

PCT桁橋の桁下面に発生した縦ひび割れ原因に関する解析的検討

(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 ○櫻井 義之
 (一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 國富 康志
 (一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 谷口 秀明
 (独)土木研究所構造物メンテナンス研究センター 木村 嘉富

Abstract : Cracks along the PC cable are often seen in the PCT girder built before around the 1980s. Some cables are anchored to the upper side of the girder. It has been pointed out that the relevance of the incomplete PC grout and crack. But cracks occur even if complete PC grout. Therefore a generating factor has not yet resulted by the elucidation. This paper reports that a difference in the thermal expansion coefficient of concrete and Grout had comparatively big influence, as a result of making an attribution analysis by FEM on a longitudinal crack of girder's the lower side.

Key words : Longitudinal Crack , Swelling Pressure , Thermal Expansion Coefficient , FEM

1. はじめに

プレストレストコンクリート橋（以下、PC橋と示す）は、高強度コンクリートを使用し、さらにはプレストレスを導入することで高耐久の性能が得られる構造物である。しかし、その一方で、道路橋の定期点検結果に基づく分析¹⁾によると、国内のポストテンション方式PC橋において、架橋数の最も多いPCT桁橋（T桁のPC橋で、以下PCT桁橋と略す）に着目した場合、桁下面の縦ひび割れが際立って発生している。このひび割れは、ウェブ側面の斜めひび割れとともに、シースに沿ったひび割れであり、グラウトの充填不足がある場合には、シース内への水の侵入に起因してひび割れが発生すると考えられる。しかし、桁下面の縦ひび割れとウェブ側面の斜めひび割れが発生したPCT桁橋の撤去桁を用いて切断調査を行った結果、桁下面の縦ひび割れが発生している部位においても、PCグラウトが概ね充填されていた²⁾。そこで、本稿では、撤去桁の調査から得られた条件（かぶりや施工時期など）のもと、桁下面の縦ひび割れを対象に解析的なアプローチによってひび割れ発生原因の解明を試みた。

なお、本検討は、筆者らが所属する両機関の共同研究「撤去橋梁を用いた既設PC橋の診断技術高度化に関する研究」の一環として行ったものである

2. 撤去桁の切断調査結果

2. 1 橋梁概要

対象橋梁は1961年に架設されており、経年劣化による老朽化と幅員の変更によって、架設後48年目（2009年）に架替が行われた。橋梁概要を表-1に、撤去前の状況を写真-1に示す。ここで、竣工年月より、緊張作業およびグラウト注入は冬季に行われたと推測される。

表-1 対象橋梁の諸元

橋名	植苗橋
所在地	北海道苫小牧市（海岸より10km）
構造形式	2径間単純ポストテンT桁橋
橋長	38.0m (2@18.3m)
荷重	TL-14
有効幅員	5.5m
竣工年月	昭和36年3月（1961年）



写真-1 対象橋梁の全景（上流側より撮影）

2. 2 損傷状況

対象橋梁は2径間5主桁で構成されていたが、撤去桁として入手した第一径間G2桁とG5桁についての調査結果²⁾によると、それぞれの桁の損傷状況は、ひび割れ量に多少の差はあるものの、両桁において桁下面の縦ひび割れと、ウェブ側面の斜めひび割れが発生しており、部分的にエフロレッセンスの発生や水しみ跡が確認された。ただし、サビ汁の発生は確認されていない。

2. 3 調査結果

(1) 桁切断調査

切断調査において、切断面よりシース位置(かぶり)を直接確認している。そこで、本稿で検討対象となる桁下面のみに着目し、シース配置位置と縦ひび割れ発生状況の関係、および各断面でのかぶりに関して、切断調査結果を図-1に示す。本橋のPCケーブルはC1~C4ケーブルが上縁定着ケーブル、C5~C8ケーブルが端部定着ケーブルであり、ともに桁端部に向かって曲げ上げられているが、このうち最下段で直線配置される部分の投影をシース配置位置(設計かぶりは40mm)として図示した(G2桁A1側)。図-1より、桁下面の縦ひび割れは、全体的にシースに沿っていることが確認できる。また、ひび割れの発生は、各ケーブルが最下段付近まで降りた範囲で発生している。ただし、縦ひび割れの発生状況として、ひび割れ幅はコンクリート表面で最大0.15mmであり、ひび割れ深さはシースに達するケースもあるが、エフロレッセンスはコンクリート表面に留まり、シースに達していないことが確認された(写真-2)。また、シースおよびPC鋼材は腐食していないケースも確認されており、これらの状況から、水はコンクリート表面のひび割れ(外部)から浸入したと考えられ、シース並びにPC鋼材の腐食に影響を及ぼすには至っていないと言える。

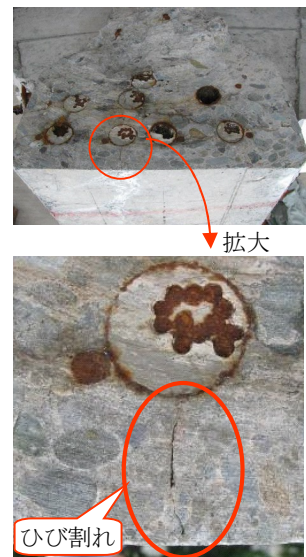


写真-2 桁下面の縦ひび割れ発生状況 (G2桁支間中央付近)

次に、非破壊検査によりシースのかぶりを測定した結果を表-2に示す(G2桁P1側)。シースのかぶりは最小33mmであり、設計値40mmより6mm下回る部分があることが確認された。また、C7ケーブルに着目すると、計測位置4000~5800mmの区間においてかぶりが20mmほど上下動することが分かり、解析対象桁において、シース配置に波打ち形状が存在していた可能性

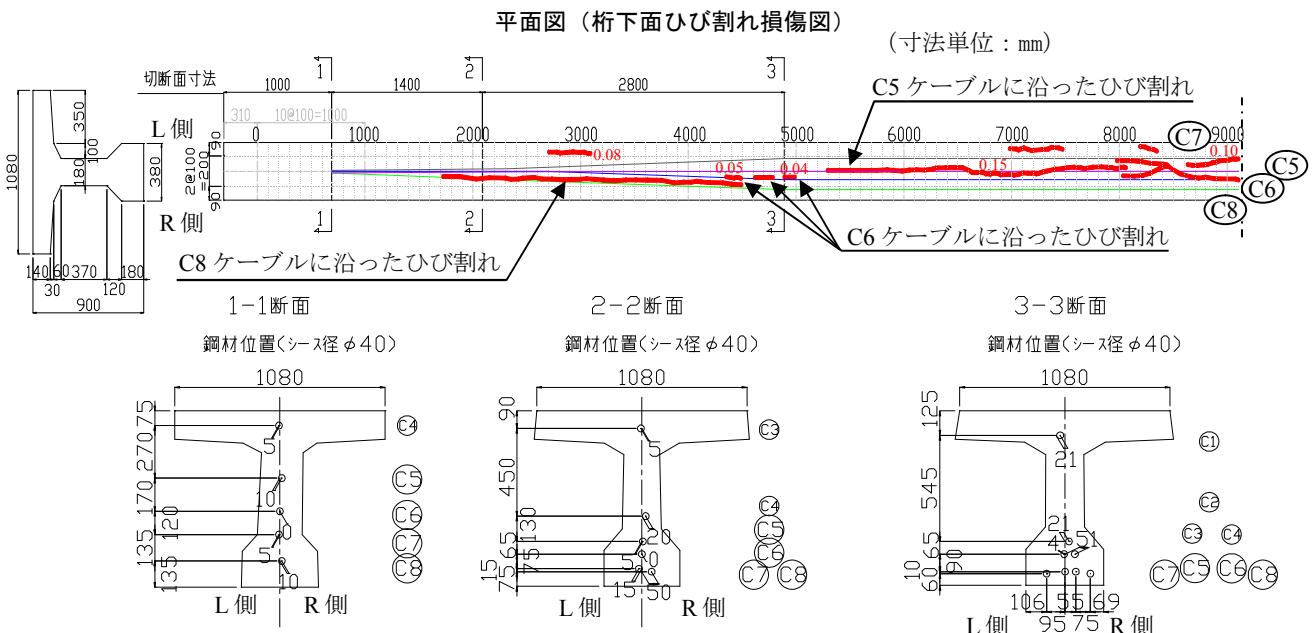


図-1 桁下面ひび割れ損傷とシース配置位置 (A1側)

がある。シースが波打ち形状になったのは、支間中央部のスターラップ間隔が500mmであり、シースの支持間隔が現在よりも広がったことが理由の一つとして挙げられる。

表-2 シースかぶり計測結果 (P1側)

ケーブル番号	計測位置 (桁端からの距離) (mm)						
	2000	3000	4000	5000	5800	6200	7200
C7	----	33mm	51mm	70mm	49mm	----	49mm
C5	----	----	48mm	63mm	62mm	55mm	44mm
C6	----	----	55mm	63mm	61mm	57mm	46mm
C8	48mm	46mm	47mm	49mm	49mm	49mm	45mm

表-3 材料試験結果

調査項目	コンクリート
圧縮強度(f_{ck})	77.5 (N/mm ²)
静弾性係数(E)	38500 (N/mm ²)
引張強度($f_{tk}=0.23 f_{ck}^{2/3}$)	4.18 (N/mm ²)

表-4 解析ケースの諸条件

	ひび割れ発生要因			
	①プレストレス力	②グラウト注入圧	③アルミ粉膨張圧	④熱膨張係数の相違
梁長さ(L) (mm)	3000	2000	2000	2000
シース配置	波打ち	直線	直線	直線
グラウト	無し	無し	無し	有り
PC鋼材 (上縁偏心)	無し	無し	無し	有り
解析モデル	モデルⅠ	モデルⅡ	モデルⅢ	

(2) 材料試験

撤去桁からコアを採取し、コンクリートの材料試験を行った結果を表-3に示す。圧縮強度は77.5N/mm²と高く、施工会社へのヒアリングの結果、PC工場で作製されたブロック桁であることを勘案すると、設計基準強度は50N/mm²であったと推察される。また、引張強度を静弾性係数で除すると引張極限ひずみが算出され、試験結果から求まる引張極限ひずみは109 μ となる。

3. 解析検討

3.1 検討概要

撤去桁の調査結果において、シースに沿った縦ひび割れ発生原因の推定として、シース内に侵入した水の影響や、グラウトの影響、プレストレスの影響、コンクリートの劣化などが挙げられている。そこで本稿では、桁下面のシースに沿った縦ひび割れに着目し、プレストレスおよびグラウトの影響に対してFEM解析を実施した。解析で想定したひび割れ発生要因は、以下である。

- ①プレストレス力による横方向ひずみ
- ②グラウト注入圧の過大による横方向ひずみ
- ③グラウトに混和するアルミ粉粉末の膨張圧
- ④コンクリートとグラウトの熱膨張係数の相違による内圧

3.2 解析方法

解析は、市販の3次元有限要素解析ソフトを用いて、PCT桁の下フランジ部を直方体でモデル化し、桁下面縦ひび割れ発生各要因について、弾性解析を行うことにより検討した。

(1) 解析モデル

解析モデルは、主桁中心線を対称面とした直方体(190×200mm)とし、シース(φ40mm)内のグラウトとPC鋼材(12φ5mm)を考慮している。拘束条件は、対称面1で橋軸直角方向を固定し、対称面2で橋軸方向を固定している。さらに対称面1と2が交わる直線の最下点で鉛直方向を固定とした。

解析ケースを表-4に、解析モデルを図-2に示す。解析ケースは、ひび割れ発生要因によって梁長さ、シース配置、グラ

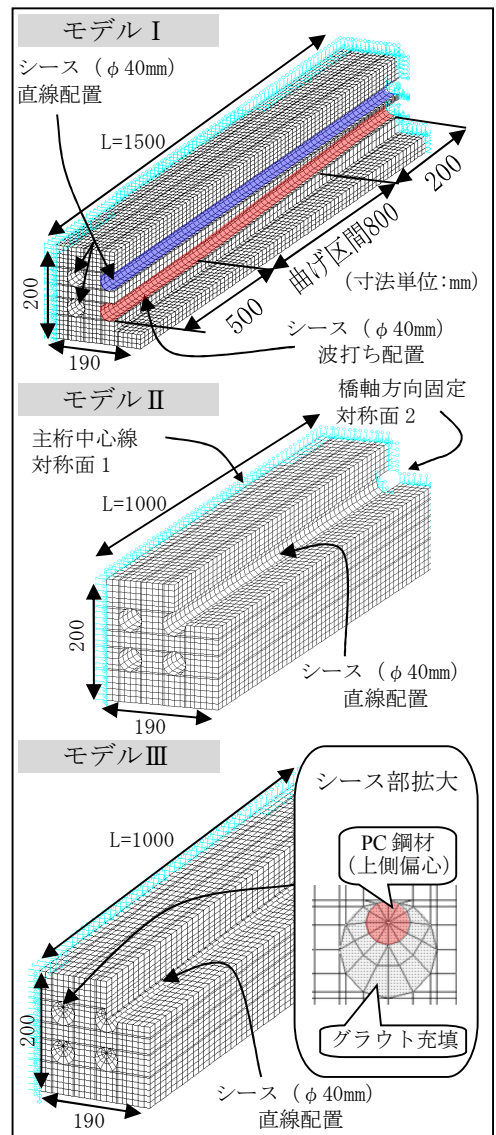


図-2 解析モデル

ウトの有無, PC鋼材偏心の有無および解析モデルを変化させた。ひび割れ発生要因①で梁長さが異なるのはシースの「波打ち(上下20mm, 曲げ区間800mm)」を考慮するためであり(図-2中のモデルⅠ参照), これ以外のケースではシース配置を直線とした。ひび割れ発生要因①~③はグラウトとコンクリートが付着一体化する前であることからグラウトおよびPC鋼材とも「無し」とし, 解析モデルとしてはφ40mmの空洞とした(図-2中のモデルⅠ, Ⅱ参照)。また, グラウト硬化後の状態となるひび割れ発生要因④はグラウトおよびPC鋼材とも「有り」とし, コンクリート, グラウト, PC鋼材間の境界条件は完全剛結とした(図-2中のモデルⅢ参照)。φ40mmのシース中にPC鋼材12φ5mmに相当する断面をシース上方へ偏心配置させている。これによりグラウトが桁下面側に集中した配置となり, グラウト膨張時に桁下面へ大きな圧力が作用する。モデルⅠに関してシース形状を波打配置としているのは, 表-2に示したように, 解析対象とする桁で波打ち配置が存在したこと, また, シースの波打ちを考慮して解析を実施した場合(矩形断面にシース部を空洞とした梁モデル), モデル端部に圧縮力を載荷すると, 波打ち部付近に応力集中が起きることが事前の解析で分かっていたためである。さらに, 同条件でシースを直線配置した場合は, 全域が圧縮となり空洞の影響は無いことも確認している。

(2) 解析条件

1) 材料特性値

解析に用いた各材料特性値を表-5に示す。コンクリートは撤去桁の圧縮試験結果より, 設計基準強度50N/mm²の設計値を用いた。また, グラウトはモルタルの一般的な値や既往の文献³⁾を参考に決定している。なお過去の文献³⁾において, シースのかぶり(i)と直径(d)の比(i/d)が, ひび割れ発生の抵抗性に影響すると記述されているため, かぶりを解析パラメータとして検討した。

表-5 解析条件 (材料特性値)

特性値項目	単位	コンクリート	グラウト	PC 鋼材
静弾性係数	N/mm ²	33000	20000	200000
熱膨張係数	μ/°C	10	20	12
ポアソン比	---	0.2	0.2	0.3

2) 荷重条件

各ひび割れ発生要因に対応した荷重は, 以下のように設定した(図-3)。

① プレストレスカ (シース波打ち配置) :

施工時における基準⁴⁾で使用されていた許容曲げ圧縮応力度を引用し, 解析モデル端面に『15N/mm²の荷重』を載荷。

② グラウト注入圧 :

既往の文献³⁾では, 注入路が長い場合の内圧として, 5~6kg/cm²の考慮が必要とされており, 解析では『内圧0.5N/mm²』とした。

③ アルミ粉の膨張圧 :

既往の文献³⁾より, 膨張率1%で内圧が約0.1N/mm²発生するとされており, 解析では膨張率5%と仮定し『0.5N/mm²の内圧』を載荷。

④ コンクリートとグラウトの熱膨張係数の相違 :

熱膨張時の温度変化は, 一般的に道路橋の設計に用いられる±20°Cを用いる。さらにグラウトが膨張してひび割れが発生することを想定して「+」側の+20°Cのみを選択した。これは冬場にグラウトが施工されて, その後外気温が20°C上昇し, コンクリートやグラウトの温度も同様に20°C上昇した状態をモデル化している。このときグラウトの熱膨張係数がコンクリートのそれより大きいため, グラウトの膨張の方が大きくなり, コンクリートに引張応力度が発生する。

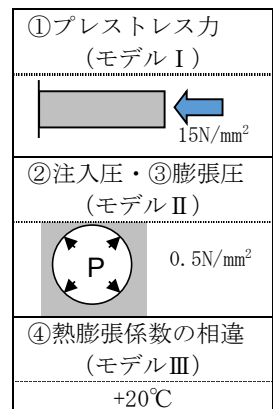


図-3 荷重概要

3. 3 解析結果

解析結果の最大主応力コンターを図-4に示す。ここで, 解析対象であるコンクリート部材下縁部の発生応力に着目した場合, 全ての荷重条件に対してシースの直下付近が最大となり, さらに, シースかぶりによって部材表面部に発生する応力が異なる。そのため, 図-4には対象橋梁施工時の一般的な

シースかぶり50mmの結果を示し、表-6と図-5に、各荷重条件に対してかぶりを変化させた場合の結果を示す。ここで、表-6に示すかぶり34mmとは、切断を行ったG2桁A1側の切断面で確認された最小かぶり厚である。表中の推定値はFEMの解析値を元に最小二乗法による累乗近似曲線から算出した値を示す。

(1) プレストレス力に対する解析結果

シースの波打ち開始部において、シース直下の部材下面側コンクリート表面に0.04N/mm²の引張応力(橋軸直角方向)が発生している。また、図示は割愛するが、プレストレスによる橋軸直角方向のひずみは93μに達するが、2章に示した引張極限ひずみ(109μ)を超えるものではなかった。

(2) シース内圧に対する解析結果

荷重条件のグラウト注入圧とアルミ粉粉末膨張圧は、荷重条件が全く同じであるため、「シース内圧」としてまとめて結果を示す。断面中央側のシース下縁部に0.18N/mm²の引張応力(橋軸直角方向)が発生している。かぶりの50mm~30mmへの変化に対して、引張応力は0.18N/mm²~0.34N/mm²へと変化し、かぶりの減少に伴って累乗的に増加する結果となった。

(3) コンクリートとグラウトの熱膨張係数の相違による内圧

断面中央側のシースの下縁部に0.98N/mm²の引張応力(橋軸直角方向)が発生している。また、かぶりに関しては前述したシース内圧荷重の結果と同様に、累乗的に増加している。

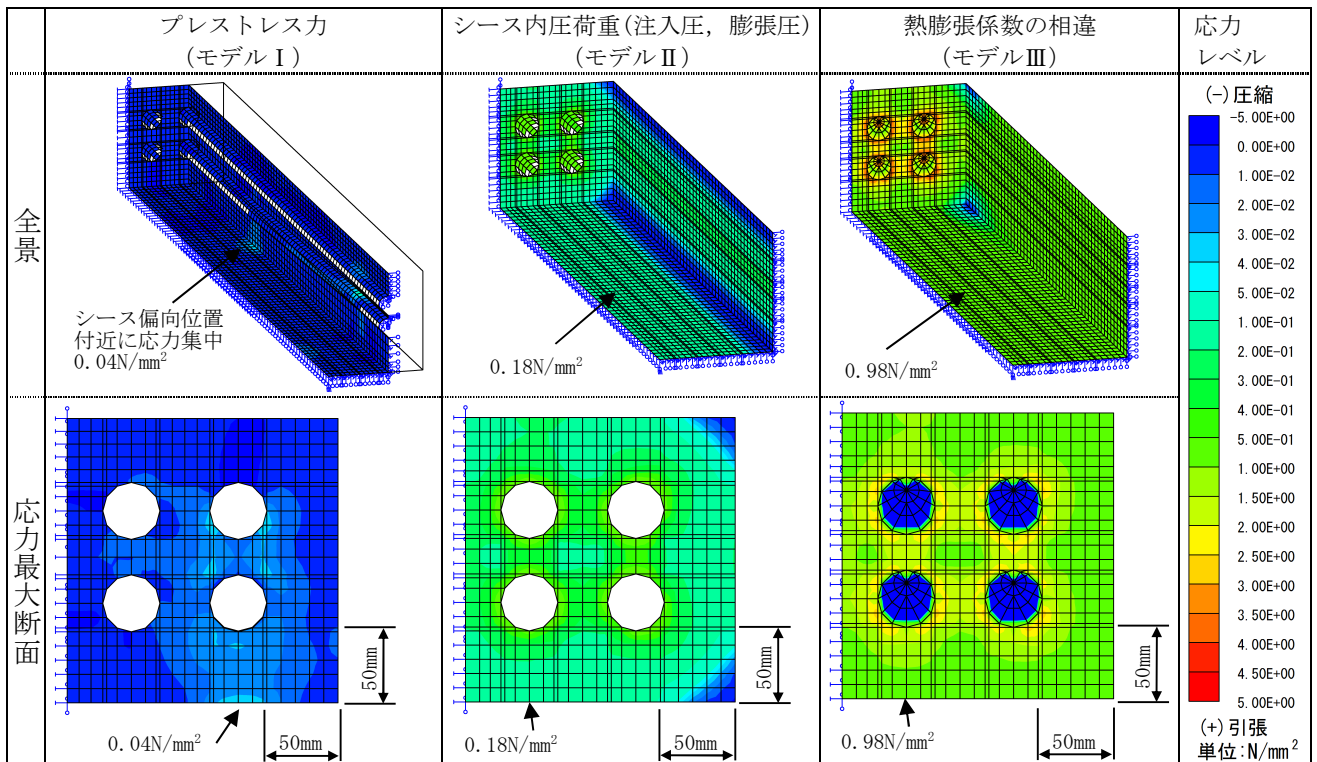


図-4 各荷重に対する最大主応力コンター図 (シースかぶり 50mm)

表-6 部材下縁の発生応力 (N/mm²)

かぶり		30mm	34mm	40mm	50mm	60mm
プレストレス力	解析値	0.07	0.06	0.05	0.04	----
	推定値	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03
シース内圧	解析値	0.34	0.30	0.25	0.18	----
	推定値	0.35	0.30	0.24	0.18	0.15
温度差	解析値	1.86	1.60	1.30	0.98	----
	推定値	1.87	1.59	1.30	0.98	0.78
合成応力	解析値	2.27	1.96	1.60	1.20	----
	推定値	2.28	1.95	1.59	1.20	0.96

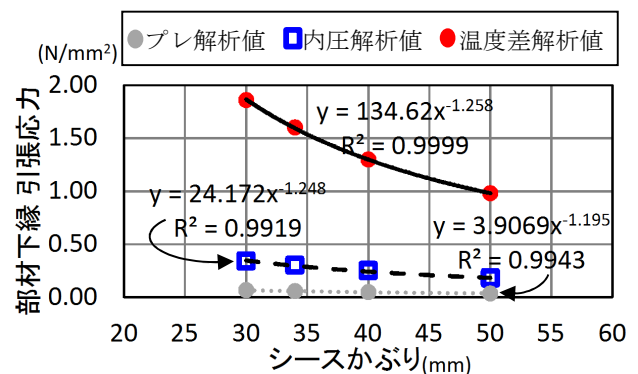


図-5 かぶり変化に伴う部材下縁応力変化図

4. 考察

解析の結果、熱膨張係数の相違(温度差)による発生応力は、シースイ圧荷重の5倍以上の応力を生じており、最もひび割れに与える影響が大きいことがわかった。一方、シーズの波打ちを考慮したプレストレスの影響は小さいことが判明した。なお、シースイ圧の結果は過去の寒地土木研究所の実験結果³⁾と整合しており、数値解析の結果は妥当と判断される。

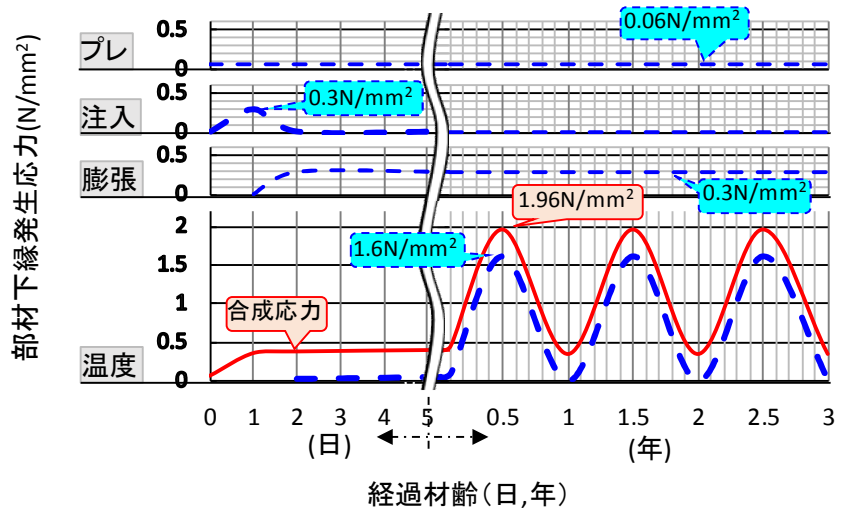


図-6 部材下縁発生応力 (シースカぶり 34mm)

ここで、対象桁の切断調査結果

では、シーズの最小かぶりが34mmであるため、かぶり34mmに着目して考察を行う。解析着目位置での発生応力について、時系列を考慮して合成した結果を図-6に示す。プレストレスやアルミ粉の膨張の影響は永続的に作用するが、グラウト注入圧は施工時のみ作用する。また熱膨張係数の相違(温度差)で発生している1.6 N/mm²の応力は、年ごとの季節変化に伴い繰返し载荷される。これにより最大で1.96N/mm²の応力が発生することになるが、これは撤去桁の材料試験結果の引張強度4.18N/mm²(表-3)よりも小さい。よって縦ひび割れの原因として、本稿で挙げた4つの原因以外の要素も存在すると考えられる。今回の解析は、静的解析による検討であるため、クリープや乾燥収縮の影響は考慮していない。これらの影響やその他の劣化現象の要素も加わり、縦ひび割れが生じたものと判断する。

現状の指針では、シーズのかぶりは60mm以上を確保しており、推定値におけるかぶり60mmの結果では、発生応力が0.96N/mm²程度と小さくなっている。このことから、桁下面の縦ひび割れの発生は、現状の指針を満足していれば十分に改善されているものと考えられる。さらに、シーズの波打ちに関しても、現行の施工基準では起こり得ないものと考えられる。

5. まとめ

以上より、今回検討を行ったPCT桁橋の桁下面縦ひび割れの発生要因としては、コンクリートとグラウトの熱膨張率の相違による、外気温変化に伴う膨張量の差が、最も影響の大きい荷重であることがわかった。ただし、シーズのかぶりが十分に確保されていれば、その荷重による影響は小さい。そのため、シースカぶりは劣化因子の侵入に対する保護の他、ひび割れ発生抑制のためにも、確保されなければならないパラメータであると言える。

参考文献

- 1) 玉越隆史, 大久保雅憲: 道路構造物群のマネジメント(管理)における点検データの活用~定期点検結果の分析から見た損傷発生・進行の特徴及び現有性能の指標化~, 土木技術資料53-12, pp18-21, 2011
- 2) 小林崇, 國富康志, 本間英貴, 木村嘉富: グラウト充填状況が既設PC橋の外観変状に及ぼす影響, PCシンポジウム論文集, pp265-268, 2013. 10
- 3) 北海道開発土木研究所(現寒地土木研究所): プレストレストコンクリート用グラウトに関する実験的研究, 土木試験所報告第29号, 1962. 3
- 4) 土木学会: プレストレストコンクリート設計施工指針, 1955. 4