

論文 PRC 桁と RC 脚からなるラーメンのクリープ解析

雪田憲子*¹・佐藤良一*²・和田宣史*³・許 明*⁴

要旨: 桁コンクリートの水和熱, 自重, クリープ, 収縮, プレストレス導入, 温度変化および杭基礎の剛性により発生する PRC ポータルラーメン橋の桁応力, 橋脚基部応力等を数値解析的に検討した。解析は, 重ね合わせの原理に基づく Step-by-Step 法を取り入れた 2 次元 FEM 解析により行った。クリープ係数は実測値に基づき, CEB-FIP MODEL CODE 1990 を修正し, 載荷時材齢の影響を考慮した。杭基礎は等価ブロックでモデル化し, ブロックの水平剛性, 鉛直剛性, せん断剛性は道路橋示方書に基づいて定めた。杭基礎モデルにおける鉛直剛性は拘束応力に大きい影響を及ぼすことがわかった。

キーワード: PRC ポータルラーメン, 杭基礎, 水和熱, プレストレス, 拘束応力

1. はじめに

PRC ポータルラーメン橋は, RC 構造の下部工と PRC 構造の上部工を剛結したラーメン構造である。この構造は, ラーメン構造とすることにより, 桁の水平変位を抑え, またジョイントと沓を設ける必要がないため, 建設コストやメンテナンスコストの削減が期待されているものである。しかし, 桁コンクリートの水和熱, 自重, クリープ, 収縮, プレストレス導入, 温度変化および杭基礎の剛性による桁変形に起因する不静定力が発生し, 橋脚を弾性体として取り扱えば大きな断面力を算定することになる。この種の構造物の設計方法としては, 橋脚のクリープによる断面力低下を取り入れることがより合理的な設計を可能にする。しかし, PRC と RC からなる不静定構造物のプレストレスや温度変化等により生じる応力・変形の打込み直後から長期にわたる経時的変化は, ほとんど明らかにされておらず, その解析もあまり行われていないように思われる。

そこで本研究は, 設計の合理化に資するため, 施工過程もできるだけ忠実に考慮し, 桁コンクリートの水和熱, 自重, クリープ, 収縮, プレストレス導入, 温

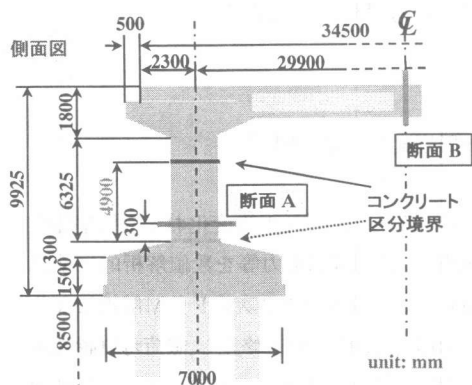
度変化および杭基礎の剛性による実ポータルラーメン橋の応力・変形のクリープ解析を行い, 実橋での実測値と比較・検討した。これらに基づき, 実橋の挙動を明らかにするとともに, 解析方法の妥当性を検討した。

2. PRC ポータルラーメン橋の概要

PRC ポータルラーメン橋の全体図を図-1 に, 諸元を表-1 に示す。また, 地盤条件を表-2 に示す。桁および橋脚に用いたコンクリートはそれぞれ水セメント比 50.8%, 57.5%, 単位セメント量 321kg/m³, 270kg/m³ である。桁および橋脚の鉄筋比は 0.74%, 0.30% で, 桁の PC 鋼材比は 0.16% である。施工過程は表-3 に示すように橋脚コンクリートの打込み後, 約 2 カ月後に桁コンクリートを打込み, 桁コンクリート打込み後, 4 日後にプレストレス導入を行った。桁と橋脚の打込み時期の違いは, 材齢の違いを取り入れた物性値により考慮した。

計測については, 図-1, 2 に示すように橋脚基部(断面 A)と桁スパン中央(断面 B)においてコンクリートの応力, ひずみ, 温度を桁コンクリート打込みから約半年間計測した。

- | | | | |
|-----|----------|-------------|---------|
| * 1 | 宇都宮大学大学院 | 工学研究科建設学専攻 | (正会員) |
| * 2 | 広島大学教授 | 工学部第四類(建設系) | 工博(正会員) |
| * 3 | 日本道路公団 | 東京建設局 | (正会員) |
| * 4 | 前宇都宮大学助手 | 工学部建設学科 | (正会員) |



横断面図

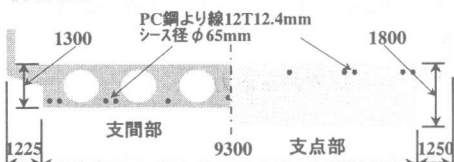
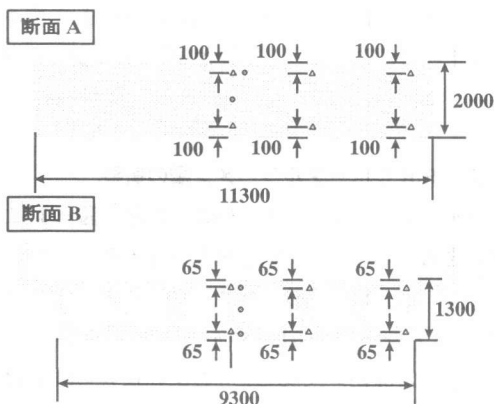


図-1 PRCポータルラーメン橋の全体図



● 熱電対 ▲ 埋込型ひずみ計
有効応力計

図-2 計測位置

表-1 PRCポータルラーメン橋の諸元

形 式	PRC中空床版橋	
橋 長	34.5m	
桁 長	34.5m	
支 間 長	29.9m	
有 効 幅 員	9.3m	
使用材料	コンクリート	上部工
	28日圧縮強度	橋脚
		杭
		28.9 N/mm ²
基礎形式	PC鋼材	SWPR7B 12φ12.4
	杭基礎 (支持杭)	杭 種
		杭 径
		杭 長
	杭本数/1基	場所打ち杭 φ1.0m 8.5m 30本

表-2 地盤条件

	土 質	N 値
フーチング下面	砂 質 土	16
杭 先 端	砂 質 土	50

表-3 施工過程

1996 年	3 月	4 月～5 月	6 月
橋脚			
桁			
橋脚	3/19: 打込み, 3/22: 脱型枠		
桁	6/1: 打込み, 6/5: プレストレス導入 6/6: 脱枠 (自重作用, 乾燥開始)		

3. 解析方法

PRCポータルラーメン橋の橋脚基部の応力に影響を及ぼす主要因は、桁コンクリートの水和熱自重、クリープ、収縮、プレストレス導入、温度変化、および杭基礎の剛性である。解析は、これらの要因を考慮し、重ね合わせの原理に基づく Step-by-Step 法を取り入れた2次元有限要素クリープ解析¹⁾を用いた。解析に用いたメッシュ図を図-3に示す。自重、温度、収縮ひずみは等価節点力として取り入れ、プレストレスは、PC鋼材に初期ひずみを与えることにより考慮した。緊張直後のPC鋼材の応力を図-4に示す。

ステップ $t_{i+1/2}$ でのコンクリート応力は、剛性マトリックスに有効ヤング係数を用いることによって次のようにして求めた。

$$\Delta\sigma_c(t_{i+1/2}, t_j) = [D_c] \Delta\epsilon_{e,cr}(t_{i+1/2}, t_j) \quad (1)$$

$$[D_c] = \frac{E_e(t_{i+1/2}, t_j)}{(1-\nu^2)} \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\sigma(t_{i+1/2}) = \sum_{j=1}^i (\Delta\sigma(t_{i+1/2}, t_j)) \quad (3)$$

ここに、 $\Delta\sigma_c(t_{i+1/2}, t_j)$ ：ステップ t_j のステップ $t_{i+1/2}$ におけるコンクリートの増分応力

$[D_c]$ ：剛性マトリックス

ν ：コンクリートのポアソン比

$E_e(t_{i+1/2}, t_j)$ ：ステップ t_j のステップ

$t_{i+1/2}$ における有効ヤング係数

$\Delta\epsilon_{e,cr}(t_{i+1/2}, t_j)$ ：増分弾性ひずみ

+ 増分クリープひずみ

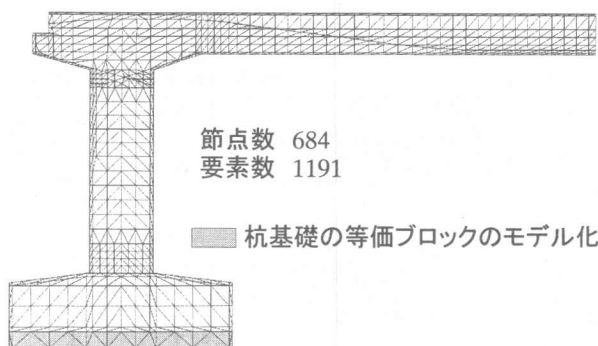


図-3 解析に用いたメッシュ図

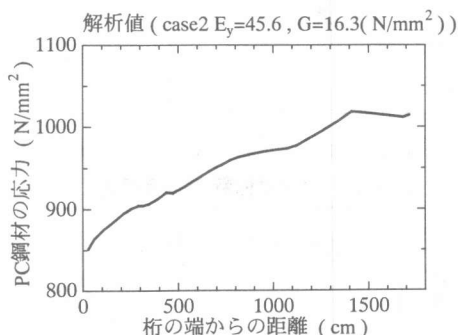


図-4 緊張直後のPC鋼材の応力

また、有効ヤング係数は次のとおりである。

$$E_c(t_{i+1/2}, t_j) = E_c(t_j) \quad (4)$$

$$/[1 + \phi(t_{i+1/2}, t_j) \times E_c(t_j) / E_c]$$

$E_c(t_j)$: ステップ t_j におけるヤング係数

$\phi(t_{i+1/2}, t_j)$: ステップ t_j で応力が発生し、

ステップ $t_{i+1/2}$ におけるクリープ係数

E_c : 標準養生材齢 28 日におけるヤング係数

このように、各ステップの増分応力はクリープの進行による応力の緩和を受けながらステップ $t_{i+1/2}$ において加算される。

4. 杭基礎モデル

杭基礎は、構造物の一部として高さ 0.5m、幅 7m、奥行き 25.46m の弾性体と仮定した等価ブロックでモデル化した。図-3 に杭基礎の等価ブロックのモデルを併せて示す。このモデルの水平剛性、鉛直剛性、せん断剛性は以下のように道路橋示方書に基づいて設定した。なお、杭の中心間隔は約 2.5~2.6m で、杭径の約 2.5 倍あるので、群杭としての影響はないものとしている²⁾。

4. 1 水平剛性の評価

等価ブロックの水平剛性 E_x は、杭間の地盤水平剛性に依存すると仮定して、地盤のヤング係数を用いることとする。地盤のヤング係数は道路橋示方書²⁾ より式 (5) で求めた。

$$E_x = E_0 = 28N \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (5)$$

E_0 : 設計の対象とする位置での

地盤の変形係数

N : 標準貫入試験による N 値

4. 2 鉛直剛性の評価

等価ブロックの鉛直変位と、杭の軸方向ばね定数 K_v ²⁾ から求められる杭頭の鉛直変位が等しいという仮定から、等価ブロックの鉛直剛性 E_y は、式 (6) で求められる。

$$E_y = (h / A_f) K_v \quad (6)$$

$$\text{ここに、} K_v = a(A_p E_p) / L \quad (7)$$

a : 補正係数, $a = 0.031(L / D) - 0.15$

D : 杭径 (cm)

A_p : 杭の純断面積 (cm²)

A_f : フーチングの全断面積 (cm²)

h : モデルの高さ (cm)

L : 杭長 (cm)

E_p : 杭のヤング係数 (kgf/cm²)

4. 3 せん断剛性の評価

鉛直剛性と同様に、等価ブロック上面の水平変位と、水平方向地盤反力係数 k_H から求められる杭頭の水平変位 y が等しいという仮定から、等価ブロックのせん断剛性 G は式 (8) のようになる。

$$G = nH_0 h / \phi y A_f \quad (8)$$

$$\text{ここに、} y = H_0 (4E_p I_p \beta^3) \quad (9)$$

n : 杭の本数 (本)

H_0 : 杭 1 本あたりの杭直角軸方向力 (kgf)

ϕ : 杭が有限長の場合の補正係数

y : 杭頭の水平変位

I_p : 杭の断面 2 次モーメント (cm⁴)

β : 杭の特性値 (cm⁻¹)

$$\beta = \sqrt[4]{k_H D / (4E_p I_p)}$$

k_H : 水平方向地盤反力係数 (kgf/cm³)

なお、式 (9) より求められる杭頭の水平変位 y は、杭が半無限長 ($\beta L \geq 3$) で、杭頭部とフーチングが

剛結である場合の変位である。本橋の場合、 $\beta L = 2.26$ で有限長であるが、杭径の3倍強の部分
が良質の支持層に根入れされているので、有限長に
対する補正係数 ϕ を1とし半無限長として扱った。
補正係数 ϕ は、杭先端の支持条件を考慮したもので、
杭が有限長の場合で水平方向地盤反力係数 k_H が
深さ方向で一定と仮定できるとき、杭頭の水平変位
は ϕy で求められる²⁾。また、本解析は杭基礎も2
次元平面応力問題として取り扱っているため、曲げ
モーメントに対するバネ定数等は定めず、1本の杭
で求められたバネ定数を杭の本数倍し、等価ブロッ
クのヤング係数を定めている。

以上の仮定および実橋の材料特性から得られる
等価ブロックのそれぞれのヤング係数は、水平剛性が
43.9N/mm²、鉛直剛性が29.4N/mm²、せん断剛性が
11.3N/mm²となった。鉛直剛性の場合には杭頭荷重－
杭頭沈下量曲線の降伏時の割線勾配に対応した値
である。この値は拘束力による変位を対象とする
場合は、変位が小さくバネ定数はこの場合より大き
いと考えられるので、初期接線勾配から決まるバネ
定数も取り入れ、割線勾配を1/0.6倍³⁾した。これに
加え、杭基礎剛性の影響度をみるために1/0.3倍の
場合も検討した。この検討はせん断剛性に対して
も行った。解析ケースを表－4に示す。

5. 材料特性

5. 1 圧縮強度、ヤング係数

材齢28日におけるコンクリートの圧縮強度、ヤ
ング係数はそれぞれ、橋脚で28.9N/mm²、26.1kN/mm²、
桁で41.0N/mm²、31.5kN/mm²である。解析に用いた
橋脚および桁コンクリートのヤング係数の経時変
化を図－5に示す。解析では橋脚、桁それぞれのコ
ンクリートの打込み時期の違いを考慮し、桁の材齢
に対応する橋脚コンクリートのヤング係数を用い
た。

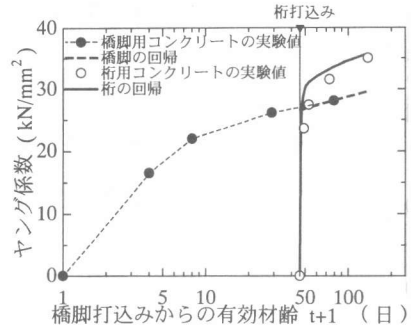
5. 2 クリープ特性

コンクリートのクリープ特性は、実大クリープ・
収縮実験⁴⁾による実験値に基づき、各載荷時材齢の
影響を考慮したクリープ係数を定めた。実橋の体
積／露出面積比V/Sは、橋脚が710mm、桁が346mm

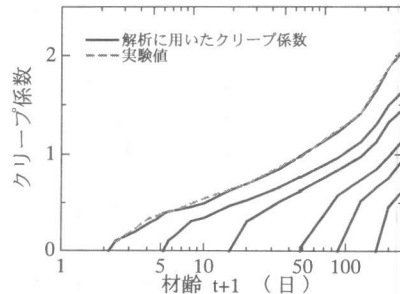
表－4 解析ケース

	Ey=29.4 (Kv)	Ey=45.6 (Kv/0.6)	Ey=91.1 (Kv/0.3)
G=11.3 (kH)	—	case4	—
G=16.3 (kH/0.6)	case1	case2	case3
G=27.4 (kH/0.3)	—	case5	—

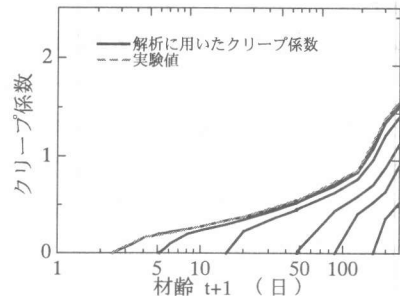
Ey, G: N/mm²



図－5 ヤング係数の経時変化



図－6 桁のクリープ係数の経時変化



図－7 橋脚のクリープ係数の経時変化

であり、実験供試体のV/S(橋脚用が594mm、桁用が
283mm)に比べて大きい。V/Sがこのレベルの大き
い範囲ではクリープ係数と収縮ひずみの低下傾向
は小さいと予測される⁴⁾ので、実験値をそのまま用
いた。各載荷時材齢の影響は、CEB-FIP MODEL
CODE 1990 (MC90) に従い、実験値と一致するよう
にMC90を修正した。解析に用いた桁および橋脚コ
ンクリートのクリープ係数を図－6, 7に示す。

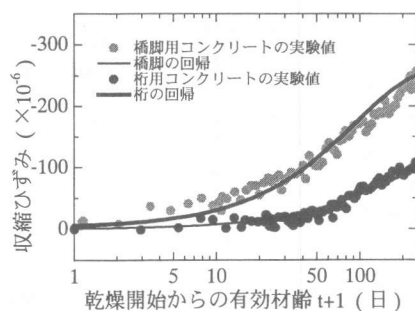


図-8 収縮の経時変化

5. 3 収縮ひずみ

収縮ひずみは、クリープ係数と同様に V/S の影響は小さいものとし、図-8 に示す実験値を用いた。材齢 126 日の収縮は桁、橋脚用コンクリート供試体でそれぞれ 243×10^{-6} 、 77×10^{-6} である。

6. 解析結果

図-9、10 は桁コンクリート打込み後からの温度と桁スパン中央下縁のコンクリート応力、橋脚基部外側のコンクリート応力の経時変化を解析値とともに示したものである。図-9 で、桁の温度は材齢 1 日でピークに達し、断面平均温度で約 40°C 上昇している。この時、桁下縁近傍では 0.5N/mm^2 の引張応力が生じ、材齢 4 日目のプレストレス導入により約 2.3N/mm^2 の圧縮応力が生じている。この圧縮応力は材齢 5 日の脱枠・支保工撤去で 1.4N/mm^2 程度、引張側に減少し、材齢 10 日過ぎまで増加する。その後材齢 30 日から 70 日あたりまで温度上昇するが引張応力はほぼ一定値を示し、材齢 100 日あたりの温度低下により若干引張応力が増加している。解析は桁コンクリートの水和熱による温度応力を過大に評価するが、プレストレス導入後は実測値とよく一致している。

図-10 で、橋脚基部外側のコンクリート応力は桁コンクリートの水和熱による温度変形の影響をかなり強く受けており、圧縮応力が 1.0N/mm^2 を超えている。プレストレスの影響は瞬時にはほとんどみられず、桁の応力と対応して、10 日過ぎまで引張側へ増加する。桁の温度低下の影響は橋脚にもみられ、材齢 100 日あたりで応力が明らかに増大し、引張応力がおよそ 0.5N/mm^2 に達している。解析値

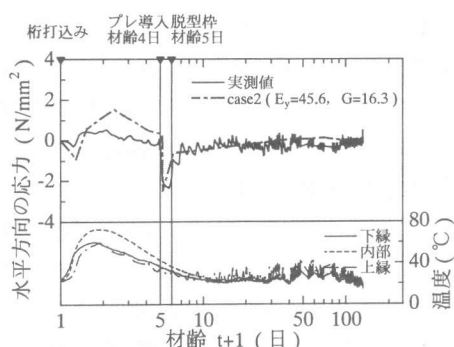


図-9 桁スパン中央下縁のコンクリート応力の経時変化

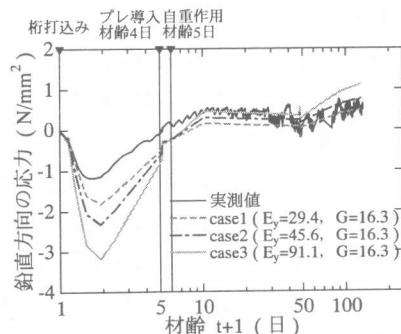


図-10 橋脚基部外側のコンクリート応力の経時変化 (抗基礎モデルの鉛直剛性 E_y の比較)

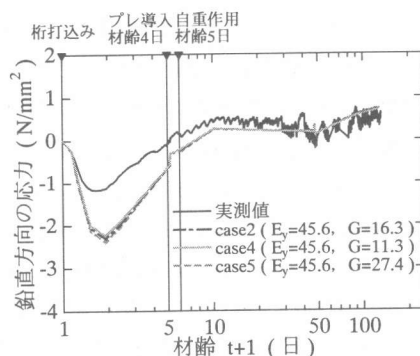


図-11 橋脚基部外側のコンクリート応力の経時変化 (抗基礎モデルのせん断剛性 G の比較)

と実測値の比較結果は桁の場合とほとんど同じであるが、杭基礎のせん断剛性が同じであっても鉛直剛性が大きくなると拘束力も増大することが示されている。図-11 は鉛直剛性を一定として、せん断剛性を 11.3N/mm^2 、 16.3N/mm^2 、 27.4N/mm^2 と変化させたときの解析値を実測値と比較して示したものであるが、せん断剛性は橋脚基部応力に対して影

響がほとんどないことがわかる。ちなみに、図-12は、材齢126日における橋脚基部応力と鉛直剛性の関係を示したものであるが、剛性の増大とともに応力は線形に増大していることが認められる。

最後に、図-13、14は桁コンクリート打込み後からの桁スパン中央下縁、および橋脚基部外側のコンクリートひずみの経時変化を示したものである。なお、コンクリートひずみは、実ひずみから温度ひずみを補正したものである。図-13のコンクリートひずみは、実測値と解析値は自重が作用する材齢5日まではほとんど一致しているが、その後経時的に実測値と解析値との差が増大する。この理由に関しては、はっきりしていないので今後の検討課題とする。図-14のコンクリートひずみは、材齢30日から80日の間に圧縮ひずみを生じその後引張側に転じている。圧縮ひずみは温度上昇によるものであるが解析の方ではその影響はほとんど現れていない。従って、表面部分が卓越して温度上昇した可能性がある。

7. 結論

- 1) 桁コンクリートの水和熱、自重、収縮、クリープ、プレストレス、温度変化および杭基礎の剛性により発生するP R Cポータルラーメン橋の桁応力、橋脚基部応力等の、Step-by-Step 法に基づく2次元有限要素クリープ解析方法を提示した。
- 2) 道路橋示方書の杭基礎バネ定数と等価な弾性杭基礎モデルを用い、かつ実大供試体の実測クリープ係数、収縮ひずみを用いた解析値は、応力、ひずみともにほぼ一致した。ただし、桁スパン中央下縁のコンクリートひずみについては、圧縮ひずみを過大評価した。
- 3) 桁変形に伴う拘束応力には等価杭基礎モデルの鉛直剛性の影響が大きいことが明らかとなった。

【謝辞】

本研究はJ H北関東自動車道技術検討委員会の一環として実施したものである。

委員長の山崎淳日大教授をはじめ関係各位に厚くお礼申し上げる。

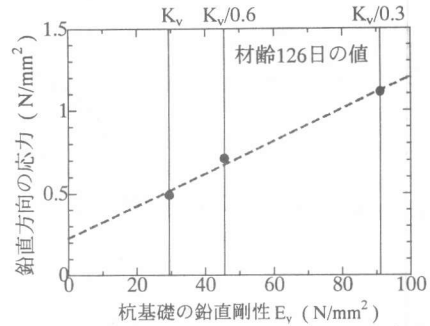


図-12 橋脚基部外側のコンクリート応力と杭基礎モデルの鉛直剛性 E_v の関係

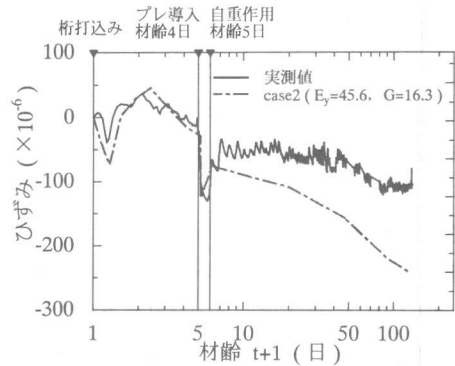


図-13 桁スパン中央下縁のコンクリートひずみの経時変化

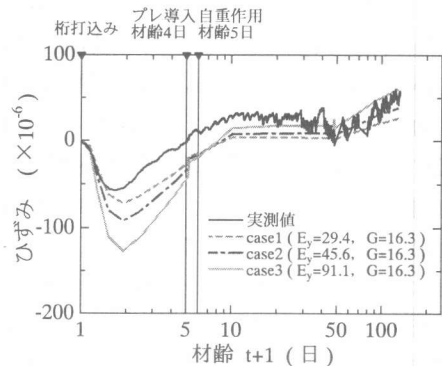


図-14 橋脚基部外側のコンクリートひずみの経時変化

参考文献

- 1) 早川智浩ほか：高強度コンクリートラーメンの自己収縮応力 2次元FEM解析,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.20, No.2, 1998
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編・IV下部構造編, pp37-47, pp326-398, 1998
- 3) 日本道路協会：杭基礎設計便覧 平成4年10月, pp103-106
- 4) 和田宣史ほか：コンクリートのクリープ・収縮の寸法依存性に関する実験的検討,コンクリート工学年次論文報告集, 1999 (投稿中)