

## コンクリート構造の 時間依存性挙動とFEM解析

株式会社国際建設技術研究所  
上仁 健一郎

### 構造材料の時間依存性挙動とは

時間の経過にともなうひずみの増大。

- 荷重が作用し続けることによって生じるクリープ（コンクリート、岩石、木材、金属、ゴム、プラスチック...）
- 荷重には依存しない乾燥収縮、自己収縮等の体積変化（セメントペースト、骨材）
- コンクリートのクリープは30年にわたって続く

構造材料の応答には瞬間応答と時間依存応答がある。

## コンクリートの時間依存性挙動が構造に及ぼす影響

### 時間依存性挙動を予測することの必要性

●プレストレストコンクリートでは、プレストレスのロスが生じる⇒計画的なプレストレスング

●意図しないたわみ, 変形

施工時の上げ越し, 下げ越し, 製作桁長は?

●そのたわみ, 変形を拘束する構造では2次的な断面力(=不静定力)が発生する。

不静定構造の支点, 分割施工や混合構造における構造系変化が変位を拘束する。

## コンクリートの時間依存性挙動が構造に及ぼす影響

中央閉合時 $M=0$



(a) 中央径間を連続構造とする前の死荷重による曲げモーメント  $M_{d1}$



(b) 中央径間を連続構造としたのち、コンクリートのクリープの影響により変化した死荷重による曲げモーメント  $M_{d2}$

施工段階を考慮して算出した死荷重曲げモーメント

## クリープの作用効果

クリープはひずみとたわみ, また応力分布に影響を及ぼす。

①無筋コンクリートのクリープは, 応力が非常に高いときには破壊の生じる限界ひずみへの接近を早めるが(クリープ破壊), クリープ自体は断面耐力に変化を与えることはない。

## クリープの作用効果

②RCでも鉄筋が均等に分布しているときは, 断面耐力に変化を与えることはない。

③持続荷重を受けるRC単純はり(静定構造)の終局強度に及ぼすクリープの影響は小さいが, たわみはかなり増大し, 設計上の支配的条件になりうる。

## クリープの作用効果

④持続荷重を受けるRC柱では、クリープによってコンクリートは縮むが鉄筋は縮まない。断面は平面を保持していなければならないので時間の経過とともにコンクリートの応力度は減じ、鉄筋の応力度は増加する。鉄筋拘束

## クリープの作用効果

⑤不静定構造物において、クリープは収縮・温度変化あるいは支点沈下などによって発生する応力を緩和する。



⑥コンクリート構造物ではクリープは不均一収縮による内部応力を低減させるので、ひび割れ発生が低減する。

## クリープの作用効果

⑦マスコンクリートではクリープはひび割れの原因となりうる。これは、拘束されたコンクリート全体が、水和熱の発生とその後のクーリングとによる温度変化の反復を受けるときに起こりやすい。

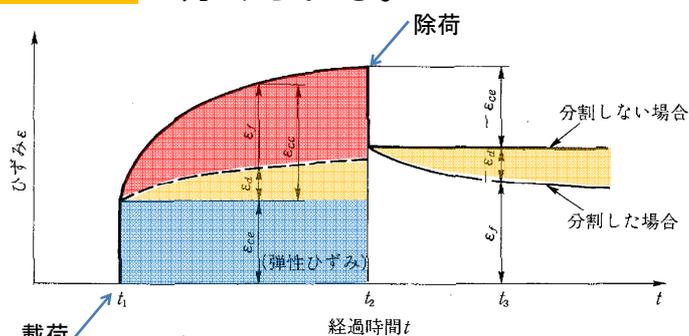
⑧プレストレスの減少

⑨不静定力の発生

出典：コンクリート構造の設計・施工・維持管理の基本 土木学会関西支部

## クリープひずみの推定

クリープひずみ( $\epsilon_{cc}$ )はフロー成分( $\epsilon_f$ )と遅れ弾性成分( $\epsilon_d$ )に分けられる。



## クリープひずみの推定

クリープひずみは弾性ひずみに比例し，引張応力に対しても圧縮応力に対しても同じ比例定数を持つものとする。(Davis-Glanvilleの仮定)

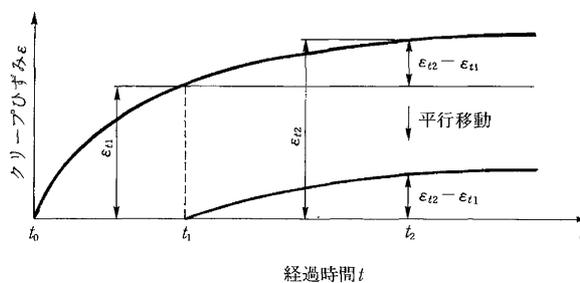
$$\varepsilon_{cc} = \sigma_c / E_c \cdot \phi$$

ただし，コンクリートの応力度が圧縮強度の約40%以下の場合。

$\varepsilon_{cc}$ : コンクリートのクリープひずみ,  $\sigma_c$ : 持続荷重による応力度,  $E_c$ : コンクリートのヤング係数,  $\phi$ : コンクリートのクリープ係数

## クリープひずみの推定

$t_1$ に作用する持続荷重によって生じる応力変化に対するクリープ曲線は， $t_0$ に載荷した持続荷重に対するクリープ曲線をひずみ軸方向に平行移動させたものに等しい。(Whitneyの仮定)



Whitneyによる理想曲線

## 体積変化

- 凝結, 硬化過程における体積変化
- 初期収縮
- 硬化コンクリートの体積変化
  - ①湿潤膨張
  - ②温度変化
  - ③中性化(炭酸化)による収縮
  - ④乾燥収縮

## 体積変化

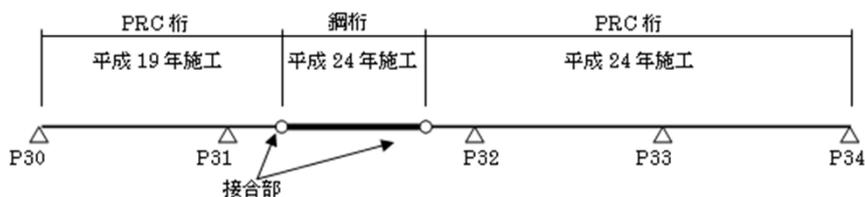
### コンクリートの収縮度

- 乾燥収縮(水の蒸発), 自己収縮(水和による水の消費), 炭酸化収縮
- 骨材によっては,  $1000 \times 10^{-6}$ に達する大きな収縮を示す場合がある。
- コンクリートの収縮ひずみの試験値, 既往の資料, 実績をもとに定めることを原則とする。

## 時間依存性FEM解析の事例

### 概要

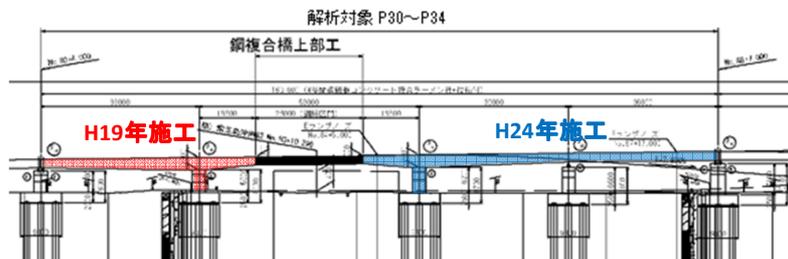
鋼・コンクリート複合連続ラーメン橋において、分割施工時期が設計条件と大きく異なることとなったため、構造に対するクリープ・乾燥収縮の影響を検討した。



## 時間依存性FEM解析の事例

橋梁全体をモデル化し、施工条件、構造系変化およびコンクリートのクリープ・乾燥収縮の影響を考慮できるFEM解析を行った。

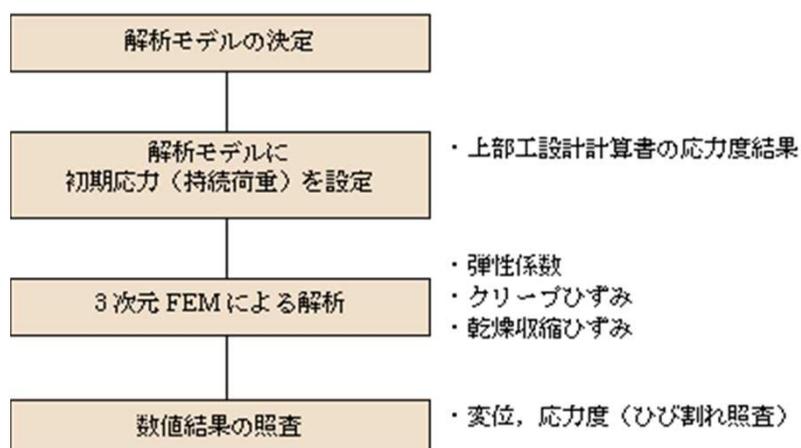
鋼桁・コンクリート桁の変位、応力についての照査を行った。



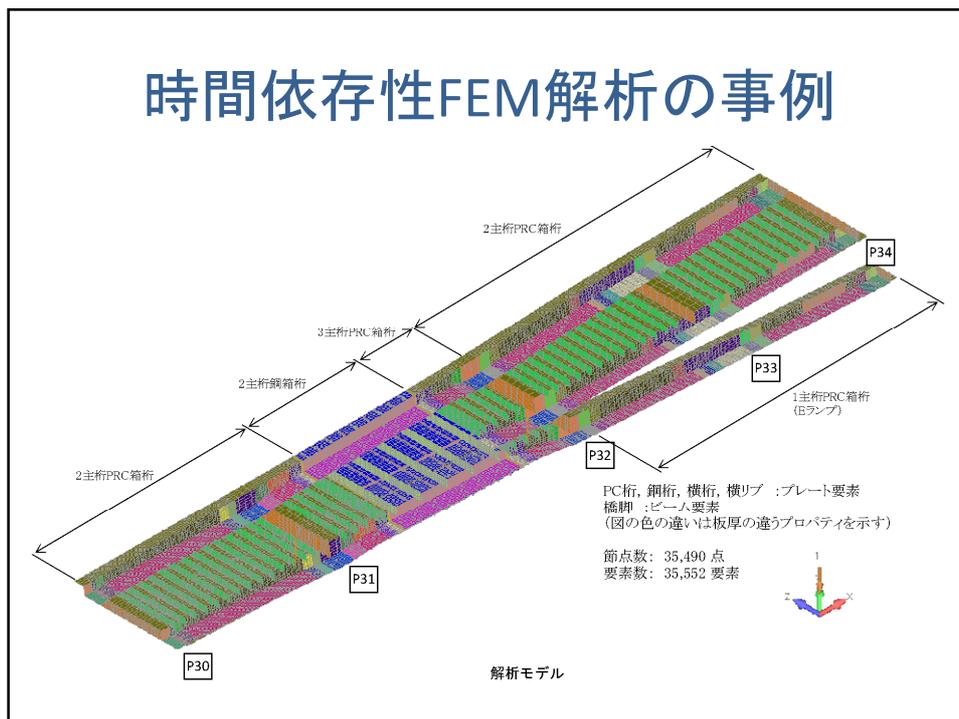
鋼・コンクリート桁接合部



## 検討方法



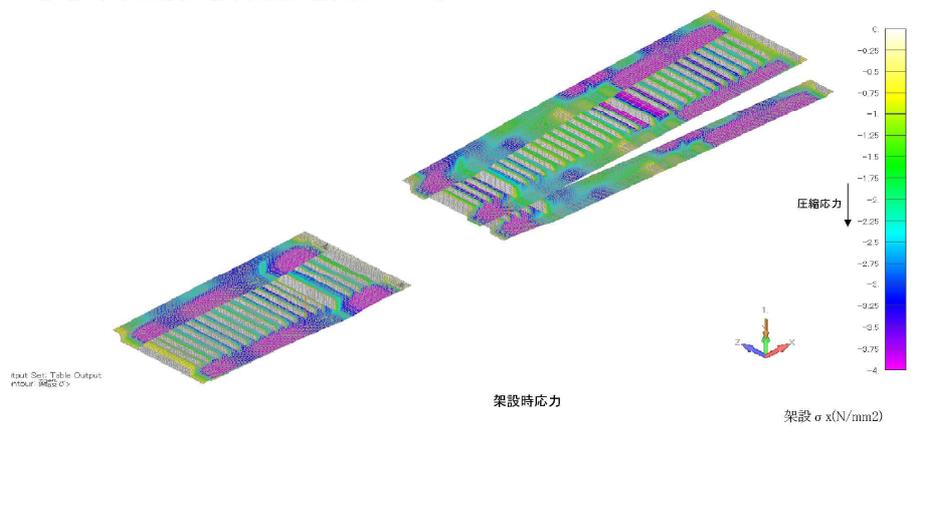
## 時間依存性FEM解析の事例



## 時間依存性FEM解析の事例

架設時応力:

第32編上部工設計計算書より抽出し、各要素に初期応力として与える。

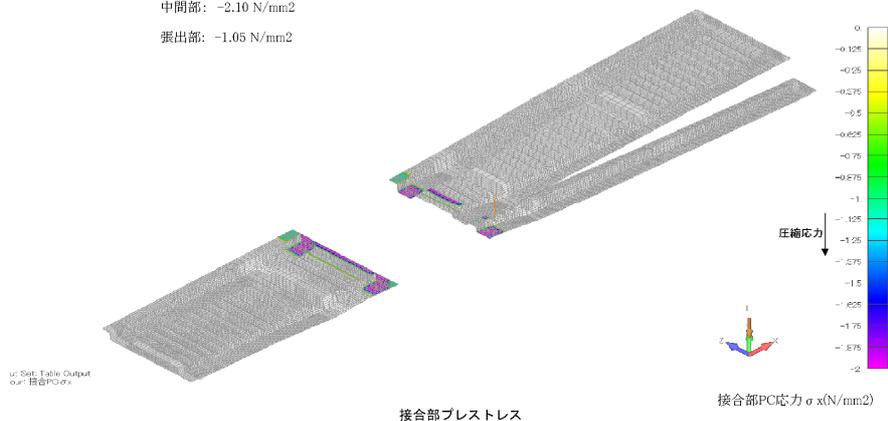


## 時間依存性FEM解析の事例

接合部プレストレス : 第32編上部工設計計算書(§3 床版部の設計)より

中間部:  $-2.10 \text{ N/mm}^2$

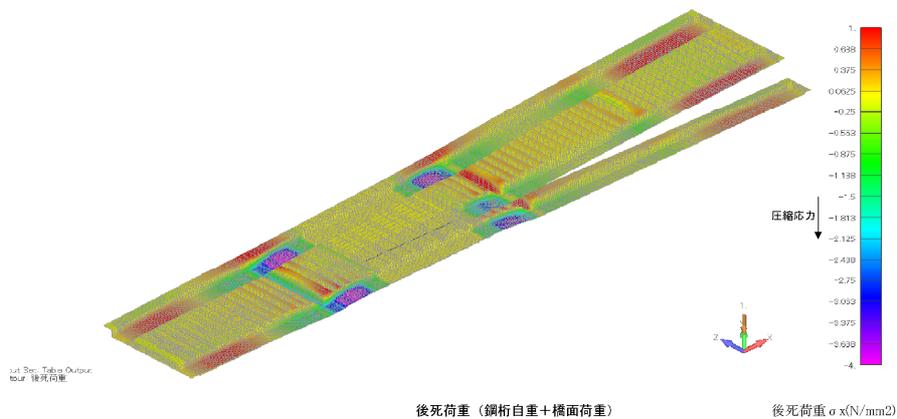
張出部:  $-1.05 \text{ N/mm}^2$



## 時間依存性FEM解析の事例

後死荷重: 鋼桁自重+橋面荷重  $2.696 \text{ kN/m}^2$  を

FEMモデルに載荷した解析結果をコンクリート要素に与え、クリープひずみを発生させる。



# 時間依存性FEM解析の事例

クリープ係数およびクリープひずみ

クリープ係数(架設時応力に関するクリープ係数)

| Step   | 施工日   | ブロック1 | ブロック2 | ブロック3 | 接合部   |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Step 1 | 0     |       |       |       |       |
| Step 2 | 120   | 0.000 |       |       |       |
| Step 3 | 1520  | 1.832 | 0.000 |       |       |
| Step 4 | 1855  | 1.913 | 1.275 | 0.000 |       |
| Step 5 | 2083  | 1.960 | 1.466 | 1.133 |       |
| Step 6 | 2144  | 1.971 | 1.508 | 1.219 |       |
| Step 7 | 2144  | 1.971 | 1.508 | 1.219 | 0.000 |
| Step 8 | 2191  | 1.978 | 1.538 | 1.273 | 0.696 |
| 竣工時    | 2371  | 2.004 | 1.636 | 1.430 | 1.136 |
| 1年後    | 2551  | 2.028 | 1.714 | 1.553 | 1.345 |
| 3年後    | 3281  | 2.109 | 1.916 | 1.835 | 1.749 |
| 最終     | 10000 | 2.410 | 2.375 | 2.366 | 2.357 |

クリープひずみ クープ換算弾性係数E<sub>c</sub> 14091 N/mm<sup>2</sup>

| Step   | 施工日   | ブロック1     | ブロック2     | ブロック3     | 接合部       |
|--------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Step 1 | 0     |           |           |           |           |
| Step 2 | 120   | 0.000     |           |           |           |
| Step 3 | 1520  | 1.300E-04 | 0.000     |           |           |
| Step 4 | 1855  | 1.358E-04 | 9.049E-05 | 0.000     |           |
| Step 5 | 2083  | 1.391E-04 | 1.040E-04 | 8.041E-05 |           |
| Step 6 | 2144  | 1.399E-04 | 1.070E-04 | 8.648E-05 |           |
| Step 7 | 2144  | 1.399E-04 | 1.070E-04 | 8.648E-05 | 0.000     |
| Step 8 | 2191  | 1.404E-04 | 1.091E-04 | 9.034E-05 | 4.940E-05 |
| 竣工時    | 2371  | 1.422E-04 | 1.161E-04 | 1.015E-04 | 8.063E-05 |
| 1年後    | 2551  | 1.439E-04 | 1.216E-04 | 1.102E-04 | 9.544E-05 |
| 3年後    | 3281  | 1.497E-04 | 1.360E-04 | 1.302E-04 | 1.241E-04 |
| 最終     | 10000 | 1.710E-04 | 1.685E-04 | 1.679E-04 | 1.673E-04 |

クリープ係数(接合部PC応力に関するクリープ係数)

| Step   | 施工日   | ブロック1 | ブロック2 | ブロック3 | 接合部   |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Step 1 | 0     |       |       |       |       |
| Step 2 | 120   |       |       |       |       |
| Step 3 | 1520  |       |       |       |       |
| Step 4 | 1855  |       |       |       |       |
| Step 5 | 2083  |       |       |       |       |
| Step 6 | 2144  |       |       |       |       |
| Step 7 | 2144  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Step 8 | 2191  | 0.236 | 0.257 | 0.276 | 0.696 |
| 竣工時    | 2371  | 0.372 | 0.459 | 0.521 | 1.136 |
| 1年後    | 2551  | 0.425 | 0.562 | 0.666 | 1.345 |
| 3年後    | 3281  | 0.534 | 0.788 | 0.965 | 1.749 |
| 最終     | 10000 | 0.839 | 1.250 | 1.497 | 2.357 |

クリープひずみ クープ換算弾性係数E<sub>c</sub> 14091 N/mm<sup>2</sup>

| Step   | 施工日   | ブロック1     | ブロック2     | ブロック3     | 接合部       |
|--------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Step 1 | 0     |           |           |           |           |
| Step 2 | 120   |           |           |           |           |
| Step 3 | 1520  |           |           |           |           |
| Step 4 | 1855  |           |           |           |           |
| Step 5 | 2083  |           |           |           |           |
| Step 6 | 2144  |           |           |           |           |
| Step 7 | 2144  | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
| Step 8 | 2191  | 1.675E-05 | 1.825E-05 | 1.956E-05 | 4.940E-05 |
| 竣工時    | 2371  | 2.637E-05 | 3.257E-05 | 3.697E-05 | 8.063E-05 |
| 1年後    | 2551  | 3.016E-05 | 3.990E-05 | 4.730E-05 | 9.544E-05 |
| 3年後    | 3281  | 3.787E-05 | 5.589E-05 | 6.845E-05 | 1.241E-04 |
| 最終     | 10000 | 5.953E-05 | 8.869E-05 | 1.062E-04 | 1.673E-04 |

施工条件: 相対湿度70% 仮想部材厚 68cm

# 時間依存性FEM解析の事例

クリープ係数およびクリープひずみ

クリープ係数(完成時応力に関するクリープ係数)

| Step   | 施工日   | ブロック1 | ブロック2 | ブロック3 | 接合部   |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Step 1 | 0     |       |       |       |       |
| Step 2 | 120   |       |       |       |       |
| Step 3 | 1520  |       |       |       |       |
| Step 4 | 1855  |       |       |       |       |
| Step 5 | 2083  |       |       |       |       |
| Step 6 | 2144  |       |       |       |       |
| Step 7 | 2144  |       |       |       |       |
| Step 8 | 2191  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 竣工時    | 2371  | 0.350 | 0.416 | 0.460 | 0.655 |
| 1年後    | 2551  | 0.412 | 0.528 | 0.614 | 0.872 |
| 3年後    | 3281  | 0.526 | 0.759 | 0.917 | 1.281 |
| 最終     | 10000 | 0.832 | 1.222 | 1.450 | 1.890 |

クリープひずみ クープ換算弾性係数E<sub>c</sub> 14091 N/mm<sup>2</sup>

| Step   | 施工日   | ブロック1     | ブロック2     | ブロック3     | 接合部       |
|--------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Step 1 | 0     |           |           |           |           |
| Step 2 | 120   |           |           |           |           |
| Step 3 | 1520  |           |           |           |           |
| Step 4 | 1855  |           |           |           |           |
| Step 5 | 2083  |           |           |           |           |
| Step 6 | 2144  |           |           |           |           |
| Step 7 | 2144  |           |           |           |           |
| Step 8 | 2191  | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
| 竣工時    | 2371  | 2.485E-05 | 2.955E-05 | 3.264E-05 | 4.647E-05 |
| 1年後    | 2551  | 2.922E-05 | 3.747E-05 | 4.354E-05 | 6.185E-05 |
| 3年後    | 3281  | 3.733E-05 | 5.386E-05 | 6.511E-05 | 9.094E-05 |
| 最終     | 10000 | 5.902E-05 | 8.669E-05 | 1.029E-04 | 1.341E-04 |

施工条件: 相対湿度70% 仮想部材厚 68cm

## 時間依存性FEM解析の事例

乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮ひずみ

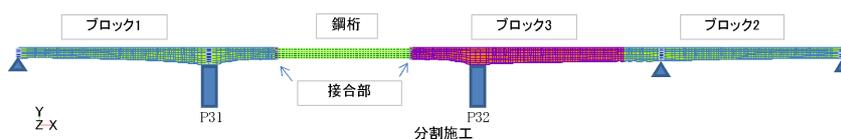
|        | 施工日   | ブロック1    | ブロック2    | ブロック3    | 接合部      |
|--------|-------|----------|----------|----------|----------|
| Step 1 | 0     |          |          |          |          |
| Step 2 | 120   | 0.000000 |          |          |          |
| Step 3 | 1520  | 0.000096 | 0.000000 |          |          |
| Step 4 | 1855  | 0.000109 | 0.000037 | 0.000000 |          |
| Step 5 | 2083  | 0.000116 | 0.000051 | 0.000028 |          |
| Step 6 | 2144  | 0.000117 | 0.000056 | 0.000034 |          |
| Step 7 | 2144  | 0.000117 | 0.000056 | 0.000034 | 0.000000 |
| Step 8 | 2191  | 0.000119 | 0.000059 | 0.000037 | 0.000011 |
| 竣工時    | 2371  | 0.000123 | 0.000069 | 0.000047 | 0.000029 |
| 1年後    | 2551  | 0.000126 | 0.000078 | 0.000061 | 0.000041 |
| 3年後    | 3281  | 0.000139 | 0.000109 | 0.000097 | 0.000084 |
| 最終     | 10000 | 0.000183 | 0.000178 | 0.000177 | 0.000176 |

補正乾燥収縮 補正量 2.21 倍

|        | 施工日   | ブロック1    | ブロック2    | ブロック3    | 接合部      |
|--------|-------|----------|----------|----------|----------|
| Step 1 | 0     |          |          |          |          |
| Step 2 | 120   | 0.000000 |          |          |          |
| Step 3 | 1520  | 0.000213 | 0.000000 |          |          |
| Step 4 | 1855  | 0.000240 | 0.000082 | 0.000000 |          |
| Step 5 | 2083  | 0.000256 | 0.000113 | 0.000063 |          |
| Step 6 | 2144  | 0.000259 | 0.000123 | 0.000074 |          |
| Step 7 | 2144  | 0.000259 | 0.000123 | 0.000074 | 0.000000 |
| Step 8 | 2191  | 0.000262 | 0.000130 | 0.000082 | 0.000024 |
| 竣工時    | 2371  | 0.000271 | 0.000154 | 0.000104 | 0.000063 |
| 1年後    | 2551  | 0.000279 | 0.000173 | 0.000134 | 0.000091 |
| 3年後    | 3281  | 0.000307 | 0.000241 | 0.000214 | 0.000185 |
| 最終     | 10000 | 0.000405 | 0.000394 | 0.000391 | 0.000389 |

施工条件: 相対湿度70% 仮想部材厚 68cm

## 時間依存性FEM解析の事例

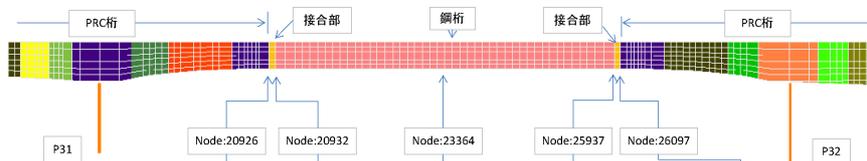


施工ステップ

|        | 施工内容           | 経過(日) | 施工日         | 備考           |
|--------|----------------|-------|-------------|--------------|
| Step 1 | P31,P32 橋脚部施工  | 0     | 平成19年2月1日   |              |
| Step 2 | ブロック1施工完了      | 120   | 平成19年6月1日   |              |
| Step 3 | ブロック2施工完了      | 1520  | 平成23年4月1日   |              |
| Step 4 | ブロック3とEランプ施工完了 | 1855  | 平成24年3月1日   |              |
| Step 5 | 鋼桁架設完了         | 2083  | 平成24年10月15日 | 鋼桁自重載荷       |
| Step 6 | 接合部コンクリート荷重載荷  | 2144  | 平成24年12月15日 | 接合部自重載荷      |
| Step 7 | 鋼桁接合           | 2144  | 平成24年12月15日 | 鋼桁接合プレストレス載荷 |
| Step 8 | 橋面工完了          | 2191  | 平成25年1月31日  | 橋面荷重載荷       |

3次元クリープFEM解析は、Step4から行う。  
Step4までの応力などは、設計値を用いる。

## 時間依存性FEM解析の事例

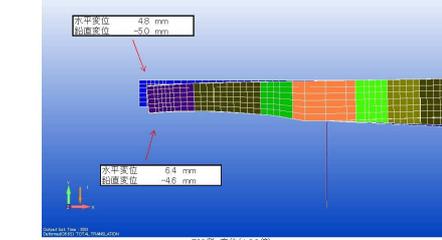
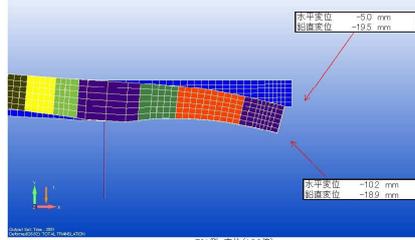
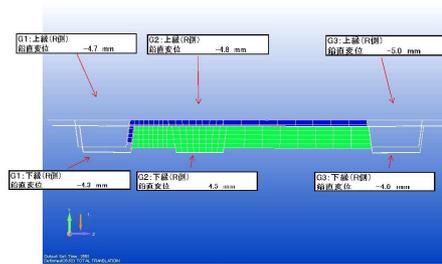
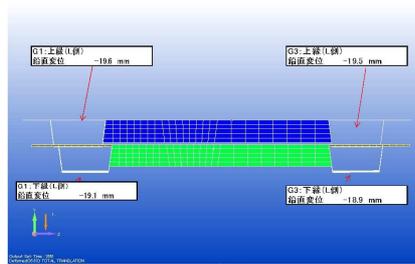


| Step    | 施工内容          | 経過(日) | 着目日時        | 着目格点の変位 (mm) |       |       |       |       |
|---------|---------------|-------|-------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
|         |               |       |             | 20926        | 20932 | 23364 | 25937 | 26097 |
| Step 1  | P31,P32 橋脚部施工 | 0     | 平成19年2月1日   |              |       |       |       |       |
| Step 2  | ブロック1施工完了     | 120   | 平成19年6月1日   | 0.0          |       |       |       |       |
| Step 3  | ブロック2施工完了     | 1520  | 平成23年4月1日   | -13.6        |       |       |       |       |
| Step 4  | ブロック3とランプ施工完了 | 1855  | 平成24年3月1日   | -14.2        |       |       |       | 0.0   |
| Step 5  | 鋼桁架設完了        | 2083  | 平成24年10月15日 | -14.5        | -15.0 | -8.0  | -1.0  | -0.5  |
| Step 6  | 接合部コンクリート荷重載荷 | 2144  | 平成24年12月15日 | -14.6        | -15.1 | -8.1  | -1.1  | -0.5  |
| Step 7  | 鋼桁接合          | 2144  | 平成24年12月15日 | -14.6        | -15.1 | -8.1  | -1.1  | -0.5  |
| Step 8  | 橋面完了          | 2191  | 平成25年1月31日  | -15.2        | -15.7 | -8.8  | -1.5  | -0.9  |
| Step 9  | 竣工時           | 2371  | 平成25年7月30日  | -17.7        | -18.3 | -12.6 | -3.9  | -3.4  |
| Step 10 | 1年後           | 2551  | 平成26年1月26日  | -18.9        | -19.6 | -14.5 | -5.2  | -4.6  |
| Step 11 | 3年後           | 3286  | 平成28年1月31日  | -22.0        | -22.8 | -19.0 | -8.2  | -7.6  |
| Step 12 | 10000日後       | 10000 | 平成46年6月19日  | -29.3        | -30.5 | -29.4 | -15.3 | -14.4 |

材齢の影響による鋼桁製作キャンパラー -6.5 mm

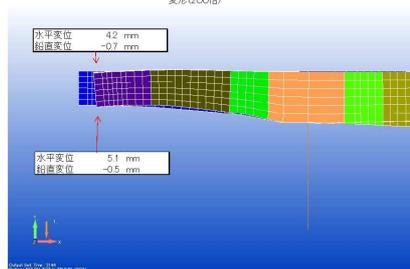
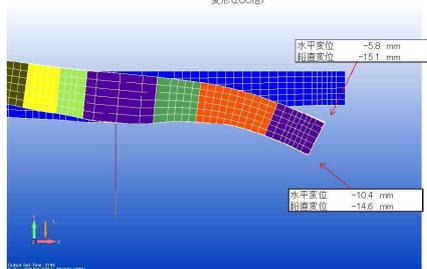
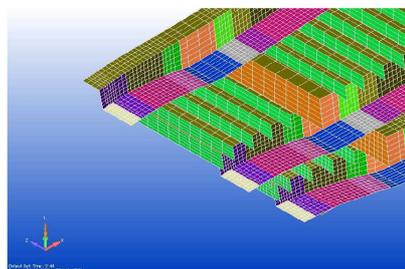
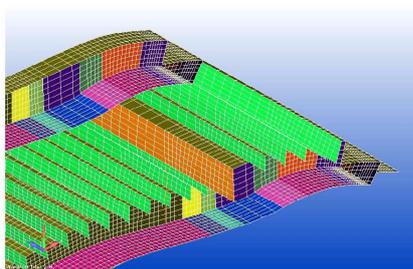
各施工ステップの変位

## 時間依存性FEM解析の事例



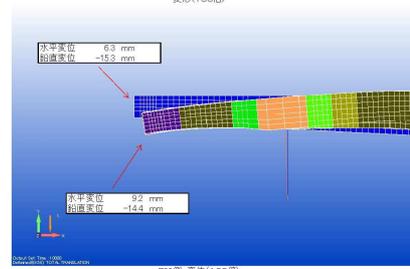
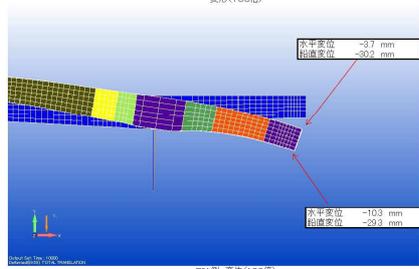
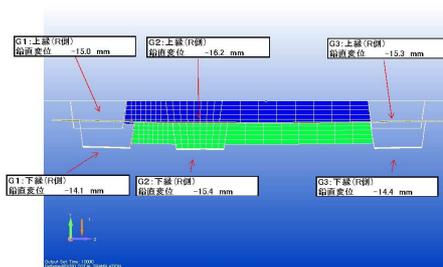
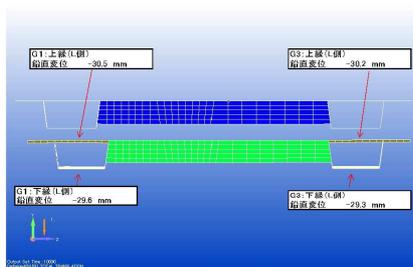
PRC桁完成から1年後の変位

## 時間依存性FEM解析の事例



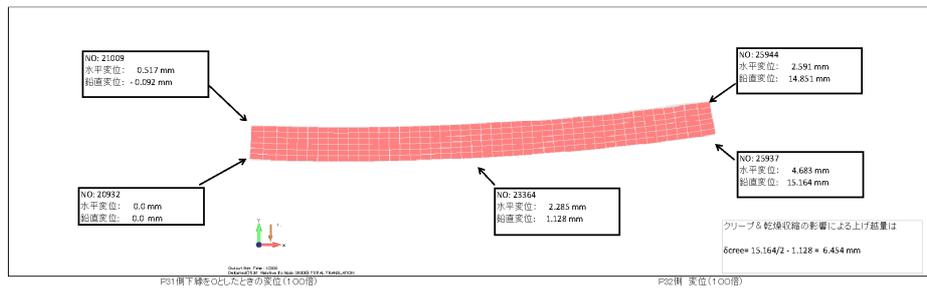
PRC桁完成から鋼桁架設直前での変位

## 時間依存性FEM解析の事例



PRC桁完成から最終10000日での変位

## 時間依存性FEM解析の事例



PC桁完成からのクリーブ・乾燥収縮を考慮した鋼桁変位