

(4) 弾性合成桁橋の経時挙動評価

Evaluation of Time-Dependent Behavior of Steel-Concrete Composite Girder Bridge with Partial Interaction

中原正人*, 栗田章光**, 中井 博***, 小深田祥法****

Masato NAKAHARA, Akimitsu KURITA, Hiroshi NAKAI, Yoshinori KOBUKATA

- * 工修 中央復建コンサルタンツ(株) (〒532-0004 大阪市淀川区西宮原 1-8-29)
 ** 工博 大阪工業大学教授 工学部土木工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)
 *** 工博 福井工業大学教授 工学部土木工学科 (〒910-8585 福井県福井市学園 3-6-1)
 **** 工修 (株)横河ブリッジ (〒592-8331 大阪府堺市築港新町 2-3)

Until now, the various solutions to reduce the tensile stress in concrete slab, which acts at intermediate support region of continuous steel-concrete composite girder bridge, have been applied. The steel-concrete composite girder with partial interaction is one of them. Because of using the flexible shear connector, the elastic slip occurs between steel girder and concrete slab. On the other hand, it is generally recognized that the girder designed as the non-composite one, which has a few stud shear connector, behaves as the girder having partial interaction. First of all the analytical method on time dependent behavior due to creep, shrinkage and temperature change is presented in this paper. Furthermore, the analytical results are reported by comparing with experimental ones. Finally, the influence of time dependent behavior for the girder is evaluated and discussed.

Key word: Composite Girder, Partial Interaction, Creep, Shrinkage, Temperature Change

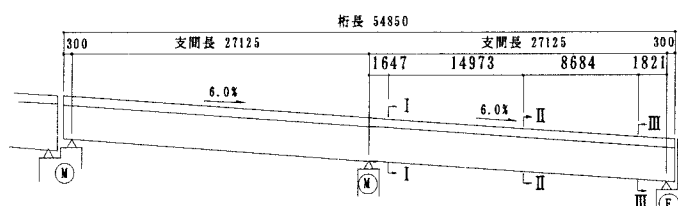
1. はじめに

連続合成桁橋を採用するにあたって、中間支点領域のコンクリートの引張応力が問題になるのは周知のとおりである。そこで、PC 鋼材や支点のジャッキアップ・ダウンによってプレストレスを導入する、いわゆるプレストレスする連続合成桁橋、あるいは負の曲げモーメントをうける領域では鋼桁に対してコンクリート床版の抵抗を期待しない非合成桁とするプレストレスしない連続合成桁橋、さらには鋼桁とコンクリート床版とを柔なずれ止めを介して結合した弾性合成桁橋などの総称である不完全合成桁橋などが採用されてきた。本来、弾性合成桁橋は不完全合成桁橋に属するものである。しかしながら、鋼桁とコンクリート床版とが非合成であるとして設計された桁もスラブアンカーや添接用ボルトなどの存在

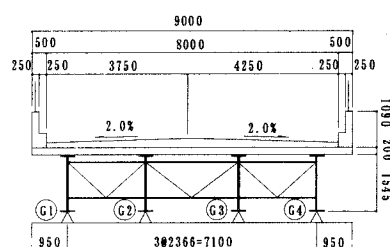
により両者の間に弱い合成作用が生じ、弾性合成桁として挙動すると考えられる。

一方、コンクリートのクリープ・乾燥収縮などの経時挙動は、その予測を見誤ると床版のひび割れや過度の変形、さらには、プレストレスの損失を生じさせるため、使用限界状態を照査する場合には十分に検討されるべき項目である。また、プレキャストコンクリート床版におけるこれらの設計値は、現行の道路橋示方書に規定されておらず、それに準じているのが現状である。

そこで、本研究では弾性合成桁橋の経時挙動に着目し、経時挙動が合成桁に及ぼす影響をプレキャストコンクリート床版を用いた2径間連続非合成鉄桁橋の約3年間にわたる長期測定結果と弾性合成理論を用いた解析結果の両面から評価し、検討が加えられている。



(a) 側面図



(b) 支点上断面図

図-1 実験橋梁の一般図 [単位: mm]

2. 実験橋梁の概要

本研究で用いられた実験橋梁（A 橋）の一般図と長期ひずみ測定位置（断面Ⅰ-Ⅰ～断面Ⅲ-Ⅲ）を図-1 に示す。A 橋は 2 径間連続非合成鉄桁橋で設計されており、橋長は 55.0m(2@27.125)、床版支間は 2.37m である。また、A 橋の床版には PPCS 工法が採用されており、プレキャストコンクリート床版の橋軸直角方向には工場で、橋軸方向には現場で、それぞれプレストレスが導入されている。橋軸方向のプレストレスの導入量は、中間支点領域で約 8.5N/mm²、それ以外の区間で約 5.0N/mm² である。A 橋のずれ止めには φ19 の頭付きスタッドが 1m 間隔で各列に 1 本ずつ使用され、さらに高さ調整用の押さえ金具が 1m 間隔でそれぞれ配置されている。

なお、本橋梁はアプローチ橋であり、全線供用開始の約 3 年前に完成し、その間長期ひずみが測定されていた。

3. 経時挙動解析

3.1 概説

本研究では経時挙動の要因として、コンクリートのクリープ・乾燥収縮、および合成桁の温度変化の 3 つを設定した。

3.2 クリープ・乾燥収縮解析

クリープを生じさせる持続外力は、コンクリート床版内に配置した内ケーブルによるプレストレス力と後死荷重とした。解析には、クリープ、および乾燥収縮それぞれの現象において誘導したコンクリートの応力-ひずみ関係式を適用し、鋼桁とコンクリート床版との間に弾性ずれが生じるという仮定の下で、合成桁に作用する断面力を鋼桁、およびコンクリート床版それぞれの図心に作用する軸方向力と曲げモーメントに分けて取り扱う分担断面力法⁹⁾を用いた。

コンクリートのクリープおよび乾燥収縮に関する応力-ひずみ関係式は、次のとおりである。

クリープ：

$$\Delta \varepsilon_{c,t-t_1} = \frac{\sigma_{t_1}}{E_c} \phi_c(t-t_1) + \frac{\Delta \sigma_{t-t_1}}{E_c} \left\{ 1 + \frac{\phi_c(t-t_1)}{2} \right\} \quad (3.1)$$

乾燥収縮：

$$\Delta \varepsilon_{sh,t} = \frac{\Delta \sigma_t}{E_c} \left\{ 1 + \frac{\phi_{sh}(t)}{2} \right\} + \varepsilon_{sh,\infty} \frac{\phi_{sh}(t)}{\phi_{sh,\infty}} \quad (3.2)$$

ここに、

$\phi_c(t-t_1)$: 材齢 t におけるクリープ係数

$\varepsilon_{sh,\infty}$: 最終乾燥収縮量

$\phi_{sh,\infty}$: 乾燥収縮に伴うクリープ係数の最終値

ここでは、乾燥収縮解析法の要点のみを示す。図-2 に示すように鋼桁とコンクリート床版とが結合されるとコンクリート床版の自由な乾燥収縮ひずみ $\varepsilon_{sh,\infty}$ が鋼桁に拘束されるため断面内には不静定な断面力の変化が生じる。任意材齢 t における力の釣り合い条件式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{s,t}^{sh}(x) + \Delta N_{c,t}^{sh}(x) + \Delta P_{p,t}^{sh}(x) &= 0 \\ \Delta M_{s,t}^{sh}(x) + \Delta M_{c,t}^{sh}(x) - \Delta N_{s,t}^{sh}(x)d &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

ここに、

$\Delta N_{s,t}^{sh}(x), \Delta M_{s,t}^{sh}(x)$: 任意材齢 t までの乾燥収縮に伴う鋼桁の分担軸方向力および曲げモーメントの変化量

$\Delta N_{c,t}^{sh}(x), \Delta M_{c,t}^{sh}(x)$: 任意材齢 t までの乾燥収縮に伴うコンクリート床版の分担軸方向力および曲げモーメントの変化量

$\Delta P_{p,t}^{sh}(x)$: 任意材齢 t までの乾燥収縮に伴う PC 鋼材の張力の変化量

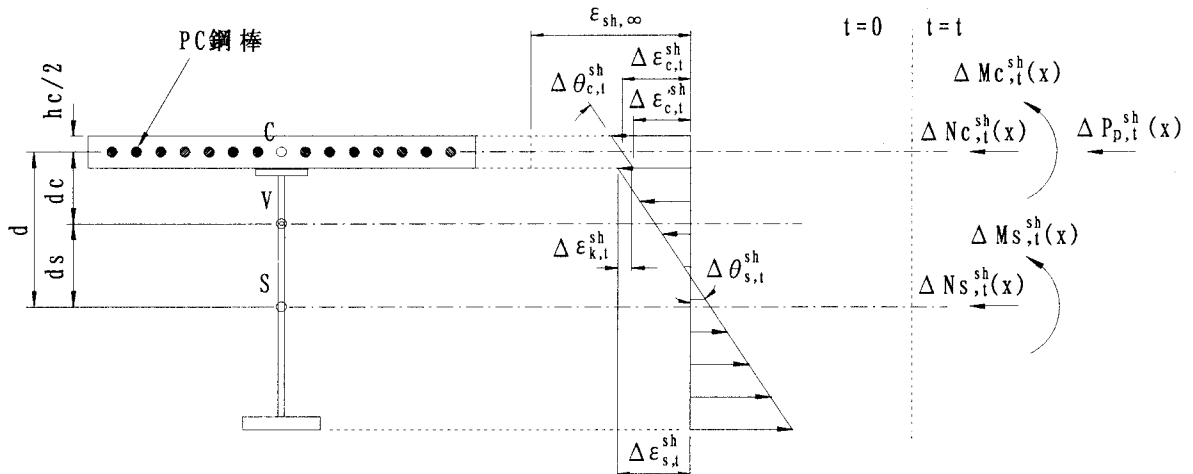


図-2 乾燥収縮解析における分担断面力の仮定とひずみ分布

さらに、任意材齢 t における変位の適合条件式は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_{s,t}^{sh} &= \Delta\theta_{c,t}^{sh} \\ \Delta\epsilon_{c,t}^{sh} &= \Delta\epsilon_{p,t}^{sh} \\ \Delta\epsilon_{s,t}^{sh} - \Delta\epsilon_{c,t}^{sh} &= \Delta\epsilon_{k,t}^{sh} \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

ここに、

$\Delta\theta_{s,t}^{sh}, \Delta\theta_{c,t}^{sh}$: 任意材齢 t までの乾燥収縮に伴う鋼桁およびコンクリート床版の曲率の変化量

$\Delta\epsilon_{s,t}^{sh}, \Delta\epsilon_{c,t}^{sh}$: 任意材齢 t までの乾燥収縮に伴う結合面における鋼桁およびコンクリート床版ひずみの変化量

$\Delta\epsilon_{c,t}^{sh}$: 任意材齢 t までの乾燥収縮に伴うコンクリート床版図心位置ひずみの変化量

$\Delta\epsilon_{p,t}^{sh}$: 任意材齢 t までの乾燥収縮に伴う PC 鋼材のひずみの変化量

$\Delta\epsilon_{k,t}^{sh}$: 任意材齢 t までの乾燥収縮に伴う弾性ずれの変化量

以上より、変化断面力は、力の釣り合い条件式 (3.3)、および変位の適合条件式 (3.4) を解くことによって算出できる。変化断面力が求まると、乾燥収縮に伴う各部材の変化応力度、さらには式 (3.2) を用いて各部材のひずみの変化量が算出できる。なお、クリープによる各部材のひずみの変化量も同様の方法で算出することができる。

3.2 温度変化解析

温度変化解析では、床版図心位置、および鋼桁上・下フランジの温度の測定値を用い、回帰分析して床版上縁から鋼桁下縁まで温度が直線分布するものと仮定した。各部材のひずみの変化量は、温度差による桁の回転方向に仮想モーメントを作用させ、それを外力として先程と同様に分担断面力法を用いて解析を行った。

4. クリープおよび乾燥収縮の緒係数に関する実験

コンクリートの経時挙動を精度よく予測するためには、その基礎データとなる正確なクリープ、および乾燥収縮の経時的な進行を表す係数とその最終値が必要である。そこで、図-3 に示すような実験橋梁のプレキャストコンクリート床版と同じ条件でダミー床版供試体を 2 体製作した。その測定値を用いて図-4 に示すフローより諸係数を算出した。つまり、ダミー床版供試体の一体にはプレストレスを導入し、クリープひずみと乾燥収縮ひずみを同時に測定した。もう一体は無応力状態にし、乾燥収縮ひずみのみを測定した。クリープひ

ずみは両者のひずみを差し引くことによって得られる。また、クリープ係数はクリープひずみを弾性ひずみで除することによって算出できる。

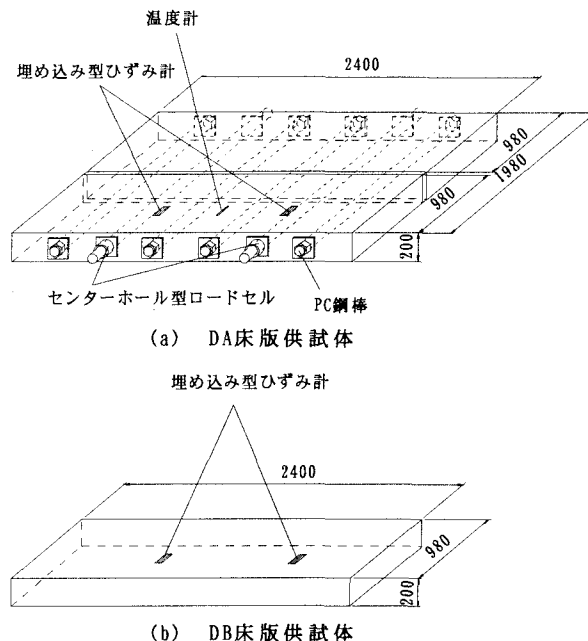


図-3 ダミー床版供試体 [単位 ; mm]

表-1 ダミー床版の概要

供試体名	試験目的	プレストレスの有無	埋め込みゲージ	ロードセル	熱伝対	温度計
DA	クリープ	導入	2	2	2	1
DB	乾燥収縮	無	2	—	2	—

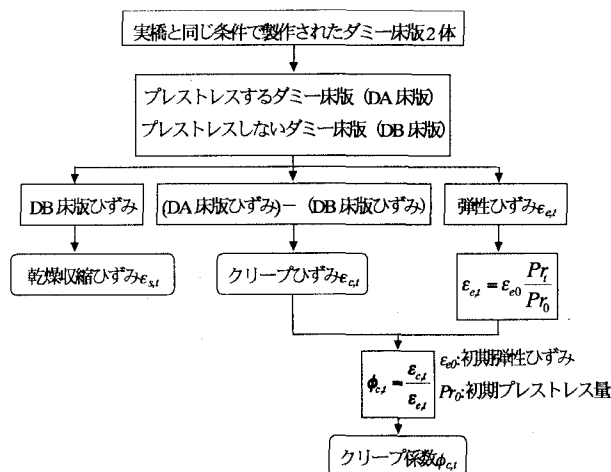


図-4 係数算出フロー

いま、温度補正後の測定ひずみの経時変化を図-5 に示す。結果は大きく波打っており温度・湿度などの外気の影響を補正しきれていないと考えられる。そこで、測定開始日と同じ温度の日をピックアップした。その結果を DA 床版ひずみ、DB 床版ひずみ、およびクリープ係数として、図-6 から図-8 に示す。また、図中には指数関数を用いて回帰分析した結果

も併せて示した。なお、図中のひずみは引張ひずみを正とする。表-2 にまとめを示す。

表-2 係数値のまとめ [引張ひずみ：正]

y	最終値 A	進行係数 B
DA 床版ひずみ 1	-155 μ	0.01898
DA 床版ひずみ 2	-167 μ	0.02008
DB 床版ひずみ 1	-139 μ	0.02063
DB 床版ひずみ 2	-175 μ	0.02011
クリープ係数 1	1.20	0.01427
クリープ係数 2	1.05	0.01273

$$y = A(1 - e^{-Bx})$$

以上の結果より、本研究でのコンクリート床版のクリープ係数と自由乾燥収縮量は以下のように決定した。

クリープ係数の最終値 : $\phi_{c,\infty} = 1.13$

自由乾燥収縮量 : $\varepsilon_{s,\infty} = 157\mu$

ここで、このダミー床版供試体は実験橋梁の施工ステップと同様に施工されており、プレキャストコンクリート床版を用いた最終乾燥収縮量は仮置き時間を考慮して $\varepsilon_{sh,\infty} = 60\mu$ とした。また、乾燥収縮に伴うクリープ係数は、それに着目した既往の実験結果²⁾より引用し $\phi_{sh,\infty} = 1.40$ とした。

5. 測定結果と解析結果の比較・検討

5.1 フレキシビリティ定数 f

合成桁は、鋼桁とコンクリート床版との合成度を表すパラメータであるフレキシビリティ定数 f を用いて以下のように定分類れている³⁾。

- $f=0$ 鋼桁とコンクリート床版とは完全合成
- $1 < f < 7$ 鋼桁とコンクリート床版とは弾性合成
- $f=7$ 鋼桁とコンクリート床版とは非合成

ここに、フレキシビリティ定数 f は次のように定義される。

$$f = \sqrt{\frac{k_0 L_d}{k n_s}} \quad (5.1)$$

ここで、 k_0 は基準ばね定数 (20 tf/cm/cm), L_d はスタッドの配置間隔, n_s はスタッド 1 列あたりの本数, および k はスタッド 1 本あたりのばね定数である。

本実験橋梁のフレキシビリティ定数 f は、過去のスタッドの押し抜きせん断試験の結果を参照して算出すると $f=2.2$ となった。

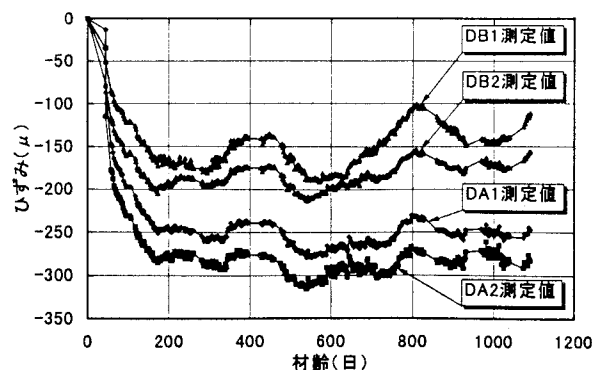


図-5 測定ひずみの経時変化

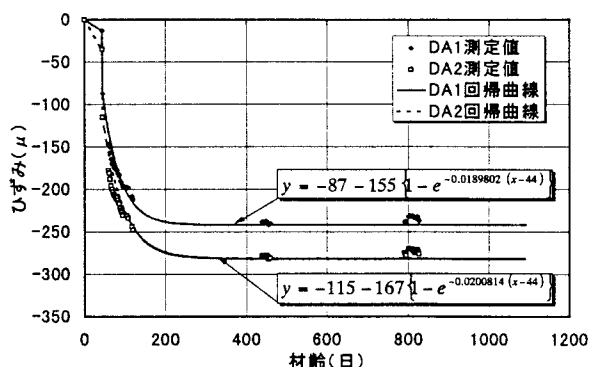


図-6 DA 床版供試体ひずみの経時変化

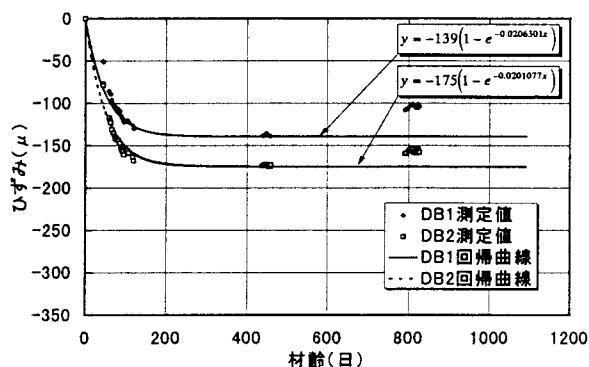


図-7 DB 床版供試体ひずみの経時変化

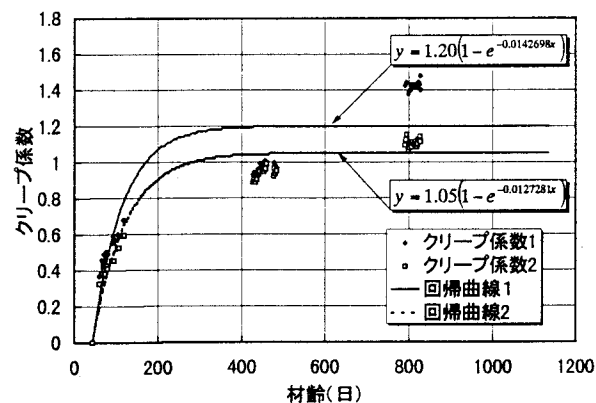


図-8 クリープ係数の経時変化

5.2 結果と考察

図-9 に中桁にあたる G2 桁の断面内部ひずみの経時変化を示す。測定値より鋼桁とコンクリート床版との間に弾性ずれが生じるという弾性合成桁の特性が確認された。また、解析値は鋼桁ひずみの経時変化を比較的良好に追従している。しかしながら、コンクリート床版については、初期材齢期間（材齢 200 日くらいまで）以外は、両者の良好な一致は見られなかった。

そこで、図-10 にコンクリート床版ひずみの経時変化を示す。測定値は材齢 200 日あたりから大きく変動している。これは、本橋梁がプレキャストコンクリート床版と鋼桁との結合後しばらくの間アスファルトが施工されなかったため、測定値に降雨・湿度・風・日射等の影響が含まれたからだと考えられる。そこで、解析値に外気湿度の補正を施した結果も併せて示した。これは、既往の研究にコンクリートの内部湿度を測定して補正した例があり、そこから湿度 1%あたりの補正量⁹⁾を引用したものである。その補正量は、次の通りである。

相対湿度 90%～70%の場合：補正量 $7.5\mu/\%$

相対湿度 70%～40%の場合：補正量 $5.0\mu/\%$

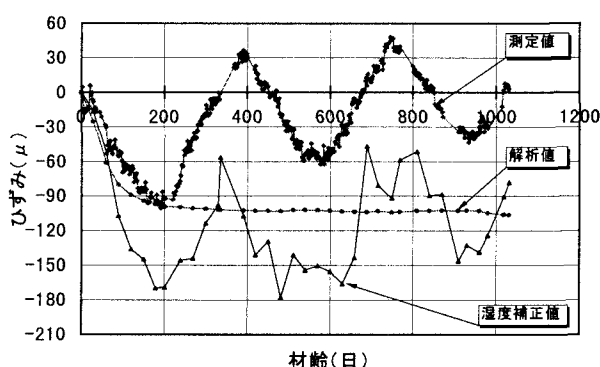
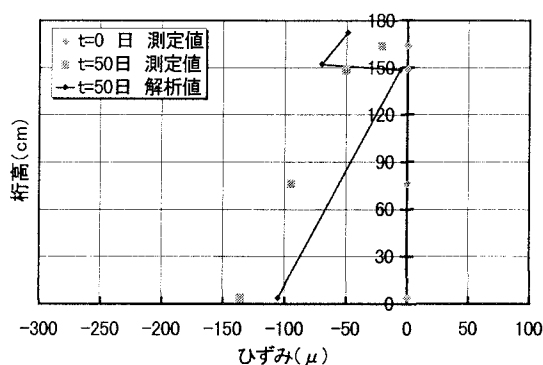


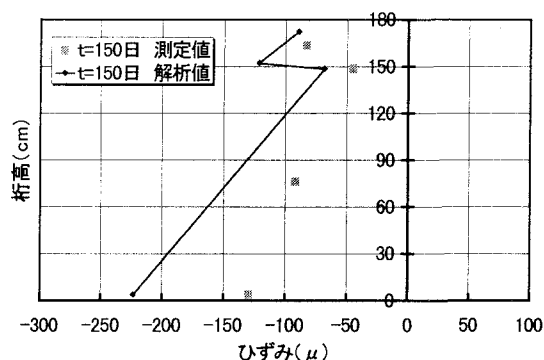
図-10 G2 桁中間支点部のコンクリート床版ひずみの経時変化 [引張ひずみ：正]

これより、湿度補正した結果は測定値と同様の傾向を示しており湿度の影響が大いに認められた。しかしながら両者の良好な一致は見られなかった。その原因としてクリープ係数、およびフレキシビリティ定数 f の評価が挙げられる。そこで、クリープ係数、およびフレキシビリティ定数 f をパラメータにしてパラメータ解析を行った。その結果を図-11、および図-12 に示す。ここで、クリープ係数については過去の文献⁹⁾に同じような実験が報告されており、そこでの算出されたクリープ係数 0.75 も参考にした。図-11 について解析結果の方が測定結果よりも大きくなっているのは、解析上考慮されていない拘束によってひずみが抑えられたからだと考えられる。また、図-12 より解析結果はクリープ係数に依存しており、

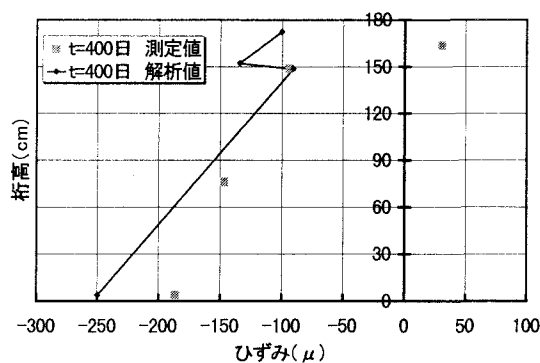
正確なクリープ係数の評価が重要であることが認められる。



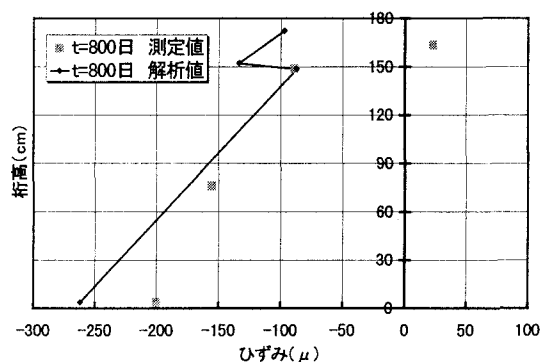
(a) 材齢 0 日および 50 日



(b) 材齢 200 日



(c) 材齢 400 日



(d) 材齢 800 日

図-9 G2 桁の断面内部ひずみの経時変化

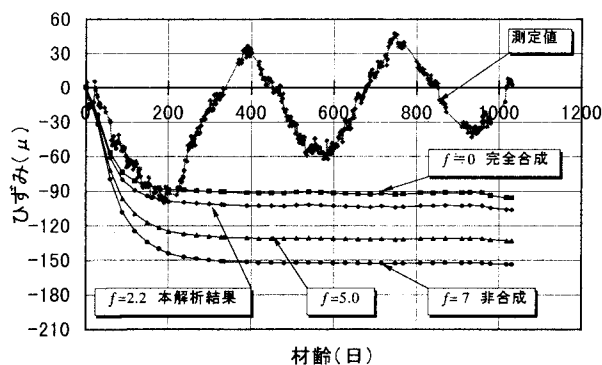


図-11 フレキシビリティ定数 ($\phi=1.13$ 一定)

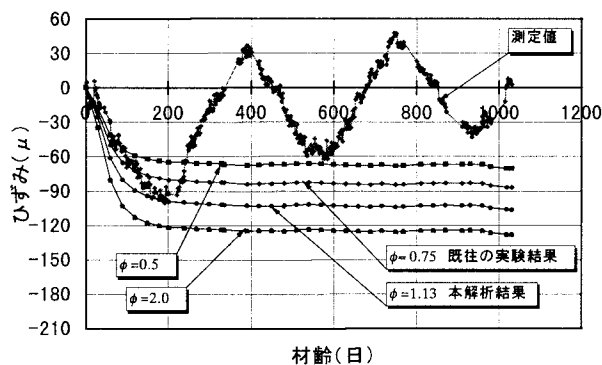


図-12 クリープ係数 ($f=2.2$ 一定)

5.3 経時挙動に伴う変化応力

経時挙動に伴う変化応力を G2 桁中間支点部のコンクリート床版に着目して、表-3 に示す設計条件を用いて算出した設計値、ダミー床版から得られた結果を用いて算出した解析値、および測定結果から応力-ひずみ関係式を用いて直接算出した値でもって、一括して表-4 に示す。

表-3 変化応力の算出条件

	設計条件	解析条件
クリープ係数 ϕ_c	2.0	1.13
乾燥収縮に伴うクリープ係数 ϕ_{sh}	4.0	1.40
乾燥収縮度 $\epsilon_{sh\infty}$	18×10^{-5}	6.0×10^{-5}
弾性係数比 $n = E_s / E_c$	6.0	4.5

表-4 コンクリート床版の変化応力

	設計値		解析値		測定値 ($t=200$)	
	応力	変化率	応力	変化率	応力	変化率
クリープ	4.5	1.00	2.6	0.58	2.2	0.49
乾燥収縮	2.1	1.00	0.8	0.38	1.0	0.43
合計	6.6	1.00	3.4	0.52	3.2	0.48

[引張応力：正 単位： N/mm^2]

これより、設計値は解析値、および測定値に比べてかなり過大評価していることが分かった。また、経時挙動の影響により中間支点部のコンクリート床版には $3.2N/mm^2$ の引張応

力が生じていることが分かった。

6. 結論

本研究では、弾性合成桁橋の経時挙動に着目し、その影響を実験、および解析の両面から評価した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) ダミー床版供試体を用いてクリープ・乾燥収縮に関する諸係数を算出した結果より、現行の道路橋示方書でのこれらの規定値は過大評価していることが分かった。
- (2) コンクリート床版ひずみの解析結果に外気湿度補正を施した結果は測定結果と同様の傾向を示し、湿度の影響が大きいことが認められた。
- (3) 経時挙動に伴う変化応力を算出すると、中間支点部には $3.2N/mm^2$ の引張応力が発生していることが分かった。これは、導入プレストレス量の 38% の損失を意味している。
- (4) 経時挙動解析結果は、測定結果より大きな値を示し、それらはクリープ係数の値に大きく依存することが分かった。

今後の課題として以下のようなことが挙げられる。

- (1) 本研究で示したようなダミー床版供試体を用いた実験を多数行い、プレキャストコンクリート床版のクリープ・乾燥収縮に対する設計用の値を整備する必要がある。
- (2) 解析結果はクリープ係数に大きく依存するため、クリープ係数の正確な評価方法の確立が必要である。
- (3) 実際の橋梁の経時挙動を精度良く予測するためには測定値が大きく影響を受ける温度・湿度等の補正方法の確立も必要である。

【参考文献】

- 1) 栗田章光：回復クリープを考慮した鋼・コンクリート合成桁橋の経時挙動に関する研究、大阪市立大学博士学位論文、1992.9
- 2) A.Kurita, Y.Ushijima, H.Watanabe, H. Nakai : Experimental Study on Creep Coefficient Followed with Shrinkage of Concrete in Steel-Concrete Composite Girder Bridge, Proceeding of the 3rd Korea-Japan Joint Seminar on Steel Bridges pp207 ~ pp216, 1994.12
- 3) 中井 博編：プレキャストコンクリート床版の設計・施工、森北出版、1988.5
- 4) 栗田章光・松本一郎・法堂英記：PC 軌道桁におけるクリープ・乾燥収縮に関する研究、共同研究成果報告書、1994.3
- 5) 中井 博・栗田章光・亀井正博・瀬野靖久：プレキャスト床版を用いた連続合成桁橋におけるクリープ・乾燥収縮性状の計測と解析、土木学会論文集 No.453/VI-17, pp117 ~ 124, 1992.9