

投稿論文 (和文)

PAPERS

PC有ヒンジラーメン橋の時間依存変位に関する検討

橋場 盛*・石塚幹剛**・宮川豊章***・
見島孝之****

PC有ヒンジラーメン橋はその経済的優位性から多数の施工実績がある。その反面、コンクリートのクリープ変形等の時間依存変位が大きく、それによる機能低下をきたし、補修工事がなされた報告も見られる。本報告は、この時間依存変位に影響を及ぼす幾つかの要因について実測変位と解析結果とを比較し、その影響度を検討したものである。

Key Words : concrete bridge, creep, shrinkage, time-dependent displacement

1. まえがき

PC有ヒンジラーメン橋は、その経済的優位性より中央径間200m程度までの橋梁に多く採用され、我国では嵐山橋（昭和34年）以来、100橋を超える実績を有している。

しかし、その構造特性としてコンクリートのクリープ等による時間依存変位の大きいことが挙げられ、昭和40年頃よりその挙動に関する調査・研究^{1)~3)}がなされてきている。またヒンジ部の過大な変位（たれ下がり）による走行性の低下、伸縮装置、ヒンジ杓の破損等の機能障害をきたし、補修工事がなされたとの報告^{4),5)}も見られる。

上述の時間依存変位には、地盤の変形の他に図-1に示すように材料的要因、部材（断面）的要因および構造的要因が影響し合い、その現象を複雑なものにしている。

本論文は、時間依存変位解析への逐次法（step-by-step method）の適用、および実橋の実測たわみとの比較によって、各要因の影響度合について論じたものである。

2. 時間依存変位の解析法

(1) 逐次法

後述する検討例で用いた手法は、逐次法と呼ばれているものである。コンクリートのクリープ・乾燥収縮およびPC鋼材のレラクセーションに対して以下のように適用した。

a) コンクリートのクリープ・乾燥収縮

変化応力下でのコンクリートのひずみは、乾燥収縮に

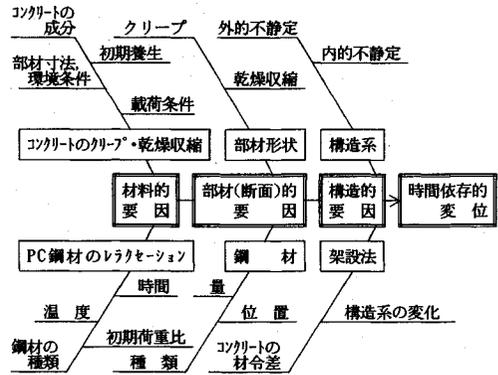


図-1 コンクリート構造物の時間依存変位に影響する要因

よるひずみも含めて表現すると次式のように表わされる。

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E(t_0)} (1 + \phi(t, t_0)) + \int_{t_0}^t \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} \cdot \frac{1 + \phi(t, \tau)}{E(\tau)} \cdot d\tau + \epsilon_{sh}(t, t_0) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

$\epsilon(t)$: 着目する時間 $t (> t_0 \geq 0)$ におけるコンクリートの全ひずみ

σ_0 : 当初応力（載荷時 t_0 における応力）

$E(t)$: 時間 t におけるコンクリートのヤング係数

$\phi(t, t_0)$: 時間 t_0 で載荷されたときの時間 t におけるクリープ係数

$\epsilon_{sh}(t, t_0)$: 時間 t_0 から時間 t までの乾燥収縮ひずみ

上式第一項が一定応力による（弾性+クリープ）ひずみ、第二項が変化応力分によるひずみ、第三項が乾燥収縮ひずみを表す。第二項の積分は特殊な場合（ σ と ϕ が線形関係にある場合）を除いて解析的に求めることができない。

逐次法は、ある時間間隔ごとに分割して求積する方法

*正会員 工修（株）オリエンタルコンサルタンツ
（〒530 大阪市北区堂山町1-5 大阪合同ビル内）

** 工修 阪神高速道路公団 計画部

***正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科

****正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科

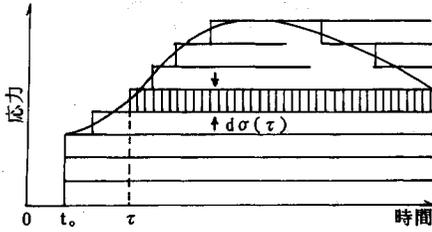


図-2 応力ステップ法による応力履歴の分解

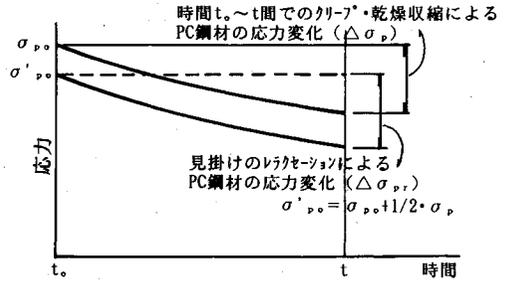


図-3 見かけのレラクセーションにおけるPC鋼材の応力変化

で、クリープ曲線の重ね合わせの原理を適用するものである。この求積には幾つかの方法があるが、時間間隔を細かくすれば方法による違いはないとされている。また、時間間隔も対数軸上で等間隔にすると、よい精度が得られるとも言われている⁶⁾。

なお、後述するようにコンクリートのヤング係数の経時変化についても考慮しているので、式(2)によりクリープ係数(たとえばコンクリート標準示方書ではコンクリート材令28日のヤング係数を基準にして決められている⁷⁾)も載荷時のヤング係数を基準にした値に補正する。

$$\phi(t, \tau) = \frac{E(\tau)}{E(28)} \cdot \phi_{28}(t, \tau) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、

$\phi(t, \tau)$: 載荷時 $t = \tau$ でのコンクリートのヤング係数 $E(\tau)$ を基準としたときのクリープ係数

$\phi_{28}(t, \tau)$: コンクリート材令 $t = 28$ 日でのコンクリートのヤング係数 $E(28)$ を基準としたときのクリープ係数

ここで、コンクリートの受ける応力履歴を図-2に示すような応力ステップ⁸⁾に分解すると、式(1)は次式のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) = & \frac{\sigma_0}{E_0} \left(1 + \sum_{i=1}^n \Delta\phi_i \right) + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma_i}{E_i} \left(1 + \sum_{j=1}^n \Delta\phi_{ji} \right) \\ & + \sum_{i=1}^n \Delta\varepsilon_{sh,i} \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

ここに、

$$t_i = t_0 \cdot 10^{4t_i}, \quad t'_i = t_0 \cdot 10^{4t_i - (t-1/2)}$$

$$\Delta t = (\log t - \log t_0) / n$$

$$\Delta\sigma_i = \sigma(t_i) - \sigma(t_{i-1})$$

$$\Delta\phi_i = \phi(t_i, t_0) - \phi(t_{i-1}, t_0)$$

$$\Delta\phi'_{ji} = \phi(t_j, t'_i) - \phi(t_{j-1}, t'_i)$$

$$\Delta\varepsilon_{sh,i} = \varepsilon_{sh}(t_i, t_s) - \varepsilon_{sh}(t_{i-1}, t_s)$$

n : 時間分割数

E_0, E'_i : それぞれ $t = t_0, t = t'_i$ でのコンクリートのヤング係数

t_s : 乾燥収縮開始時のコンクリートの材令

なお、式(3)における時間分割数であるが、予備検

討を行い、 $n = 20$ を採用した。また、最終計算時間($t = \infty$)を50年とした。

b) PC鋼材のレラクセーション

PC鋼材の見かけのレラクセーションを次のように取り扱う。時間 $t_0 \sim t$ 間のクリープ・乾燥収縮によるPC鋼材の応力変化量 $\Delta\sigma_p$ の1/2が時間 t_0 に生じるとして、当初の初期応力 σ_{p0} を $\sigma'_{p0} = \sigma_{p0} + 1/2 \Delta\sigma_p$ として純レラクセーションによる応力変化量を見かけのレラクセーションによる応力変化量とした(図-3参照)。時間分割を行なう場合、時間 t_0 において応力 σ_{p0} で緊張したとき、時間 t_{i-1} でのPC鋼材の応力変化量 $\Delta\sigma_p(t_{i-1})$ は次のように表わされる。

$$\Delta\sigma_p(t_{i-1}) = \sum_{j=1}^{i-1} \{ \Delta\sigma_{p,r}(j) + \Delta\sigma_{p,s}(j) \} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、

$\Delta\sigma_{p,r}(j)$: 時間間隔 $\Delta t_j (= t_j - t_{j-1})$ での外荷重およびクリープ・乾燥収縮によるPC鋼材の応力変化量

$\Delta\sigma_{p,s}(j)$: 時間間隔 Δt_j での見かけのレラクセーションによるPC鋼材の応力変化量

時間間隔 Δt_i でのレラクセーションを考えると、時間 t_{i-1} での緊張応力 $\sigma_{p0}(t_{i-1})$ (式(15))を純レラクセーションの初期応力とみなす。

$$\sigma_{p0}(t_{i-1}) = \sigma_{p0} + \Delta\sigma_p(t_{i-1}) \dots \dots \dots (5)$$

したがって、見かけのレラクセーションの初期応力は、 Δt_i 間に発生する $\Delta\sigma_{p,r}$ の1/2を加えた応力 ($\sigma_{p0}(t_{i-1}) + 1/2 \cdot \Delta\sigma_{p,r}$) とした。

(2) マトリックス構造解析法への適用

a) 断面定数

時間間隔 Δt_i における断面定数は、次式のように算出できる。

$$I_v = I - A_v \cdot y_v^2, \quad W_v(y) = I_v / y \dots \dots \dots (6)$$

ここに、

A_v, I_v : 換算断面定数で換算断面図心軸に関する断面積、断面2次モーメント

$W_v(y)$: 換算断面定数で換算断面図心軸に関する距離 y の位置での断面係数

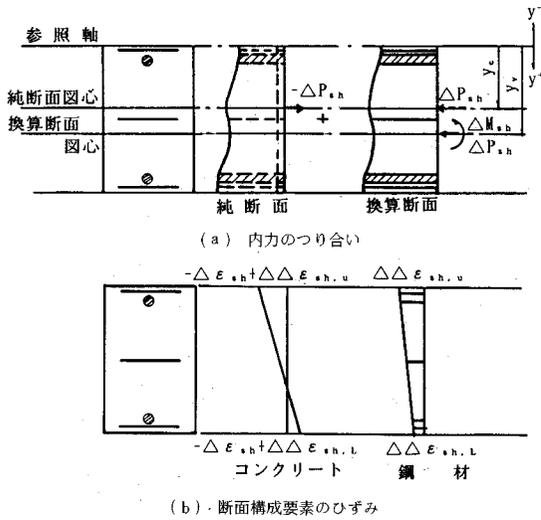


図-4 乾燥収縮ひずみによる内部応力度

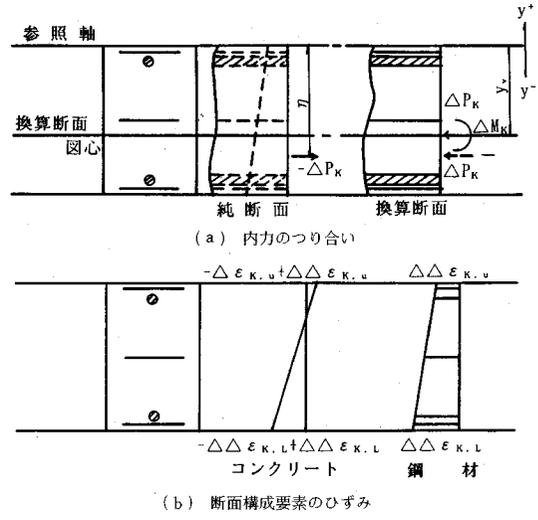


図-5 コンクリートのクリープひずみによる内部応力度

I: 換算断面定数で参照軸に関する断面2次モーメント

なお、断面定数算出において鉄筋およびPC鋼材をコンクリートに換算するためのヤング係数比は次式による。

$$n_i^s = n_{i-1}^s (1 + \Delta\phi_i), \quad n_i^t = n_{i-1}^t (1 + \Delta\phi_i)$$

ここに、

$$n_0^s = E_s / E_c(t_c), \quad n_0^t = E_p / E_c(t_c)$$

$E_s, E_p, E_c(t_c)$: それぞれ鉄筋, PC鋼材およびプレストレス導入時のコンクリートのヤング係数

b) 内部拘束による発生応力度

コンクリートの乾燥収縮による発生応力度は、図-4に示すようにして求める。すなわち、まず乾燥収縮ひずみを生じるコンクリートのみ(純断面)について、このひずみによる変形を元の状態に戻す力 ΔP_{sh} を純断面図心に作用させる。つぎに換算断面に関して ΔP_{sh} を解放する⁹⁾。断面構成要素であるコンクリート、鋼材のひずみは図-4(b)のようになる。なお、換算断面でのひずみ分布は、式(8)で表わされる。

$$\Delta \varepsilon_{sh}(y) = \{\Delta P_{sh} / A_v + \Delta M_{sh} / W_v(y)\} / E_i \dots\dots (8)$$

ここに、

$$\Delta P_{sh} = E_i \cdot A_c \cdot \Delta \varepsilon_{sh}, \quad \Delta M_{sh} = \Delta P_{sh} (y_c - y_v)$$

A_c : コンクリート純断面積

y_c, y_v : 参照軸から純断面図心および換算断面図心までの距離

$\Delta \varepsilon_{sh}$: 時間間隔 Δt_i におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみの増分

クリープの場合⁹⁾も同様に、図-5に示すように求められる。このときの換算断面でのひずみ分布は、次のよ

うになる。

$$\Delta \varepsilon_k(y) = \{\Delta P_k / A_v + \Delta M_k / W_v(y)\} / E_i \dots\dots (9)$$

ここに、

$$\Delta P_k = E_i \cdot \{\Delta \varepsilon_{k,u} \cdot A_c - (\Delta \varepsilon_{k,u} - \Delta \varepsilon_{k,L}) \cdot G_c / H\}$$

$$\Delta M_k = \Delta P_k \cdot (\eta - y_v)$$

$$\eta = \frac{\Delta \varepsilon_{k,u} \cdot G_c - (\Delta \varepsilon_{k,u} - \Delta \varepsilon_{k,L}) \cdot I_c / H}{\Delta \varepsilon_{k,u} \cdot A_c - (\Delta \varepsilon_{k,u} - \Delta \varepsilon_{k,L}) \cdot G_c / H}$$

I_c, G_c : それぞれ純断面定数で参照軸に関する断面2次および1次モーメント

H : 部材高

$\Delta \varepsilon_{k,u}, \Delta \varepsilon_{k,L}$: 時間間隔 Δt_i における上縁および下縁でのコンクリートのクリープひずみの増分

同様にPC鋼材のリラクセーションの場合、換算断面のひずみ分布 $\Delta \varepsilon_r(y)$ は、次式となる。

$$\Delta \varepsilon_r(y) = \{\Delta P_r / A_v + \Delta M_r / W_v(y)\} / E_i \dots\dots (10)$$

ここに、

$$\Delta P_r = \sum_j \Delta \sigma_{pr,j} \cdot A_{p,j}, \quad \Delta M_r = \sum_j \Delta P_{r,j} \cdot (h_{p,j} - y_v)$$

$\Delta \sigma_{pr,j}$: PC鋼材(j)のリラクセーションによる Δt_i 間の損失応力

$h_{p,j}, A_{p,j}$: PC鋼材(j)の参照軸からの距離および断面面積

c) 部材の初期力および剛性方程式

上述のようにコンクリートのクリープ・乾燥収縮およびPC鋼材のリラクセーションが拘束されることによって生じる内力を初期力として構造解析する。

仮想仕事の原理によって、この初期力ベクトル $\{f_0\}$ は求められ¹⁰⁾、部材軸に沿う内力分布を直線と仮定すると次のようになる。なお $\Delta N, \Delta M$ には式(7)~(10)の $\Delta P, \Delta M$ が対応する。

$$\{f_0\} = \begin{bmatrix} N_i \\ S_i \\ M_i \\ N_j \\ S_j \\ M_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta N_i(1-\gamma_N/2) \\ -\Delta M_i\gamma_M/L \\ -\Delta M_i \\ \Delta N_i(1-\gamma_N/2) \\ \Delta M_i\gamma_M/L \\ \Delta M_i(1-\gamma_M) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(11)$$

ここに、
 $\gamma_N = 1 - \Delta N_j / \Delta N_i$, $\gamma_M = 1 - \Delta M_j / \Delta M_i$
 $\Delta N_i, \Delta N_j$: それぞれ i, j 端での軸力 (ΔP)
 $\Delta M_i, \Delta M_j$: それぞれ i, j 端でのモーメント (ΔM)

L : 部材長

部材の剛性方程式は式 (12) のとおりである¹⁰⁾。

$$\{f\} = [k] \{u\} + \{f_e\} - \{f_0\} \dots\dots\dots(12)$$

ここに、

- $\{f\}$: 節点力ベクトル
- $[k]$: 要素剛性マトリックス (式 (13))
- $\{u\}$: 節点変位ベクトル
- $\{f_e\}$: 等価節点力ベクトル
- $\{f_0\}$: 初期力ベクトル (式 (11))

なお、式 (13) の A, I は換算断面に関する断面積、断面 2 次モーメントである。式 (12) より全体剛性方程式を組立て解くが、各時間間隔における計算の流れを示すと図-6 のようである。

$$[k] = \begin{bmatrix} \frac{E_i \cdot A}{L} & & & & & \\ & \frac{12E_i \cdot I}{L^3} & & & & \\ & & \frac{6E_i \cdot I}{L^2} & \frac{4E_i \cdot I}{L} & & \\ & & & & \frac{E_i \cdot A}{L} & \\ -\frac{E_i \cdot A}{L} & & & & & \\ & \frac{12E_i \cdot I}{L^3} & \frac{6E_i \cdot I}{L^2} & & & \frac{12E_i \cdot I}{L^3} \\ & & & & & & \frac{6E_i \cdot I}{L^2} & \frac{4E_i \cdot I}{L} & & \\ & & & & & & & & & \frac{E_i \cdot A}{L} \\ & & & & & & & & & & \frac{12E_i \cdot I}{L^3} \\ & & & & & & & & & & & \frac{6E_i \cdot I}{L^2} & \frac{4E_i \cdot I}{L} & & \\ & & & & & & & & & & & & & & \frac{E_i \cdot A}{L} \end{bmatrix} \text{symm.} \dots\dots\dots(13)$$

3. 検討例

(1) 考慮した要因

図-1 に示したように時間依存変位に影響を及ぼす要因として多くのものが挙げられるが、とくに材料的要因については次のように考えた。

コンクリートのクリープ・乾燥収縮は、使用コンクリートの成分、初期養生条件、環境条件など多くの影響を受け、正確に見積ることは非常に困難である。ここでは、その進行度を道示 III¹¹⁾ に示されている方法によることとし、乾燥収縮およびクリープ係数のフロー成分の基本値を変化させて、その影響度を把握した。

コンクリートのヤング係数は材令とともに増加する傾

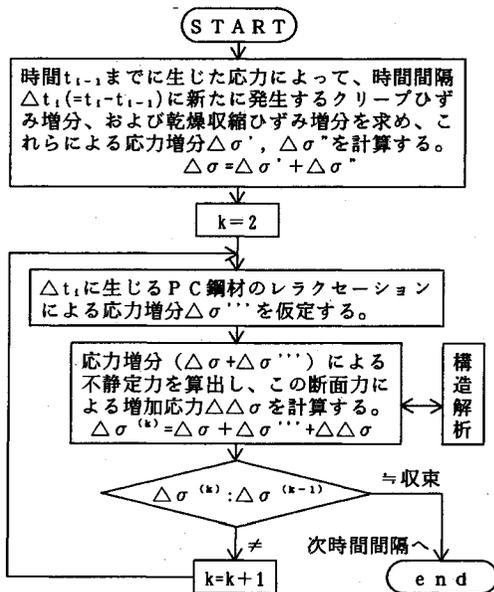


図-6 各時間間隔における流れ図

向があり、ここでは文献¹²⁾を参考にして次式を用いた。

$$E(t) = E(28) \frac{t}{2.333 + 0.917t} \text{ (kgf/cm}^2 \text{)} \dots\dots\dots(14)$$

ここに、

$E(t), E(28)$: それぞれ材令 t 日、および 28 日でのコンクリートのヤング係数

PC 鋼材の純リラクセーションによる応力損失量は、PC 設計指針に従って式 (15)¹³⁾ によって見積ることとした。

$$\sigma_{pr} = K \cdot \sigma_{ps0} \cdot (\sigma_{ps0} / \sigma_{psv} - 0.55) \cdot \log \{ (24t + 1) / (24t_0 + 1) \} \dots\dots\dots(15)$$

ここで、

$$\sigma_{ps0} / \sigma_{psv} - 0.55 \geq 0.05$$

σ_{pr} : 時間 t_0 において初期応力 σ_{ps0} で緊張した鋼材の時間 t における純リラクセーションによる応力損失量

K : 鋼材の種類によって定まる係数

$K = 1/45$: 低リラクセーション鋼材

$K = 1/10$: 一般の鋼材

σ_{psv} : 降伏点強度

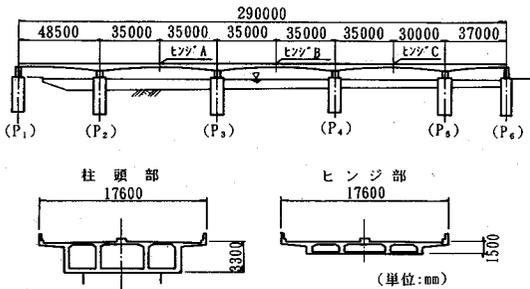
なお、ここでは降伏点強度 σ_{psv} は、JIS 規格値 (JIS G 3109) とする。

(2) 検討例 1

本橋は図-7 に示すように 5 径間連続有ヒンジラーメン橋でカンチレバー工法によって架設され、昭和 41 年に竣工した橋梁である。本橋の検討ケースの一覧表を表-1 に示す。同表では各要因を次のように変化させて検討した。

表一 検討ケース一覧表

ケース NO.	乾燥収縮の基本値 (μ)			クリープ係数の フロー成分の 基本値		リラクゼーションの係数 (K)			構造系の変 化		コンクリートの単 位体積重量 (tf/m^3)		系完成までの 施工日数 (日)		鉄筋拘束		コンクリートの ヤング係数 (kgf/cm^2)		備 考
	-250	-350	-450	2.0	2.4	1/45	1/10	0	段階 施工	一括 施工	2.5	2.68	91	62	考慮	無視	3.5×10^6	2.98×10^6	
1	○			○		○			○		○		○		○		○		基本
2	○							○	○		○		○		○		○		リラクゼーション(1)
3		○		○		○			○		○		○		○		○		収縮(1)
4	○			○						○	○		○				○		構造系
5	○			○		○			○		○		○		○		○		鉄筋
6	○			○				○		○		○		○		○		○	リラクゼーション(2)
7			○			○			○		○		○		○		○		収縮(2)
8	○			○					○		○		○		○		○		自重
9	○				○				○		○		○		○		○		クリープ
10	○				○				○		○		○		○		○		施工時間
11	○				○				○		○		○		○		○		コンクリートのヤング係数
12		○			○				○		○		○		○		○		組合せケース



図一七 検討例1の橋梁一般図

a) 乾燥収縮の基本値

架橋場所(神戸市)付近の平年湿度および温度は、それぞれ68% R.H., 15.6°C(統計期間1951~1980年)¹⁴⁾であることを考えて、道示Ⅲに従って湿度70% R.H.に対する基本値-250 μ を基本とし、-350 μ , -450 μ と変化させた。

b) クリープ係数のフロー成分の基本値

同様に、70% R.H.に対する基本値2.0を基本とし、60% R.H.に対する値2.4についても検討した。

c) PC鋼材のリラクゼーション

式(15)による10⁸時間に対する純リラクゼーション率の計算結果¹⁵⁾を表一2に示す。同表に示すコンクリート標準示方書による結果を参考にして、K=1/45(低リラクゼーション鋼材)を基本とし、K=1/10, K=0も検討した。

d) 施工時間

施工記録が入手できなかったので、標準サイクルを7日とし、橋体完成までの日数を91日としたケースを基本とし、62日についても検討した。

e) コンクリートのヤング係数

設計値3.5 $\times 10^6 kgf/cm^2$ (材令28日)を基本とし、その85%とした値2.98 $\times 10^6 kgf/cm^2$ についても検討した。

f) コンクリートの単位体積重量

主桁自重については、コンクリートの単位体積重量、

表一2 10⁸時間に対するリラクゼーション率の計算値の比較

	PCI設計指針(式(15)) K=1/10	K=1/45	コンクリート 標準示方書 ¹⁵⁾
10 ⁸ 時間に対する リラクゼーション率	0.059	0.013	0.015

注) 使用鋼材: SBPR 80/105, 緊張応力度: 59.7 kgf/mm^2

表一3 時間依存変位の検討結果 (単位: mm)

ケースNO.	ヒンジ位置の時間依存変位($t=\infty$)			備 考
	ヒンジA	ヒンジB	ヒンジC	
1	90.6	84.6	55.9	基本ケース
2	87.9	81.8	53.5	リラクゼーション (k=0, 無視)
3	99.5	93.6	63.2	乾燥収縮 ($\epsilon_{sh0}=-350\mu$)
4	78.7	71.2	42.9	構造系(一括施工)
5	99.2	92.2	61.2	鉄筋拘束(無視)
6	98.6	92.9	62.4	リラクゼーション (k=1/10)
7	108.9	103.4	70.8	乾燥収縮 ($\epsilon_{sh0}=-450\mu$)
8	96.5	90.4	59.9	自重(5%増)
9	104.5	98.1	64.4	クリープ($\phi_{t0}=2.4$)
10	95.5	89.0	58.1	施工日数($t=62$ 日)
11	105.1	98.4	64.8	コンクリートのヤング係数 (15%減)
12	136.9	129.5	87.1	組合せケース上記ケース 3.8.9.11の要因の組合せ
測定値	151	120	92	S.62.5測定

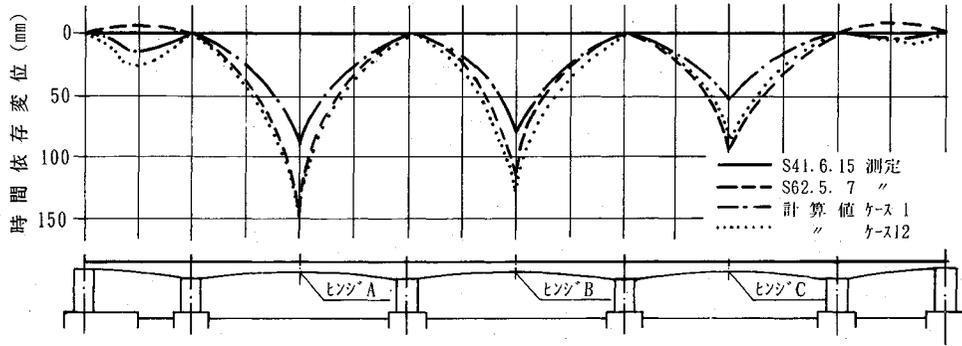
あるいは部材断面寸法の出来形値によって変化する。ここでは、コンクリートの単位体積重量を変化させることによって主桁自重の影響を把握することとした。

2.5 tf/m^3 , さらにその5%増の2.63 tf/m^3 についても検討した。

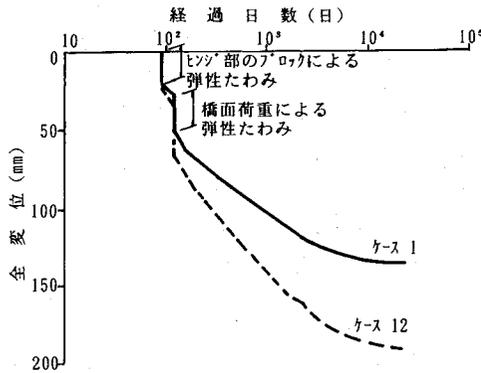
表一1のケース1を基本ケースとし、ケース2~ケース11は、考慮した要因のうちの1つのみを変化させて検討したものである。なお、検討に用いた構造寸法、緊張力等は本橋の設計計算書によった。

表一3に各ヒンジ位置の時間依存変位を示す。考慮した要因について、その最も一般的な値を用いたケース1は、実橋測定値の60~70%にとどまっており、かなり小さくそれを見積もってしまう結果となっている。

ケース2~11の結果より、とくに各要因の変動が、ヒ



図—8 時間依存変位図 ($t=\infty$)



図—9 ヒンジAにおける全変位の経時変化図

ンジ位置Aの時間依存変位に及ぼす影響について見ると次のようである。

- ①PC鋼材のレラクセーションにおける係数 ($K=1/45$) を0, 1/10に変化させると、変位の変化量はそれぞれ-2.7, 8.0mmとなっている(ケース1の0.97, 1.09に相当している)。
- ②乾燥収縮ひずみの基本値 ($\epsilon_{sh0}=-250\mu$) を-350 μ , -450 μ と変化させるとそれぞれ8.9, 18.3mm増加する。
- ③クリープ係数のうち、その流動成分の基本値 ($\phi_{r0}=2.0$) を2.4とすると、13.9mm増加している。
- ④構造系の変化を無視すると(一括施工と仮定すると) 11.9mm減少する。
- ⑤鉄筋拘束を無視すると、8.6mm, 9%増加する。
- ⑥自重の5%増加を仮定すると、5.9mm, 7%増加する。
- ⑦施工日数を91日から62日に変更すると4.9mm増加する。
- ⑧コンクリートのヤング係数 ($3.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$) を15%減じた $2.98 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ とすると、14.5mm, 16%増加する。

以上のように、一つの要因の変動によって測定結果を説明することは難しく、幾つかの要因の変動の組み合わせ

表—4 応力度比較表

(単位: tf/m^2)

検討ケースNo. 応力度の種類	ケース 1			ケース 12			設計 計算値
	①定応力	②変化 応力	①+② 合計	①定応力	②変化 応力	①+② 合計	
上縁コンクリート	-652	258	-394	-627	350	-327	-228
鉄筋(上縁側)	-8754	-7570	-16324	-10123	-8959	-19082	-
PC鋼材(上縁側)	4834	-8502	-3668	5787	-9849	-4060	-7689
鉄筋(下縁側)	-4033	-12629	-16662	-5024	-17722	-22746	-
下縁コンクリート	-820	-29	-849	-863	-29	-892	-990

注) (-): 圧縮、(+): 引張、PC鋼材は緊張応力の変化量を示す。

せが考えられる。ケース12は、影響度の大きいケース3, 8, 9, 11を組合せたものであるが、ヒンジ位置で測定値の90~110%とほぼ測定値に近い結果となっている。

また、図—8に示す橋軸方向の時間依存変位による橋桁の変形でも、端径間を除いて比較的良好な一致の結果となっている。なお、端径間での変形挙動が異なることについては、今後十分な検討を加える必要があると考えられる。

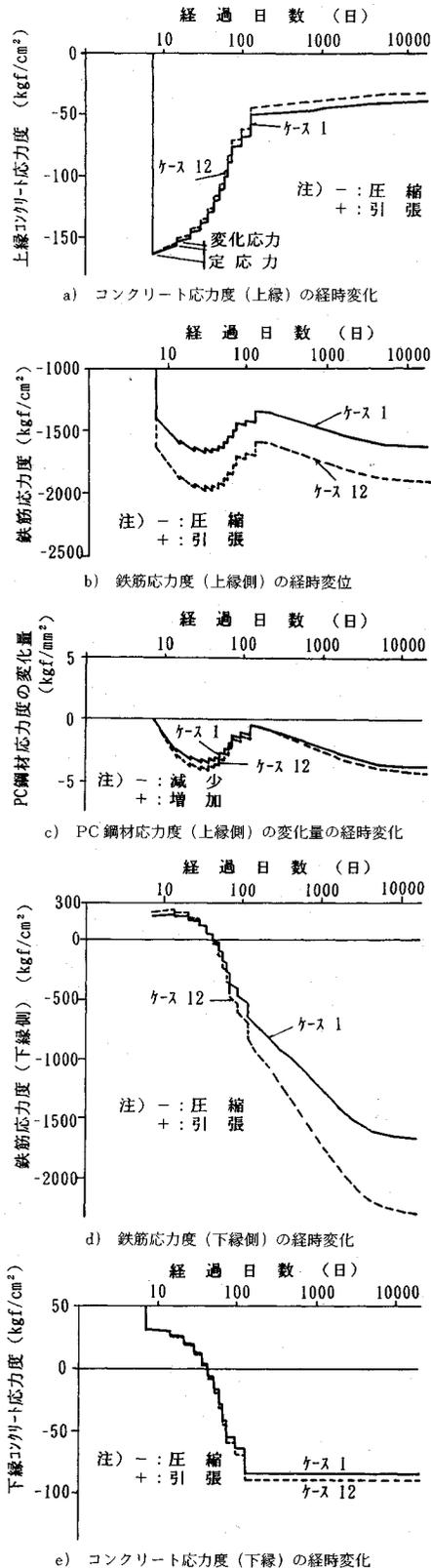
さらに、図—9はヒンジ位置Aでの全変位の経時変化であるが、10~20年の長期にわたって時間依存変位が進行することを示している。

図—10は断面構成要素(コンクリート、鉄筋、PC鋼材)の応力の経時変化の一例で、同断面の設計値との比較を表—4に示す。同図表のように両ケースの応力差はコンクリートで 5 kgf/cm^2 、鉄筋で $300\sim 600 \text{ kgf/cm}^2$ 、またPC鋼材で 0.4 kgf/mm^2 程度となっている。とくに、ケース12における鉄筋の圧縮応力度が大きな値を示しているが、これは圧縮鉄筋量が0.13%と非常に少ないことによるものである。

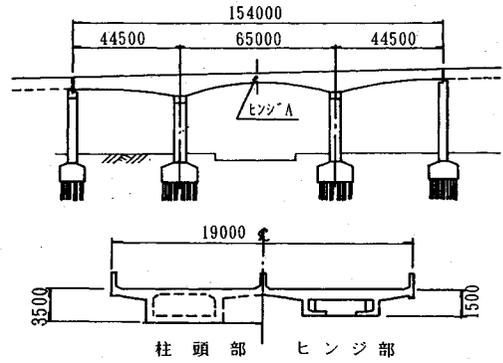
また、コンクリート応力度について設計計算値と比較すると、圧縮応力が上縁では $10\sim 17 \text{ kgf/cm}^2$ 大きく、下縁では $10\sim 14 \text{ kgf/cm}^2$ 小さくなっている。さらに、PC鋼材の緊張応力の変化量は $-3.6\sim -4.0 \text{ kgf/mm}^2$ 小さくなっている。このことより、設計計算値は、安全側の結果となっていることがわかる。

(3) 検討例2

図—11は検討例2の橋梁一般図であるが、本橋は昭



図一10 断面構成要素の応力度の経時変化 (P2 右側柱頭部)



図一11 検討例2の橋梁一般図 (単位: mm)

表一5 検討ケース一覧表

検討ケース	1	2
乾燥収縮の基本値(μ)	-250	○
	-350	○
クリープ係数のフロー成分の基本値	2.0	○
	2.4	○
リラクゼーションの係数	$K=1/45$	○
構造系の変化	段階施工	○
コンクリートの単位体積重量 (tf/m^3)	2.5	○
	2.68	○
系完成までの施工日数(日)	278	○
鉄筋拘束	考慮	○
コンクリートのヤング係数 (kgf/cm^2)	3.50×10^5	○
	2.47×10^5	○
備考	基本	組合せケース

表一6 時間依存変位の検討結果 (単位: mm)

	ヒンジ位置A	備考
ケース1	86	基本
ケース2	140	組合せ
測定値	163	S.62.12 測定

和 54 年 3 月に完成した道路橋 (架橋場所 大阪地区) である。本橋についても表一5 に示す 2 ケースについて検討した。

なお、各施工ステップに要する日数およびコンクリートのヤング係数 ($E(28)=2.47 \times 10^5 \text{kgf}/\text{cm}^2$) は本橋の工事報告書を参考にして決定した。

表一6 にヒンジ位置の時間依存変位の結果 ($t=\infty$) を示す。なお、本橋の上げ越し量は設計計算によると 53 mm となっている。同表のようにケース1で測定値の約 53%、またケース2で測定値の約 86% と前述検討例1と同様な割合になっている。しかし測定値は竣工後9年であることを考えると、今後なお時間依存変位の増加が考えられ、両者の差は幾分か大きくなることが予想される。

(4) 検討結果のまとめ

以上の検討例によって得られたことをまとめると、次のようである。

①時間依存変位は、10~20年の長期にわたって進行す

るものと考えられる。

- ②時間依存変位に影響を及ぼす幾つかの要因のうち、とくにコンクリートのクリープ係数、ヤング係数、および乾燥収縮ひずみが大きな影響を及ぼすものと考えられる。
- ③常用的な値（一般的に設計に用いられる値）を用いた結果は、かなり小さく時間依存変位を評価することが、実橋での測定結果との比較で明かとなった。
- ④断面構成要素の応力は、設計値が安全側となる結果を示しており、設計上の問題とはならないものと考えられる。

4. 結 論

本論文では、PC橋の時間依存変位解析に逐次法を適用し、時間依存変位に影響を及ぼす幾つかの要因について実橋での実測たわみとの比較によって、その影響度を考察した。得られた結論を示すと以下のようである。

(1) 時間依存変位は、一般的な値を用いた場合には、実橋の実測たわみの60~70%とかなり小さくなる傾向が見られた。

(2) 時間依存変位に影響を及ぼす幾つかの要因のうち、とくにコンクリートのクリープ係数、ヤング係数、および乾燥収縮ひずみが大きな影響を及ぼすことが、実測たわみとの比較で明かとなった。

(3) コンクリートの特性は、架橋場所の環境条件等に左右され、設計段階で正確に見積もることは困難と考えられる。本橋のような変形に敏感な構造形式を選定する場合には、これらの予想される変動を考慮した設計手法を明らかにすることが、今後の課題と考えている。

5. あとがき

PC有ヒンジラーメン橋は昭和50年代を中心に数多く建設されてきたが、その変形特性（時間依存変位）に由来した問題も生じている。同形式橋のもつ経済性、施工性は十分に認められているが、走行性を重視する高速道路あるいは交通量の多い都市内道路では、同形式の橋梁の選定に当たって十分な配慮が必要と考えられる。

本論文は有ヒンジラーメン橋のヒンジ部沈下に関する

検討会（委員長：故明石外世樹立命館大学名誉教授、昭和62年度）における検討成果の一部をまとめたものである。同検討会の委員各位に深く感謝する次第です。さらに検討会途中で逝去されました明石先生のご冥福を心からお祈り申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 日本道路公団：中央ヒンジ型式PC橋のたわみ変化調査報告書、1970年3月。
- 2) 高藤 傳・関 慎吾：長大PC道路橋のたわみ特性と補修方法について、日本大学理工学研究所所報、第55号、pp.245~274、1981年8月。
- 3) 百島祐信：カンチレバー架設したプレストレストコンクリート橋における断面力および挙動の研究、土木学会論文集、No.240、pp.113~128、1995年8月。
- 4) 白井士朗他：越野尾橋の補修工事、橋梁と基礎、VOL.2、No.5、pp.21~26、1968年5月。
- 5) 酒井和廣：美陵高架橋の補修、橋梁と基礎、VOL.17、NO.8、pp.86~89、1983年8月。
- 6) たとえば、(ed.) Bazant, E.P. et al : Creep and Shrinkage in Concrete Structures, Wiley, pp.312~315, 1982.
- 7) (社)土木学会：コンクリート標準示方書 設計編、pp.25~26、1986年10月。
- 8) (ed.) Bazant, Z.P. : Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete, Wiley, pp.102~103, 1988.
- 9) 赤尾親助・栗田章光：合成構造部材におけるコンクリートのクリープ、収縮の影響の計算法、1973年4月。
- 10) たとえば、W. マクガイア他著、川井忠彦監訳：マトリックス構造解析、丸善(株)、pp.339~342、1981。
- 11) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編、pp.86~90、昭和53年1月。
- 12) 阪神高速道路公団、(社)日本材料学会：コンクリート基礎性状に関する調査研究(その2)報告書、p.140、1984年3月。
- 13) Tadros, M.K. et al : Time-Dependent Analysis of Composite Frames, jour. of structural division, ASCE, pp 871~884, Apr., 1977.
- 14) 国立天文台編：理科年表、昭和64年、pp.206~210、丸善(株)、1988。
- 15) (社)土木学会：コンクリート標準示方書、設計編、pp.33、1986年10月。

(1992.3.5 受付)

STUDY ON TIME DEPENDENT DISPLACEMENT OF PRESTRESSED CONCRETE CONTINUOUS BOX-GIRDER BRIDGE WITH HINGE

Mori HASHIBA, Mikitake ISHIZUKA, Toyoaki MIYAGAWA and Takayuki KOJIMA

Prestressed concrete continuous box-girder bridge with hinge at mid span is one of the popular type of bridge, and many bridges of this type have been constructed in highway. It is evaluated in its cost performance in construction. On the other hand, there are some reports on its repairment for reduction of its function such as its large time dependent displacement due to creep and shrinkage in concrete. This paper describes the result of investigation about certain factors which affect on such displacement by the use of an analytical method as well as field observations.