

プレキャスト床版を用いた合成桁の クリープ現象に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON TIME-DEPENDENT BEHAVIORS OF CREEP IN
COMPOSITE GIRDERS BY USING PRESTRESSED PRECAST CONCRETE SLABS

* ** *** ****
中井 博 ・ 藤井 学 ・ 渡辺英一 ・ 竹中裕文

By Hiroshi NAKI, Manabu FUJII, Eiichi WATANABE and Hirofumi TAKENAKA

This paper presents an experimental study on time-dependent behaviors of the creep in the composite girders using prestressed precast concrete slabs. Creep and relaxation tests of PS-strands, precast concrete slab panels and composite girders, which consist of those components, were executed to obtain the data for analyzing the linear visco-elastic properties of such kind of composite girders. Based on the series of model tests, various behaviors of creep and relaxation in the composite girders using prestressed precast concrete slabs are discussed in this paper.

1. まえがき

近年、道路橋の急速施工という面からプレキャスト床版と鋼桁とを組合わせた合成桁橋が注目を集めるようになり、種々な開発・研究が進められている。^{1)~5)} とくに、西独、フランス、スイスなどのヨーロッパ諸国および米国においては、プレキャスト床版を用いた合成桁橋の実施例が数多く報告されている。ところが、わが国においてはプレキャスト床版を用いた合成桁橋の実施例は少なく、その力学的特性、とりわけプレストレスを導入するコンクリート床版のクリープ現象に関する実測データはほとんど得られていない。したがって、この種の合成構造物を合理的に設計するためには、クリープ現象についても実測結果に基づき検討しておくことが必要であると考えられる。

本研究は、プレキャスト床版を用いた合成桁を対象として、単純合成桁および連続合成桁のクリープ現象に関する一連の実験的研究^{6)~7)}を行い、クリープの実用的計算手法を試案するために必要な基礎データを得ようとするものである。すなわち、まずコンクリート床版およびP C 鋼線の構造素材単体としてのクリープ、あるいは、リラクセーション現象に関する実験を実施して、実測データを入手し、それぞれのパラメータを分析する。つぎに、コンクリート、P C 鋼線および鋼桁を組み合わせた単純合成桁および連続合成桁に発生する

* 中井 博 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)
** 藤井 学 工博 神戸大学助教授 工学部土木工学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町)
*** 渡辺英一 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)
**** 竹中裕文 工修 (株)春本鐵工所 設計部 (〒551 大阪市大正区南恩加島 6-20-34)

クリープ、あるいは、リラクセーション現象に関する実験を実施して、別途行っている粘弾性解析結果^{9)・10)}と比較し、検討を加えようとするものである。

現在、実験を開始してから約8か月間経過しており、それらの計測データに基づき、上述のプレキャスト床版を用いた合成桁のクリープ・リラクセーション特性について本文は考察するものである。

2. 実験概要

(1) PC鋼線のリラクセーション現象に関する実験

a) 実験目的

今回製作した合成桁模型においては、プレキャスト床版と鋼桁とを合成する前にプレキャスト床版に導入したプレストレスの一部分を合成後に解放し、負の曲げモーメントを発生させて経済性を図るものも含まれている。このような場合のPC線は、プレストレッチされた場合と類似のリラクセーション特性を示すものと思われるが、除荷荷重履歴を伴うPC鋼線のリラクセーション特性については、今まで詳しくは調べられていない。

そこで、この実験では、PC鋼線の構造素材としてのリラクセーション現象を把握するため、以下のような手順に従う実験を行っている。

- 1) 除荷荷重履歴を伴うPC鋼線のリラクセーション特性を、約2年間にわたり計測する。
- 2) 初期緊張の後、一定期間において解放される張力の大きさが、どの程度PC鋼線のリラクセーション特性に影響を与えるかを調べる。

b) 実験装置

実験装置としては、神鋼鋼線工業(株)・技術研究所の図-1に示す自動追尾式リラクセーション試験機を使用している。PC鋼線の両端部をグリップで固定した後、図中の重錘と送錘によって所定の引張荷重を与える。そして、そのときのひずみ ϵ を基準とし、以後のPC鋼線のひずみの変化は、試験片に取り付けられている伸び計と差動トランスとで検出し、サーボモーターにより送錘の位置を自動的に移動して、PC鋼線の引張荷重を調節する。このように、PC鋼線のひずみを常に一定に保持し続けながら荷重の減少量を連続的に記録できるようになっている。なお、これらの試験装置は恒温室の中に設けられており、温度の影響を極力受けないようになっている。

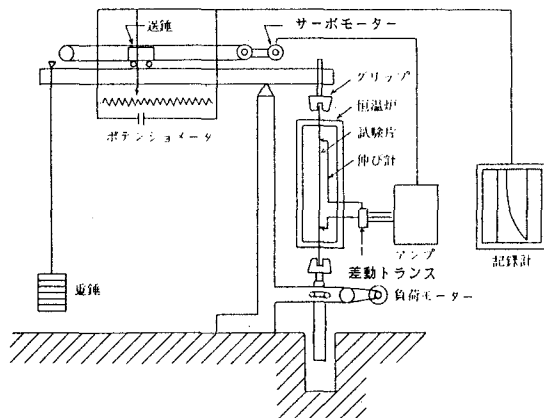


図-1 自動追尾式リラクセーション試験機

c) 実験供試体および実験条件

1) 供試体

プレキャスト・コンクリート床版の橋軸方向のプレストレス導入に使用するPC鋼より線としては、後述の実験に合わせ、かつ実験装置の容量等も考慮して、低リラクセーション材の2.9mm 3本よりのものを対象とした。

2) 試験条件

表-1に示すように、各実験供試体の初期導入引張応力は一定とし、解放応力としては3種類とした。すなわち、初期引張応力としては、PC鋼線の降伏応力の70%に相当する 136.5kgf/mm^2 (1338MPa)で同一とし、

実験供試体PS-1では、この応力のうち68.3kgf/mm²(669MPa)を初期導入から3日後に除荷し、また実験供試体PS-2およびPS-3では、除荷する応力をそれぞれ降伏応力の50%および20%とした。

表-1 各試験体の初期導入引張応力および解放応力

試験体の番号	初期導入引張応力 (kg/mm ²)	解放応力 (kg/mm ²)	解放までの期間 (日)	計測継続期間 年、あるいは、時間
PS-1	136.5	68.3	3	2年間
PS-2	136.5	97.5	3	1000時間
PS-3	136.5	39.0	3	1000時間

$$1\text{kgf/mm}^2 = 9.8\text{N/mm}^2$$

(2) プレキャスト・コンクリート床版のクリープ現象に関する実験

a) 実験目的

プレキャスト・コンクリート床版の単体としてのクリープ現象を調べるため、以下の実験を行っている。

- 1) 一定の持続荷重下で、クリープひずみの時間にわたる変動を計測する。
- 2) 初期導入圧縮応力の一部分をプレストレス導入3日後に解放した場合につき、クリープひずみの経時変動を計測する。
- 3) 乾燥収縮に伴うひずみの経時変動を計測する。

b) プレキャスト床版模型

プレキャスト床版模型の詳細図を図-2に例示する。その寸法は、幅80cm、長さ100cm および厚さ7cm とし、設計基準強度は500kgf/cm²(49MPa)とした。

表-2および表-3には、プレキャスト床版模型のコンクリートの示方配合および材料試験結果を示す。なお、養生は蒸気養生としている。圧縮応力を導入するプレキャスト床版には、応力導入用のPC鋼棒φ-17mmを挿入するため直径26mmのシース4本を20cm間隔に配置して、材齢40日目にプレストレスを与えた。また、PC鋼棒の張力をプレキャスト床版内に均一に分布させるため、図中に示すように、厚さ22mmの鋼板製の支圧板を床版の端部に埋め込むとともに、荷重分配用の治具を取り付けた。そして、これらの実験供試体は、後述する合成桁模型と同一場所に設置した。

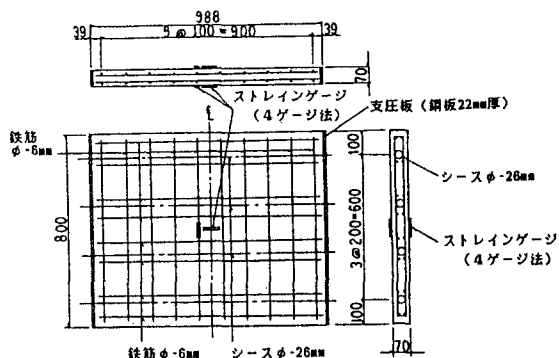


図-2 プレキャスト床版模型の詳細
(S-1およびS-2)

なお、プレキャスト床版模型の側面から水分が蒸発するのを防止し、実橋の床版と類似の状況とするため、その側面にエポキシ系の樹脂を塗装した。

表-2 コンクリートの示方配合

粗骨材 最大 寸法 (mm)	スラ ンプ (cm)	空気量 (%)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m ³) 1kgf/m ³ = 9.8N/m ³				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
					W	C	S	G	NL4000
15	5±1.5	2 ± 1	39	40	179	460	675	1067	12.0

表-3 コンクリートの材料試験結果

プレキャスト 床版のタイプ	材令 7 日			材令 28 日		
	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
MG-1	498	33.2	4.01×10 ⁵	589	38.1	4.34×10 ⁵
MG-2	498	33.2	4.01×10 ⁵	589	38.1	4.34×10 ⁵
MG-3	498	32.9	4.02×10 ⁵	582	38.0	4.34×10 ⁵
MG-4	497	32.6	4.04×10 ⁵	581	38.4	4.32×10 ⁵
MG-5, 6	497	33.0	3.99×10 ⁵	581	38.6	4.32×10 ⁵
S-1	497	33.0	3.99×10 ⁵	581	38.6	4.32×10 ⁵
S-2	497	33.0	3.99×10 ⁵	581	38.6	4.32×10 ⁵
S-3	500	33.1	4.04×10 ⁵	582	38.7	4.31×10 ⁵

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 0.098 \text{ MPa}$$

c) 載荷方法

各プレキャスト床版模型の導入圧縮応力および解放応力等を、表-4に示す。P C 鋼棒の当初の導入張力は、 $P_0 = 11.2 \text{ tf}(110 \text{ kN}) / \text{本}$ とし、その一部を解放する際の除荷荷重は $P_r = 5.6 \text{ tf}(55 \text{ kN}) / \text{本}$ とした。これら張力の導入および解放は、センターホール型の油圧ジャッキによって行った。あらかじめ

表-4 プレキャスト床版の導入・解放応力

プレキャスト 床版のタイプ	供試体数	初期導入圧縮応力 (kgf/cm ²)	解放応力 (kgf/cm ²)	解放までの時間 (日)
S-1	2	80	—	—
S-2	2	80	40	3
S-3	2	—	—	—

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 0.098 \text{ MPa}$$

検定されたロードセル（容量 $15 \text{ tf}(147 \text{ kN})(=2,000 \mu)$ ）で張力を管理している。また、P C 鋼棒の張力は、プレキャスト・コンクリート床版のクリープに伴って徐々に減少するが、その際、減少量が導入軸力 $P_0 = 11.2 \text{ tf}(110 \text{ kN}) / \text{本の} 5\%$ を越えない範囲で、常にP C 鋼棒を再緊張して調整している。

d) 測定方法

コンクリート床版のひずみは、床版の上・下面に接着したメタルベース付きのポリエステルゲージ4枚を4ゲージ法に結線して、長期間にわたるドリフトがなく、小さいひずみ変動でも正確に計測できるように工夫した。また、ゲージの接着やコーティングは、長期間にわたる計測に耐えられるように注意した。

図-2には、これらのストレインゲージの貼付位置を示す。

P C 鋼棒の張力は、端部にロードセルを取りつけて計測している。

(3) 合成桁模型のクリープ現象に関する実験

a) 実験目的

プレキャスト・コンクリート床版、P C鋼線および鋼桁を組み立てた合成桁全体としてのクリープ現象を把握するため合成桁模型を製作し、以下に示すような後死荷重およびプレストレスの導入および解放に伴って生じる模型桁各部の応力や変位を長期間にわたって測定している。

- 1) 合成桁模型の合成前に導入されたプレストレスに伴うクリープひずみ、および、クリープたわみの測定
- 2) 合成桁模型の合成後のプレストレス解放に伴うクリープひずみ、および、クリープたわみの測定
- 3) 合成桁模型に後死荷重を作用させることによって生じるクリープひずみ、および、クリープたわみの測定

b) 模型桁

図-3に模型桁の一般図を示す。
模型桁としては、単純合成桁3体（支間長：5.0m、幅員：0.8m）、および、連続合成桁1体（支間長：7.0m × 2 = 14.0m、幅員：0.8m）を製作した。

表-5および表-6には、鋼材、ならびに、プレキャスト床版の継目およびジベル孔に充填した無収縮モルタルの材料試験結果を示す。

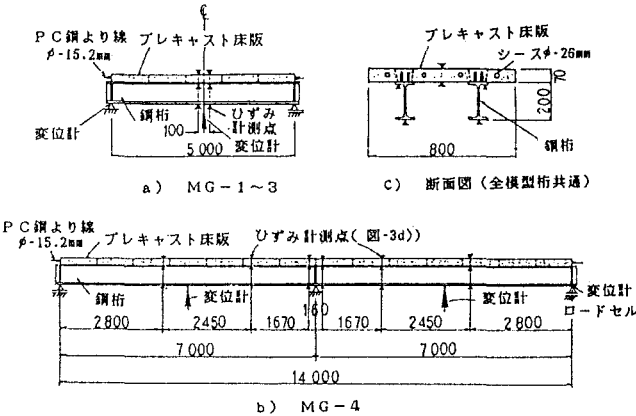


図-3 模型桁の一般図

表-5 鋼材の材料試験結果

$1\text{kgf/mm}^2 = 9.8\text{N/mm}^2$

材質	寸 法	降伏点 (kgf/mm^2)	引張強度 (kgf/mm^2)	伸率 (%)
SS41	H-200x100 X5.5x8	44	51	21

表-7 模型桁の種類と基本諸元

模型桁 のタイプ	模型桁の 構造形式	支間 (m)	プレストレス導入・解放による プレキャスト床版の応力度 または、後死荷重の荷重強度	計測項目・点数		
				ひずみ	変位	反力
MG-1	単純合成桁	5.0	導入プレストレス 80kgf/cm^2	8	3	-
			後死荷重 0.5tf/m			
MG-2	単純合成桁	5.0	導入プレストレス 80kgf/cm^2	8	3	-
MG-3	単純合成桁	5.0	導入プレストレス 80kgf/cm^2	8	3	-
			解放プレストレス 40kgf/cm^2			
MG-4	連続合成桁	7.0	導入プレストレス 80kgf/cm^2	24	6	6
		X2=14.0	後死荷重 0.5tf/m			

$1\text{kgf/cm}^2 = 0.098\text{MPa}$

表-6 無収縮モルタルの材料試験結果

$1\text{kgf/cm}^2 = 0.098\text{MPa}$

使用箇所	圧縮強度 (kgf/cm^2)	弾性係数 (kgf/cm^2)
継目	498	2.47×10^5
ジベル孔	513	2.37×10^5

c) 載荷方法

表-7には、各模型桁の導入および解放プレストレス量、ならびに後死荷重の荷重強度等を示す。模型桁MG-1およびMG-4では、合成前にプレキャスト床版に導入したプレストレスを解放せずにそのままとし、合成後にカウンターウェイトによる等分布荷重 ($w_d = 0.5 \text{ tf/m}$ (49kN), 1主桁当たり) を載荷した。模型桁MG-2では、合成前にプレキャスト床版に導入したプレストレスを合成後も解放せずそのままとし、後死荷重は無載荷とした。一方、模型桁MG-3では合成前に導入したプレストレスの半分の解放した。

d) 測定方法

図-3には、各模型桁のひずみ、および、変位の計測点の位置を示す。模型桁各部のひずみは、模型桁の支間中央に関して対称にストレインゲージを貼付し、全て4ゲージ法によって計測している。また、模型桁のたわみは、支間中央および支点にストレインゲージ型の変位計を設置して計測している。

3. 実験結果

(1) PC鋼線のリラクセーション現象に関する実験結果

図-4には、実験供試体PS-1の張力減少率と時間との関係を示す。初期ひずみを与えてから現在まで約9か月経過しているが、0.4%の張力が減少しているのがわかる。

引張応力が降伏応力の70%で除荷荷重履歴のないものは、約1.2%低下しており、実験供試体PS-1のリラクセーション率は、除荷荷重履歴のないものの約1/3である。

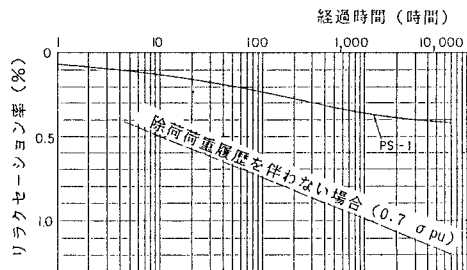


図-4 除荷荷重履歴を伴うPC鋼線のリラクセーション

(2) プレキャストコンクリート床版のクリープ現象に関する実験結果

図-5には、プレキャスト床版模型のひずみの変化を示す。これらのデータは、プレストレス導入後8ヶ月程度のものであるが、実験供試体S-1では 70×10^{-6} のクリープひずみが発生しており、これはプレストレス導入時の弾性ひずみの約40%に相当する。また、実験供試体S-2ではプレストレスを除荷した後のコンクリートひずみはほとんど変化せず、どちらかという減少する傾向がみられる。

なお、PC鋼棒の張力は、図-6に示すようにプレストレス導入直後にはかなり減少するが、張力の調整および部分解放後はあまり減少していず、プレストレス導入当初は、10日あまりで5%程度の張力の減少がみられるものの、その後は、150日経過後に5%程度の減少が生じていた。

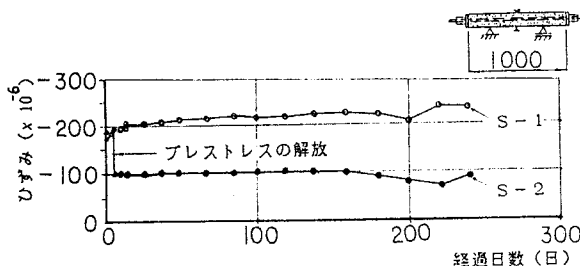


図-5 プレキャスト床版単体のひずみの経時変化

(3) 合成桁模型のクリープ現象に関する実験結果

a) 模型桁各部のひずみの変化

図-7には、単純合成桁模型各部のひずみの変化を示す。合成後死荷重・重荷の後、あるいは、プレストレスの一部分解放の後のひずみの変化に着目すると、約8か月経過後には、模型桁MG-1およびMG-2では鋼桁上フランジに約400kgf/cm²(39MPa)の圧縮応力が生じているものの、下フランジではさほど変化がみられず30~50kgf/cm²(2.9~4.9MPa)の引張応力が発生している。これらは、後死荷重、あるいは、プレキャスト床版へのプレストレスに伴うクリープ応力と考えられる。

また、模型桁MG-3では、プレストレスの一部分解放によって生じた鋼桁上フランジの引張応力および下フランジの圧縮応力が徐々に減少しており、これはプレキャスト床版内に残存している圧縮力に伴うクリープによるものと考えられる。プレストレス解放後からの上フランジの応力の変化をみると、約200kg/cm²(20MPa)の圧縮応力が生じており、これは模型桁MG-1およびMG-2の50%に相当している。一方、下フランジでは約80kg/cm²(7.8MPa)の引張応力が生じており、模型桁MG-1およびMG-2よりも大きな値を示している。

一方、図-8には、連続合成桁模型MG-4のひずみの変化を示す。この模型桁MG-4においても後死荷重およびプレキャスト床版へのプレストレスに伴うクリープ応力が発生している。カウンターウェイト・載荷後からの各計測点のひずみの変化をみると、支間の0.4L点では鋼桁上フランジの圧縮応力が約400kgf/cm²(39MPa)増大しているが、下フランジではほとんど変化がない。

そして、0.75L点では鋼桁上フランジで約200kgf/cm²(20MPa)、下フランジで80kgf/cm²(7.8MPa)の圧縮応力が発生し

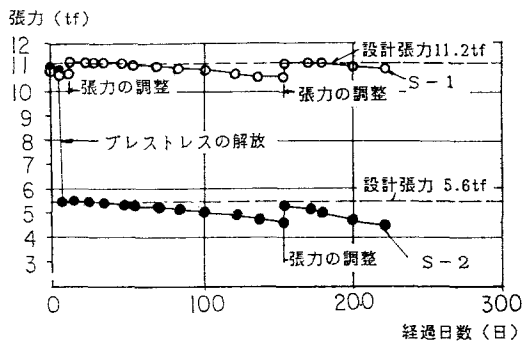
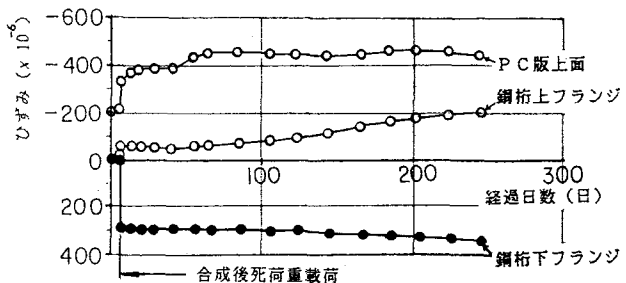
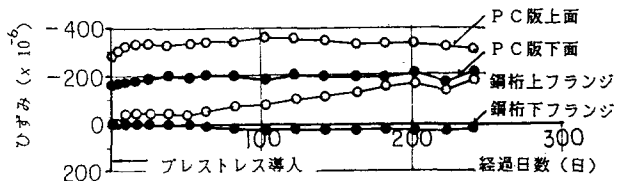


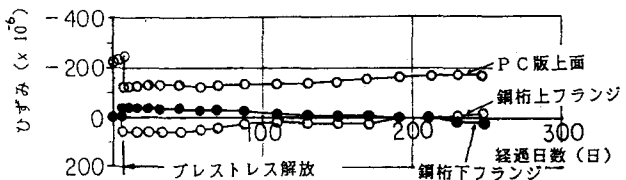
図-6 PC鋼棒の張力の経時変化



(a) MG-1



(b) MG-2



(c) MG-3

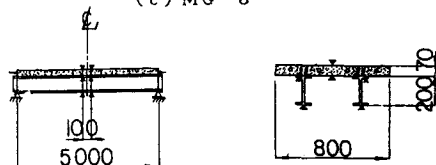


図-7 単純合成桁模型のひずみの経時変化

ている。また、上述の支間の0.4L点の応力の変化とは異なり下フランジの応力は上フランジのそれに追隨してクリープ応力が増大を続けている。この計測点では後死荷重による曲げモーメントがほぼ0であるので、発生した応力はプレキャスト床版へのプレストレスに伴うものが大部分であるためと考えられる。

さらに、中間支点付近の計測点では、合成後死荷重載荷後、約8か月经過後の後鋼桁上フランジに約 150kgf/cm^2 (15MPa)の引張応力が、また鋼桁下フランジには約 200kgf/cm^2 (20MPa)の圧縮応力が発生し、徐々にではあるが増大している。

b) 模型桁のたわみの変化

図-9には、プレストレス解放後、あるいは、カウンターウェイト載荷後からの各模型桁の支間中央のたわみの変化を示す。模型桁MG-1およびMG-2では約 $3.0\sim 3.5\text{mm}$ たわみが増大している。この結果は上述した応力の変化と比較的よく対応する傾向にある。

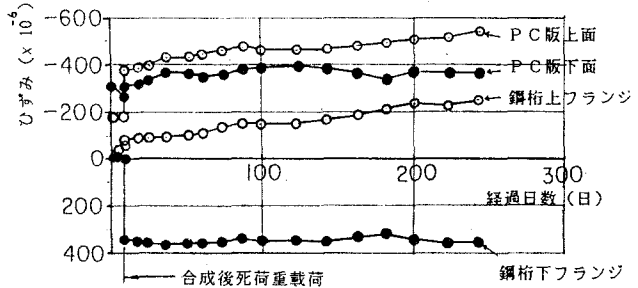
つぎに、模型桁MG-3ではプレストレス解放後8か月经過後、約 1.6mm の下方へのたわみが生じ、プレストレスの解放によって生じた上方へのたわみ 1.6mm が失われている。

また、模型桁MG-4においては、合成後死荷重載荷後から約 3.9mm たわみが増大しており、今後も増大していく傾向がみられる。

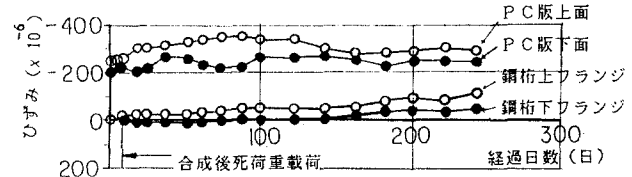
4. 実験結果の考察

図-10～12には、連続合成桁模型MG-4について、別途行っている解析結果と実測値の比較例を示す。

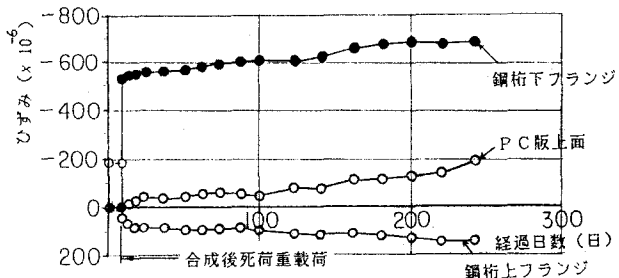
図-10および図-11は、それぞれ連続合成桁模型MG-4の中間支点付近におけるプレキャスト床版下面および鋼桁下フランジ下縁のひずみの変動を示したものである。これらの図は、実験開始



(a) 計測断面①



(b) 計測断面②



(c) 計測断面③

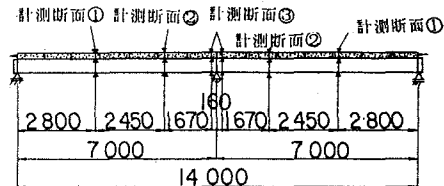


図-8 連続合成桁模型のひずみの経時変化

から約3か月後までのものを示しているが、実測値と解析値の傾向はほぼ一致していることがわかる。

つぎに、図-12は、支間中央のたわみの経時変化を示したものである。この図から解析値と実測値とがよく一致する傾向にあることがわかる。

なお、ここには連続合成桁模型MG-4について比較例を示したが、単純合成桁模型MG-1、MG-2およびMG-3についても同様の結果が得られているので、⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ここでは省略した。

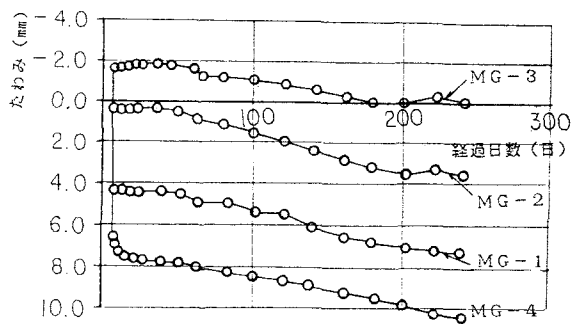


図-9 各模型桁のたわみの経時変化

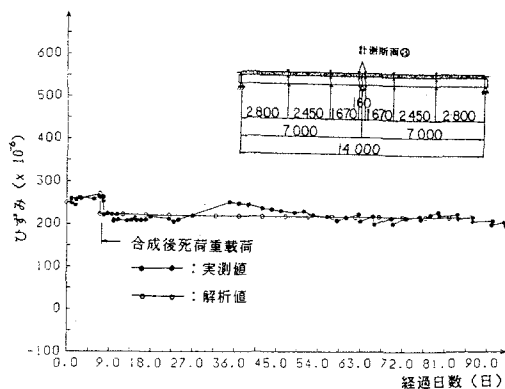


図-10 模型桁MG-4のプレキャスト床版
下面のひずみの経時変化

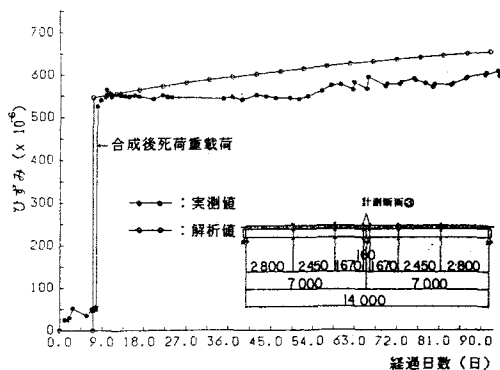


図-11 模型桁MG-4の鋼桁下フランジ
下縁のひずみの経時変化

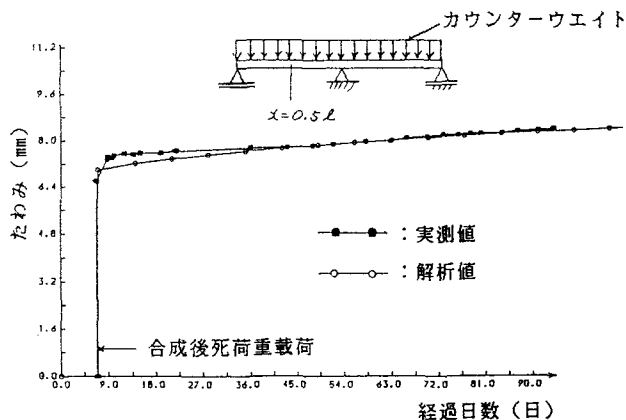


図-12 連続合成桁模型MG-4の支間中央におけるたわみの比較

5. まとめ

上述の各模型桁のクリープ現象の測定は現在も続行中であるが、これまでに明かになったことをまとめると、以下のとおりである。

- (1) プレキャスト床版単体のクリープひずみは、荷重を与えてから8か月を経過後でも初期ひずみの約40%程度であった。
- (2) プレストレスの半分を解放した実験供試体・プレキャスト床版S-2では、残存している圧縮応力に伴うクリープひずみがみられなかった。
- (3) 除荷荷重履歴を伴うP C鋼線の9か月間のリラクセーション率はそれを伴わないものの約1/3であった。
- (4) 各合成桁模型のクリープ応力およびたわみは、別途行っている粘弾性学に基づく解析値とは傾向がほぼ一致することがわかった。
- (5) プレキャスト床版単体のクリープひずみが小さいにもかかわらず、これを用いた合成桁のクリープひずみが比較的大きいのは、プレキャスト床版と鋼桁とを結合しているスタッド付近の応力集中が大きいこと、および、充填材料のクリープ等の諸影響があるものと考えられる。

謝 辞

本研究は、文部省科学研究費（試験研究-1）の補助を受けて行っているものである。なお、P C鋼より線のリラクセーション試験は神鋼鋼線工業（株）・技術研究所の自動追尾式リラクセーション試験機で行っており、御協力で深謝する。

参考文献

- 1) 土木学会関西支部共同研究グループ：プレキャスト床版を用いた合成桁橋の耐荷性の実用化に関する研究、報告書（1）、昭和60年 6月
- 2) 土木学会関西支部共同研究グループ：プレキャスト床版を用いた合成桁橋の耐荷性の実用化に関する研究、報告書（2）、昭和61年 6月
- 3) 中井 博・岸田博夫・竹中裕文：プレキャスト床版を用いた合成桁の耐荷性に関する実験的研究、土木学会構造工学論文集、Volume 31A、pp.395~408
- 4) 中井 博・竹中裕文・喜田 浩：プレキャスト床版を用いた合成桁の自動車走行のもとにおける耐久性の実験的研究、土木学会構造工学論文集、Volume 32A、pp.82 ~92
- 5) Takenaka, H., Kishida, H. and Nakai, H. :A Study on New Composite Girder using Prestressed Precast Concrete Slab by PPCS Method, Der Stahlbau, Heft 6, 1986, s.165-174
- 6) 中井博、藤井学、渡辺英一、竹中裕文：プレキャスト床版を用いた連続合成桁のクリープ現象に関する実験的研究、昭和61年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集、I-78、昭和61年5月
- 7) 中井博、藤井学、渡辺英一、竹中裕文：プレキャスト床版合成桁のクリープ・リラクセーション現象に関する実験的研究、昭和61年度土木学会年次学術講演会講演概要集、I-216、昭和61年5月
- 8) Niwa, Y., Nakai, H., Watanabe, E. and Yamada, I.:On Long-Term Behavior of Cables in Cable-Stayed Bridges, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.3, No.1, pp.373-382 April 1986
- 9) 林圭一、丹羽義次、渡辺英一、Luiza H. Ichinose :合成構造物クリープ・リラクセーションに関する基礎的考察、昭和61年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集、I-77、昭和61年5月
- 10) 中井博、渡辺英一、竹中裕文、林圭一：プレキャスト床版合成桁の経時挙動の理論的解析法について、昭和61年度土木学会年次学術講演会講演概要集、I-218、昭和61年11月

(1986年10月17日受付)