | 105.4 | -11.6 | 8.7         | 33.8 |
| 地震時   | P10 → P13 | 35.5                   | 10.4 | 79.0  | 18.6  | 8.0         | 54.6 |
|       | P10 ← P13 | 19.9                   | 53.4 | 78.7  | 17.7  | 32.7        | 20.4 |

本橋の外ケーブルの配置本数は 32 本であるが、表-2の主桁曲げ応力度には余裕があり、設計荷重作用時で外ケーブルの必要本数を算定すると、30 本まで減らすことができる。すなわち、本橋の外ケーブル配置は、次に示す終局荷重作用時で決定されている。

4. 3 終局荷重作用時の照査

曲げに対する終局荷重作用時の照査は、「外ケーブルマニュアル」に従って、外ケーブルを内ケーブルと同様に引張抵抗材と考え、平面保持を仮定した手順により破壊抵抗曲げモーメントを求める手法を用いた。ただし、部材変形に伴う外ケーブルの応力度増加は、重信川高架橋での実績<sup>2)</sup>等を考慮して  $10 \text{ kgf/mm}^2$  と設定し、最終的には後述する非線形解析により安全性を確認することとした。

表-3 主桁主要断面の曲げ破壊安全度

荷重組合せ:  $1.7 \times (\text{死荷重} + \text{活荷重})$

|         |      | 柱頭部 (P11 側) | 中央径間 | 柱頭部 (P12 側) |
|---------|------|-------------|------|-------------|
| 活荷重曲げ最大 | 鉄筋無視 | 1.18        | 0.97 | 1.14        |
|         | 鉄筋考慮 | 1.43        | 1.11 | 1.39        |
| 活荷重曲げ最小 | 鉄筋無視 | 0.96        | 1.12 | 0.93        |
|         | 鉄筋考慮 | 1.16        | 1.29 | 1.13        |

終局荷重作用時の曲げモーメントが最も

厳しくなる荷重組合せは、 $1.7 \times (\text{死荷重} + \text{活荷重})$  の場合である。表-3に、曲げ破壊安全度がクリティカルとなる柱頭部および支間中央の主桁断面について、曲げ破壊安全度の算定結果を示す。

鉄筋を考慮したケースでは、終局曲げモーメントを与える同じ荷重状態で、せん断に対する引張弦材としての必要鉄筋量と、ねじりモーメントに対する橋軸方向必要鉄筋量を控除した鉄筋量を有効とした。

4. 4 偏向部

偏向部は、外ケーブルの偏向力を主桁に円滑に伝達するようリブ形式とした。偏向具の設置される部分は、ケーブルの曲げ半径 ( $R = 4.0 \text{ m}$ ) により必要厚を決定した。偏向具としては、硬質 PE 管 ( $\phi 140, R = 4.0 \text{ m}$ ) を中間の曲げ部分に用い、両端には  $R = 1.0 \text{ m}$  のテーパ加工を施した鋼管を取り付けたものを使用した。偏向部では、ケーブル (エポキシ塗布型ストランド) は  $\phi 114$  の PE 内管を介して配置する 2 重管構造

とし、内管にはケーブルの保護および防錆を目的にグラウトを充填した。また、予備孔は各ボックスに1カ所ずつ設けた。（図-3、写真-2）

偏向部補強は、「外ケーブルマニュアル」にしたがいリブ形式の簡易法により、偏向具周辺に生じる局部引張力およびせん断力に対して必要鉄筋量を算出し、補強筋を配置した。

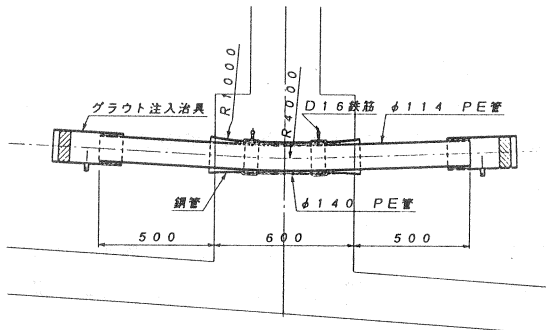


図-3 偏向具詳細図

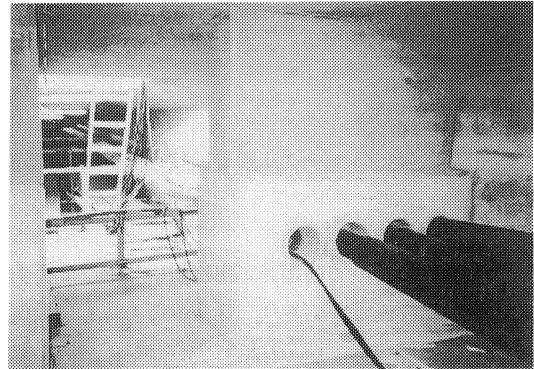


写真-2 偏向部隔壁（リブ形式）

#### 4.5 定着部

外ケーブル32本は、表-1に示すとおり、内ボックスに各6本、外ボックスに各4本配置し、全て連続ケーブルとして桁端横桁に定着した。

外ケーブル方式では、一般に大容量のケーブルがウェブや上下床版の外で横桁に定着されるため、内ケーブル方式とは異なる曲げおよびせん断応力が定着横桁に生じる。「外ケーブルマニュアル」によると、「定着横桁を格子モデルや四辺固定版として曲げモーメントならびにせん断力を算出して、引張応力度ならびにせん断応力度に対する補強を行ってよい。」

とあるが、本橋の端横桁については、その形状を考えると版として検討するのは適切でない。本橋では、FEM解析を実施することにより、外ケーブルによる応力の伝達がタイドアーチ的な性状を示すことを確認した。その概念図を図-4に示す。これより、補強として図中の引張弦材（タイバー）に相当する引張鉄筋を鉛直方向に配置した。

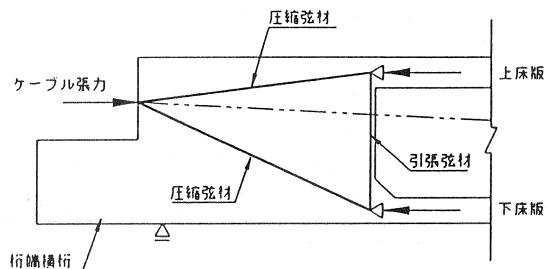


図-4 タイドアーチ概念図

#### 5. 非線形解析

外ケーブル構造の終局荷重作用時の安全性を厳密に検討するには構造系としての終局耐力を算定する非線形解析を実施する必要がある。本橋の場合、終局荷重作用時の照査で部材変形に伴う外ケーブルの応力度増加を  $10\text{kgf/mm}^2$  見込んで設計していることから、追加検討として以下のような非線形解析による破壊安全度の確認を行った。

##### 5.1 解析概要

検討においては、材料非線形性、幾何学的非線形性を考慮した、複合非線形フレーム解析<sup>3)</sup>を実施した。コンクリート、PC鋼材、鉄筋のそれぞれの応力度-ひずみ関係を適切にモデル化するために、主桁部材をファイバーモデルとし、終局状態の判定は、主桁部材のいずれかのファイバーが終局ひずみ ( $\epsilon_{cu} = 3500 \mu$ ) に達した時点とした。

### 5. 2 解析モデル

図-5に示すとおり、外ケーブルは軸力部材としてトラス要素でモデル化した。各設計断面において所定の偏心量が確保されるように、偏向部には剛部材を設置した。なお、外ケーブルの応力度増加を過大に評価しないように、ケーブルと偏向部剛部材との接合条件はスライドとした。

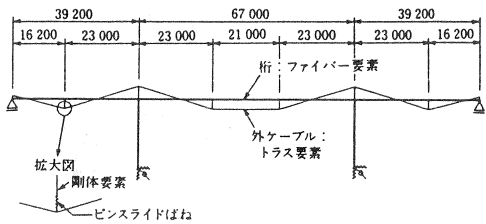


図-5 非線形解析モデル

### 5. 3 荷重の載荷方法

荷重載荷パターンは、活荷重の影響線により定めた。図-6に載荷3ケースを示す。載荷荷重は、終局荷重作用時で最も厳しい組合せとして  $1.7 \times (\text{死荷重} + \text{活荷重})$  を想定し、設計荷重作用時 (死荷重 + 活荷重) を初期状態として死荷重と活荷重を同時に増加させた。このようにして、主桁破壊時の荷重係数  $\alpha$  が 1.7 以上あれば道路橋示方書による安全度が確保されるものと考えた。

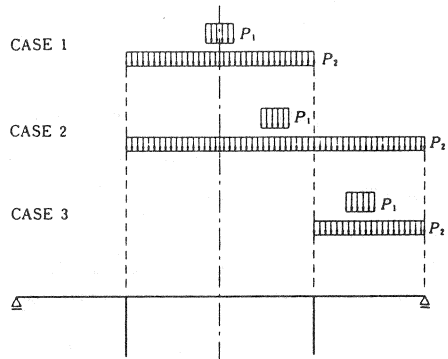


図-6 活荷重載荷パターン

### 5. 4 解析結果

非線形解析では、いずれの荷重ケースにおいても柱頭部断面で破壊が生じた。荷重係数  $\alpha = 2.7 \sim 2.9$  となったことから、 $10 \text{ kgf/mm}^2$  の応力度増加を考慮した詳細設計結果は、十分安全であることが確認できた。

## 6. 外ケーブルの施工

本橋の外ケーブルの架設・緊張では、従来の内ケーブル工法に比べて次のような特徴が挙げられる。

### 6. 1 外ケーブル挿入

全長にわたりシースがないため、ケーブル挿入においてプッシングマシンを使用せずにウィンチによる引き込み方式とした。引き込みは効率化のため、ケーブル3本もしくは4本を同時に行った。(図-7)

また、エポキシ被覆の保護、および偏向部への円滑な挿入のために、摩擦を回避する受棚を仮設した。(写真-1、図-8)

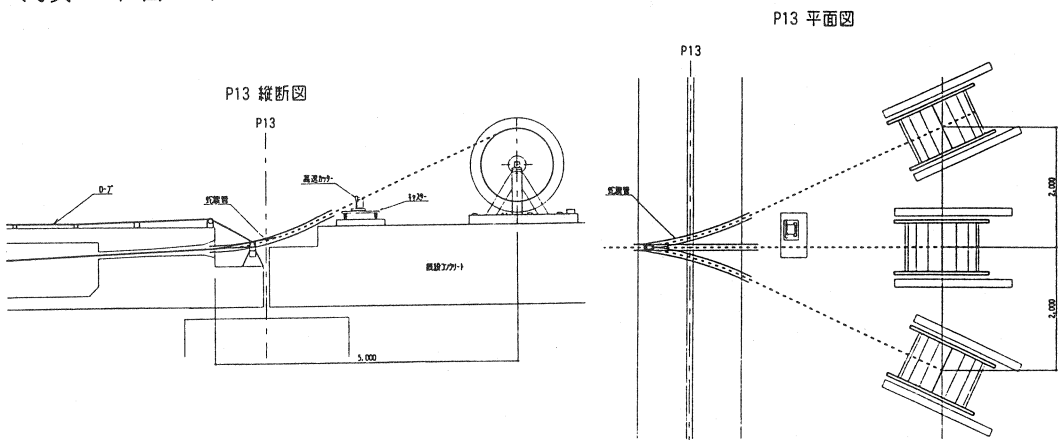


図-7 ケーブル挿入ドラム配置

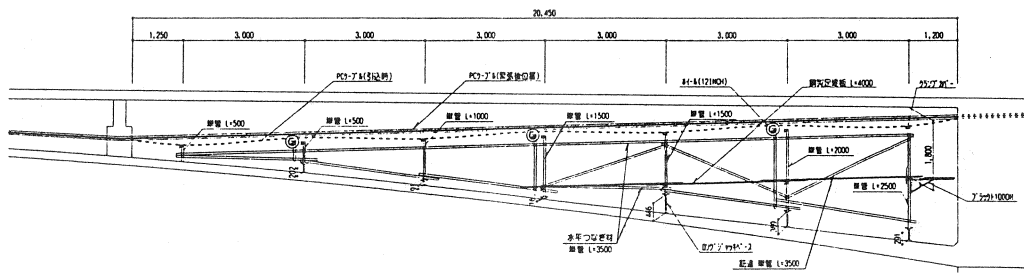


図-8 ケーブル受支保工

## 6. 2 緊張管理

内ケーブルに比較して摩擦による緊張力の損失が小さいため、緊張管理においては $\mu$ 管理ではなく、「外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工基準(案)」<sup>4)</sup>に従い、荷重計示度および鋼材の伸び量による管理とした。これにより、鋼材伸び量が緊張計算値の $\pm 5\%$ の管理値以内にあることを確認した。

## 6. 3 計測管理

①偏向部等の各部において設計上必要な張力が得られていることの確認、②偏向部における摩擦係数 $\mu$ の確認を目的とし、ひずみゲージによる計測を実施した。ただし、PCケーブルにはエポキシ被覆が施されているので、PCケーブルの弾性係数からは直接応力を求めることができない。このため、事前にエポキシ塗布ストランドの緊張荷重計示度とひずみゲージ読み値の関係をを用いて、ひずみゲージのキャリブレーションを行った。計測位置は、桁端横桁(緊張端P10、固定端P13)の内側と、柱頭部および偏向部隔壁の両側の計6箇所とした。

計測の結果、各部外ケーブルの緊張力は設計値を満足しており、偏向部における摩擦係数は設計で仮定した $\mu=0.3(1/\text{rad})$ と良く一致することが確認された。

## 7. おわりに

道路橋としてはわが国で初めて全外ケーブル方式を採用した開明高架橋の設計・施工の概要について報告した。全外ケーブル方式の採用により、コンクリート数量の大幅な低減が図れ、鋼材緊張を一括片引きとすることができ、経済的な設計および施工性の向上が実現できた。

ただし、外ケーブルの必要本数は曲げに対する終局荷重作用時の検討で決定されており、これは主桁変形に伴う外ケーブルの応力度増加量を合理的に設定することによりさらに経済的な設計にする余地があると考えられる。すなわち、本橋では、非線形解析により厳密な耐荷力の照査を行うことを前提として応力度増加を $10\text{kgf}/\text{mm}^2$ 見込んだ設計としたが、今後、より大きい応力度増加の設定が基準化されれば、外ケーブル方式はより経済的な構造となるといえる。

## 参考文献

- 1) (財)高速道路技術センター：外ケーブルを用いたPC橋の設計マニュアル，平成8年8月
- 2) 長谷俊彦，馬場照幸，岡田稔規，吉松慎哉  
：重信川高架橋の設計報告，プレストレストコンクリート技術協会第5回シンポジウム論文集，p.397~400，1995.10
- 3) 沖見芳秀，右近八郎：複合非線形フレーム解析システムの開発，土木学会誌，vol.80，p.14~17，平成7年1月
- 4) (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基準(案)，平成8年3月