

有ヒンジPC箱けた橋の応力開放法による プレストレス推定と中央ヒンジ部の異常たわみ原因の推定

Presumption of Prestress and Cause of Large Displacement
in Center Hinge P C Box Girder by Released Stress Method

肥田 研一*、神野 人志**、永吉 竜二**、高橋 洋一***、出水 享****

Kenichi Hida、Hitoshi Kamino、Ryuji Nagayoshi、Yoichi Takahashi、Akira Demizu

*正会員(株)千代田コンサルタント西日本地区橋梁保全部長 (〒812-0041 福岡市中央区大名1丁目)

**正会員(株)千代田コンサルタント鹿児島支店技術部構造課 (〒890-0064 鹿児島市鴨池新町21-7)

***正会員(株)計測リサーチコンサルタント九州事業部事業部長 (〒812-0007 福岡市博多区東比恵2丁目)

****正会員(株)計測リサーチコンサルタント九州事業部 (〒812-0007 福岡市博多区東比恵2丁目)

昭和54年に建設された有ヒンジPC箱けたラーメン橋の中央ヒンジ部に異常たわみが生じている。本論文では、この異常たわみの原因を推定するために、応力開放法である鉄筋切断法およびスロットストレス法を用いて開放ひずみを計測することにより、死荷重時の応力状態及び、残存プレストレス量の推定を行った。

さらに、PC橋梁に配置された鉄筋にはクリープ・乾燥収縮ひずみが作用していることから、鉄筋切断法により得られたひずみを用いてクリープ係数を推定し、このクリープ係数から中央ヒンジ部の建設時から現在までのたわみ量を解析により求めた。この結果、本橋梁に生じている異常たわみは、クリープによる影響が主因であることを確かめた。

1. まえがき

対象とする橋梁は、昭和54年に建設された山間部に位置する3径間有ヒンジPC箱けたラーメン橋であり、中央ヒンジ部に異常なたわみが生じている。既存の有ヒンジPC橋の一部には、数十年経過すると中央ヒンジ部に大きなたわみの発生に加え、中央ヒンジ部の支承であるゲレンク沓の磨耗による段差および衝撃音や振動が発生するなどの現象が見受けられる。本橋梁では、建設時より追跡調査が行われており、図-1に示すように中央ヒンジ部のたわみは、昭和61年に200mm程度、平成5年に240mm程度であり、平成15年には300mmのたわみ量になる経過をたどっている。

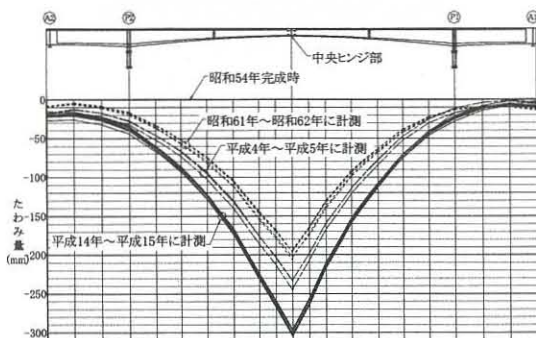


図-1 異常たわみ計測結果

本論文は、応力開放法による死荷重時の応力状態の測定および解析を行い、プレストレスおよびクリープ係数の推定を行い、中央ヒンジ部の異常たわみ現象を解明したものである。

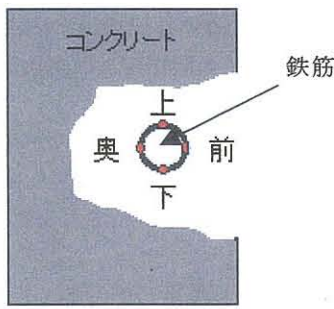
2. 応力開放法による死荷重時の応力測定

応力開放法とは、元来、鉱山業界で岩盤等に作用する応力を測定する方法として開発されたものである。この方法は、金属やプラスチックにも用いられている。応力開放法の原理は単純である。測定対象物にスリットやオーバーコアなどで応力を開放し、開放されたひずみやたわみを測定することで応力開放前の初期応力を算出する方法である。代表的な測定方法を挙げると、孔径変化法、孔壁ひずみ法、円錐孔底法などがある。今回用いた応力開放法は、これらの手法をコンクリート構造物用に応用・開発したものであり、鉄筋応力は鉄筋切断法を、コンクリート応力は、スロットストレス法を用いて死荷重時の応力測定を行った。

2.1 鉄筋切断法

鉄筋切断法とは、計測対象の鉄筋にひずみゲージを貼付し、同鉄筋を切断することにより現在作用している応力を測定する方法である。

手順は、鉄筋探査器で計測対象鉄筋位置の特定を行い、ハンドブレーカーで鉄筋をはつり出し、はつり出した鉄筋にひずみゲージを貼付する(図-2、写真-1)。そして、鉄筋切断(写真-2)前後ひずみの測定を行うことで開放されたひずみを計測する。切断された鉄筋は、特殊接続金具を用いて機械的に接続したのち(写真-3)、ポリマーセメントモルタルで断面修復を行う¹⁾。はつり出しによる鉄筋への曲げ等の影響を考慮して、1断面に4箇所ゲージを貼付し、軸方向、曲げひずみを分離しひずみを測定した。また、はつり出された鉄筋を溶接で接続すると鉄筋に降伏応力を超える熱応力が発生するため、この問題を解決するために開発された特殊接続金具で鉄筋を接合した¹⁾。(写真-3)



● ひずみゲージ
図-2 ゲージ貼付位置(断面)

2. 2 スロットストレス法

スロットストレス法とは、図-3に示すように計測対象位置にフラットジャッキ挿入用のスロットを削孔し、削孔穴にフラットジャッキを挿入し、加圧することにより所定の検長区間が開放前の変位量となった時点での応力を現有応力とする方法である。

手順は、計測対象位置に鉄筋がないことを鉄筋探査器により確認し削孔位置を定め、変位計を取り付ける。そして削孔およびスリット(写真-4、5)を作成する。(終了後、開放変位量を読み取る)。同部にフラットジャッキ(写真-6)を挿入し開放前の変位量となるまで加圧し、押し戻す力と表面変位の関係から開放時に生じた変位に相当する作用応力を算出する。

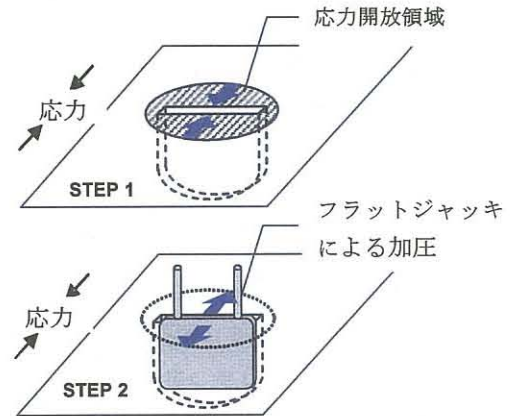


図-3 スロットストレス法による測定原理



写真-1 ゲージ貼付状況



写真-2 鉄筋切断状況



写真-3 接続治具設置完了



写真-4 スロット削孔状況

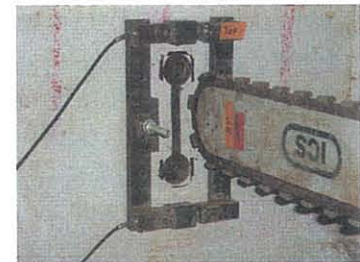


写真-5 削孔完了時

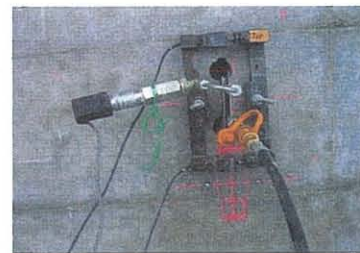


写真-6 フラットジャッキ挿入状況

有ヒンジPC箱けた橋の応力開放法によるプレストレス推定と中央ヒンジ部の異常たわみ原因推定

圧縮応力の場合、図-3 に示すように、切削したスロット両端間距離は縮まり、これを初期状態に戻すのに要した圧力はスロットと直角方向の圧縮応力と密接に関係している。フラットジャッキで数回の加圧/減圧を行うことで、図-4 に示すように圧力と標点間距離の傾きを求め、コンクリートに作用している圧縮応力は、式(1)により求めることが出来る。

$$\sigma_0 = F/D = A_j \cdot S \cdot (d_0 - d_s) / D \quad (1)$$

ここに、

- σ_0 : コンクリートの死荷重時の応力 (N/mm²)
- F : フラットジャッキで与えた力 (N)
- D : 応力拡大係数 (mm²)
- A_j : フラットジャッキの受圧面積 (mm²)
- S : フラットジャッキ圧力と変位との関係の傾き (= $\Delta P / \Delta d$) (N/mm² / mm)
- ΔP : フラットジャッキの圧力変化量 (N/mm²)
- Δd : 標点間変化量 (mm)
- d_0 : 応力解放前標点間距離 (mm)
- d_s : 応力解放後標点間距離 (mm)

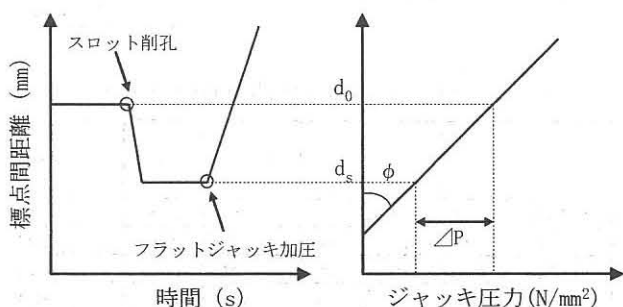
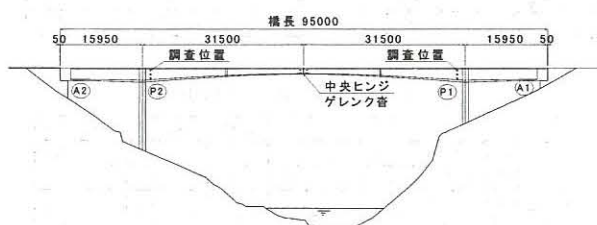


図-4 標点間距離の変化とジャッキ圧力の関係



(a) 概略図

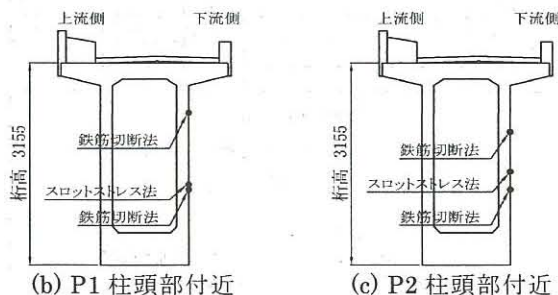


図-5 調査位置図

係数Dは、フラットジャッキで与えた力(F)とその面に作用していた応力度 (σ_0) との関係を表す係数で、これを応力拡大係数と呼ぶこととする。応力拡大係数は、削孔したコンクリート断面形状とフラットジャッキの寸法によって決まる定数で、スロットの形状を正確に削孔し、同一形式のフラットジャッキを正確にセットした場合一定を示すと考えている。

2. 3 測定位置

鉄筋切断法、スロットストレス法は、図-5 に示すように、中央径間側の P1、P2 柱頭部付近で行った。

2. 4 測定結果

表-1 に鉄筋切断法とスロットストレス法の測定結果を示す。図-2 を見て分かるように、奥のゲージは、スペースが狭く、正確にゲージが貼付できないことが考えられ、安定した値を得ることができなかった。そのため奥のデータを除く上下前の平均値を測定値として採用した。

3. プレストレスとクリープ係数の推定

3. 1 概要

プレストレスとクリープ係数は、応力開放法である鉄筋切断法とスロットストレス法により推定した。鉄筋切断法による開放ひずみは、自重・プレストレスによるひずみ+クリープ・乾燥収縮によるひずみである¹⁾。次にスロットストレス法は、コンクリート部の現有応力を測定するものであり²⁾、自重およびプレストレスからなる死荷重時の応力を測定するものである。

このため、鉄筋切断法の開放ひずみとスロットストレス法の開放ひずみの差が、実際に作用しているクリープ・乾燥収縮によるひずみと考えることができる³⁾。

鉄筋切断法によって測定される開放ひずみは、式(2)に示すように死荷重時(自重+プレストレス)の弾性ひずみとコンクリートのクリープ・乾燥収縮によるひずみが鉄筋に作用している。

$$\epsilon_r = \epsilon_e + \epsilon_c + \epsilon_s \quad (2)$$

表-1 測定結果

	ゲージ位置	P1柱頭部付近		P2柱頭部付近	
		上側	下側	上側	下側
鉄筋切断法による鉄筋ひずみ (μ)	上	1021	1118	994	1017
	下	1232	1438	1152	1200
	前	1282	1124	1065	1313
	奥	657	307	919	-24
	平均 (奥含む)	1048	997	1033	877
	平均 (奥除外)	1178	1227	1070	1177
スロットストレス法による応力 (N/mm ²)		10.7		7.9	

ここに、 ϵ_r : 鉄筋切断法による測定ひずみ
 ϵ_e : 死荷重時の弾性ひずみ ($=\sigma_{cd}/E_c$)
 ϵ_c : クリープによるひずみ
 ϵ_s : 乾燥収縮によるひずみ
 σ_{cd} : 計測位置での死荷重時 (自重+プレストレス) のコンクリート応力 (N/mm^2)
 E_c : コンクリートの静弾性係数 (N/mm^2)

カンチレバー施工されたPC箱けたのクリープひずみは、施工段階と完了後の経時変化において複雑な動きをする。しかし、中央ヒンジ部の異常たわみの原因を推定するために、計測されたクリープひずみは、計測された弾性ひずみに比例すると仮定すると、スロットストレス計測位置での鉄筋開放ひずみは、式(3)の通りとなる。

$$\epsilon_r = \epsilon_e \cdot (1 + \phi) + \epsilon_s \quad (3)$$

$$\epsilon_c = \epsilon_e \cdot \phi$$

ここに、 ϕ : クリープ係数である。

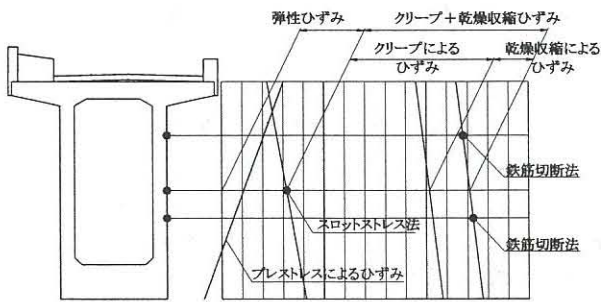
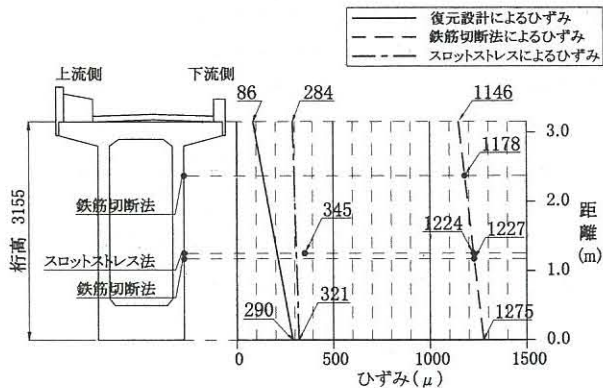
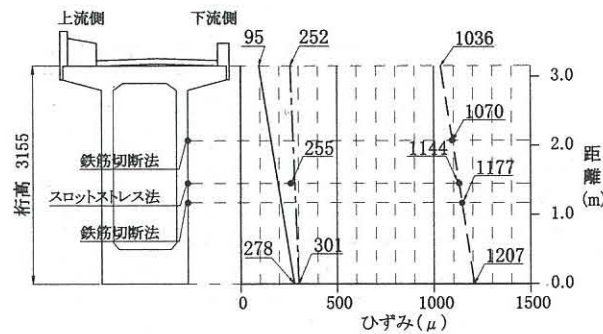


図-6 プレストレス推定の概念図



(a) P1橋脚部調査結果



(b) P2橋脚部調査結果

図-7 死荷重時のひずみ分布

肥田、神野、永吉、高橋、出水 :

式(3)より、乾燥収縮ひずみを仮定すれば計測結果よりクリープ係数を求めることができる。

図-6は、断面に作用しているひずみ分布の概念である。クリープ係数は断面で一定と仮定すれば、死荷重時の弾性ひずみの分布が求められる。この死荷重時の弾性ひずみの分布から自重応力分布を差し引くことによりプレストレスを把握することができる。

3.2 クリープ係数の推定

中央ヒンジ部の異常たわみの原因を推定する目的から、断面に作用するクリープ係数は一定であると仮定し、弾性ひずみであるスロットストレス法によるひずみと鉄筋切断法による開放ひずみより求められるクリープひずみより、式(4)でクリープ係数を算定することができる。

表-2 クリープ係数の推定値

		ϵ_r	ϵ_e	ϵ_s	ϵ_c	ϕ
スロット	P1橋脚柱塔部	1224	345	150	729	2.11
スレス位置	P2橋脚柱塔部	1144	255	150	739	2.90
	平均					2.51

表-3 P1, P2 橋脚柱頭部の弾性ひずみ分布

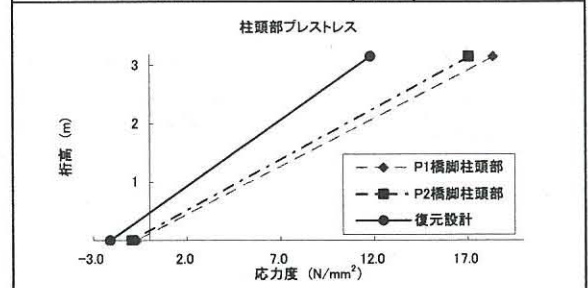
		ϵ_r (μ)	ϵ_s (μ)	ϵ_{c+e} $=\epsilon_r - \epsilon_s$ (μ)	ϕ	$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c+e}}$ (μ)
P1橋脚柱塔部	上縁	1146	150	996	2.51	284
	下縁	1275	150	1125	2.51	321
P2橋脚柱塔部	上縁	1036	150	886	2.51	252
	下縁	1207	150	1057	2.51	301

表-4 復元設計による死荷重時の応力

	P1橋脚柱塔部付近		P2橋脚柱塔部付近	
	応力度 (N/mm^2)	ひずみ (μ)	応力度 (N/mm^2)	ひずみ (μ)
主けた上縁	2.68	86	2.94	95
主けた下縁	8.99	290	8.62	278

表-5 プレストレスの推定

応力開放法によるプレストレス		単位	上縁応力	下縁応力
	P1橋脚	死荷重時のひずみ (ϵ_d)	μ	284
P2橋脚	死荷重時の応力 ($\sigma_{d+p} = \epsilon_e \cdot E_c$)	N/mm^2	9.2	10.4
	自重 (σ_d)	N/mm^2	-9.2	11.1
	プレストレス ($\sigma_p = \sigma_{d+p} - \sigma_d$)	N/mm^2	18.4	-0.7
復元設計によるプレストレス	死荷重時のひずみ (ϵ_d)	μ	252	301
	死荷重時の応力 ($\sigma_{d+p} = \epsilon_e \cdot E_c$)	N/mm^2	8.2	9.8
	自重 (σ_d)	N/mm^2	-8.9	10.7
	プレストレス ($\sigma_p = \sigma_{d+p} - \sigma_d$)	N/mm^2	17.1	-0.9
	復元設計によるプレストレス	N/mm^2	11.8	-2.1
	コンクリートの静弾性係数	N/mm^2	32,500	



ている⁵⁾。さらに、鉄筋コンクリート梁供試体の強度試験結果は、アルカリ骨材反応が生じている供試体と健全な供試体の曲げ強度、せん断強度の差異は見られなかったと報告している⁵⁾。本橋梁では写真-7に示すようなひび割れが発生しておりアルカリ骨材反応が発生している可能性が高いといえる。なお、アルカリ骨材反応に関しては調査を実施しており別の機会に報告する予定である。

上記のことを考慮して、静弾性係数を低減させてたわみ量を解析した。その結果が表-7である。静弾性係数が低下した場合の解析値のたわみ量は約360mmになった。このことから、クリープによるたわみ増加はほぼ収束しているが、静弾性係数が低下することにより、たわみ量は260mmから現在の300mm(+40mm)まで進行し、この後も360mm(+60mm)に向かって進行する可能性があることが推測される。したがって、静弾性係数の低下が原因である時期より、たわみは進行したものと推測される。

以上より、本橋梁の異常たわみは、想定以上のクリープによる影響が主因であり、静弾性係数の低下も異常たわみの一因であると推定される。静弾性係数の低下が進行すれば中央ヒンジ部のたわみも今後進行する可能性もあると考えられる。



写真-7 主けたのひび割れ状況

表-7 中央ヒンジ部のたわみ
(静弾性係数が低下した場合)

静弾性係数 E (N/mm ²)	2.16×10 ⁴	3.10×10 ⁴
弾性たわみ	68 mm	49 mm
クリープたわみ	242 mm	165 mm
オーバーレイによるたわみ	5 mm	5 mm
支点沈下によるたわみ	41 mm	41 mm
合計	356 mm	260 mm

5. まとめ

今回の検討結果を以下に示す。

- 1) 応力開放法である鉄筋切断法およびスロットストレス法を組み合わせることにより、PC橋のプレストレス及びクリープの影響を推定することができた。

肥田、神野、永吉、高橋、出水：

- 2) プレストレス量およびクリープ係数の推定結果から中央ヒンジ部のたわみ挙動の経年変化を再現することができた。
- 3) プレストレス、クリープ係数および中央ヒンジ部のたわみ挙動から本橋梁に発生していた中央ヒンジ部の異常たわみの主因は、想定以上のクリープであることを推定できた。
- 4) 本橋梁では、静弾性係数の低下が確認され、静弾性係数の低下も異常たわみの一因であることが推測された。この静弾性係数の低下は、アルカリ骨材反応の疑いがあり、今後たわみが増加する懸念があると推測される。

有ヒンジPC箱けた橋の応力状態を把握した事例は少なく、今回、精度等の種々の問題は含むが、仮定のもとで応力開放法により死荷重時の応力状態とクリープひずみを把握する一例を示すことができた。これは、応力開放法による測定結果は、種々の情報が含まれており、PC構造物に作用している死荷重時応力状態とクリープ・乾燥収縮ひずみ状態を精度良く把握できる可能性を示唆していると考えられる。このため、応力開放法の計測精度の向上および鉄筋開放ひずみからのクリープ・乾燥収縮ひずみ推定方法の精度向上等の課題に研究を進め、別の機会に報告したい。

なお、本橋梁では、今後、劣化の進行が予想されるため、異常たわみの抑制と劣化の抑制を図っていくための対策工法の検討を実施することとなっている。

参考文献

- 1) 中井督介ほか：PC構造物のはつりおよび断面修復に関する実験的検討，第13回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム，PP.495-500，2004
- 2) 浅井洋ほか：フラットジャッキを併用した応力解放法によるコンクリート部材の現有応力測定，コンクリート工学，VOL.42，No.4，PP.26-32，2004
- 3) 横山和昭ほか：鉄筋切断法による実PC橋の残存プレストレス測定に関する検討，第13回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム，PP.501-504，2004
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書構造性能照査編，PP30，2002
- 5) 村角保行ほか：アルカリ骨材反応が生じた鉄筋コンクリート部材の物性確認試験と部材試験，コンクリート工学年次論文，Vol.27，No2，PP.1-6，2005

(2005.7.1 受付)