

5. 解析

5 - 1. 概要

ひび割れの原因として代表的なものである水和熱、乾燥収縮の影響について、解析で検討を行った。

解析は、3次元FEMで実施し、3種類の方法でアプローチを試みた。

(1) 部材に一律な収縮を考慮した解析(5 - 2)

・対象：山中川東高架橋、山中川高架橋、自然田高架橋、菟砥川高架橋の4橋。

・解析方法：

温度応力解析ソフトを使用し、断面に一律な乾燥収縮を考慮する。^{注)}

水和熱による温度応力を考慮する。

クリープと鉄筋拘束の影響は考慮しない。

・モデル：対象橋梁（上部工）全体とし、施工手順を考慮。

・解析の目的：構造物の性能に影響を与える大きなひび割れの再現。

(2) クリープ・鉄筋拘束の影響を考慮した解析(5 - 3)

業務名：第二阪和国道橋梁調査検討業務（平成20年度）

発注者：浪速国道事務所

・対象：山中川東高架橋

・解析方法：

専用ソフトにより、クリープ・鉄筋拘束の影響を考慮する。

断面に一律な乾燥収縮を考慮する。水和熱は考慮しない。

・モデル：対象橋梁（上部工）全体とし、施工手順を考慮。

・解析の目的：実構造物に作用する乾燥収縮度を厳密に評価する。

(3) 部材内部の湿度移動に着目した応力解析(5 - 4)

・対象：山中川東高架橋

・解析方法：

温度応力解析ソフトを流用し、部材内の湿度移動解析を行い、要素ごとに異なる乾燥収縮ひずみを与える。水和熱は考慮しない。

クリープと鉄筋拘束の影響は考慮しない。

・モデル：対象橋梁（上部工）全体とする。施工手順は考慮しない。

・解析の目的：乾燥収縮の進行度差による内部拘束応力の算出。

注) 乾燥収縮は材齢が同一の場合、各要素のひずみを一定とする現行の規準類に則った評価としている。

5 - 2 . 部材に一様な収縮を考慮した解析

上部工に変状が確認された、山中川東高架橋、山中川高架橋、自然田高架橋、菟砥川高架橋の4橋について結果を報告する。また、これら4橋については、解析結果と点検調書の対比を行い、解析がどの程度、橋梁全域の変状を表現し得ているかを確認し、解析の評価を行う。

さらに、ヤング係数、引張強度について、実際の物性値（または推測値）を用いた解析を実施し、コンクリート標準示方書等に示される標準的な値を用いた場合との比較を行う（自然田高架橋）。

5 - 2 - 1 . 山中川東高架橋

1) 検討方針

解析方法

3次元FEMにより乾燥収縮・水和熱に対する時刻歴解析（弾性解析）を行なう。

使用ソフトはASTEAMACS（株式会社構造力学研究センター（RCCM））とする。

構造概要

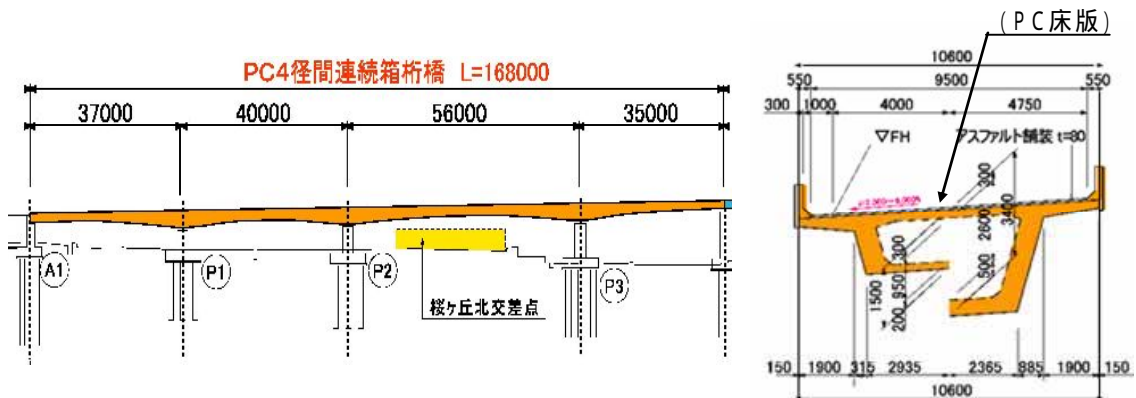
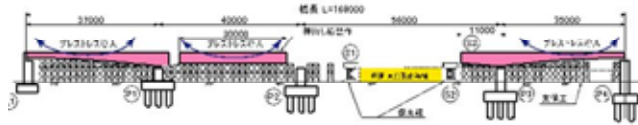


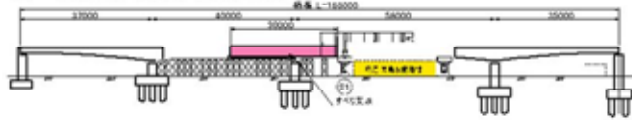
図5 - 1 . 山中川東高架橋 構造図

施工方法

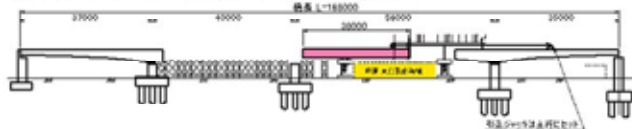
1. 押し桁製作、仮支柱組立、A1～P1,P3～P4径間架設



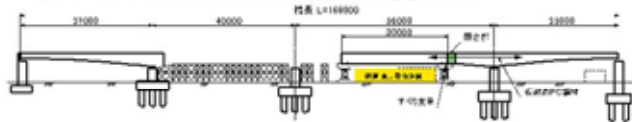
2. P2橋脚から反力を取り出す



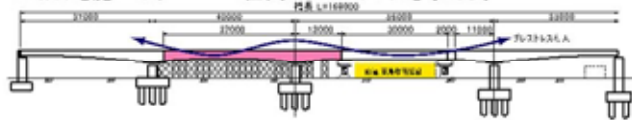
3. P3～P4径間既設部から反力を取り出す



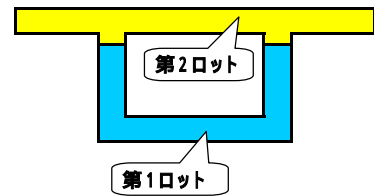
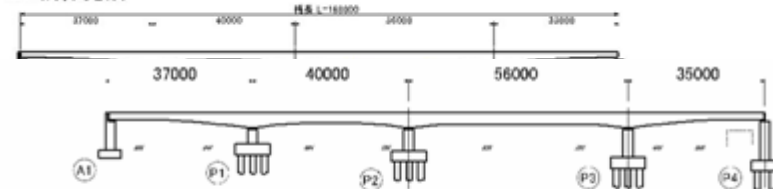
4. 押し完了後、速やかにP3～P4径間と閉合する



5. 残りを施工し、P1～P3径間にプレストレスを与える。



6. 橋体完成



- ・ P2～P3径間のうち、交差点上の30mは押し架設
- ・ その他は支保工施工
- ・ 断面的には、1回目：ウェブ・下床版、2回目：上床版の2分割で施工

年月	作業内容	工期
2002.2	準備工・支保工基礎工	
3	支保工組立	
4	支保工組立	
5	押し桁製作	
6	型枠、鉄筋、PC コンクリート工	
7	支保工組立	
8	支保工組立	
9	型枠、鉄筋、PC コンクリート工	
10	型枠、鉄筋、PC コンクリート工	
11	支保工組立	
12	橋体工	
2003.1	橋体工	
2		
3		

図5 - 2 . 山中川東高架橋 施工手順図

解析の着目点とモデル

「第二阪和国道橋梁点検結果概要」によれば、桁内部からの調査により主桁、床版、定着突起等にひび割れが報告されている。一方、桁下からの目視によれば、部分的に押し出し施工したP2～P3径間の下床版下面に、橋軸方向に比較的多くのひび割れが出ているのが特徴的である。本橋の施工は、分割施工の組み合わせによるものであり、後に施工された部位が既設部から大きな拘束(外部拘束)を受けていたことが、発生しているひび割れに関与していると考えられる。

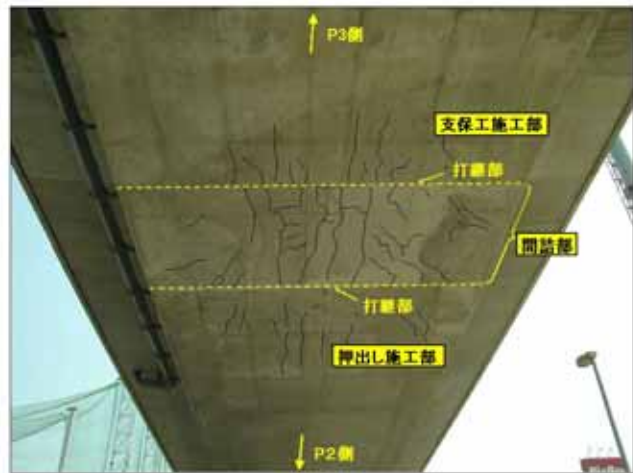
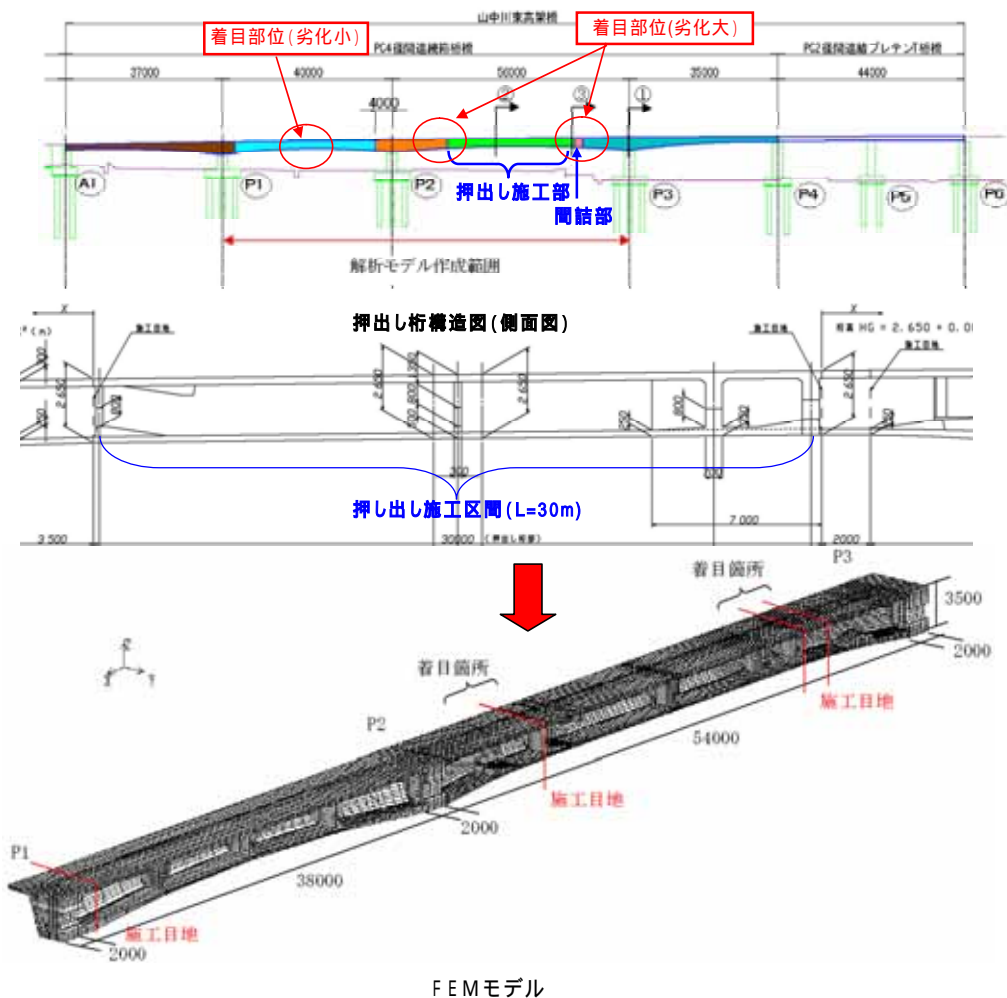


図5 - 3 . 山中川東高架橋の変状

以上より、代表的な損傷部としてP2～P3径間、および比較のため損傷が比較的軽微なP1～P2に着目し、施工手順を追った解析を行なう方針とする。



FEMモデル

図5 - 4 . 解析の着目箇所

2) 解析条件

(1) 物性値 2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:標準] 4.2 熱特性 より

使用セメント種		早強	備考
設計基準強度 σ_{ck}	(N/mm ²)	40	配合報告書より
密度	(kg/m ³)	2277	配合報告書より
ポアソン比		0.167	
熱伝導率	(W/m °C)	2.7	
比熱	(kJ/kg °C)	1.15	
熱膨張係数	(μ /°C)	10	2007年コン示 設計編:本編 p44

注) 熱物性値はコン示 設計編 4.2.1より仮定

(2) コンクリート強度 2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:標準] 4.1 力学特性 より

$$f_{ck}(t) = \frac{t}{a + bt} \cdot d \cdot f_{ck}(28) \quad (\text{解4.1.1})$$

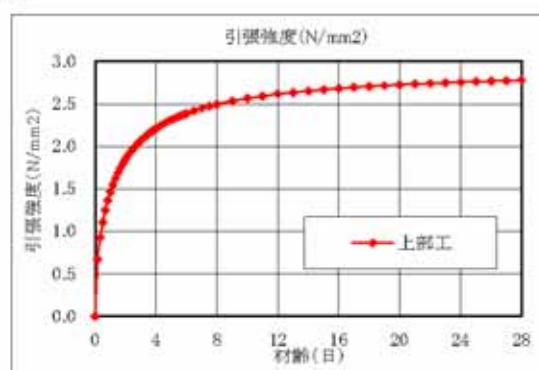
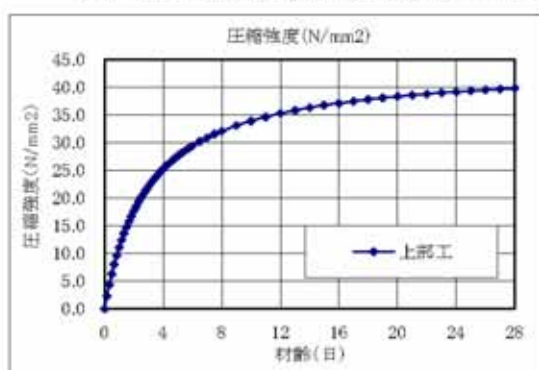
$$f_{tk}(t) = c \sqrt{f_{ck}(t)} \quad (\text{解4.1.2})$$

$f_{ck}(t)$: 材齢t日のコンクリート圧縮強度(N/mm²)

$f_{tk}(t)$: " 引張強度(N/mm²)

$f_{ck}(28)$: 材齢28日のコンクリート圧縮強度(N/mm²)

	a	b	d
普通ポルトランドセメント	4.5	0.95	1.11
中庸熱ポルトランドセメント	6.2	0.93	1.15
早強ポルトランドセメント	2.9	0.97	1.07
c	0.44		



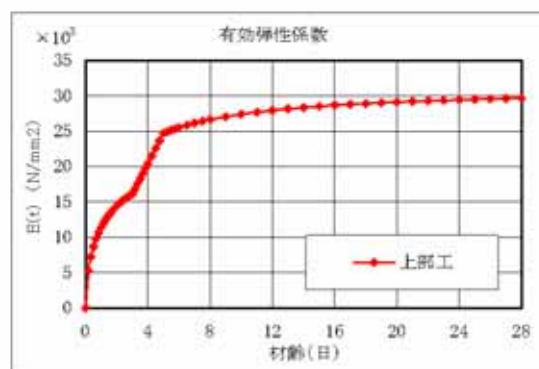
(3) 有効弾性係数

$$E(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 1000 \times \sqrt{f_{ck}(t)} \quad (\text{解4.1.3})$$

$\phi(t)$: 材齢3日まで 0.73

材齢5日以降 1.00

2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:標準]
4.1.2 コンクリートのヤング係数 より



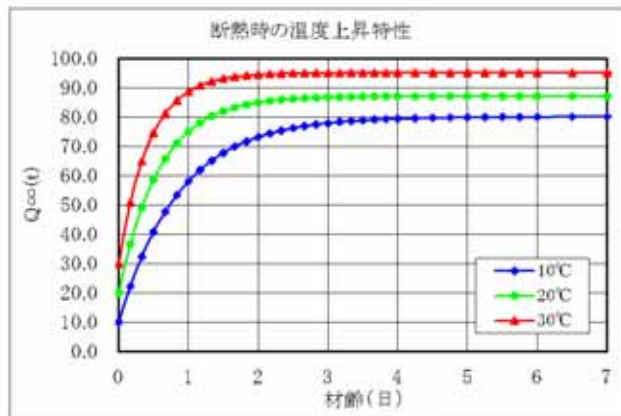
- (4) 断熱温度上昇特性 2007年制定 コンクリート標準示方書〔設計編:標準〕 4.2.1 コンクリートの熱特性 より
 JSCE式による $Q(t)=Q_{\infty}(1-e^{-\gamma t})$ (解4.2.1)

■ 早強セメント

C : 単位セメント量

425kg/m³

打設温度	$Q_{\infty}=a \times C+b$			$\gamma=g \times C+h$		
℃	a	b	Q_{∞}	g	h	γ
10	0.13	15.00	70.25	0.0016	0.4780	1.1580
20	0.13	12.00	67.25	0.0025	0.6500	1.7125
30	0.13	10.00	65.25	0.0014	1.7200	2.3150



- (5) 乾燥収縮特性 2007年制定 コンクリート標準示方書〔設計編:本編〕 5.2.8 収縮 より

	RH	W	V/S	t0	A
CASE1	65	170	170	3	1
CASE2	65	170	170	3	1.5
CASE3	65	170	170	3	2

2007年制定前

2007年制定後

自己収縮ひずみも含む

$$\epsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp(-0.108(t-t_0)^{0.56})] \cdot \epsilon'_{sh} \quad (\text{解5.2.3})$$

$$\epsilon'_{sh} = [-50 + 78 [1 - \exp(RH/100)] + 38 \log_e W - 5 [\log_e(V/S)/10]^2] \cdot A \quad (\text{解5.2.4})$$

$$t = \Delta t_i \cdot \exp(13.65 - 4000 / (273 + T(\Delta t_i) / T_0)) \quad (\text{解5.2.5})$$

- (6) 打設日および打設時コンクリート温度

・打設時コンクリート温度は外気温+5℃とする。

	打設日	外気温	コンクリート温度	備考
① 押し桁1L	4/30	16.8℃	21.8℃	
② 押し桁2L	5/23	20.2℃	25.2℃	
③ P3上部1L	5/29	20.2℃	25.2℃	
④ P3上部2L	6/21	23.1℃	28.1℃	
⑤ 閉合部	8/8	28.8℃	33.8℃	
⑥ P2上部1L	9/17	23.9℃	28.9℃	
⑦ P1～P2径間1L	9/26	20.4℃	25.4℃	
⑧ P2上部2L	10/3	19.1℃	24.1℃	
⑨ P1～P2径間2L	10/11	19.1℃	24.1℃	

3) 解析結果

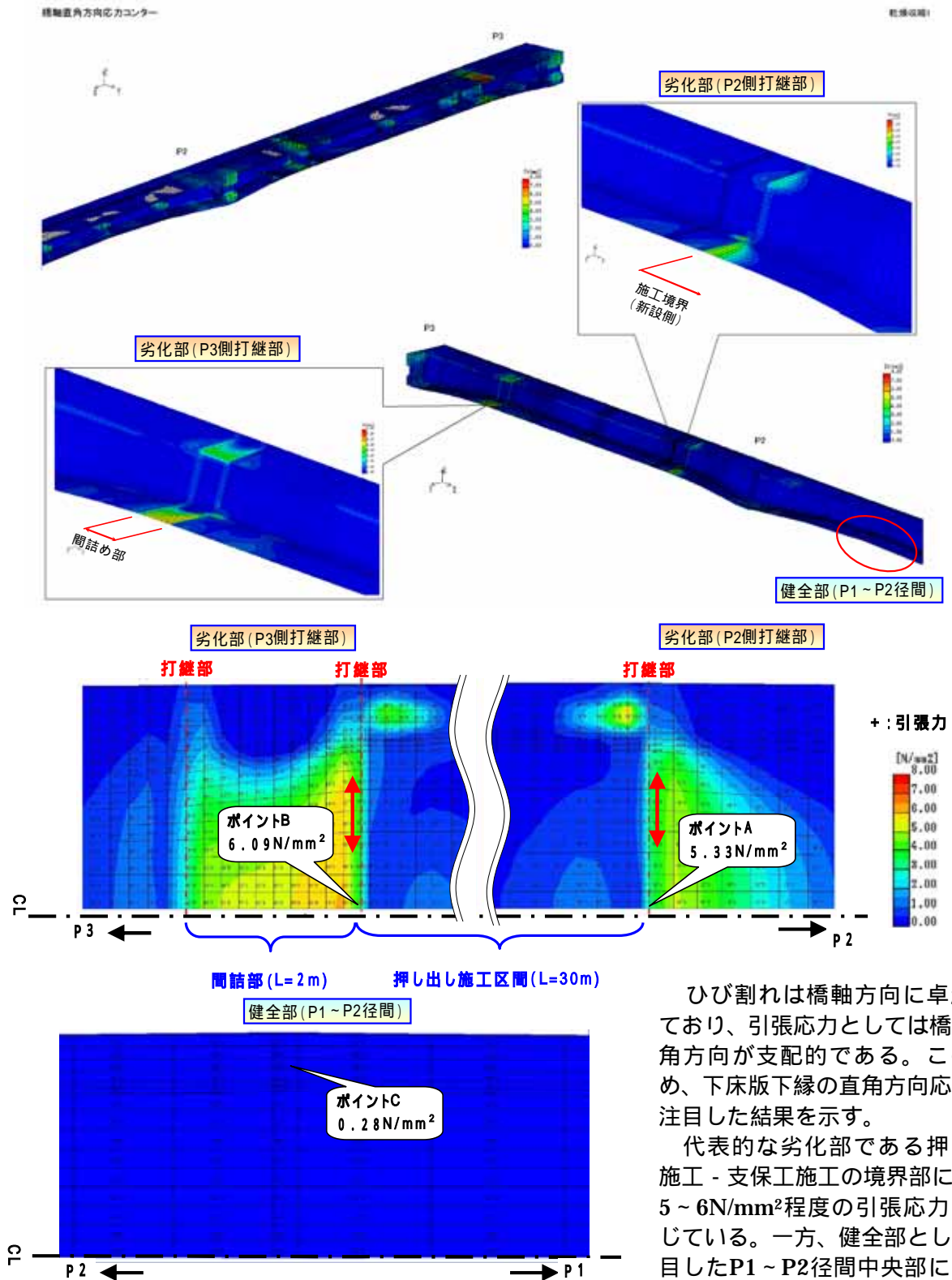


図5 - 5. 解析結果(その1)

ひび割れは橋軸方向に卓越しており、引張応力としては橋軸直角方向が支配的である。このため、下床版下縁の直角方向応力に注目した結果を示す。

代表的な劣化部である押し出し施工 - 支保工施工の境界部には、5 ~ 6N/mm²程度の引張応力が生じている。一方、健全部として着目したP1 ~ P2径間中央部には、最大でも0.3N/mm²程度の引張応力しか生じていない。

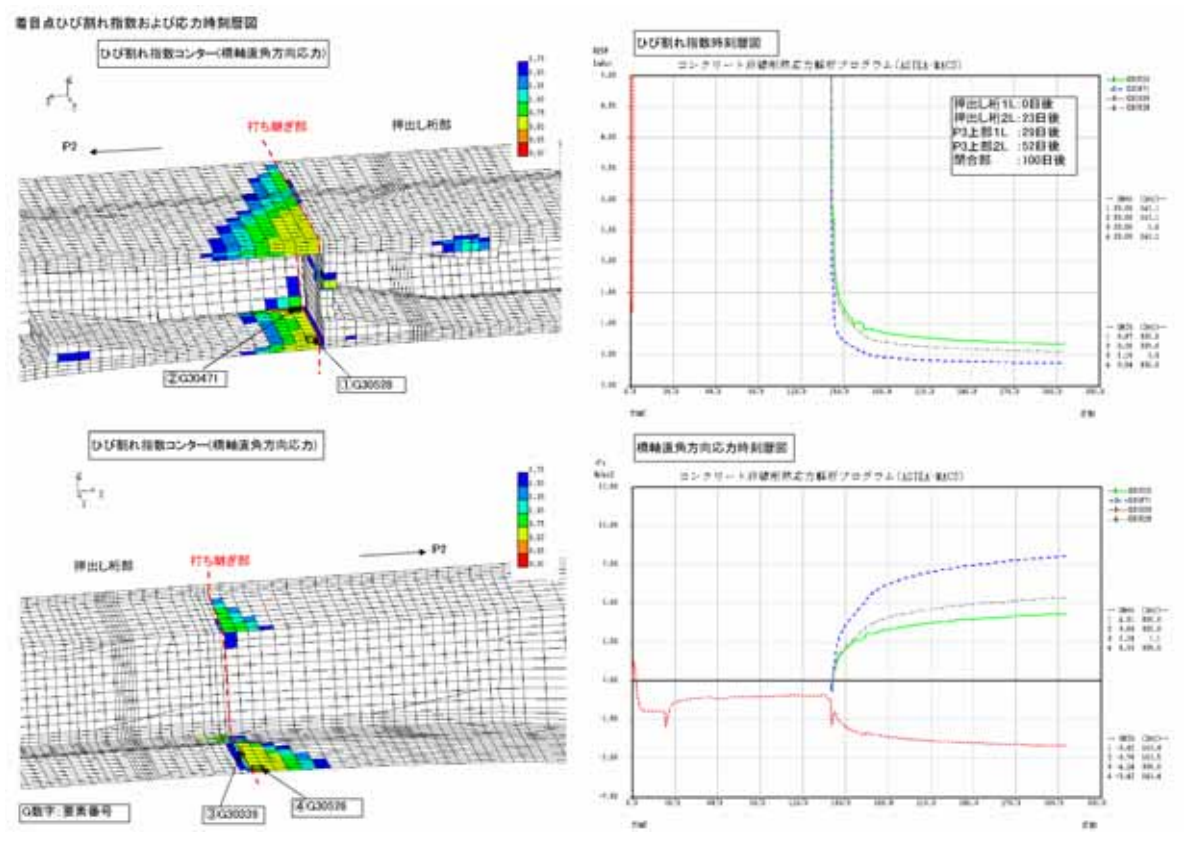
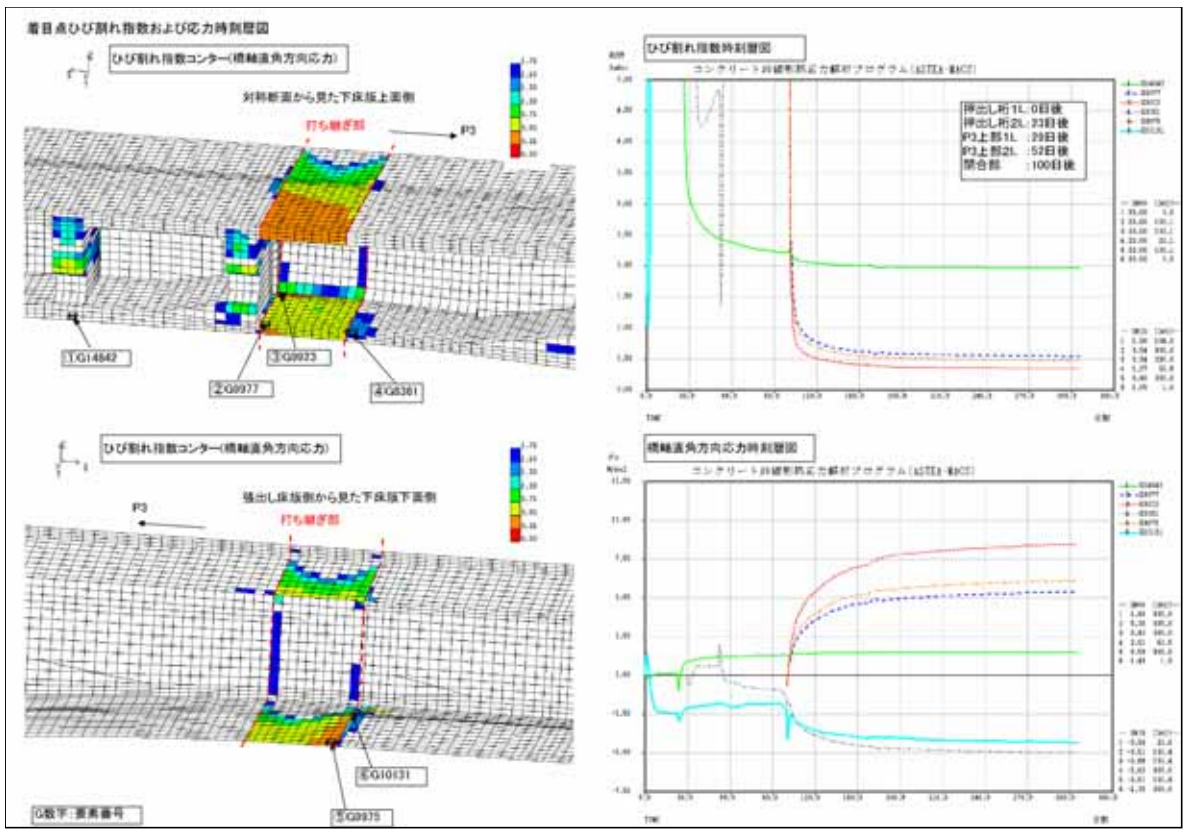


図5 - 6. 解析結果(その2)

4) クリープの影響について

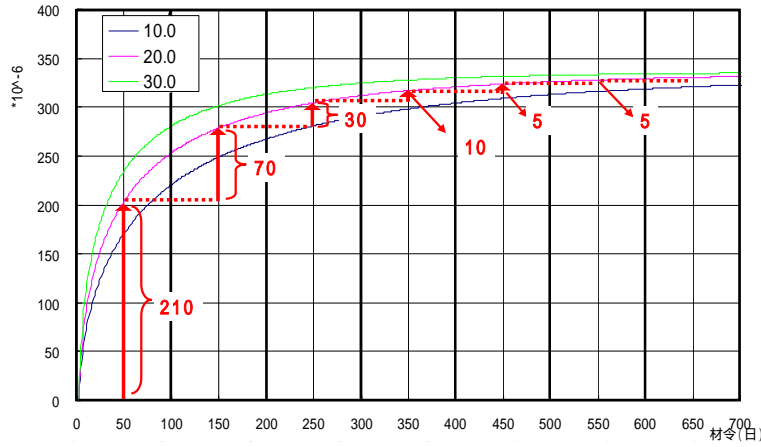
これまでの議論は弾性解析の結果に基づくもので、クリープの影響を考慮していない。クリープの影響については、2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:本編] 5.2.8 収縮に以下の記述がある。

【コンクリートの収縮によって、ラーメン、アーチ等の不静定構造物に生じる不静定力は、部材がその軸方向に一様に収縮するものとして弾性理論によって計算するのが普通である。実際に生じる不静定力の大きさは、コンクリートのクリープのために弾性理論で求めた値よりもかなり小さくなることが認められている。このことから、不静定力を求めるときの収縮ひずみは、コンクリートのクリープの影響を考慮して低減した値を用いてよいこととした。したがって、この値を用いる場合には、クリープの影響を加算してはならない。なお、この値は、圧縮強度の特性値が 55N/mm^2 程度までの通常の骨材を用いた普通コンクリートに対しては、 150×10^{-6} としてよい。】

山中川東では、乾燥収縮度の最終値を 330μ として解析を行なっている。上記記述は、構造全体の不静定力に対するものであり、部分的な拘束応力の問題とは異なるところもあるが、クリープの影響を考慮した場合の乾燥収縮度が 150μ 程度であるとすれば、今回の解析結果は最大で $330/150 = 2.2$ 倍、高めの応力が得られていることになる。

以下は、Dischinger の近似式から、クリープの影響を考慮した乾燥収縮度の低下率を $e^{-\dots}$ とし、解析による発生応力を低減した結果である。これによると発生応力は2割程度まで減少するため、乾燥収縮度がコンクリート標準示方書による標準値の1.5倍程度で引張強度を上回る結果となる。

材齢ごとの乾燥収縮進行度



クリープの影響を考慮した残留する乾燥収縮歪み

区間平均材例(日)	50	150	250	350	450	550	合計
進行した乾燥収縮歪(μ)	210	70	30	10	5	5	330.0
クリープ係数	1.87	1.50	1.32	1.20	1.12	1.05	
e ⁻	0.154	0.223	0.267	0.301	0.326	0.350	
応力として残留する歪 ×	32.4	15.6	8.0	3.0	1.6	1.7	62.4

クリープ係数は道路橋示方書に従い算出

クリープを考慮した、乾燥収縮による応力残留比率

$$= 62.4 / 330.0$$

$$= 0.189$$

乾燥収縮の倍率	1.0	1.5	2.0
温度解析最大発生応力 N/mm ²	6.09	8.57	11.06
応力残留比率	0.189	0.189	0.189
クリープを考慮した残留応力 × N/mm ²	1.2	1.6	2.1
設計引張強度 fbck N/mm ²	1.2	1.2	1.2

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \left\{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \right\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right]$$

k_1 : 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数。
異形棒鋼: 1.0, 普通丸鋼およびPC鋼材: 1.3.

k_2 : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数。

$$k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7$$

f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²). 一般に設計圧縮強度を用いてよい。

k_3 : 引張鋼材の段数の影響を表す係数。

$$k_3 = \frac{5(n+2)}{7n+8}$$

n : 引張鋼材の段数

c : かぶり(mm)

c_s : 鋼材の中心間隔(mm)

ϕ : 鋼材径(mm)

ε'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値。

※ 乾燥収縮の影響は σ_{se} に含むためここでは0とする。

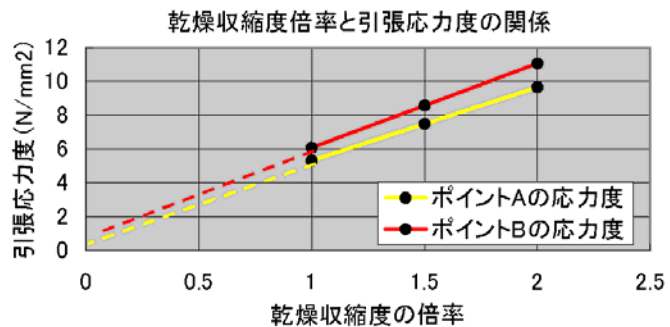
σ_{se} : 鋼材位置のコンクリート応力度が0の状態からの鉄筋応力度の増加量(N/mm²)

E_s : 鋼材のヤング係数(N/mm²)

L_{max} : ひび割れ間隔の最大値 $4c + 0.7(c_s - \phi)$

ひび割れ幅の計算

		乾燥収縮×1.0
k_1		1.00
k_2		0.95
k_3		0.91
n	段	2
f'_c	N/mm ²	40
c	mm	35
c_s	mm	125
ϕ	mm	13
σ_{se}	N/mm ²	278.3
ε'_{csd}		0 μ
E_s	N/mm ²	2.0E+05
w	mm	0.289
L_{max}	mm	218



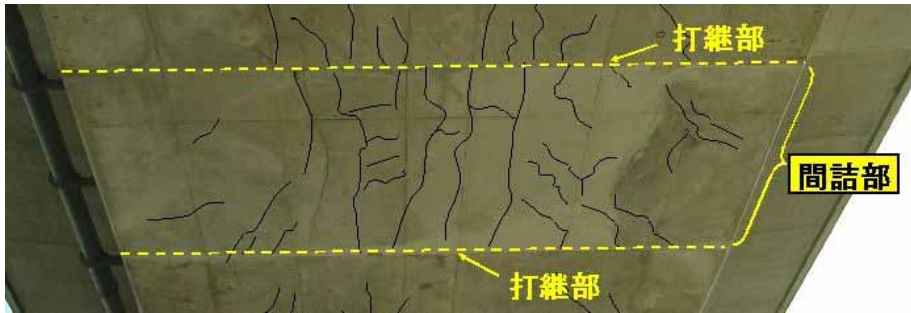
乾燥収縮度をコンクリート標準示方書による標準的な値とした場合、ひび割れ幅は、0.289mmとなった。

実際のひび割れ幅は調書によると概ね0.45mm程度であり、上記グラフに示すとおり解析上、乾燥収縮度と引張応力はほぼ比例することから、実際の乾燥収縮度は、標準的な値に対し、

$$0.45 / 0.289 = 1.56 \text{ 倍}$$

程度であった可能性がある。

(参考) 実際のひび割れスケールからの収縮度推定



P2 ~ P3径間の間詰め部は、代表的なひび割れとして幅0.80mmのものが1本、0.45mmのものが3本、下床版幅 = 5,180mmのため、これらが全て乾燥収縮によるものと仮定した場合の収縮度は、

$$(0.80 \times 1 + 0.45 \times 3) / 5,180 \times 106 = 415 \mu$$

となる。

一方、直角方向に均一なひび割れの発生が認められる張出床版部は、ひび割れ幅 0.20mm、ひび割れ間隔 1000mmのため、乾燥収縮度は、

$$0.20 / 1000 \times 106 = 200 \mu$$

となる。

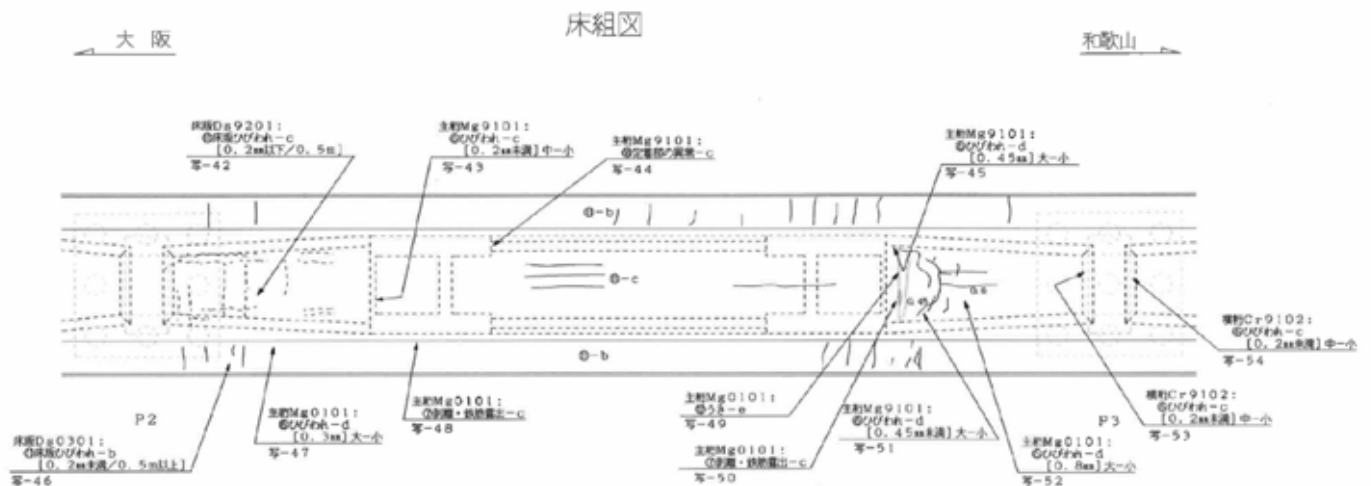


図5 - 8 . 山中川東高架橋 点検調書より

5 - 2 - 2 . 山中川高架橋

(1) 検討方針

1) 解析方法

3次元 FEM により乾燥収縮・水和熱に対する時刻歴解析（弾性解析）を行なう。

使用ソフトは ASTEA-MACS（株式会社構造力学研究センター（RCCM））とする。

2) 構造概要

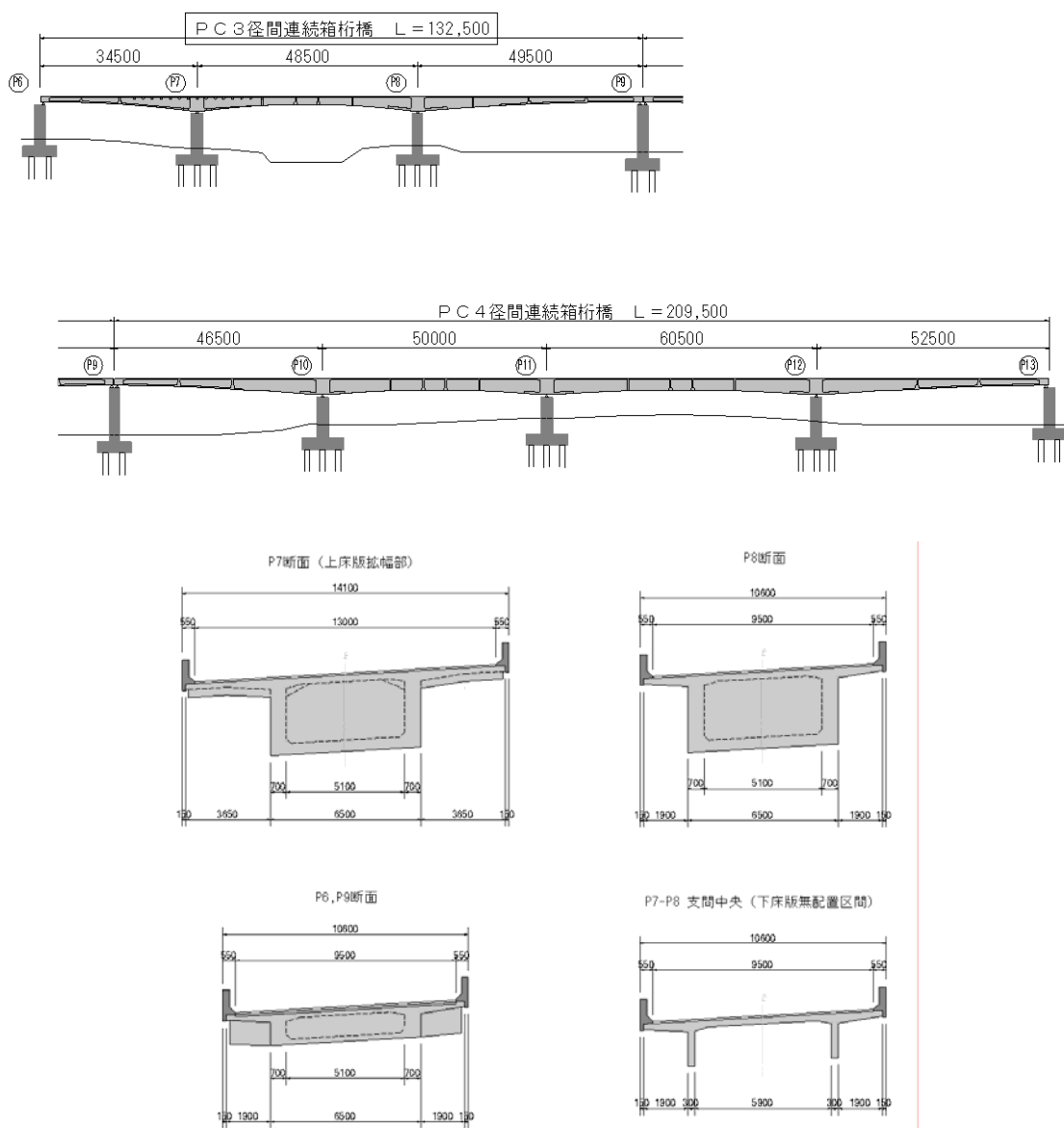
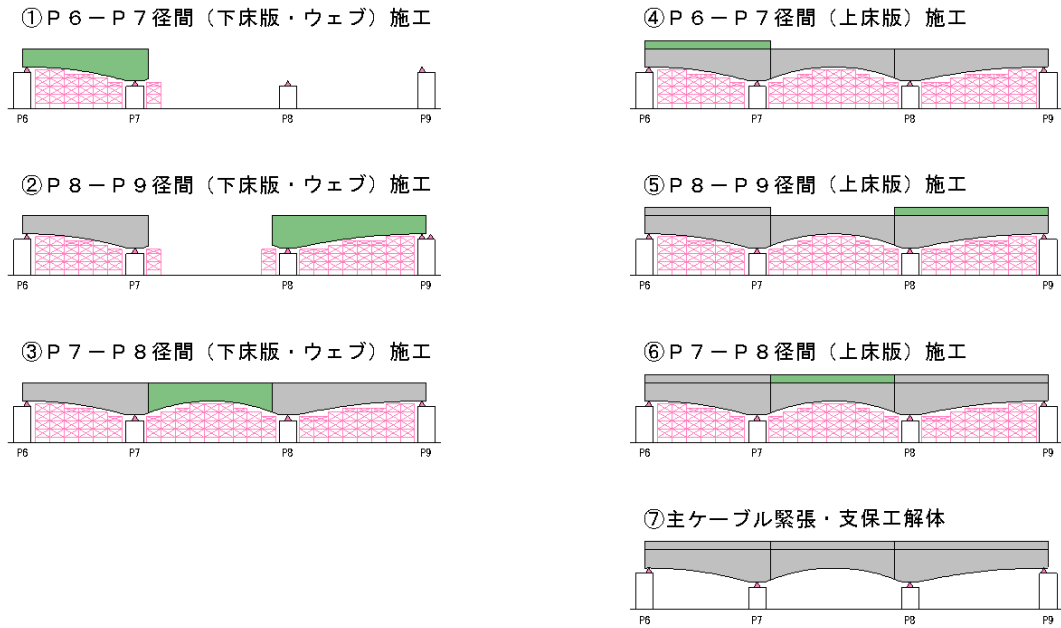


図5 - 9 . 山中川高架橋 構造図

3) 施工方法 (PC 3 径間連続箱桁橋の場合)



- ①②③ 下床版・ウェブを施工
- ↓
- ④⑤⑥ 上床版を施工
- ↓
- ⑦ 主ケーブル (内ケーブル・外ケーブル) 緊張
- ↓
- ⑦ 支保工解体

施工方法
 全径間を支保工にて施工
 断面的には、1 回目：ウェブ・下床版、2 回目：上床版の 2 分割で施工

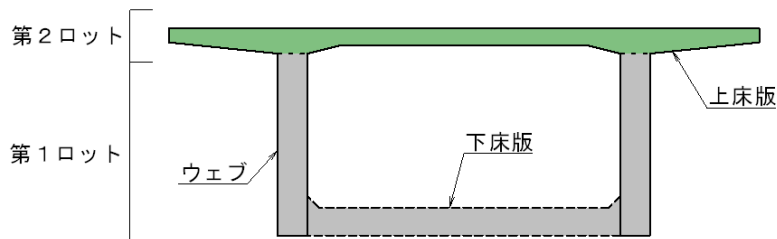
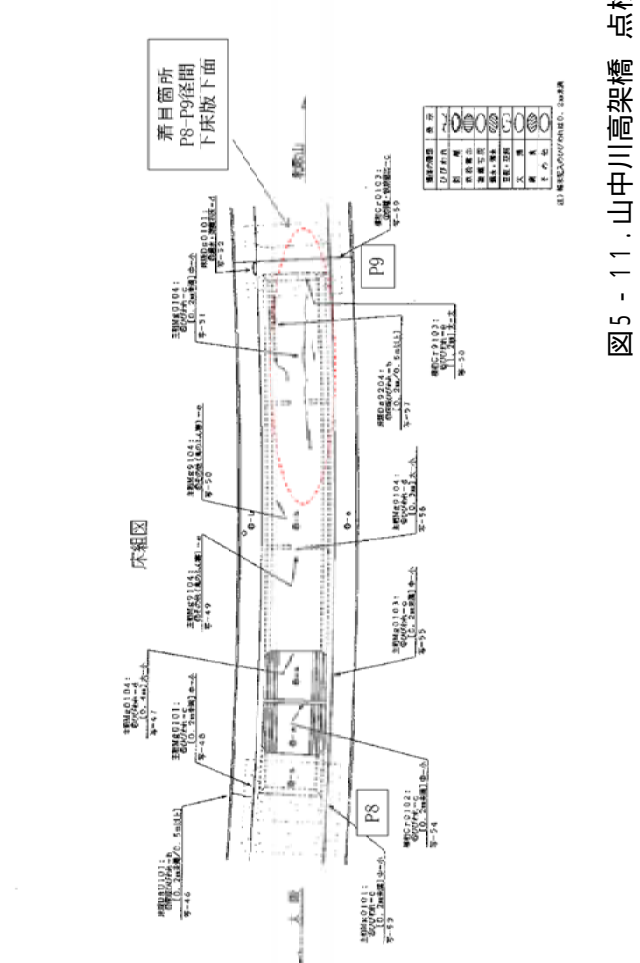
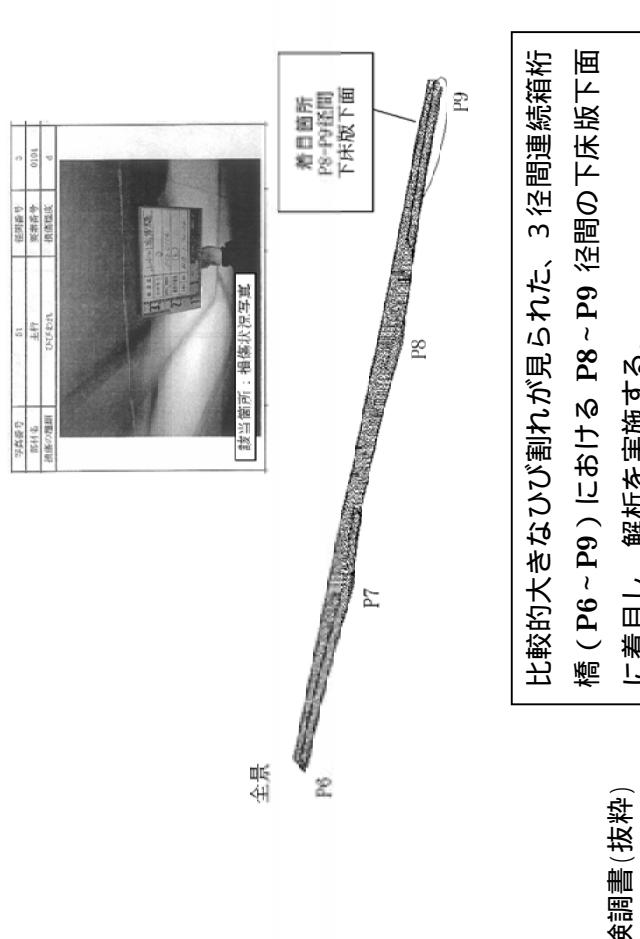
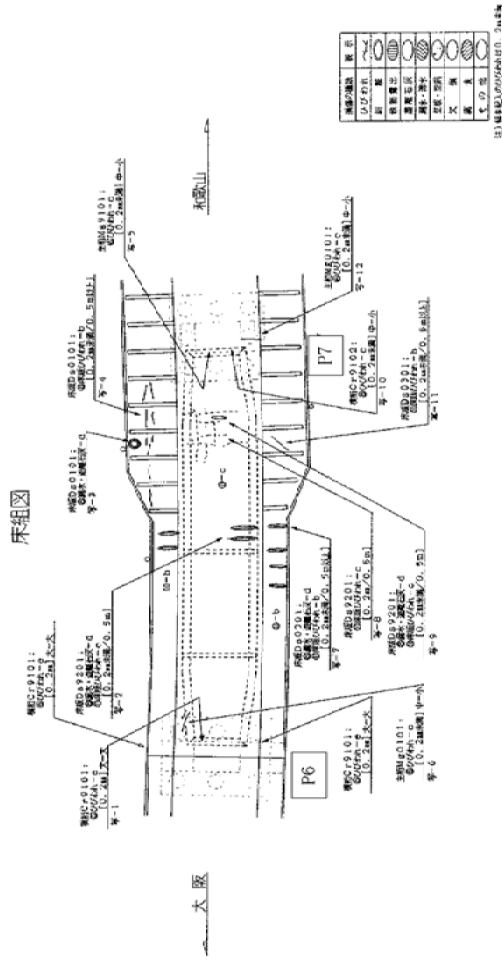
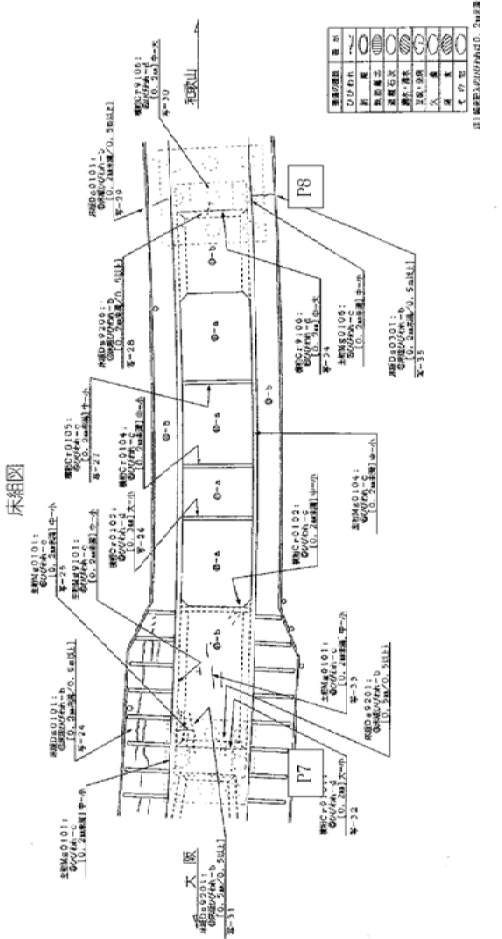


図5 - 10 . 山中川高架橋 施工手順図

4) 解析での着目点



比 較 的 大 き な ひ び 割 れ が 見 ら れ た 、 3 径 間 連 続 箱 桁 橋 (P 6 ~ P 9) に お け る P 8 ~ P 9 径 間 の 下 床 版 下 面 に 着 目 し 、 解 析 を 実 施 す る 。

図 5 - 1 - 1 . 山 中 川 高 架 橋 点 検 調 査 (抜 粋)

(2) 解析条件

1) 物性値 2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:標準] 4.2 熱特性 より

使用セメント種		早強	
設計基準強度	(N/mm ²)	40	配合報告書より
密度	(kg/m ³)	2294	配合報告書より
ポアソン比		0.167	
熱伝導率	(W/m°C)	2.7	
比熱	(kJ/kg°C)	1.15	
熱膨張係数	(μ/°C)	10	

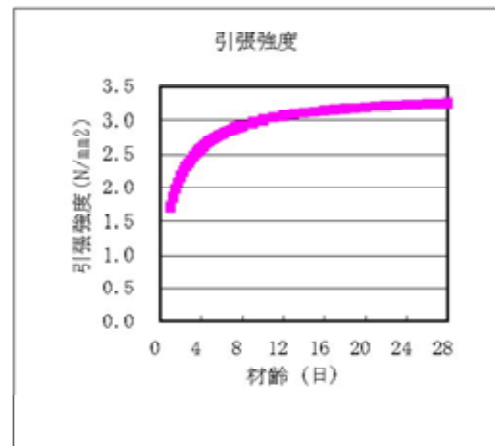
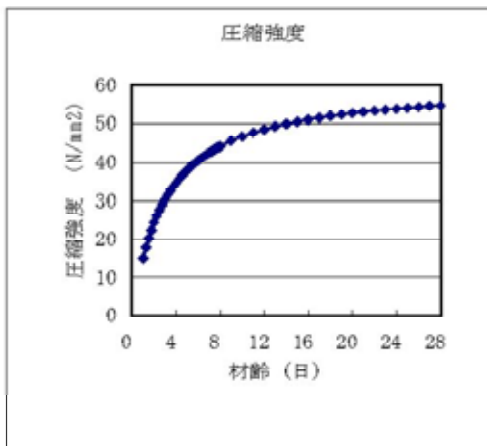
2) コンクリート強度 2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:標準] 4.1 力学特性 より

$$f'_{ck}(t) = \frac{t}{a + bt} \cdot d \cdot f'_{ck}(28)$$

$$f'_{tk}(t) = c \sqrt{f'_{ck}(t)}$$

$f'_{ck}(t)$: 材齢 t 日のコンクリート圧縮強度 (N/mm²)
 $f'_{tk}(t)$: " " 引張強度 (N/mm²)
 $f'_{ck}(28)$: 材齢 28 日のコンクリート圧縮強度 (N/mm²)

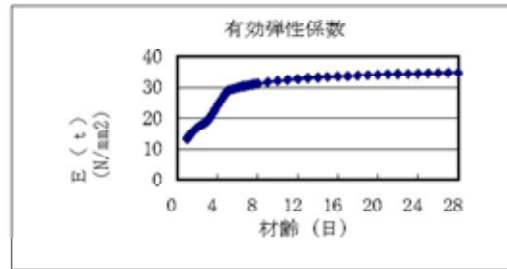
	a	b	d
普通ポルトランドセメント	4.5	0.95	1.11
中庸熱ポルトランドセメント	6.2	0.93	1.15
早強ポルトランドセメント	2.9	0.97	1.07
c	0.44		



3) 有効弾性係数 2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:標準] 4.1.2 コンクリートのヤング係数 より

$$E(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 1000 \times \sqrt{f'_{ck}(t)}$$

$\phi(t)$: 材齢3日まで0.73
 材齢5日以降1.00



4) 断熱温度上昇特性 2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:標準] 4.2.1 コンクリートの熱特性 より JSCE式による

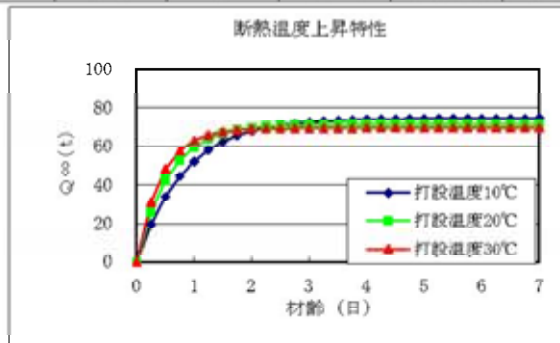
$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-\gamma t})$$

C : 単位セメント量

458 kg/m³

※配合報告書より

打設温度 ℃	Q _∞ = a × C + b			γ = g × C + h		
	a	b	Q _∞	g	h	γ
10	0.13	15	74.54	0.0016	0.478	1.2108
20	0.13	12	71.54	0.0025	0.650	1.7950
30	0.13	10	69.54	0.0014	1.720	2.3612



5) 乾燥収縮特性 2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:本編] 5.2.8 収縮 より

	RH	W	V/S	t ₀	A
CASE1	65	165	163	3	1.0
CASE2	65	165	163	3	1.5
CASE3	65	165	163	3	2.0

2007年 制定 前
2007年 制定 後

$$\epsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp(-0.108(t - t_0)^{0.56})] \times \epsilon'_{sh}$$

$$\epsilon'_{sh} = \{-50 + 78[1 - \exp(RH/100)] + 38 \log_e W - 5[\log_e(V/S)/10]^2\} * A$$

$$t = \sum \Delta t_i \cdot \exp\{13.65 - 4000 / (273 + T(\Delta t_i) / T_0)\}$$

$\epsilon'_{cs}(t, t_0)$: コンクリートの材齢t₀~tまでの収縮ひずみ(×10⁻⁶)

ϵ'_{sh} : 収縮ひずみの最終値(×10⁻⁶)

RH : 相対湿度 (%)

W : 単位水量 (kg/m³)

V : 体積 (mm³)

S : 外気に接する表面積 (mm²)

V/S : 体積表面積比 (mm)

t₀ : 乾燥開始時 (日)

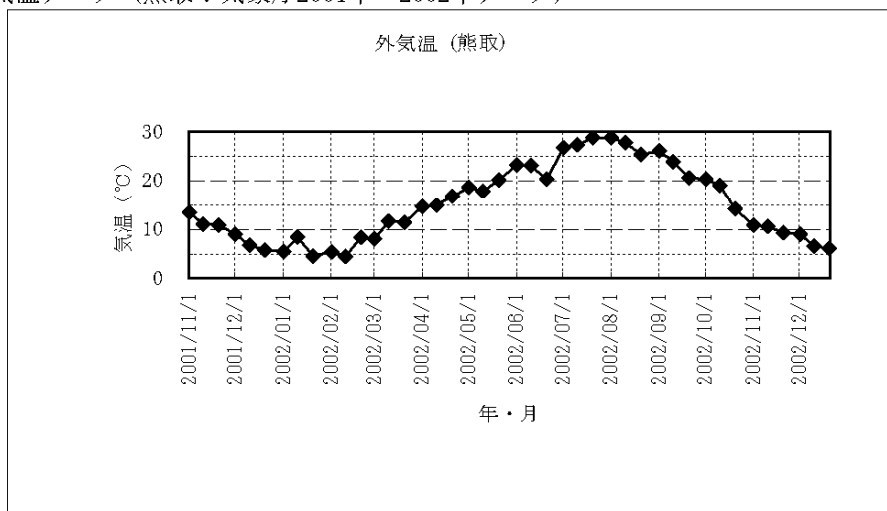
A : 収縮ひずみの設定倍率

6) 打設日及び打設時コンクリート温度

外気温は気象庁HPより日平均気温を参照した。
また、打設時コンクリート温度は外気温+5℃とする。

順序	打設箇所	打設日	外気温(℃)	コンクリート温度(℃)
【1】	P6-P7径間 ウェブ・下床版	2001/11/30	13.3	18.3
【2】	P8-P9径間 ウェブ・下床版	2001/12/11	6.7	11.7
【3】	P7-P8径間 ウェブ・下床版	2001/12/19	5.6	10.6
【4】	P6-P7径間 上床版	2001/12/27	7.5	12.5
【5】	P8-P9径間 上床版	2002/01/17	7.9	12.9
【6】	P7-P8径間 上床版	2002/01/22	4.5	9.5

外気温データ（熊取：気象庁2001年～2002年データ）



7) 養生条件

熱伝達率(W/m²°C)

合板		養生マット+散水		外気
底版・底枠		打設面		
5日間	8	5日間	5	14

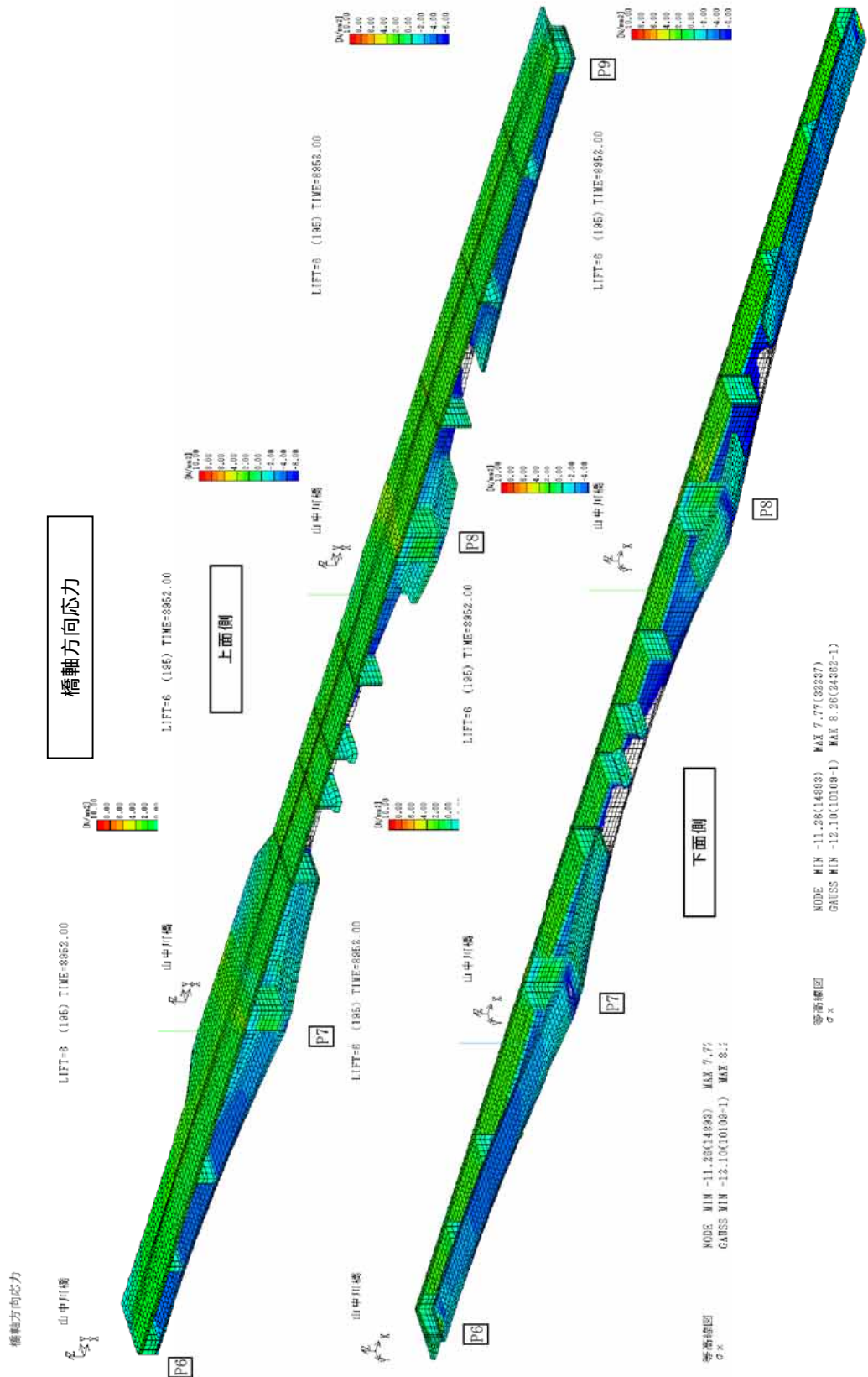


図5 - 13 . 標準的な乾燥収縮度における解析結果 (その2)

橋軸直角方向に着目したグラフ

解析結果(橋軸直角方向)

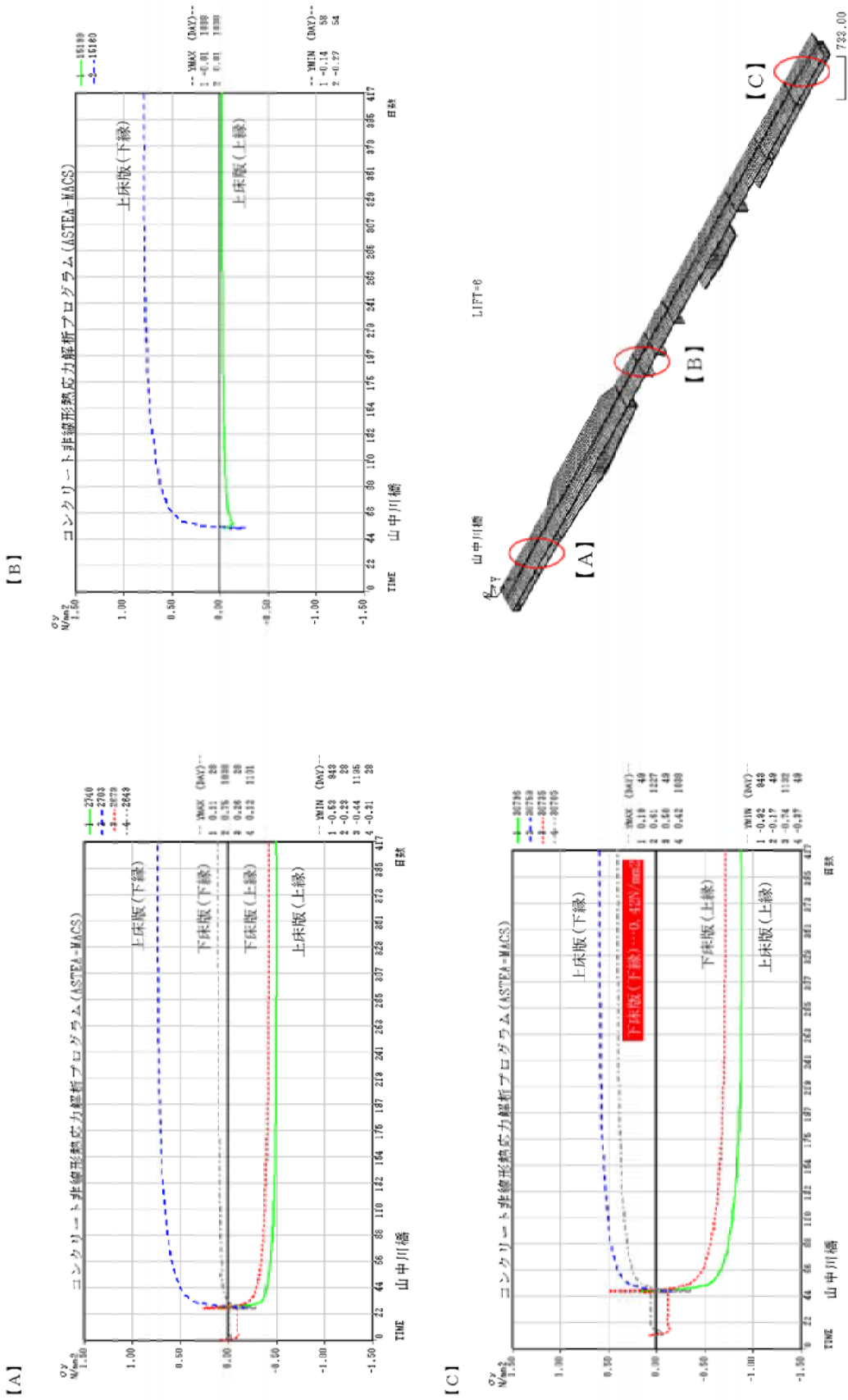


図 5 - 14 . 標準的な乾燥収縮度における解析結果(その3)

2) 乾燥収縮度 = コンクリート標準方書 × 2 倍

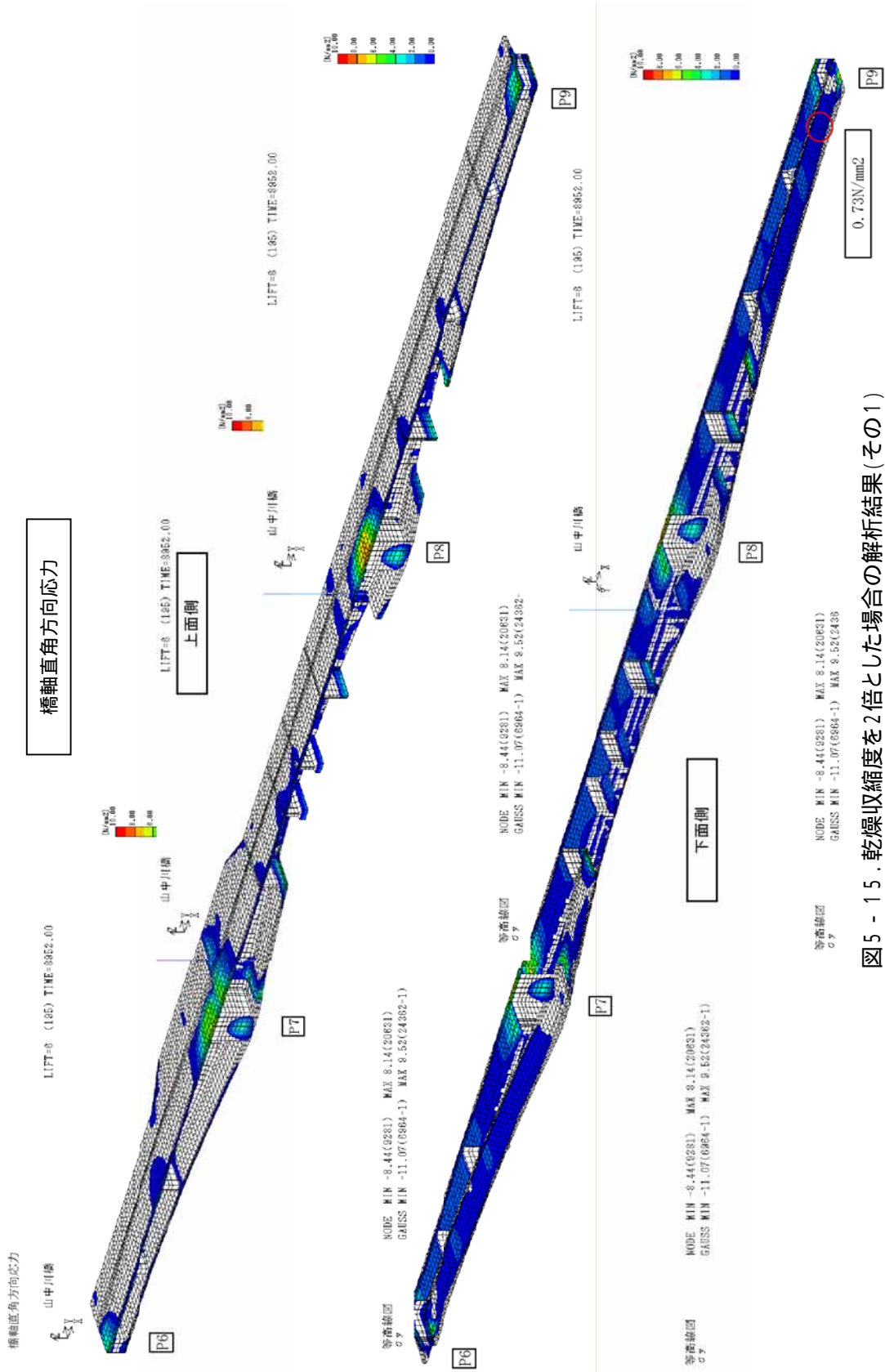


図5 - 15 . 乾燥収縮度を2倍とした場合の解析結果(その1)

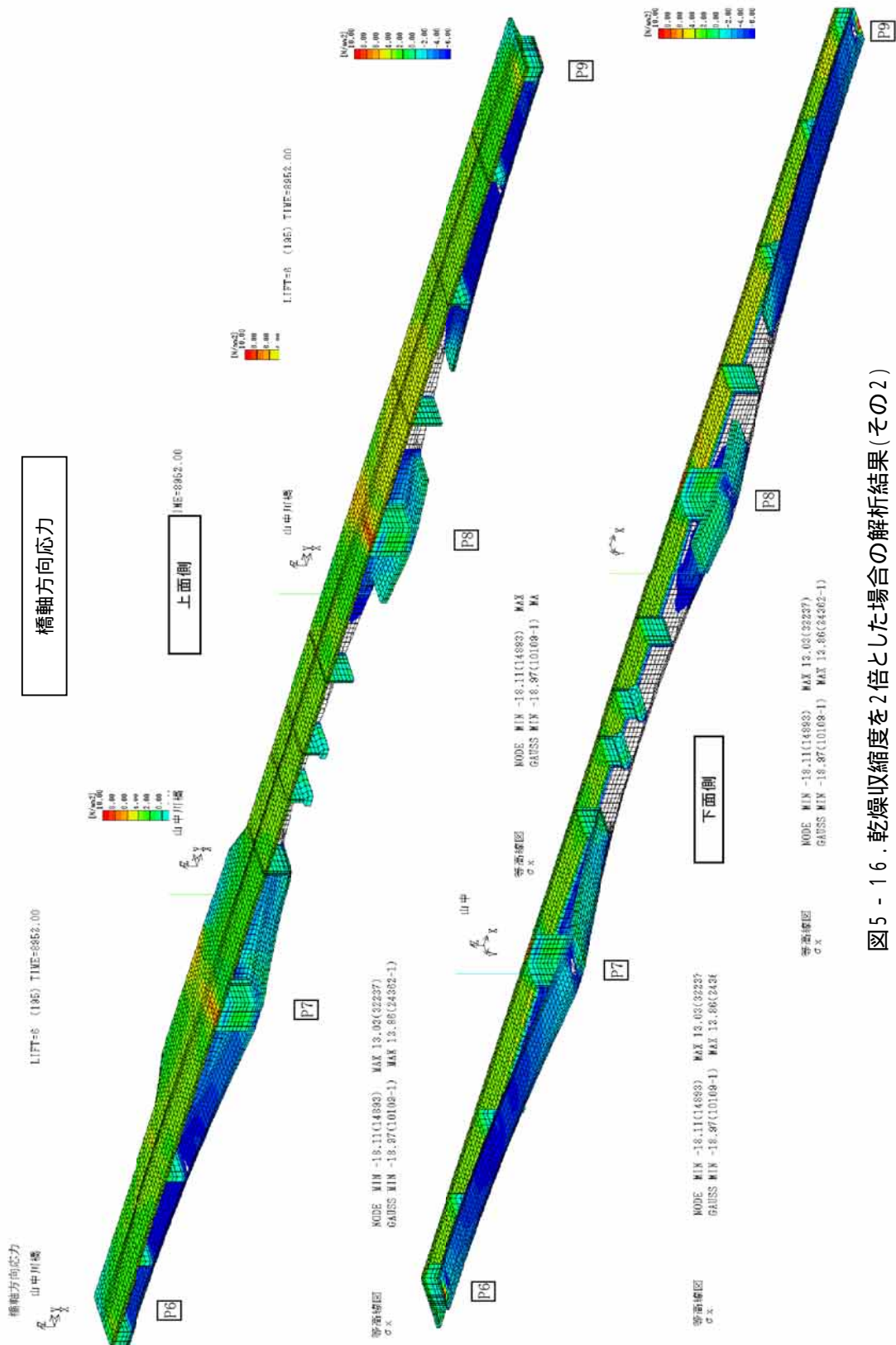


図5 - 16 . 乾燥収縮度を2倍とした場合の解析結果(その2)

橋軸直角方向に着目したグラフ

解析結果(橋軸直角方向)

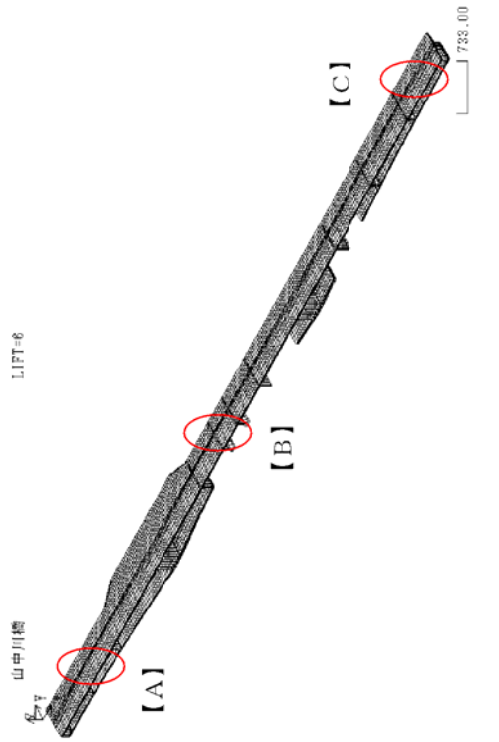
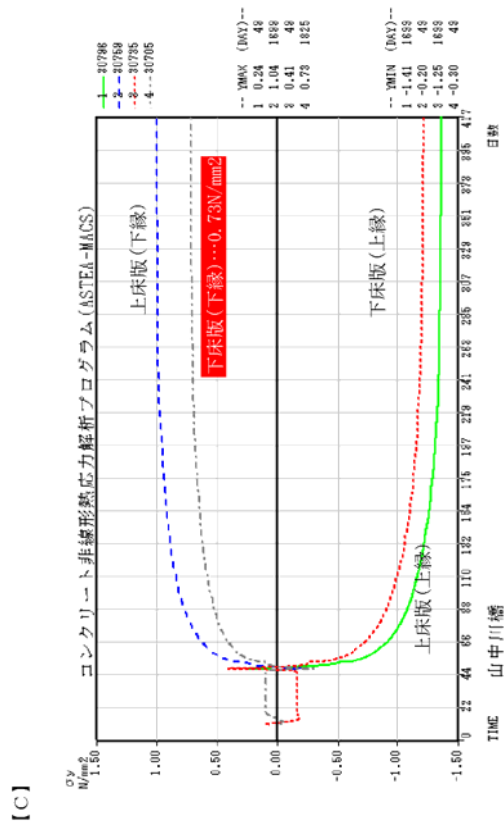
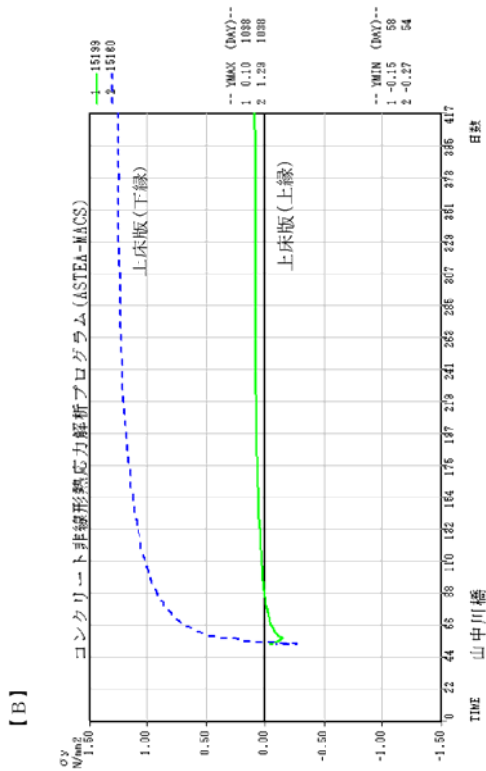
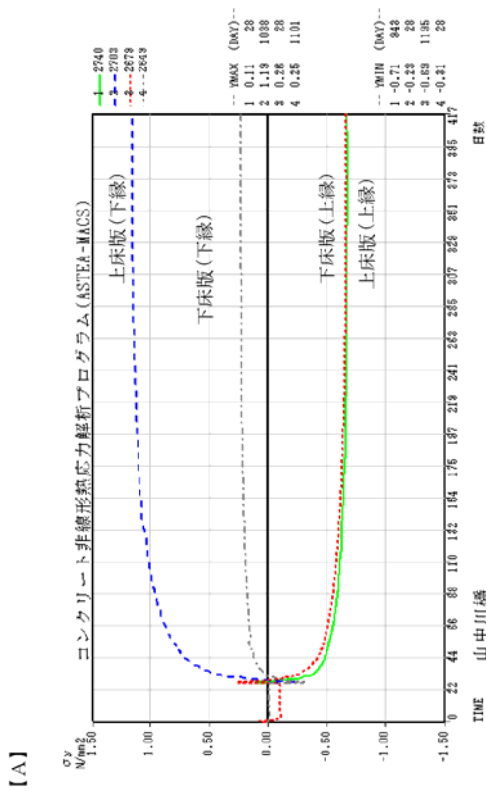


図5 - 17 . 乾燥収縮度を2倍とした場合の解析結果(その3)

(4) 変状の再現

P8～P9 径間の下床版における橋軸直角方向応力は、コンクリート標準示方書の標準的な乾燥収縮度を2倍にしても 0.73N/mm^2 に過ぎず、引張強度 2.69N/mm^2 に対してなお余裕のある状態である。

従って、乾燥収縮だけではひび割れが生じにくい結果となっているが、ひび割れ発生部位は床版横締めや主桁の自重による引張応力も作用するため、以下ではそれらの応力を合成して検討を行った。

1) 床版横締めによる発生応力

解析モデルの上床版に横締めプレストレス力 (1S28.6@600 相当) を導入した場合、下床版下面には直角方向に 0.42N/mm^2 の引張応力が発生する。

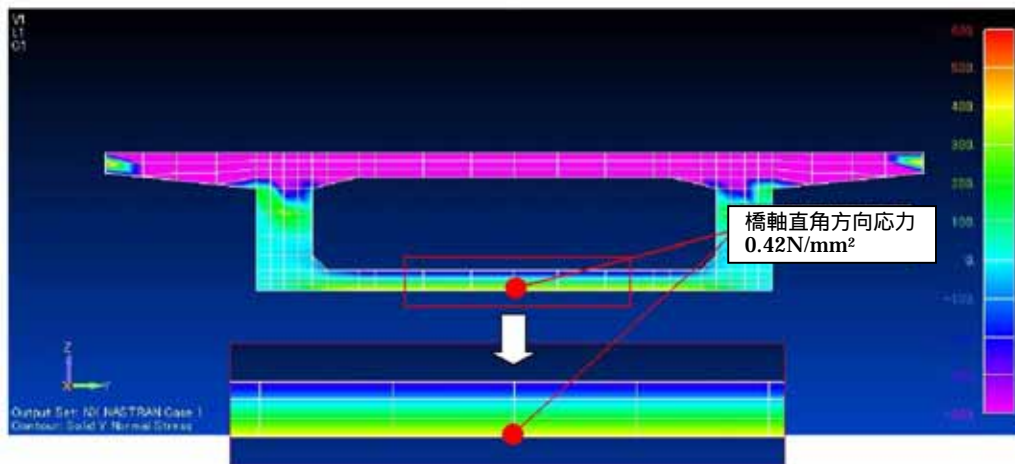


図5 - 18 . 床版横締めによる発生応力

2) 主桁自重による発生応力

同様、自重による引張応力は最大 0.65N/mm^2 となっている。

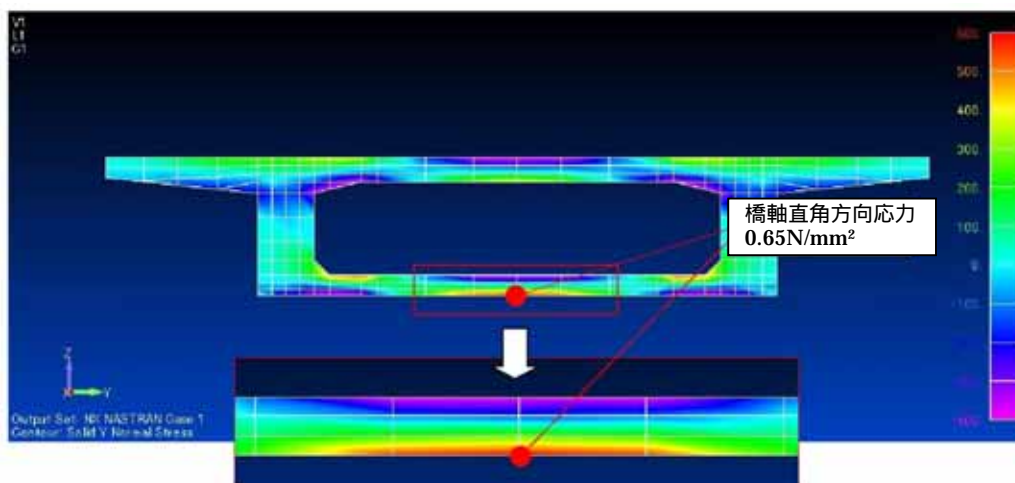


図5 - 19 . 主桁自重による発生応力

3) まとめ

1)、2)は、下床版の曲げ引張応力のため、発生応力は曲げひび割れ強度と比較を行う。
2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:本編] 5.2.1 強度 より、

曲げひび割れ強度

$$\frac{fbck=k_{ob} \times k_{lb} \times f_{tk}}{\quad} = 1.79 \text{ N/mm}^2$$

$$\textcircled{1} \quad k_{ob} = 1 + \frac{1}{0.85 + 4.5(h/I_{ch})} = 1.34$$

$$\textcircled{2} \quad k_{lb} = \frac{0.55}{\sqrt[4]{h}} = 0.50$$

h	:	部材の高さ(m)	…	1.5 m
I _{ch}	:	特性長さ(m) (=GF×Ec÷f _{tk} ²)	…	0.359 m
E _c	:	ヤング係数	…	28 kN/mm ²
GF	:	破壊エネルギー	…	92.8 N/m
		GF= 10×(d _{max}) ^{1/3} ×f'ck ^{1/3}		
d _{max}	:	粗骨材の最大寸法(mm)	…	20 mm
f'ck	:	設計計準強度(N/mm ²)	…	40 N/mm ²

$$\textcircled{3} \quad \begin{array}{l} \text{引張強度} f_{tk} = 0.23f'ck^{2/3} \\ f'ck : \text{設計計準強度(N/mm}^2\text{)} \end{array} = \frac{2.69 \text{ N/mm}^2}{40 \text{ N/mm}^2}$$

【結論】

表5-1. 山中川高架橋 解析結果

発生応力(N/mm ²)	乾燥収縮度	
	2倍	1倍
乾燥収縮	0.73	0.42
上床版横締め緊張	0.42	0.42
コンクリート自重	0.65	0.65
合成応力度	1.80	1.49
判定	NG	OK
曲げひび割れ強度	1.79	

箱桁の下床版に作用する引張応力は、常時で 0.42 + 0.65 = 1.07N/mm² である。これに通常の乾燥収縮による引張応力 0.42N/mm² を加算しても合成応力は 1.49N/mm² であり、曲げひび割れ強度 1.79N/mm² を下回るが、乾燥収縮が2倍の場合、1.80N/mm² となり僅かながらも曲げひび割れ強度を上回る。

以上により、下床版に橋軸方向に伸びるひび割れは、標準より大きな乾燥収縮による引張応力に、直角方向の曲げ応力が加わることで発生した可能性が高いと思われる。

5 - 2 - 3 . 自然田高架橋

1) 検討方針

解析条件

3 次元 FEM により乾燥収縮・水和熱に対する時刻歴解析を行なう。

使用ソフトは ASTEA-MACS (株式会社構造力学研究センター (RCCM)) とする。

構造概要

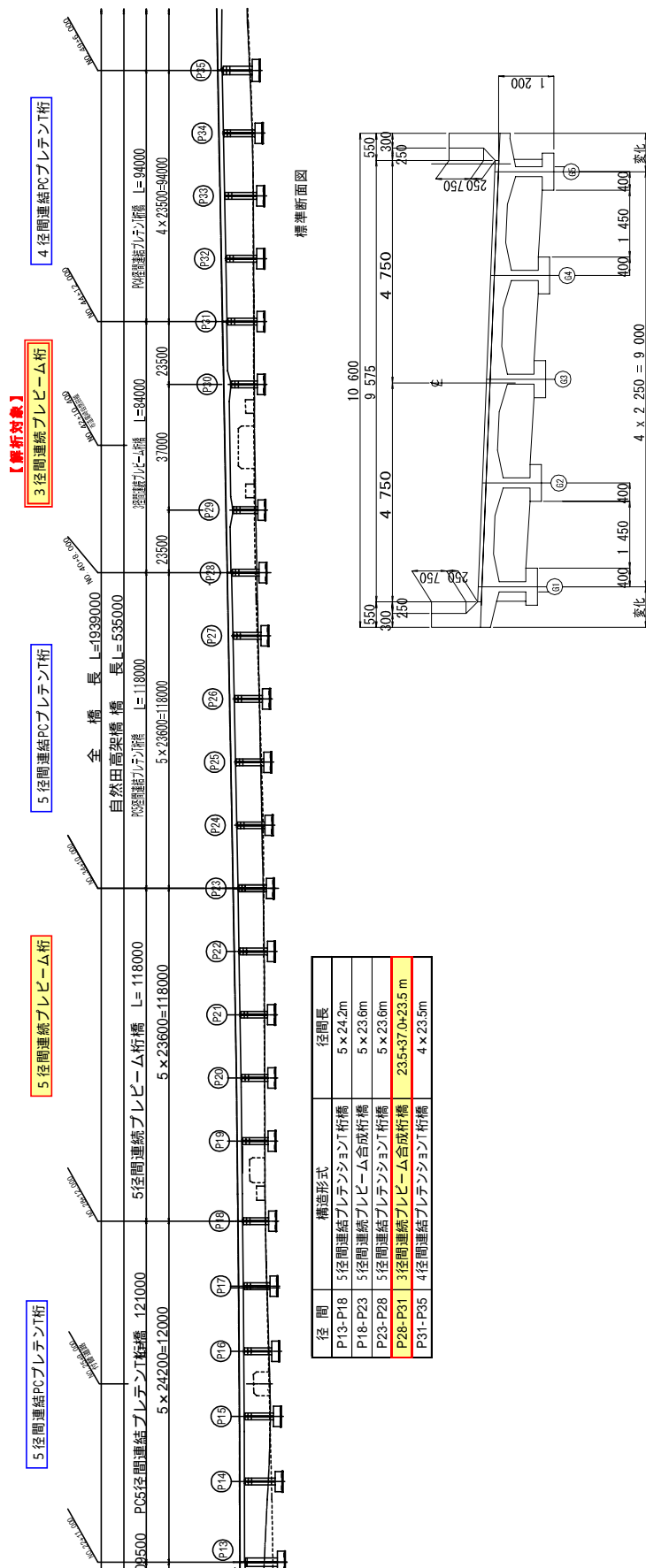


図5 - 2 - 0 . 自然田高架橋 構造一般図

施工方法

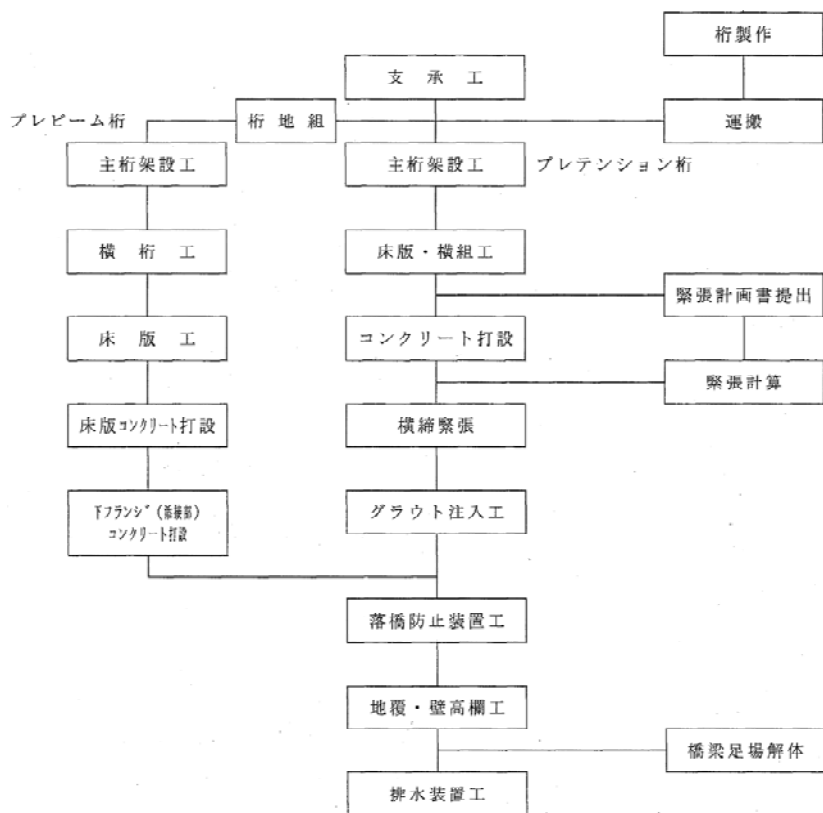


図5 - 21 . 自然田高架橋 施工フロー

< 打設順序 >

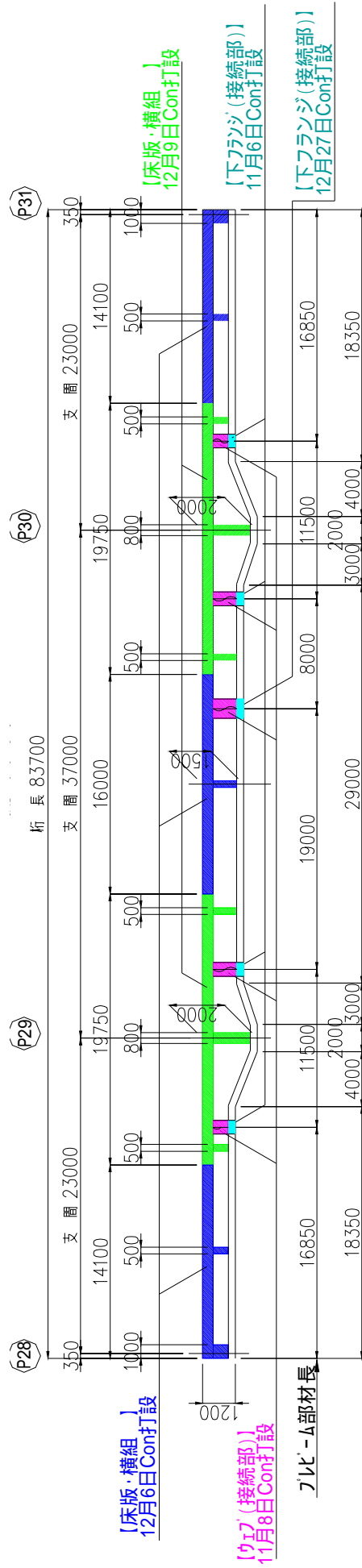
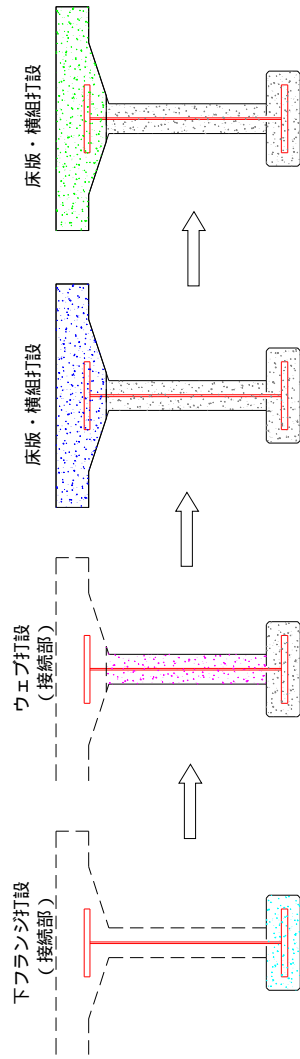
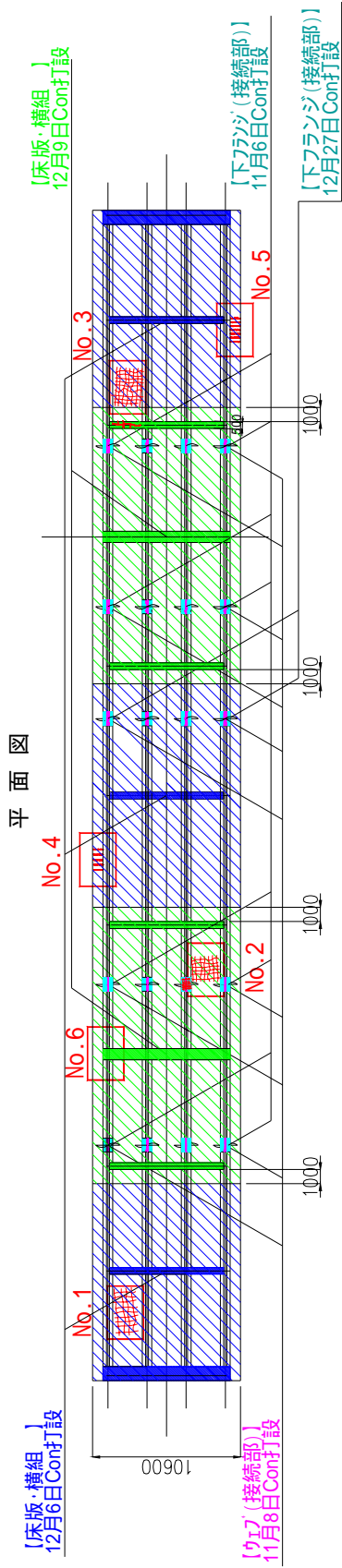


図5-2-2. 自然田高架橋 施工手順図

解析での着目点



着目点	中間床版下面 【No. 1】	中間床版下面 【No. 2】	【No. 3】	張出し床版下面 【No. 4】	張出し床版下面 【No. 5】	支点横桁部 【No. 6】
撮影写真						
損傷状況	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ
損傷の方向性	亀甲状	亀甲状	亀甲状	橋軸直角方向	橋軸直角方向	船道方向
損傷程度	0.05mm~0.1mm	0.1mm~0.2mm	0.1mm~0.2mm	0.1mm~0.3mm	0.1mm~0.35mm	0.1mm~0.35mm

着目点一覧

着目部位	着目No		
中間床版下面	No. 1	No. 2	No. 3
張出し床版下面	No. 4	No. 5	
支点横桁部	No. 6		

図5-2.3. 自然田高架橋 解析の着目箇所

調査結果によると、損傷はプレビーム桁の床版部に顕著である。従って、解析はP18～P23（5径間）、P28～P31（3径間）の何れかが対象となるが、

- ・ 損傷状況に大差がないこと
- ・ プラント、使用骨材が同一であること
- ・ 打設時期（H14.11月上旬～中旬、H14.12月上旬）に大差がなく、生コンの品質管理結果もほぼ同じ

により、自然田最大の支間37.0mを有するP28～P31径間を選定する。

着目部位は、点検調書にひび割れ記録がある、中間床版 3 箇所、張出し床版 2 箇所および横桁部 1 箇所の 6 箇所とする（前頁参照）。

2) 解析条件

物性値 2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:標準] 4.1 力学特性 より

	単位	主桁部	下フランジ	ウェブ	床版・横桁	添接部	プレビーム (H鋼)
セメントの種類		プレキャスト	普通	普通	普通	普通	-
単位セメント量	kg/m ³	-	530	334	343	530	-
比熱	kJ/kg°C	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	0.4
熱伝導率	W/m°C	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	51.3
密度	kg/m ³	2400	2400	2400	2400	2400	7850
設計基準強度	N/mm ²	50	50	50	30	50	355.0
引張強度	N/mm ²	3.11	$f_{tk}(t) = 0.44 \times \sqrt{f_{ck}(t)}$				355.0
弾性係数	N/mm ²	33000	$E(t) = \phi(t) \times 4700 \times \sqrt{f_{ck}(t)}$				200000
ポアソン比	-	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.300
線膨張係数	$\mu/^\circ\text{C}$	10	10	10	10	10	12

コンクリート強度

$$f_{ck}(t) = \frac{t}{a + bt} df_{ck}(28)$$

$$f_{tk}(t) = c \sqrt{f_{ck}(t)}$$

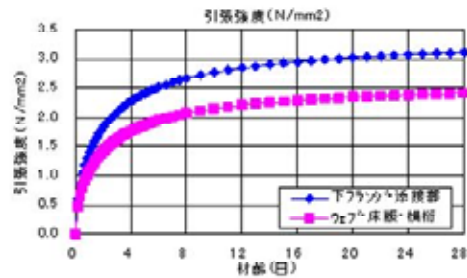
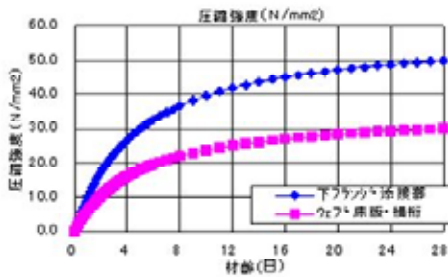
$f_{ck}(t)$: 材齢t日のコンクリート圧縮強度(N/mm²)

$f_{tk}(t)$: " 引張強度(N/mm²)

$f_{ck}(28)$: 材齢28日のコンクリート圧縮強度(N/mm²)

c: コンクリートの乾燥の程度等によって異なるが、0.44を標準とする。

	a	b	d	$f_{ck}(28)$
普通ポルトランドセメント	4.5	0.95	1.11	30, 50
中熱ポルトランドセメント	6.2	0.93	1.15	
早強ポルトランドセメント	2.9	0.97	1.07	
C	0.44			



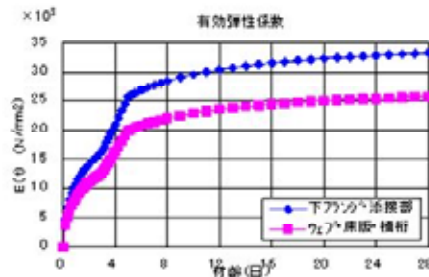
有効弾性係数 2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:標準] 4.1.2 コンクリートのヤング係数 より

$$E(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 1000 \times \sqrt{f_{ck}(t)}$$

$\phi(t)$: 材齢3日まで 0.73

材齢5日以降 1.00

注) 非発熱体は、各コンクリートの設計基準強度に対応する弾性係数を使用する。



JSCE式による

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma t})$$

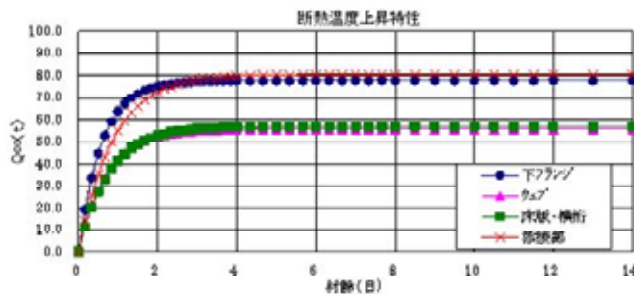
■ 普通セメント

打設部位	打設温度	a	b	g	h
Q _∞ , γの標準値	10	0.13	15.00	0.0016	0.478
	20	0.13	12.00	0.0025	0.650
	30	0.13	10.00	0.0014	1.720

新設部

打設部位	打設温度 ℃	Q _∞ = a × C + b			γ = g × C + h		
		a	b	Q _∞	g	h	γ
下フランク C=500kg/m ³	16.5	0.13	12.70	77.70	0.0029	0.276	1.7180
クマド C=344kg/m ³	18.0	0.13	12.60	66.03	0.0023	0.616	1.3905
床版・横桁 C=343kg/m ³	17.0	0.13	12.60	67.19	0.0028	0.329	1.2997
添接部 C=500kg/m ³	8.0	0.13	15.60	80.60	0.0014	0.444	1.1536

注)コンクリート打設温度は、各モデルの平均的な打設温度とする。

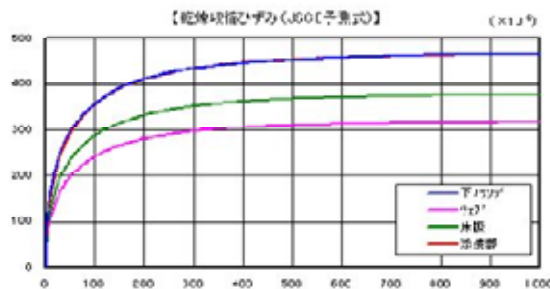


乾燥収縮特性

$$\epsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp(-0.108(t-t_0)^{0.106})] \cdot \epsilon'_{sh}$$

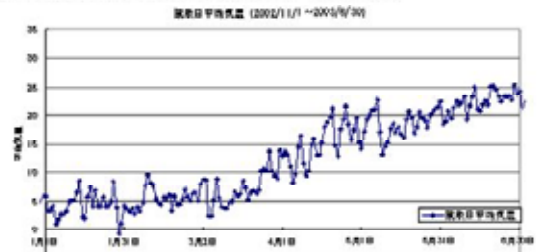
$$\epsilon'_{sh} = -50 + 78[1 - \exp(RH/100)] + 38 \log_e W - 6[\log_e(V/S)/10]^2$$

ϵ'_{sh} : 収縮ひずみの最終値(×10⁻⁵)
 ① : コンクリート材齢t₀からtまでの収縮ひずみ(×10⁻⁵)
 RH : 相対湿度(%)
 W : 単位水量(kg/m³)
 V : 体積(m³)
 S : 外気に接する表面積(m²)
 V/S : 体積表面積比(mm)



打設日および打設時コンクリート温度

外気温は、築構地点である堺市の日別平均気温(気象庁データ1971~2000年)を参照する。打設温度は、実施工時のコンクリート温度(品質管理一覧)を参照する。



STEP	部位	打設日	部齢(日)	打設温度(℃)	外気温(℃)
STEP1	下フランク	11/6	2	16.5	9.9
STEP2	クマド	11/8	28	18.0	14.7
STEP3	床版・横桁①	12/6	3	17.0	9.8
STEP4	床版・横桁②	12/9	18	14.0	7.1
STEP5	添接部	12/27		8.0	4.0

3) 解析結果

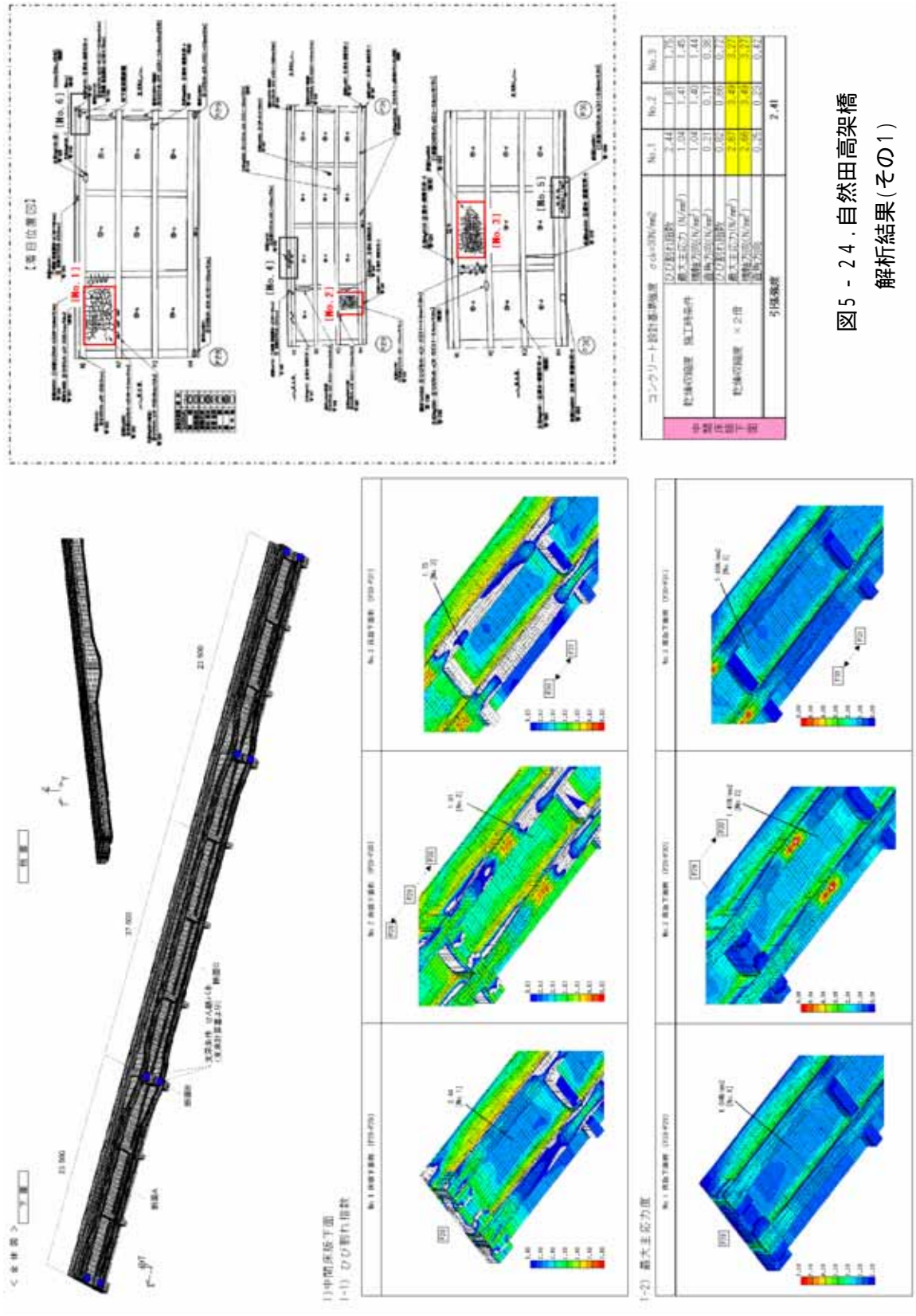
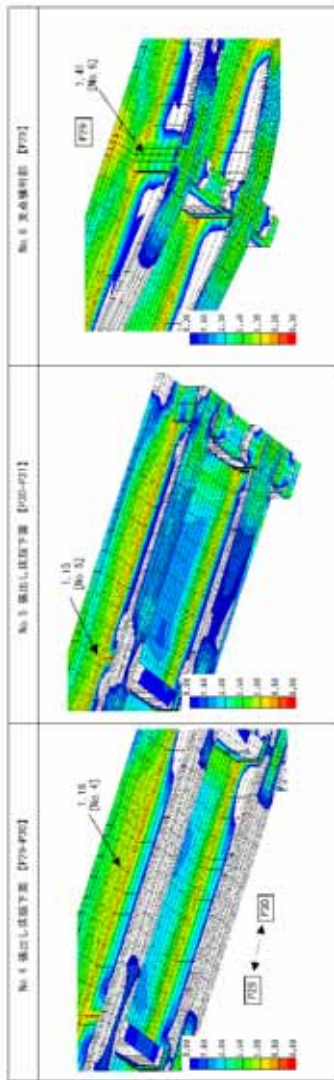


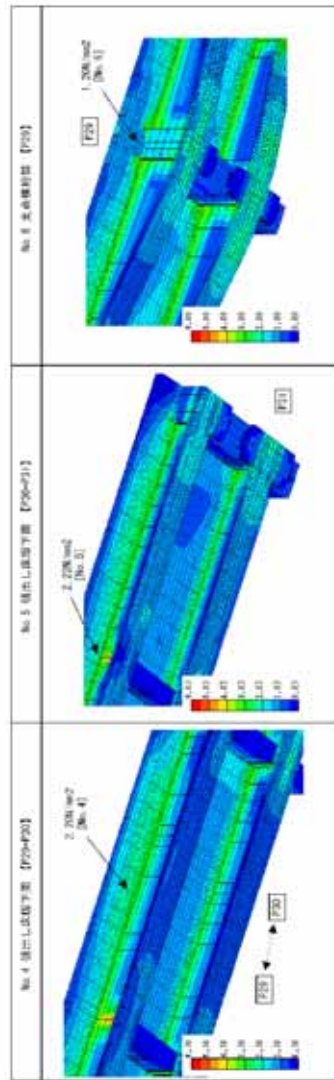
図5 - 24 . 自然田高架橋
解析結果(その1)

2) 橋出し床版下面および支点横断面

2-1) ひび割れ係数



2-2) 最大主応力度



コンクリート設計基準強度 $\sigma_{ck}=30\text{N/cm}^2$		No. 4	No. 5
橋出し床版下面	ひび割れ指数	1.18	1.15
	最大主応力 (N/cm ²)	2.70	2.22
	橋脚主応力 (N/cm ²)	2.70	2.21
支点横断面	ひび割れ指数	0.54	0.50
	最大主応力 (N/cm ²)	4.52	4.63
	橋脚主応力 (N/cm ²)	4.52	4.63
引張強度		2.41	

コンクリート設計基準強度 $\sigma_{ck}=30\text{N/cm}^2$		No. 6
橋出し床版下面	ひび割れ指数	1.41
	最大主応力 (N/cm ²)	1.20
	橋脚主応力 (N/cm ²)	1.19
支点横断面	ひび割れ指数	0.73
	最大主応力 (N/cm ²)	3.11
	橋脚主応力 (N/cm ²)	3.10
引張強度		2.41

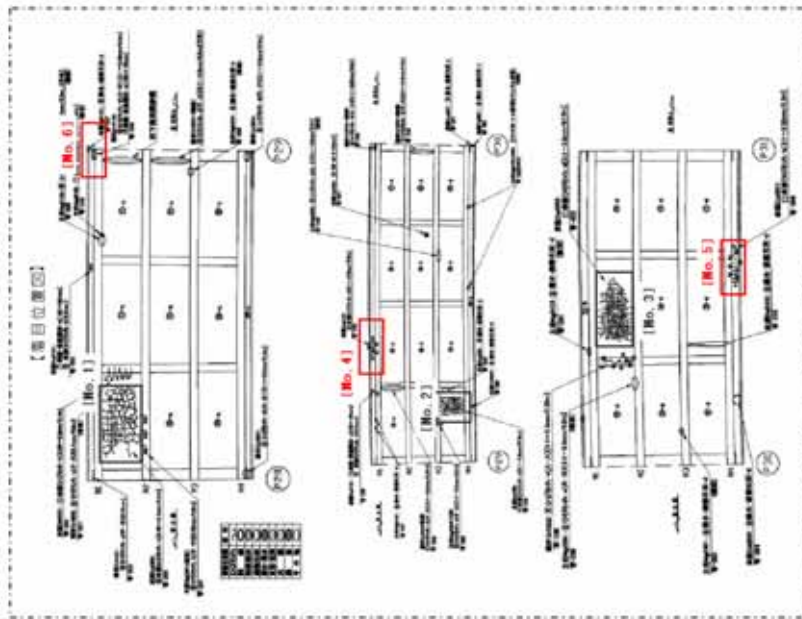


図5 - 2.5 . 自然田高架橋
解析結果(その2)

解析結果一覧表

	中間床版下面			張出し床版下面		中間支点横桁部
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
乾燥収縮度 施工時条件						
ひび割れ指数	2.44	1.81	1.75	1.16	1.15	1.41
引張応力度(N/mm ²)	1.04	1.40	1.44	2.20	2.21	1.20
乾燥収縮度 × 2倍						
ひび割れ指数	0.82	0.66	0.72	0.54	0.53	0.73
引張応力度(N/mm ²)	2.66	3.49	3.27	4.52	4.63	3.10
引張強度	2.41					

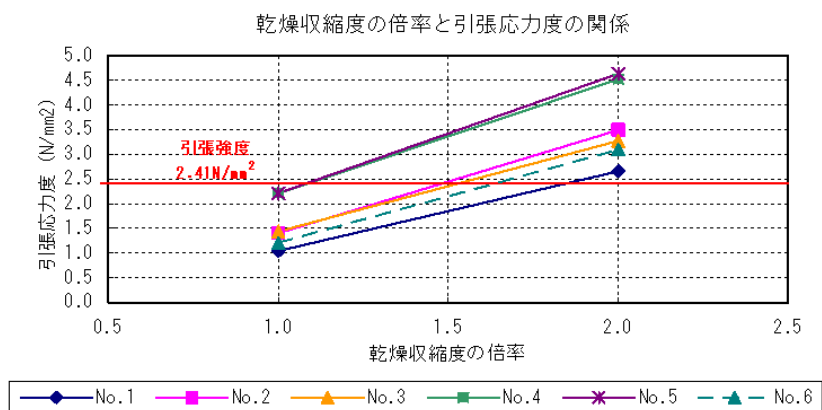


図5 - 26 . 自然田高架橋 解析結果総括

本橋の損傷部位は、外気の影響を受けやすい耳桁側に偏った傾向を示しており、中桁間の中間床版部（G2～G3間）には際立った損傷は発生していない。また劣化状況も亀甲状のひび割れを呈していることから、劣化要因としては乾燥等収縮の可能性が高いと思われる。

上表に損傷が記録されている6箇所について、乾燥収縮度をパラメータとして実施した解析の結果を示す。

コンクリート標準示方書による標準的な乾燥収縮度では、発生した最大主応力度は 1.04～2.21N/mm²であり、ひび割れ指数は中間床版で1.75～2.44（ひび割れ発生確率5%未満）、張出し床版で1.15程度（発生確率65%未満）、支点横桁で1.41（発生確率30%未満）となった。

次に、乾燥収縮度を2倍と仮定した場合、中間床版部における最大主応力度は 2.66～3.49N/mm²で引張強度を超過し、ひび割れ指数は0.66～0.82（発生確率95%以上）となった。同様に張出し床版NO.4、NO.5および支点横桁についても、最大主応力度は4.52、4.63、3.10N/mm²と引張強度を超過し、ひび割れ指数は順に0.54、0.53、0.73（発生確率95%以上）となった。

以上により、ひび割れの原因を乾燥等収縮にのみ求めるなら、収縮度はコンクリート標準示方書による標準値の2倍、750μ程度に達していた可能性があると思われる。

(参考) 点検調書の記録から乾燥収縮度の推定を行なうと、

・ 中間床版のひび割れ：幅 0.1 ~ 0.3mm の 2 方向ひび割れが 15 ~ 30cm 間隔

(平均) 890 μ

・ 張出床版のひび割れ：幅 0.05 ~ 0.3mm の 1 方向ひび割れが約 20cm 間隔

(平均) 990 μ

・ 横桁のひび割れ：幅 0.1 ~ 0.3mm の 1 方向ひび割れが 20 ~ 30cm 間隔

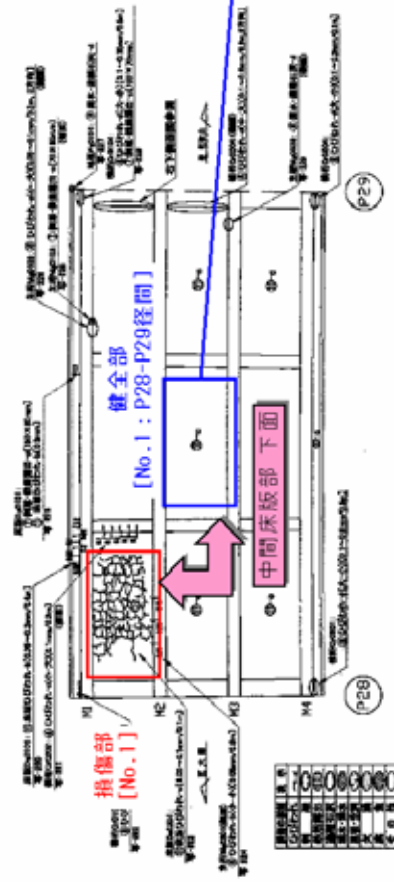
(平均) 800 μ

となる。

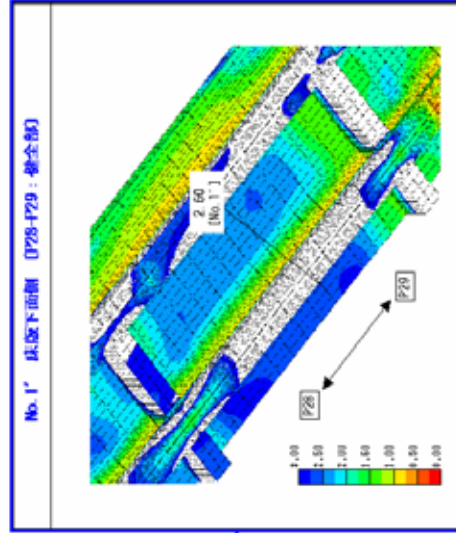
4) 健全部との比較

ここでは、前項までの損傷箇所と同一部材で損傷が報告されていない健全部を抽出し、解析結果の傾向を比較する。比較を行なう箇所は以下のとおりである。

中間床版部 下面 NO.1 (P28~P29 径間)



<ひび割れ指数>



コンクリート設計基準強度 $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$		No.1' (健全部)
中間床版下面	ひび割れ指数	2.44
	最大応力 (N/mm ²)	0.87
	橋軸方向 (N/mm ²)	0.87
	直角方向 (N/mm ²)	0.38
乾燥収縮度 × 2倍	ひび割れ指数	1.05
	最大応力 (N/mm ²)	2.67
	橋軸方向 (N/mm ²)	1.97
引張強度		0.78
		2.41

ここに
 損傷部: G1-G2間の中間床版部
 健全部: G2-G3間の中間床版部 を示す

図5 - 2.7. 健全部と損傷部の解析結果

コンクリート標準示方書による標準的な乾燥収縮度の場合、損傷部・健全部ともに発生した最大主応力度は引張強度以内である。

次に乾燥収縮度を2倍とした場合、損傷部の応力が引張強度を超過することは既述の通りであるが、健全部については最大主応力度が 1.97N/mm^2 であり、なお引張強度以内である。ただし、ひび割れ指数は1.05（発生確率85%未満）であり、ひび割れ発生の可能性は高い状態にあると言える。

以上より、着目箇所は1ヶ所に留まっているものの、解析は実橋における部位ごとの安全性を比較的正確に表現していると判断される。

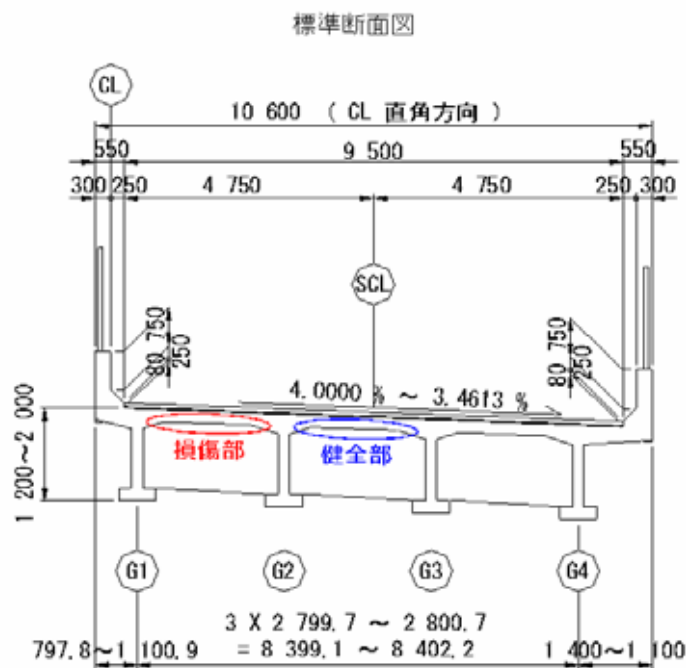


図5 - 28 . 健全部と損傷部

5 - 2 - 4 . 菟砥川高架橋

(1) 検討方針

1) 解析方法

3次元FEMにより乾燥収縮・水和熱に対する時刻歴解析（弾性解析）を行なう。

使用ソフトはASTEAMACS（株式会社構造力学研究センター（RCCM））とする。

2) 構造概要

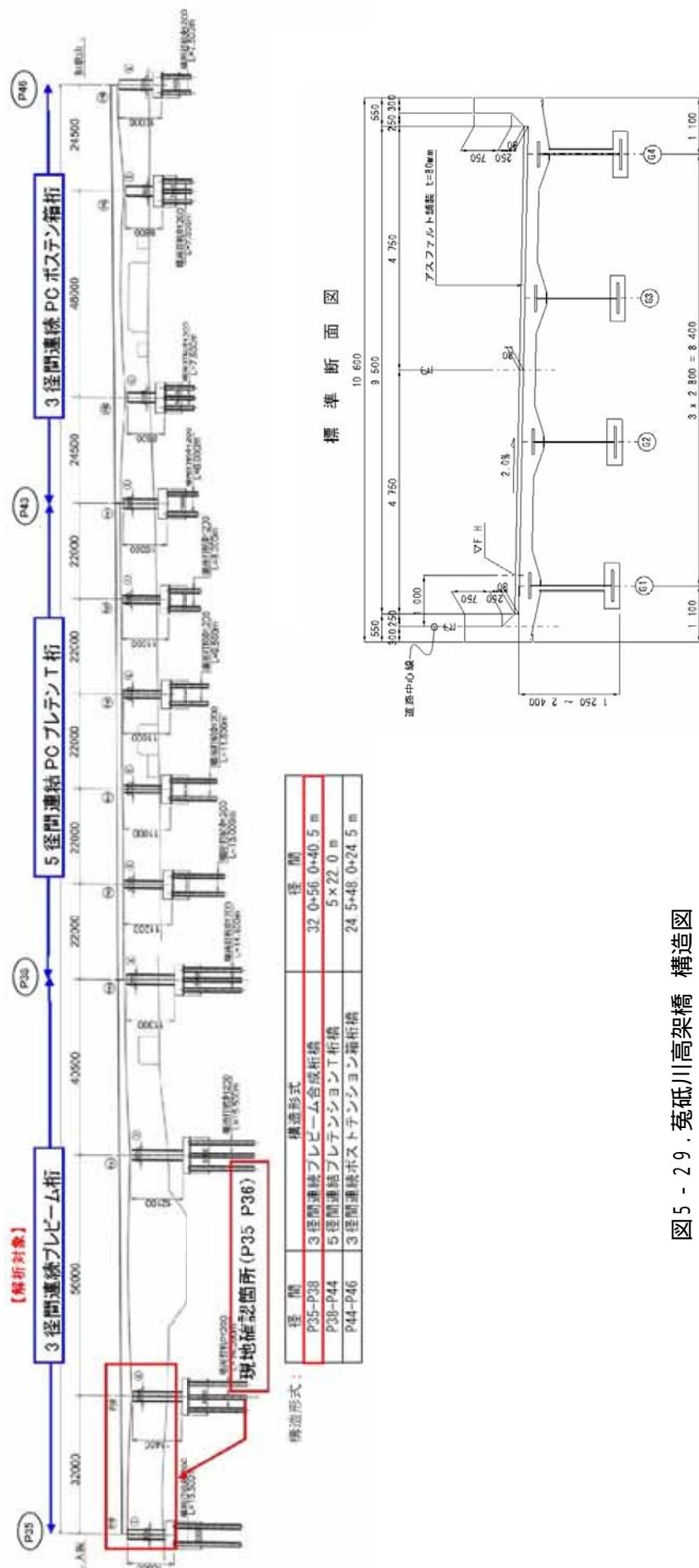


図5 - 2 - 9 . 菟砥川高架橋 構造図

3) 施工方法

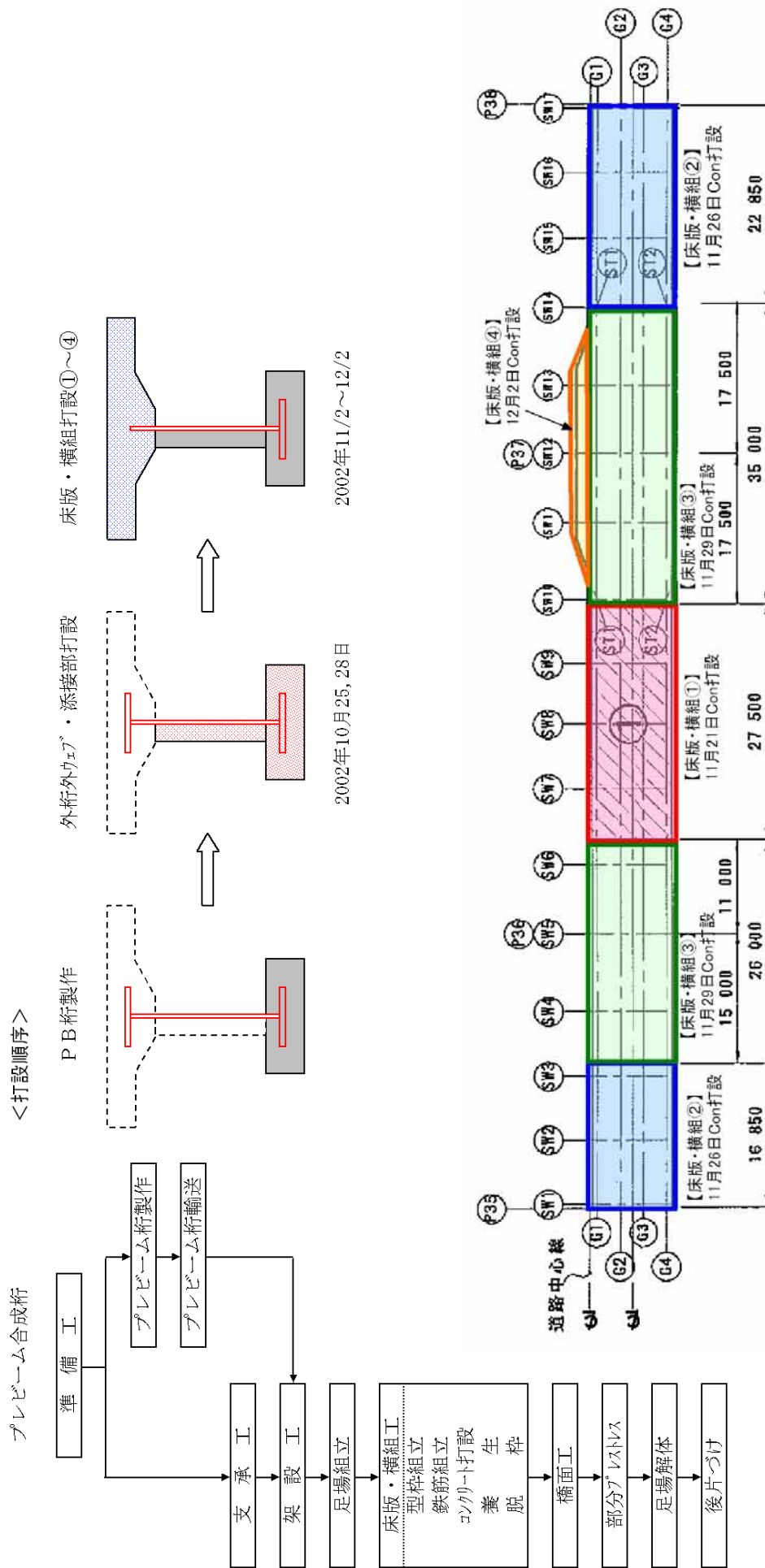
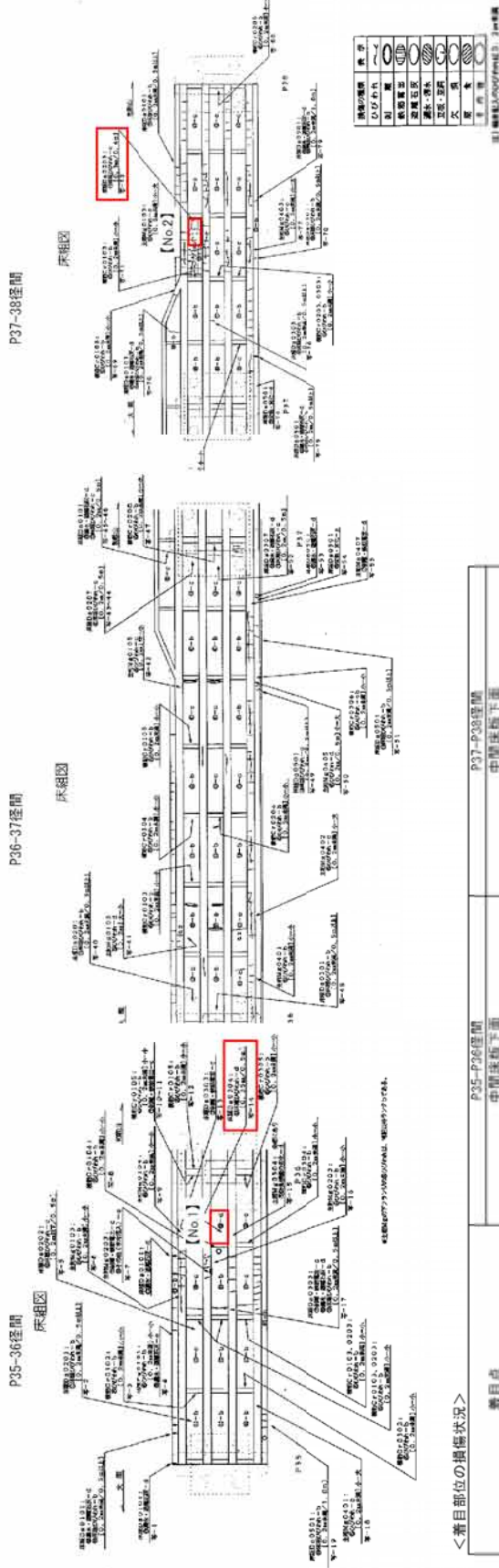


図5-30. 菟砥川高架橋 施工手順図

4) 解析での着目点

<損傷図(点検調査より抜粋)>



着目部位の損傷状況	
着目点	P35-P36径間 中間床版下層 【No. 1】
損傷写真	
損傷の種類	床版ひび割れ
損傷の方向性	亀甲状
損傷程度	幅0.35mm/間隔0.5m
	P37-P38径間 中間床版下層 【No. 2】
	
	床版ひび割れ
	橋軸直角方向
	幅0.3mm/間隔0.4m

点検調査によると、変状はプレベーム桁の床版部に顕著である。従って解析は、P35～P38径間を対象とする。

解析の着目部位は、変状の目立つ2箇所（P35～P36径間、P37～P38径間のそれぞれ中間床版）とする。

図5-31. 菟砥川高架橋 点検調査抜粋

(2)解析条件

1)物性値

	単位	主桁部 (下フランジ)	外桁外ウェブ	添接部	床版・横桁	プレベーム (鋼桁)
セメントの種類		フレキスト	普通ポルトランドセメント			-
単位セメント量	kg/m ³	-	530		353	-
比熱	kJ/kg°C		1.15			0.4
熱伝導率	W/m°C		2.7			51.3
密度	kg/m ³		2400			7850
設計基準強度	N/mm ²		50		30	355
引張強度	N/mm ²	3.11	ftk(t)=0.44×√f'c(t)			355
弾性係数	N/mm ²	33000	Ee(t)=φ(t)×4700×√f'c(t)			200000
ポアソン比	-		0.167			0.3
線膨張係数	μ/°C		10			12

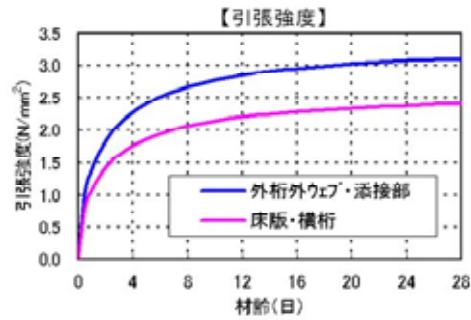
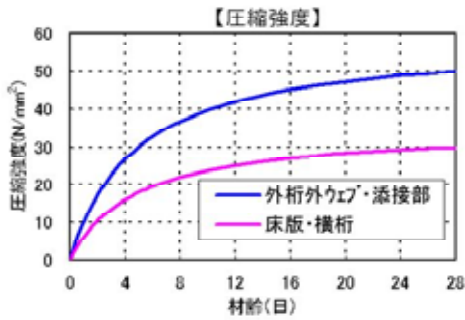
2)コンクリート強度 2007年制定 コンクリート標準示方書〔設計編:標準〕4.1 力学特性 より

$$f'c(t) = \{t / (a + bt)\} \times d \times f'ck(28)$$

$$ftk(t) = 0.44 \times \sqrt{f'c(t)}$$

- f'c(t) : 材齢t日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)
- f'ck(28) : コンクリートの設計基準強度 (N/mm²) ただし、材齢は28日とする。
- t : 材齢 (日)

単位	a	b	d
普通ポルトランドセメント	4.5	0.95	1.11
中庸熱ポルトランドセメント	6.2	0.93	1.15
早強ポルトランドセメント	2.9	0.97	1.07

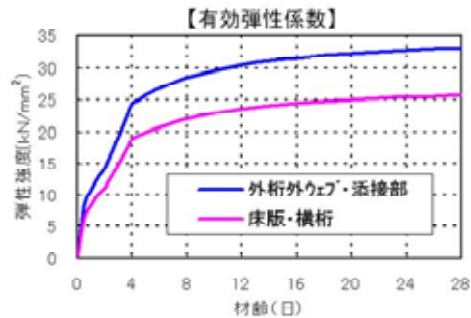


3)有効弾性係数 2007年制定 コンクリート標準示方書〔設計編:標準〕4.1.2 コンクリートのヤング係数 より

$$Ee(t) = \phi(t) \times 4700 \times \sqrt{f'c(t)}$$

- φ(t) : 材齢3日まで 0.73
- 材齢5日以降 1.00

注) 非発熱体(鋼桁, 下フランジ)は, 各材料の設計基準強度に対応する弾性係数を使用。



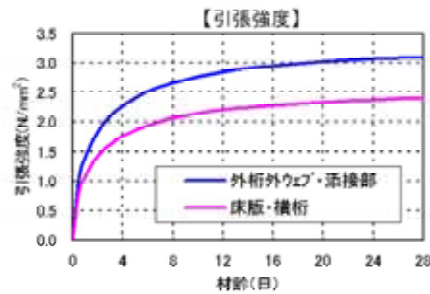
4) 断熱温度上昇特性 2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:標準] 4.2.1 コンクリートの熱特性 より

$$Q(t) = Q_{\infty} \times (1 - e^{-t/\tau})$$

■普通ポルトランドセメント

	打込み時の 温度	$Q_{\infty} = a \times C + b$		$\gamma = g \times C + h$	
		a	b	g	h
		Q_{∞}, γ の標準値			
	10	0.12	11	0.0015	0.135
	20	0.11	13	0.0038	-0.036
	30	0.11	12	0.0040	0.337

	打込み時の 温度	$Q_{\infty} = a \times C + b$			$\gamma = g \times C + h$		
		a	b	Q_{∞}	g	h	γ
		外桁外ウェブ・添接部					
	20	0.11	13	71.3	0.0038	-0.036	1.978
床版・横桁							
	20	0.11	13	51.8	0.0038	-0.036	1.305



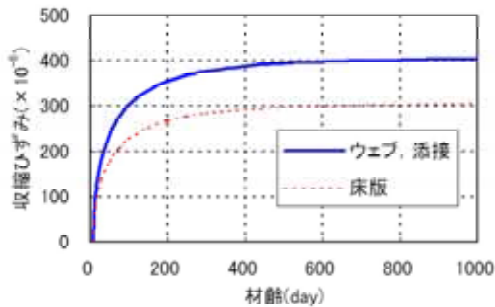
5) 乾燥収縮特性

$$\epsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp\{-0.108(t-t_0)^{0.66}\}] \cdot \epsilon'_{sh}$$

$$\epsilon'_{sh} = 50 + 78[1 - \exp(RH/100)] + 381 \log_e W - 5[\log_e(V/S/10)]^2$$

ϵ'_{sh} : 収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-5}$)
 $\epsilon'_{cs}(t, t_0)$: 材齢 t_0 から t までの収縮ひずみ ($\times 10^{-5}$)

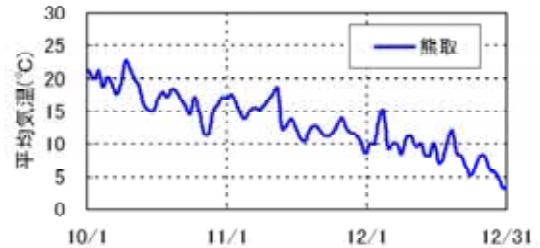
単位	単位	外桁外ウェブ 添接部	床版・横桁
相対湿度(RH)	%	70	70
単位水量(W)	kg/m ³	175	173
体積表面積比(V/S)	mm	100	147
乾燥開始日(t ₀)	day	7	7



6) 打設日及び打設時コンクリート温度

外気温は、最寄りの気象観測地点“熊取（クマトリ）”の日平均気温とする。
 打設時のコンクリート温度は、外気温 + 5℃とする。

<日平均気温(2002/10/1~12/31)>



<打設時のコンクリート温度>

STEP	部位	打設日	コンクリート温度(°C)	外気温(°C)
1	外桁外ウェブ 添接部	10/28	20.3	15.3
2	床版・横桁①	11/21	15.2	10.2
3	床版・横桁②	11/26	15.1	10.1
4	床版・横桁③	11/29	16.0	11.0
5	床版・横桁④	12/2	15.2	10.2

(3) 解析結果

1) 乾燥収縮度 = コンクリート標準示方書 × 1倍

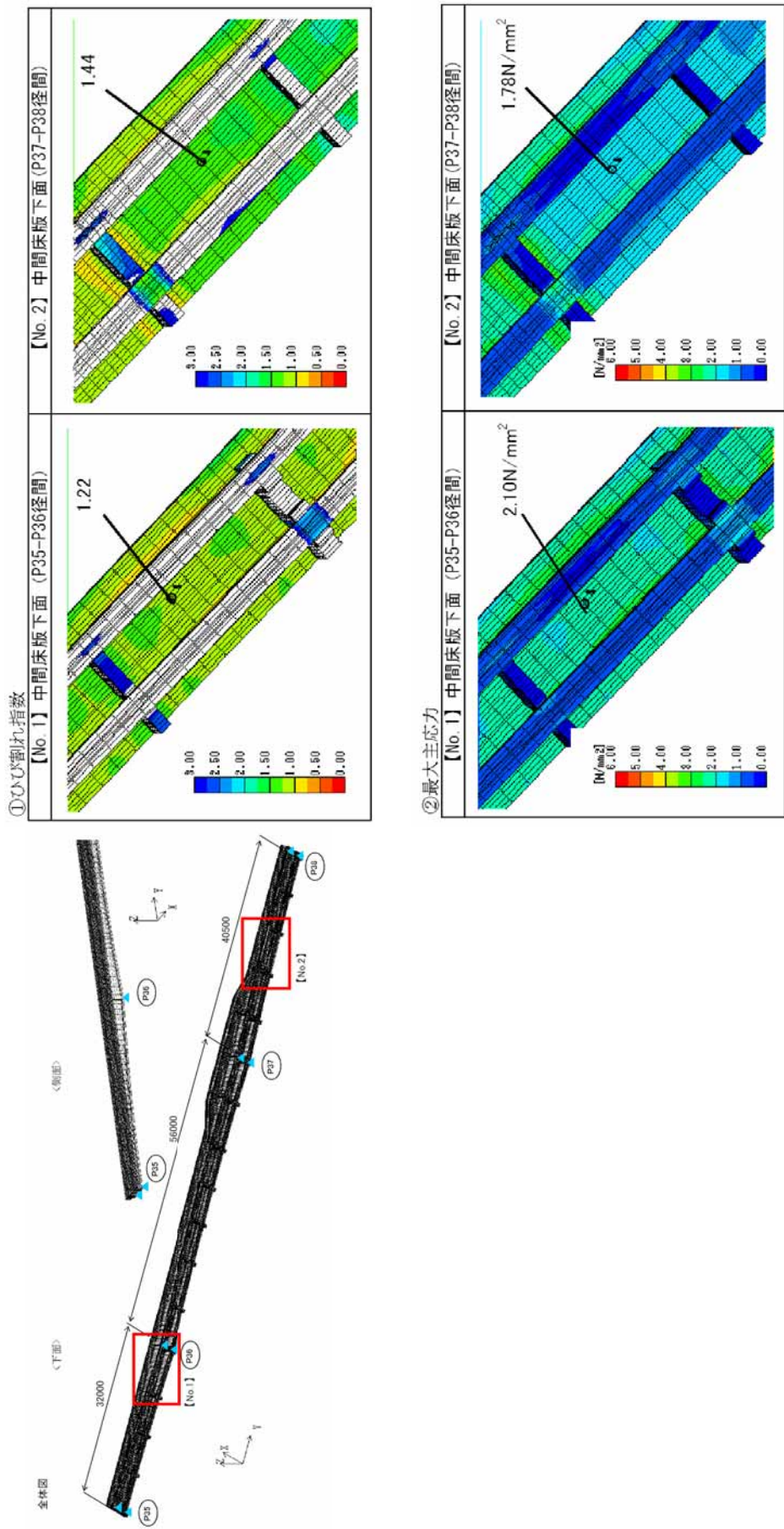


図5 - 3 - 2 . 標準的な乾燥収縮度における解析結果

2) 乾燥収縮度 = コンクリート標準示方書 × 2倍

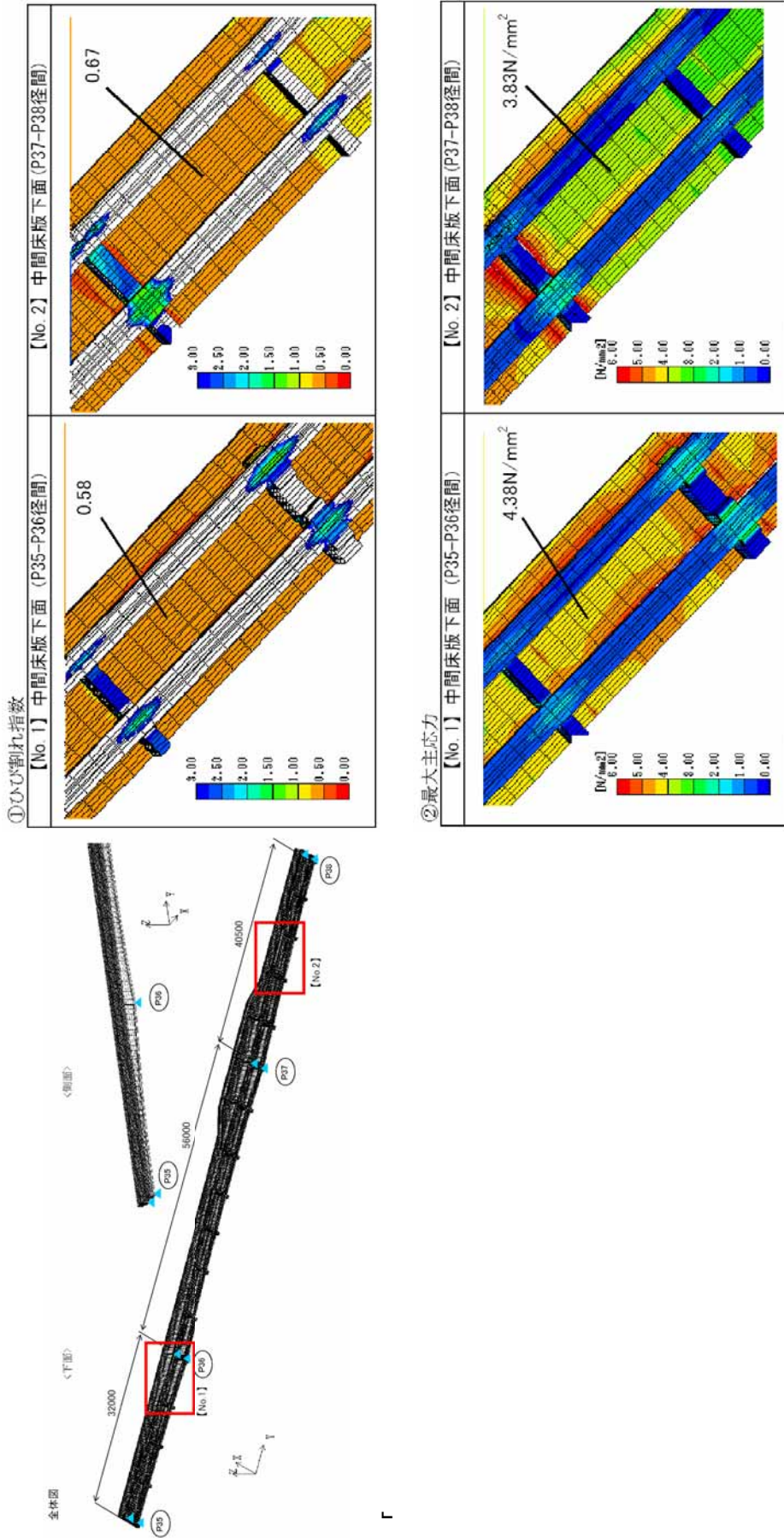


図5 - 33 . 乾燥収縮度を2倍とした場合の解析結果

3) まとめ

表5 - 2 . 菟砥川高架橋 解析結果

乾燥収縮度 = 1倍

	温度応力		温度+収縮応力	
	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
ひび割れ指数	5.26	8.93	1.22	1.44
最大主応力(N/mm ²)	0.36	0.13	2.10	1.78
橋軸応力(N/mm ²)	0.36	0.13	2.10	1.78
橋軸直角応力(N/mm ²)	-0.27	0.05	0.10	0.07

乾燥収縮度 = 2倍

	温度応力		温度+収縮応力	
	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
ひび割れ指数	5.26	8.93	0.58	0.67
最大主応力(N/mm ²)	0.36	0.13	4.38	3.83
橋軸応力(N/mm ²)	0.36	0.13	4.37	3.83
橋軸直角応力(N/mm ²)	-0.27	0.05	0.10	0.07

乾燥収縮度がコンクリート標準示方書の標準的な値の場合、発生応力は最大で 2.10N/mm² であり、引張強度 2.56N/mm² を下回る（ひび割れ指数 1.22）。一方、乾燥収縮度が 2 倍の場合、発生応力は最大で 4.38N/mm² となり、引張強度を上回る（ひび割れ指数 0.58）。

以上より、ひび割れの主要因は大きな乾燥収縮である可能性が高いと判断される。

5 - 2 - 5 . 実際の物性値を用いた解析

(1) 検討方針

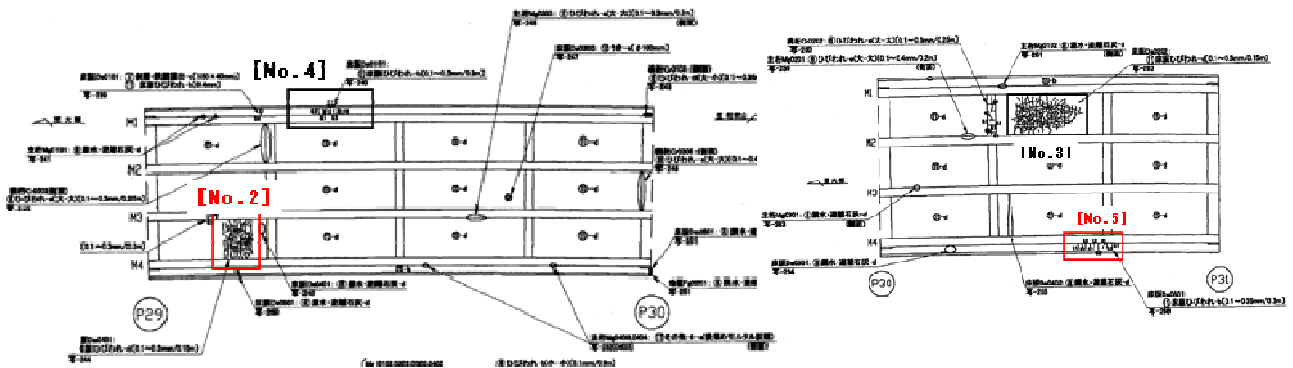
これまでに解析を実施した4橋（山中川東高架橋、山中川高架橋、自然田高架橋、菟砥川高架橋）は、何れも入力条件としての物性値をコンクリート標準示方書による標準値としていたが、ここではコア抜き試験により得られた強度、ヤング係数を使用して解析を実施する。

対象は自然田高架橋とし、静弾性試験で得られたヤング係数と、圧縮強度の試験結果から推測される引張強度を使用し、ひび割れ指数の評価に努めることとした。

なお、検討は以下の3ケースとした。

- ・ Case.1：標準モデル
- ・ Case.2：ヤング係数変更モデル
- ・ Case.3：ヤング係数 + 引張強度変更モデル

着目部位は、5 - 2 - 3の検討結果より、変状が顕著で解析上もひび割れ指数が最も小さくなったNO.2（P29～P30 径間の中間床版下面）と、NO.5（P30～P31 径間の張出し床版下面）の2ヶ所とする。



コンクリート設計基準強度 $ck=30N/mm^2$		No.1	No.2	No.3	
中間床版下面	乾燥収縮度 施工時条件	ひび割れ指数	2.44	1.81	1.75
		最大主応力 (N/mm^2)	1.04	1.41	1.45
	乾燥収縮度 × 2倍	橋軸方向 (N/mm^2)	1.04	1.40	1.44
		直角方向 (N/mm^2)	0.21	0.17	0.36
引張強度	ひび割れ指数	0.82	0.66	0.72	
	最大主応力 (N/mm^2)	2.67	3.49	3.27	
	橋軸方向 (N/mm^2)	2.66	3.49	3.27	
	直角方向	0.25	0.23	0.42	

コンクリート設計基準強度 $ck=30N/mm^2$		No.4	No.5	
張出し床版下面	乾燥収縮度 施工時条件	ひび割れ指数	1.16	1.15
		最大主応力 (N/mm^2)	2.20	2.22
	乾燥収縮度 × 2倍	橋軸方向 (N/mm^2)	2.20	2.21
		直角方向 (N/mm^2)	0.15	0.43
引張強度	ひび割れ指数	0.54	0.53	
	最大主応力 (N/mm^2)	4.52	4.63	
	橋軸方向 (N/mm^2)	4.52	4.63	
	直角方向	0.87	1.10	

図5 - 34 . 変状部の解析結果

(2)解析条件

1)基本方針

- コア抜き試験結果より、
- ・ヤング係数 20.8kN/mm²
- ・圧縮強度 45.3N/mm²

圧縮強度を設計基準強度に読み替え、引張強度をコンクリート標準示方書に従い算出する。

表5 - 3 . 自然田の物性値 測定結果

	自然田高架橋		
	上部工		
	細: C産(海砂) 細: E産(砕砂) 粗: E産	細: C産(海砂) 細: E産(砕砂) 粗: E産	細: C産(海砂) 細: E産(砕砂) 粗: E産
製造プラント名	d工場	d工場	d工場
コンクリート規格	50-8-20N	30-8-20N	30-8-20N
コア採取箇所	高強度のため採取しない。(プレビーム桁添接部)	P14-P15 プレテント桁 横桁	P15-P16 プレテント桁 横桁
部材厚さ、鉄筋間隔 (mm)		600×240×215	600×240×215
ひび割れパターン		幅0.3mm 縦方向	全て幅0.2mm以下
コア本数		3	3
単位重量試験 (t/m ³)		2.17	2.19
		2.19	2.19
		2.20	2.19
平均		2.19	2.19
圧縮強度(N/mm ²)		45.3	46.2
		48.5	46.0
		49.3	45.3
設計基準強度を上回っているか?		OK	OK
A: 静弾性係数測定試験 (kN/mm ²)		21.6	22.6
		20.8	21.4
		20.8	22.0
健全度診断マニュアルに基づいた静弾性係数の標準値か?		OK	OK
B: コンクリート標準示方書より算出した圧縮強度に相当する静弾性係数 (kN/mm ²)		32.1	32.2
		32.7	32.2
		32.9	32.1
A/B: 静弾性係数比 (%)		67.4%	70.1%
		63.6%	66.5%
		63.3%	68.6%
備考(削孔コア径)		100	健全部 100
備考(削孔コア長)		L=420	健全部 L=200

2) 有効弾性係数

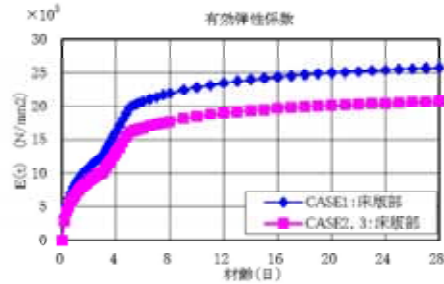
- CASE1 : $E_c(28) = 25.7 \text{ kN/mm}^2$
- CASE2 : $E_c(28) = 20.8 \text{ kN/mm}^2$ (調査結果)
- CASE3 : $E_c(28) = 20.8 \text{ kN/mm}^2$ (調査結果)

◆有効弾性係数の算出 2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:標準] 4.1.2 コンクリートのヤング係数 より

$$E(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 1000 \times \sqrt{f'_{ck}(t)}$$

$\phi(t)$: 材齢3日まで 0.73
材齢5日以降 1.00

注) 非発熱体は、各コンクリートの設計基準強度に対応する弾性係数を使用する。



3) コンクリート強度

- CASE1 : $f_{ek} = 30.0 \text{ N/mm}^2$
- CASE2 : $f_{ek} = 30.0 \text{ N/mm}^2$
- CASE3 : $f_{ek} = 45.3 \text{ N/mm}^2$ (調査結果)

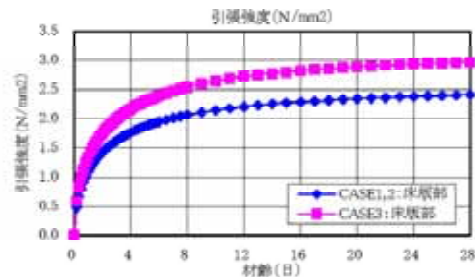
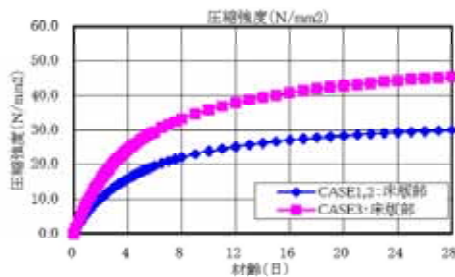
◆コンクリート強度の算出 2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:標準] 4.1.1 コンクリート引張強度 より

$$f'_{ek}(t) = \frac{t}{a + bt} f'_{ek}(28)$$

$$f'_{tk}(t) = c \sqrt{f'_{ek}(t)}$$

$f'_{ek}(t)$: 材齢t日のコンクリート圧縮強度 (N/mm²)
 $f'_{tk}(t)$: " 引張強度 (N/mm²)
 $f'_{ek}(28)$: 材齢28日のコンクリート圧縮強度 (N/mm²)

	a	b	d	$f'_{ek}(28)$
普通ポルトランドセメント (ウェブおよび下フランジ部)	4.5	0.95	1.11	50.0
普通ポルトランドセメント (CASE1,2:床版部)	4.5	0.95	1.11	30.0
普通ポルトランドセメント (CASE3:床版部)	4.5	0.95	1.11	45.3
C	0.44			



(3) 解析結果

1) 乾燥収縮度 = コンクリート標準示方書 × 1倍

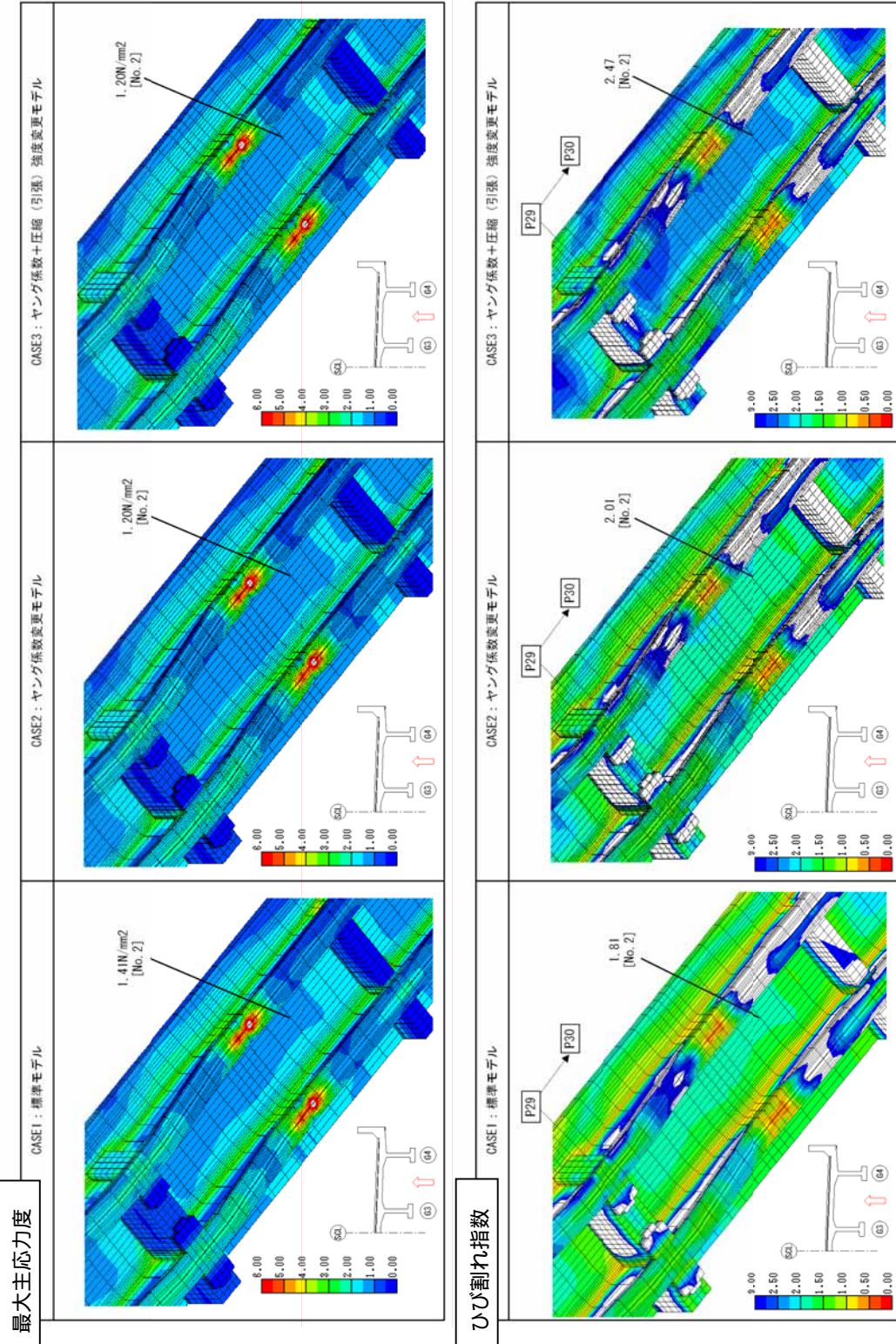


図5 - 3.5 . 標準的な乾燥収縮度における解析結果(その1) : NO.2 (P29 ~ P30 径間 中間床版部)

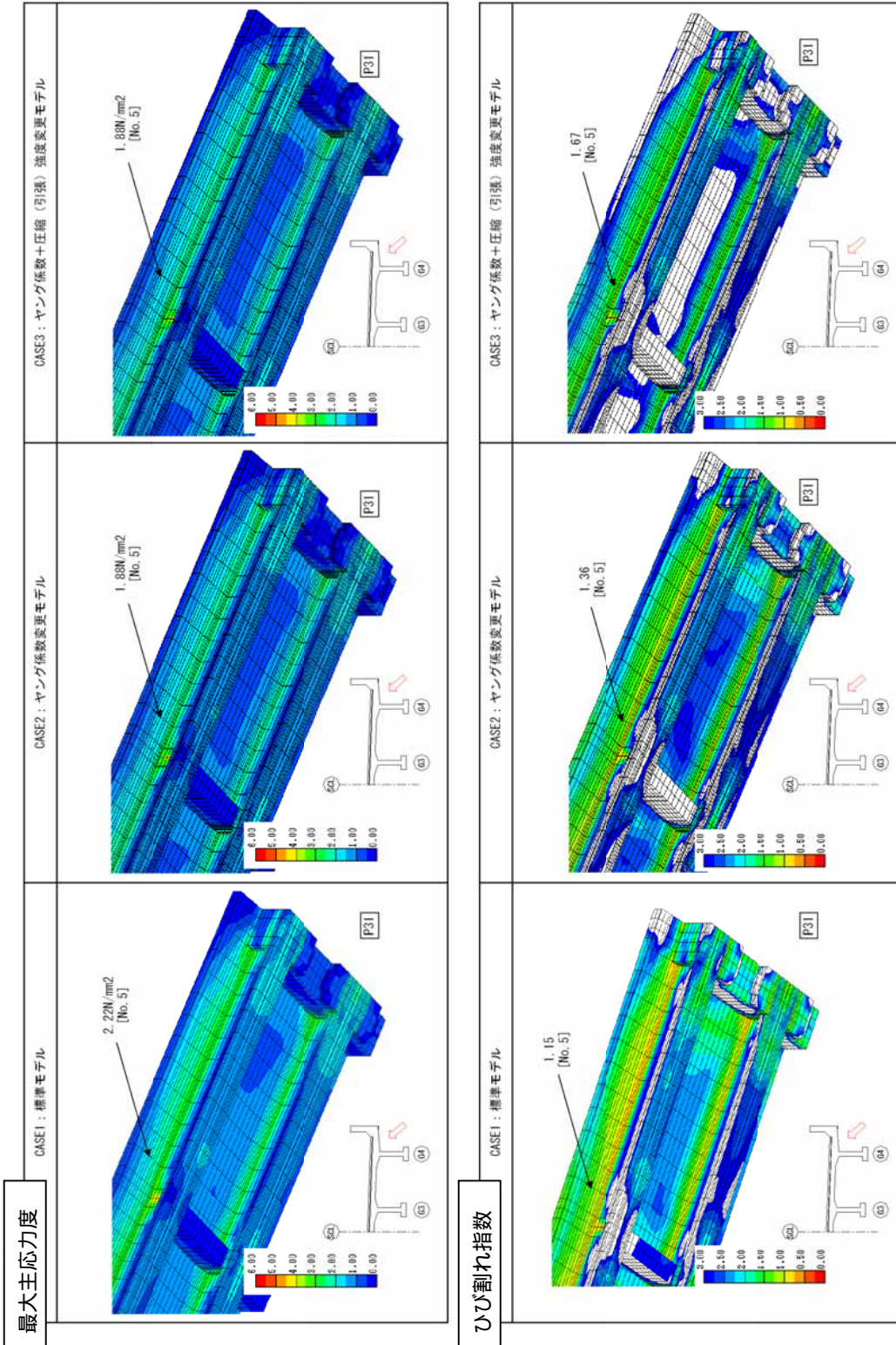


図5 - 3.6 . 標準的な乾燥収縮度における解析結果(その2) : NO.5(P30 ~ P31 径間 張出し床版部)

2) 乾燥収縮度 = コンクリート標準方書 × 2倍

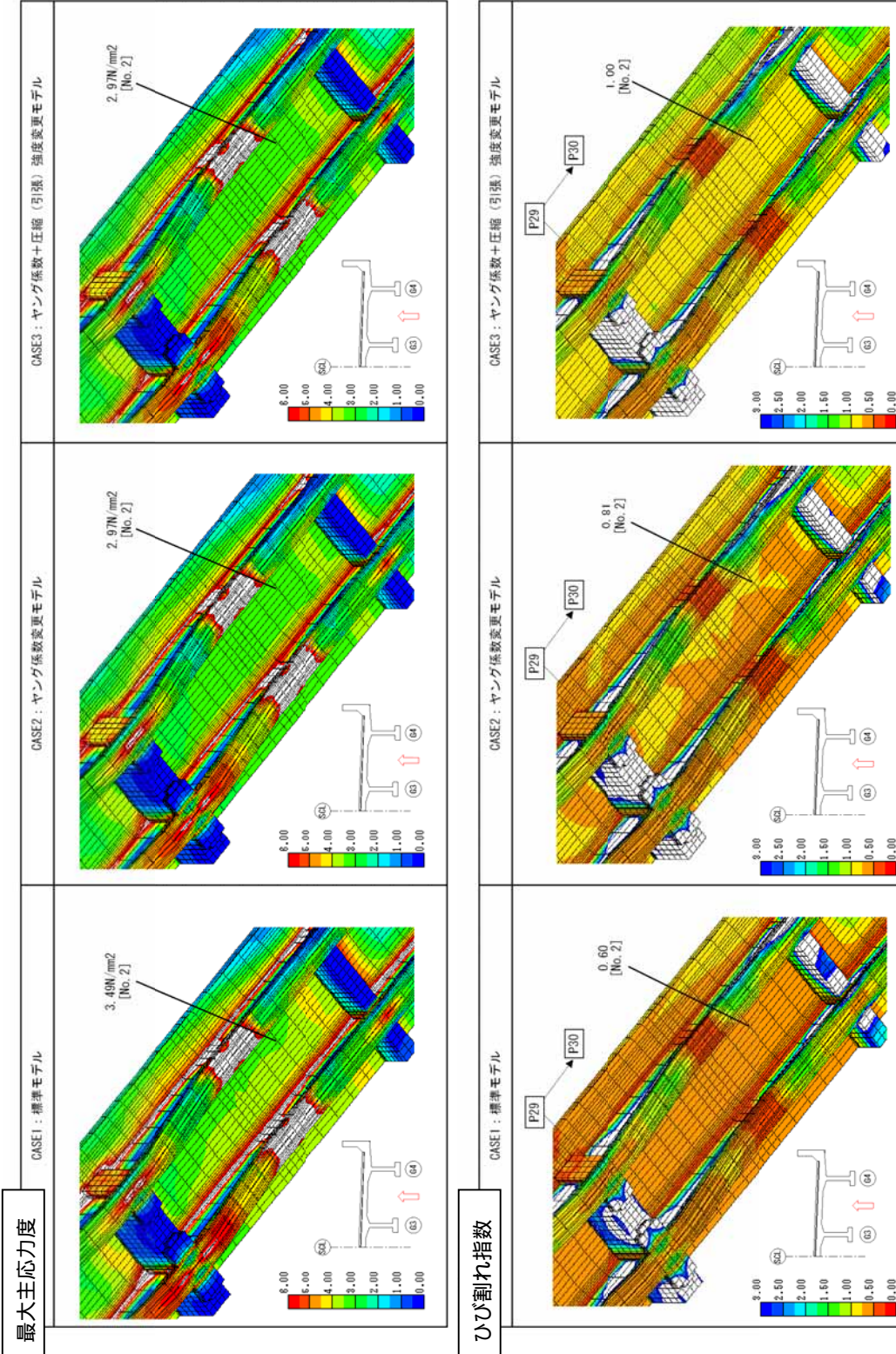


図5 - 37 . 乾燥収縮度を2倍とした場合の解析結果(その1) : NO.2 (P29 ~ P30 径間 中間床版部)

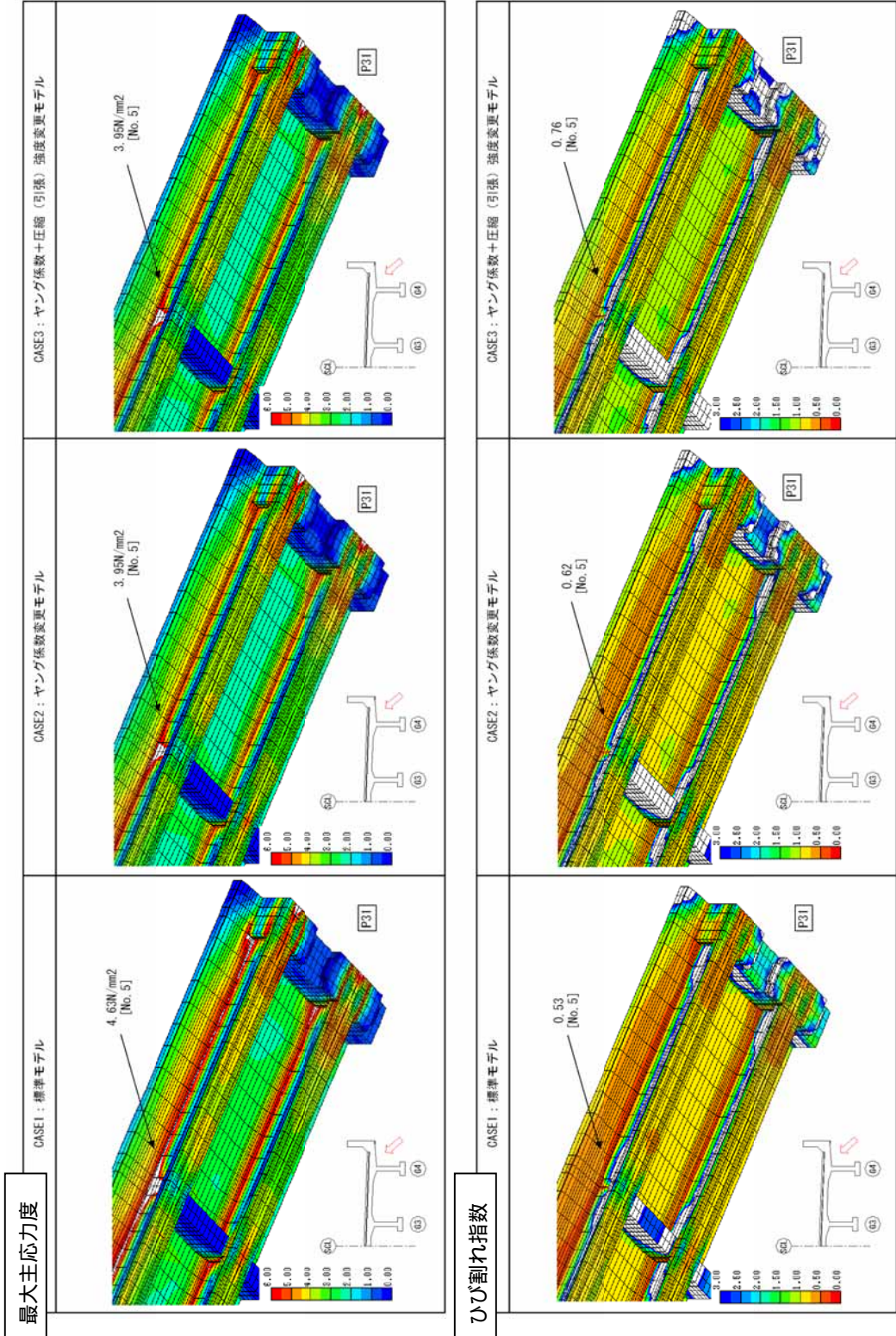


図5 - 38 . 乾燥収縮度を2倍とした場合の解析結果(その2) : NO.5(P30 ~ P31 径間 張出し床版部)

3) まとめ

表5 - 4 . 自然田解析結果(実際の物性値)

中間床版部 【No.2 : P20-P30径間】		CASE1 [標準モデル]	CASE2 [ヤング係数変更モデル]	CASE3 ヤング係数 + 圧縮 (引張) 強度 変更モデル
乾燥収縮度 施工時条件	最大主応力度	1.41N/mm ² (1.00)	1.20N/mm ² (0.85)	1.20N/mm ² (0.85)
	ひび割れ指数	1.81	2.01	2.47
乾燥収縮度 × 2倍	最大主応力度	3.49N/mm ² (1.00)	2.97N/mm ² (0.85)	2.97N/mm ² (0.85)
	ひび割れ指数	0.60	0.81	1.00
引張強度		2.41N/mm ² (fck=30.0N/mm ²)		

張出し床版部 【No.5 : P30-P31径間】		CASE1 [標準モデル]	CASE2 [ヤング係数変更モデル]	CASE3 ヤング係数 + 圧縮 (引張) 強度 変更モデル
乾燥収縮度 施工時条件	最大主応力度	2.22N/mm ² (1.00)	1.88N/mm ² (0.85)	1.88N/mm ² (0.85)
	ひび割れ指数	1.15	1.36	1.67
乾燥収縮度 × 2倍	最大主応力度	4.63N/mm ² (1.00)	3.95N/mm ² (0.85)	3.95N/mm ² (0.85)
	ひび割れ指数	0.53	0.62	0.76
引張強度		2.41N/mm ² (fck=30.0N/mm ²)		

各着目点で、ヤング係数を変更 (設計値 25.7kN/mm² 測定値 20.8kN/mm²) した場合 (Case.2) には、鋼桁による拘束度が相対的に低下し、発生応力が減少する (ひび割れ指数は大きくなる)。さらに引張強度を変更 (設計値 2.41N/mm² 圧縮強度からの推定値 2.96N/mm²) すると (Case.3) 発生応力は同一のためひび割れ指数が大きくなる。以上により、実測値をベースとした解析結果 (ひび割れ指数) は、

- ・ NO.2 (中間床版部) : 2.47 (乾燥収縮 1倍) 1.00 (乾燥収縮 2倍)
- ・ NO.5 (張出し床版部) : 1.67 (乾燥収縮 1倍) 0.76 (乾燥収縮 2倍)

となり、やはり標準的な乾燥収縮度ではひび割れ発生率の確率は低く、変状の再現のためには乾燥収縮度を2倍程度にする必要のあることが分かった。

5 - 2 - 6 . 変状との整合

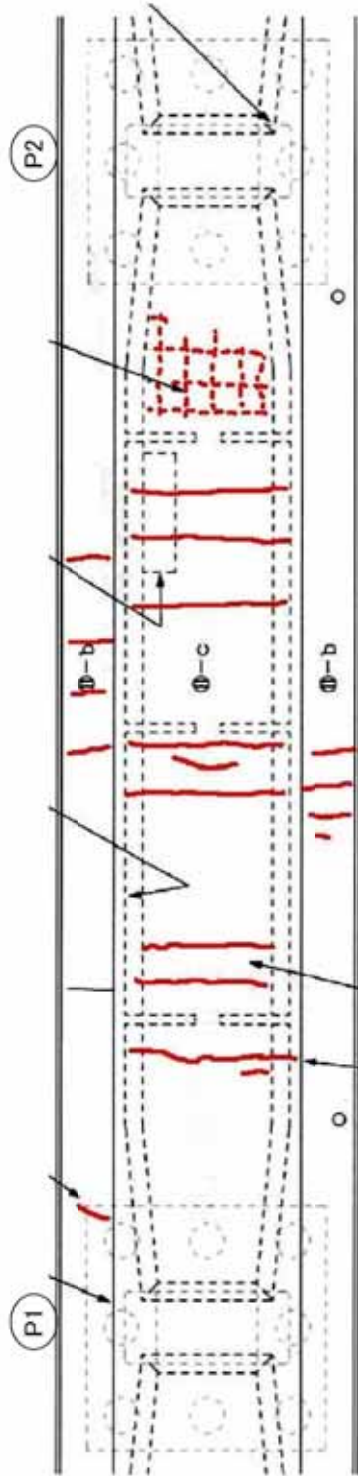
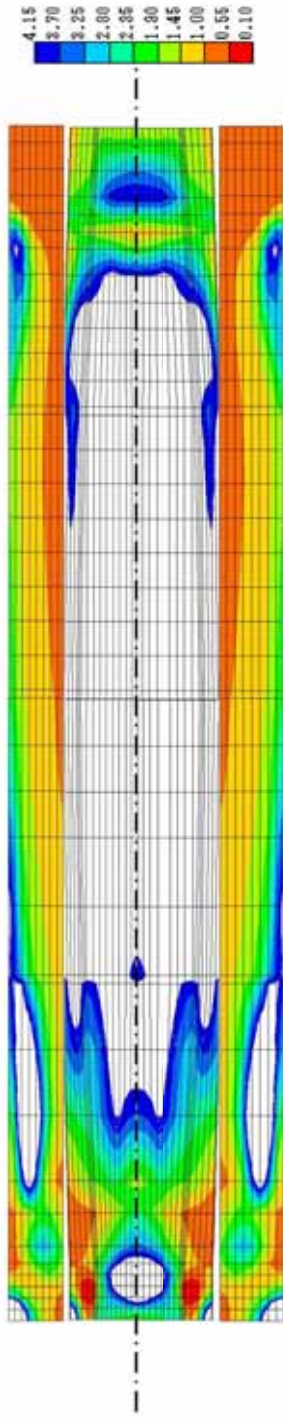
(1) 検討方針

解析を実施した4橋（山中川東高架橋、山中川高架橋、自然田高架橋、菟砥川高架橋）全域の応力分布と点検調書を対比し、解析がどの程度、変状を表現しているか目視で確認する。

なお、解析結果はコンクリート標準示方書に示される標準的な乾燥収縮度を2倍にしたケースにおける、乾燥収縮終了時の最大主応力に対するひび割れ指数分布図と同主応力ベクトル図とし、ひび割れ調書との対比を行う。

(2) 山中川東高架橋

ひび割れ指数 (最大主応力) コンター図 (乾燥収縮度=コンクリート標準示方書×2倍)



主筋カベクトル図 (乾燥収縮度: コンクリート標準示方書×2倍)

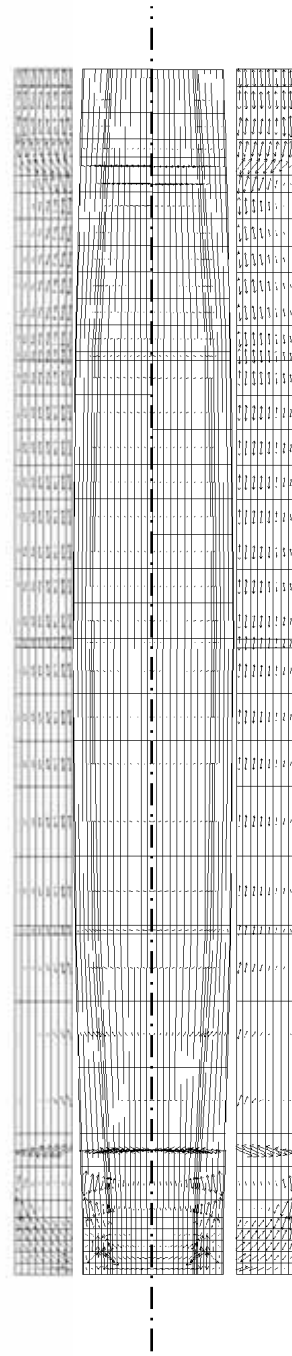
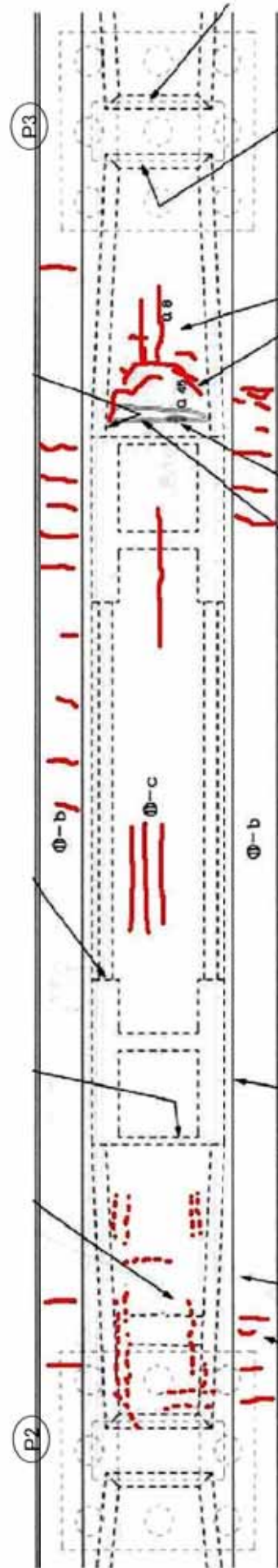
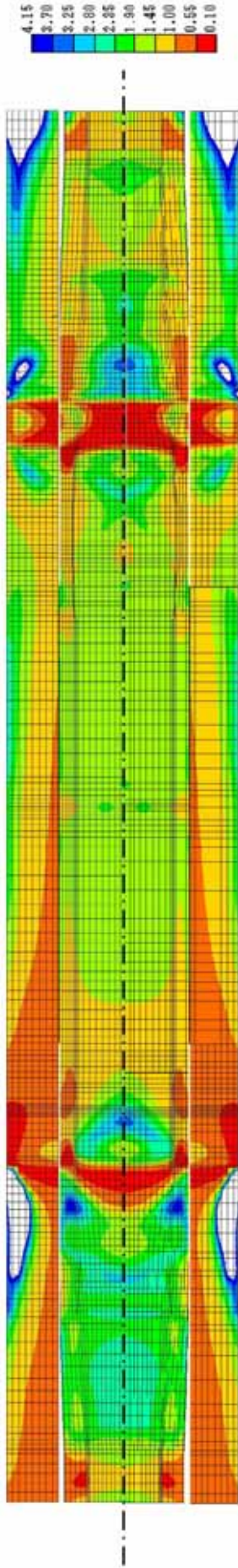


図5 - 39 . 山中川東高架橋 解析結果と点検調書の対比 (P1 ~ P2)

ひび割れ指数（最大主応力）コンター図（乾燥収縮度＝コンクリート標準示方書×2倍）



主応力ベクトル図（乾燥収縮度：コンクリート標準示方書×2倍）

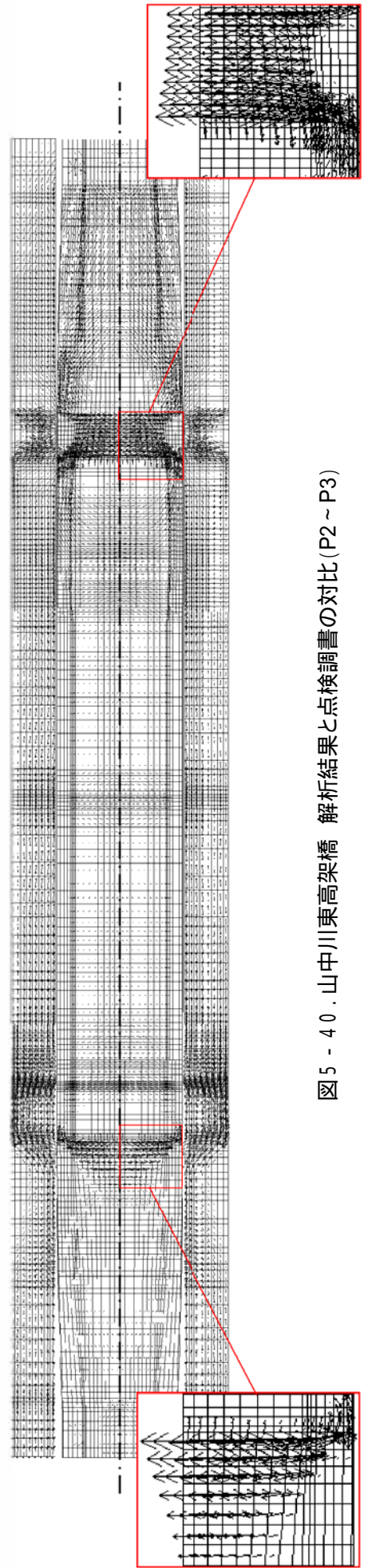


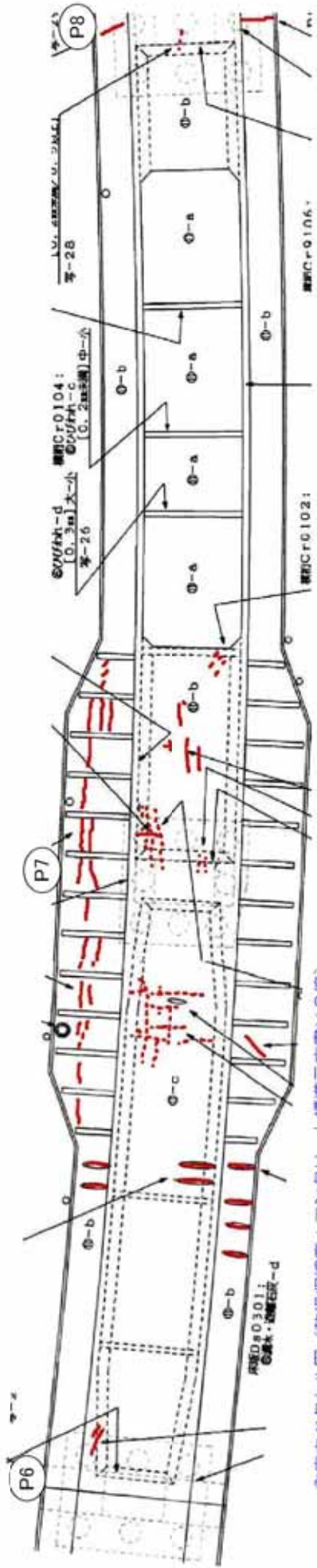
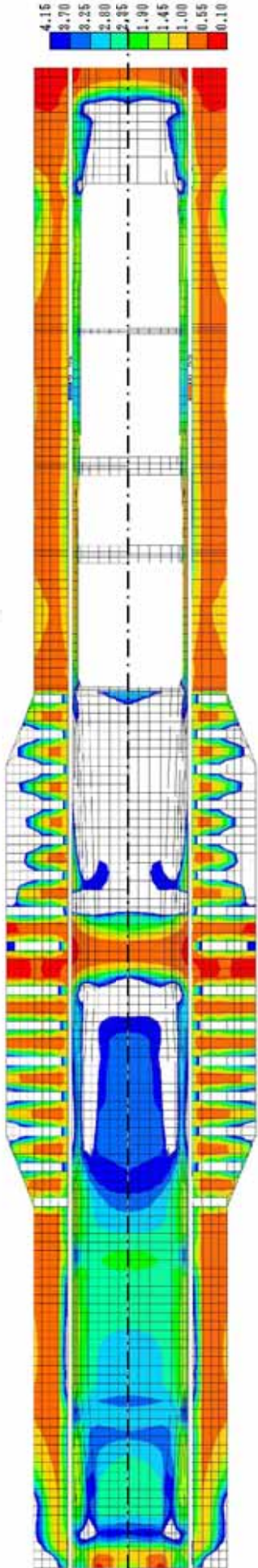
図5 - 40 . 山中川東高架橋 解析結果と点検調書の対比 (P2 ~ P3)

P1～P2 径間（図5 - 39）に着目すると、下床版下面に生じている直角方向のひび割れが解析では表現されていない。ただし、発生しているひび割れのスケールは最も P1 寄りの 1 本が 0.25mm であるが、残りは全て 0.2mm であり損傷の程度は低い。ひび割れが径間中央部の直角方向に生じていることを考えると、自重、活荷重等による曲げモーメントの影響を受けている可能性がある（解析では温度・乾燥収縮の影響のみを考慮している）。

P2～P3 径間（図5 - 40）においては、接合部近傍のひび割れ指数が 0.1～0.55 と小さく、主応力の方向も直角方向であることから、橋軸方向に生じている大きなひび割れは表現されている。また、張出床版も接合部近傍ではひび割れ指数が小さくなっており、実際と符合する。なお、調書では径間中央部の橋軸方向ひび割れが記録されているが、解析では発生確率の小さい領域であるため、乾燥収縮を主要因とするひび割れではないと思われる。山中川高架橋と同様、死荷重等による直角方向の応力が加算されてひび割れが生じた可能性もあるが、詳細は不明である。なお、ひび割れ幅は 0.2mm 以下で損傷の程度としては軽微である。

(3) 山中川高架橋

ひび割れ指数 (最大主応力) コンター図 (乾燥収縮度=コンクリート標準示方書×2倍)



主応力ベクトル図 (乾燥収縮度: コンクリート標準示方書×2倍)

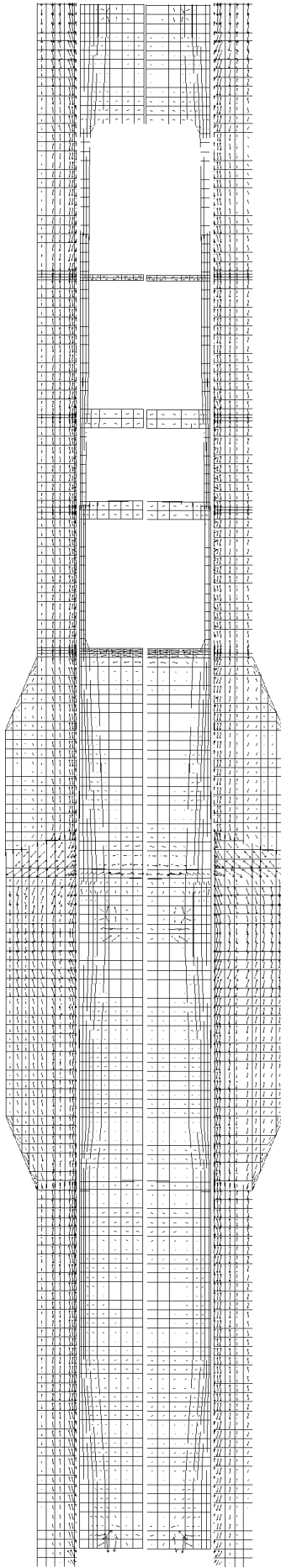
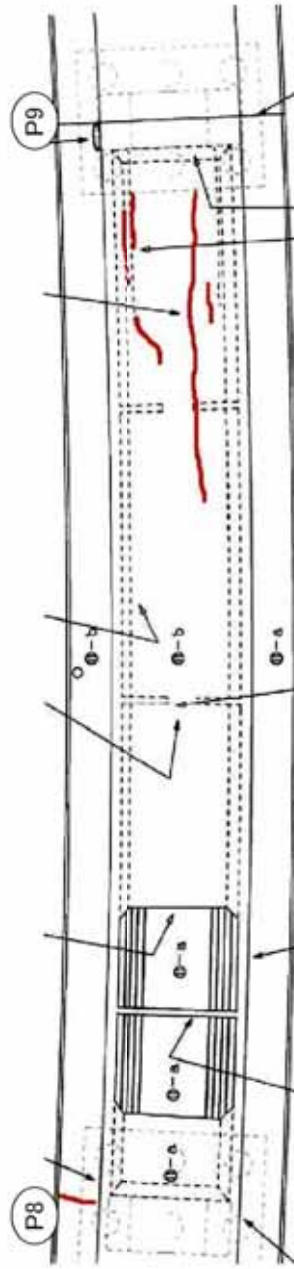
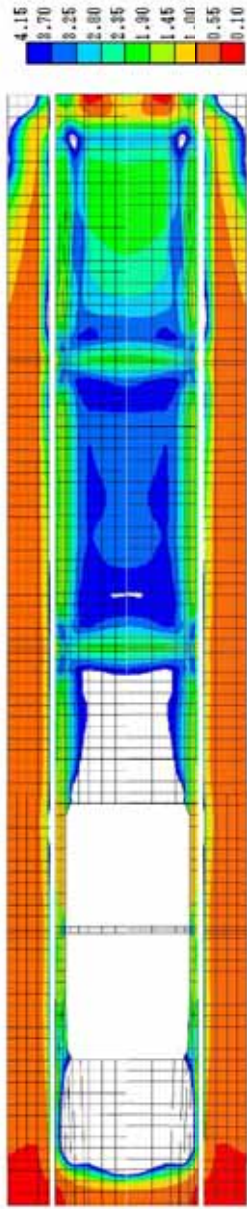


図5-4-1. 山中川高架橋 解析結果と点検調書の対比 (P6 ~ P8)

ひび割れ指数（最大主応力）コンター図（乾燥収縮度＝コンクリート標準示方書×2倍）



主応力ベクトル図（乾燥収縮度：コンクリート標準示方書×2倍）

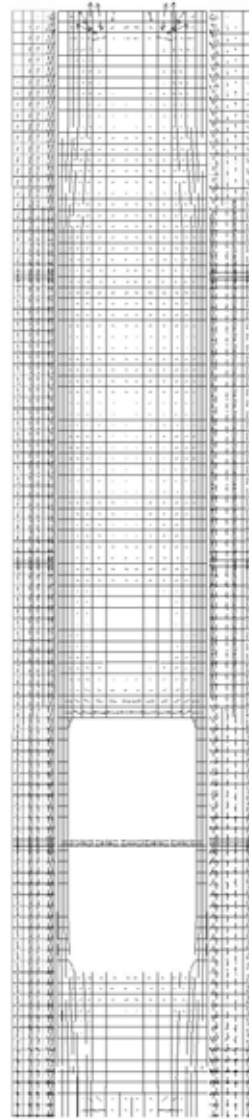


図5 - 4 - 2 . 山中川高架橋 解析結果と点検調書の対比 (P8 ~ P9)

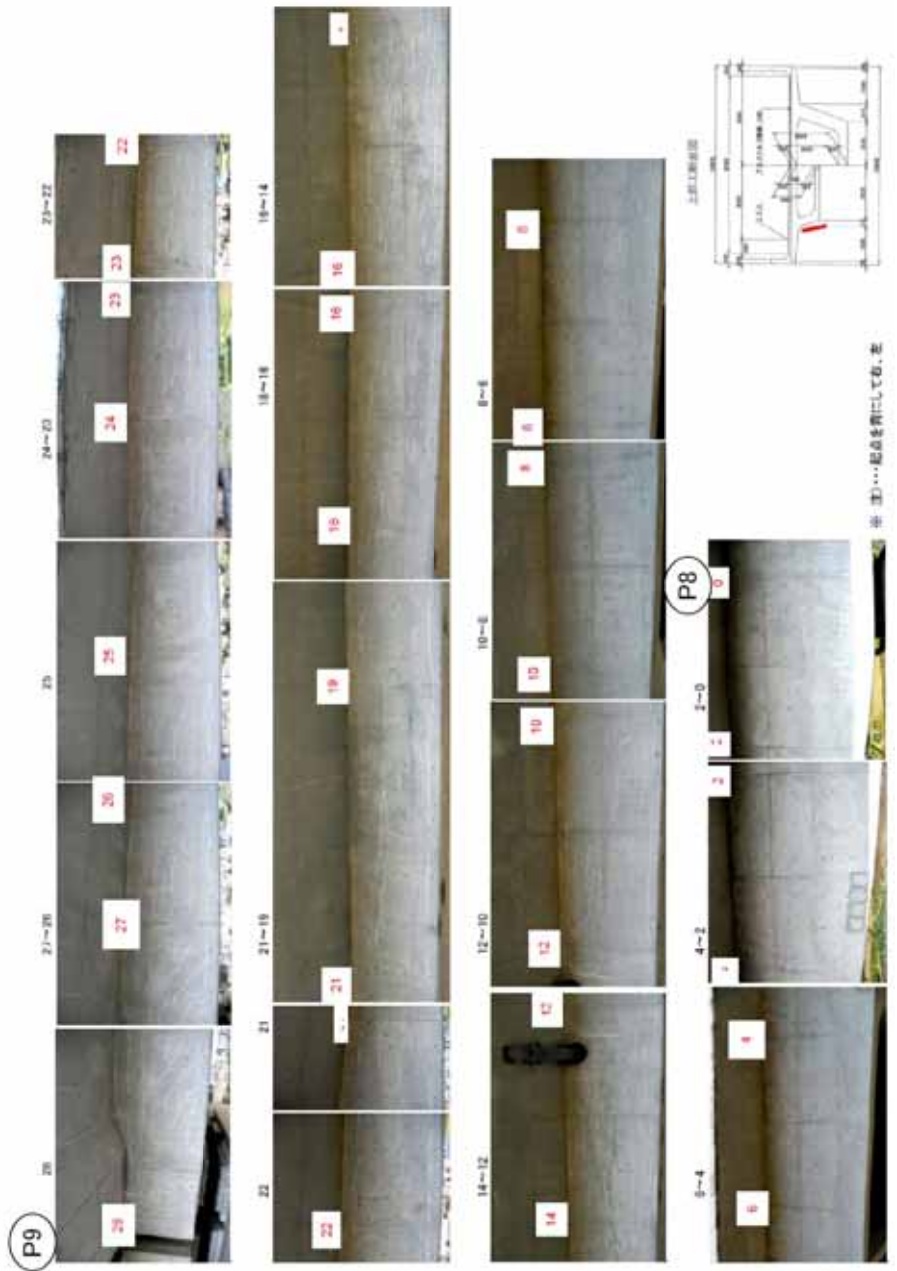
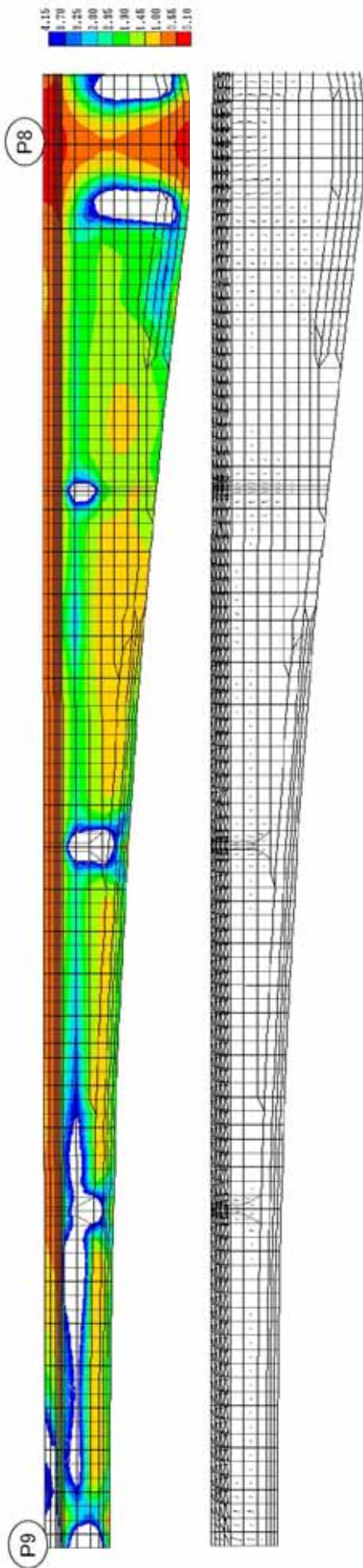


図5 - 43 . 山中川高架橋
解析結果と点検調書の対比(P8 ~ P9)
(ウェーブ橋軸方向びび割れ)

P6～P8 径間については(図5 - 41)、損傷が認められる拡幅部の張出床版が解析上のひび割れ指数も小さくなっている。主応力の方向が解析ではどちらかと言えば橋軸方向になっており実際のひび割れ方向と一致しないが、リブによる拘束の影響が解析より強く出たものと思われる。山中川高架橋は全般的にひび割れの発生が少なく、それは解析でも裏付けられている。

P8～P9 径間では(図5 - 42)、P9 近傍で橋軸方向に長く伸びるひび割れが目立つが、ひび割れ幅は 0.2mm 未満である。解析でもひび割れ指数が 1.45 以上の領域にあるため、乾燥収縮のみを原因とするものではなく、死荷重等による直角方向の応力と合成されて生じた可能性が高い。

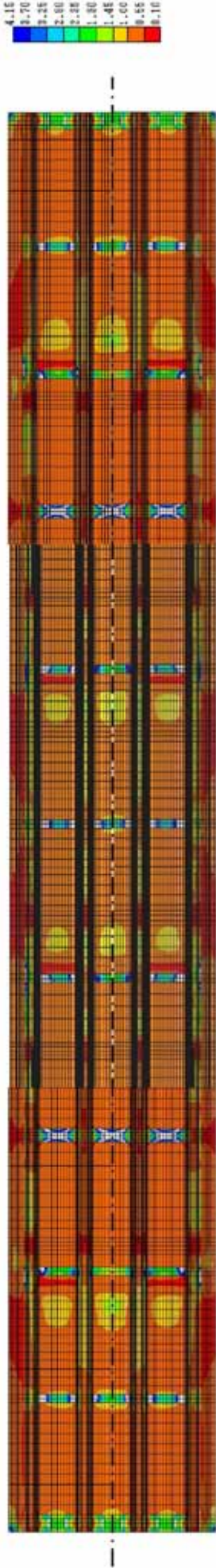
同径間のウェブに生じている橋軸方向ひび割れは(図5 - 43)、解析ではウェブ全域のひび割れ指数が 1.0 以上となっており表現し得ていない。ひび割れは径間部では概ね水平方向に伸びているが、端支点(P9)近傍で斜め方向の方向性を有する(写真5 - 1)。一般にこうした形状のひび割れは、PC 鋼材(シーソ)の錆化膨張、あるいは PC 鋼材による拘束ひび割れを原因とすることがあるが、本橋の場合にはウェブ鉛直方向にひび割れが均等に分散しており、その可能性は小さいと思われる。解析が死荷重やクリープ、また鉄筋・PC 鋼材による拘束の影響を考慮していないため詳細は不明であるが、乾燥収縮以外に別の原因が存在する可能性がある。



写真5 - 1 . 山中川高架橋 P9 端支点近傍のひび割れ

(4) 自然田高架橋

ひび割れ指数 (最大主応力) コンター図 (乾燥収縮度=コンクリート標準示方書×2倍)



主応力ベクトル図 (乾燥収縮度:コンクリート標準示方書×2倍)

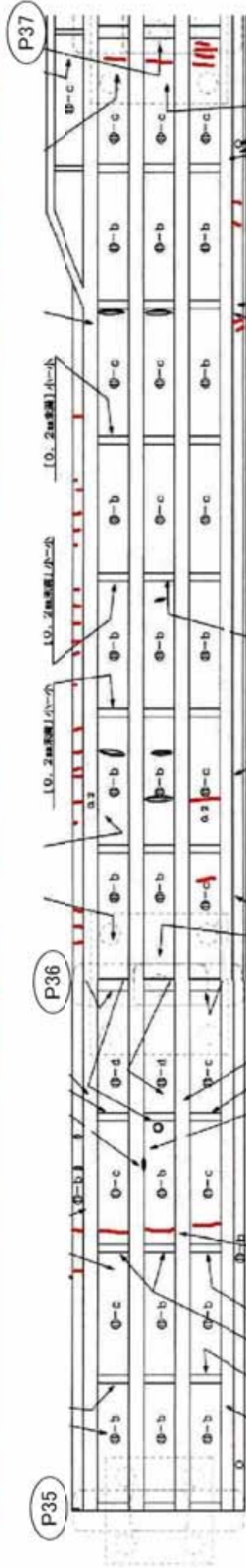
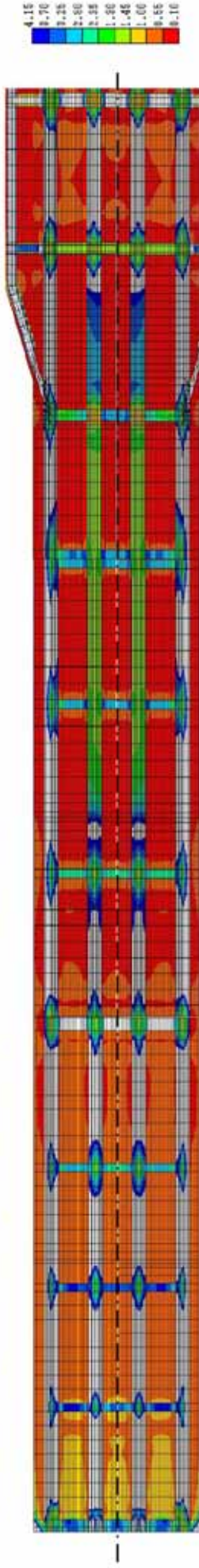


図5-44. 自然田高架橋 解析結果と点検調書の対比 (P28~P31)

床版はほぼ全域でひび割れ指数が1を切る結果となった。断面構成が橋軸方向にほぼ一定であり、鋼桁の拘束による均一な引張応力（直角方向）が解析では支配的となっている。実際のひび割れ形状は乾燥収縮に特有な亀甲状であり（調書は代表的なひび割れを模式的に示している）鋼桁による拘束の影響は解析ほど強く現れていない。このことから、床版のひび割れは全体の構造形式や架設方法より、床版自体の物性値や寸法の影響を強く受けていると考えられる。このため、5 - 4や【参考2】および【参考5】に示すような、部材内部の湿度移動を考慮した解析を行わないと、実際に生じるひび割れの表現は難しいと思われる。

(5) 菟砥川高架橋

ひび割れ指数 (最大主応力) コンター図 (乾燥収縮度=コンクリート標準示方書×2倍)



主筋カクトル図 (乾燥収縮度: コンクリート標準示方書×2倍)

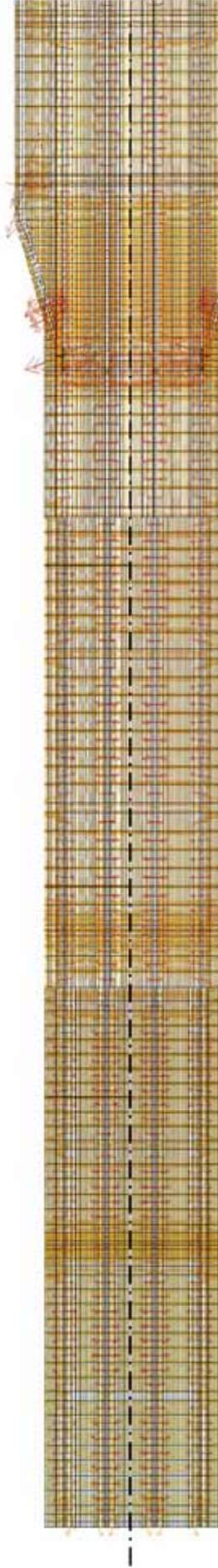
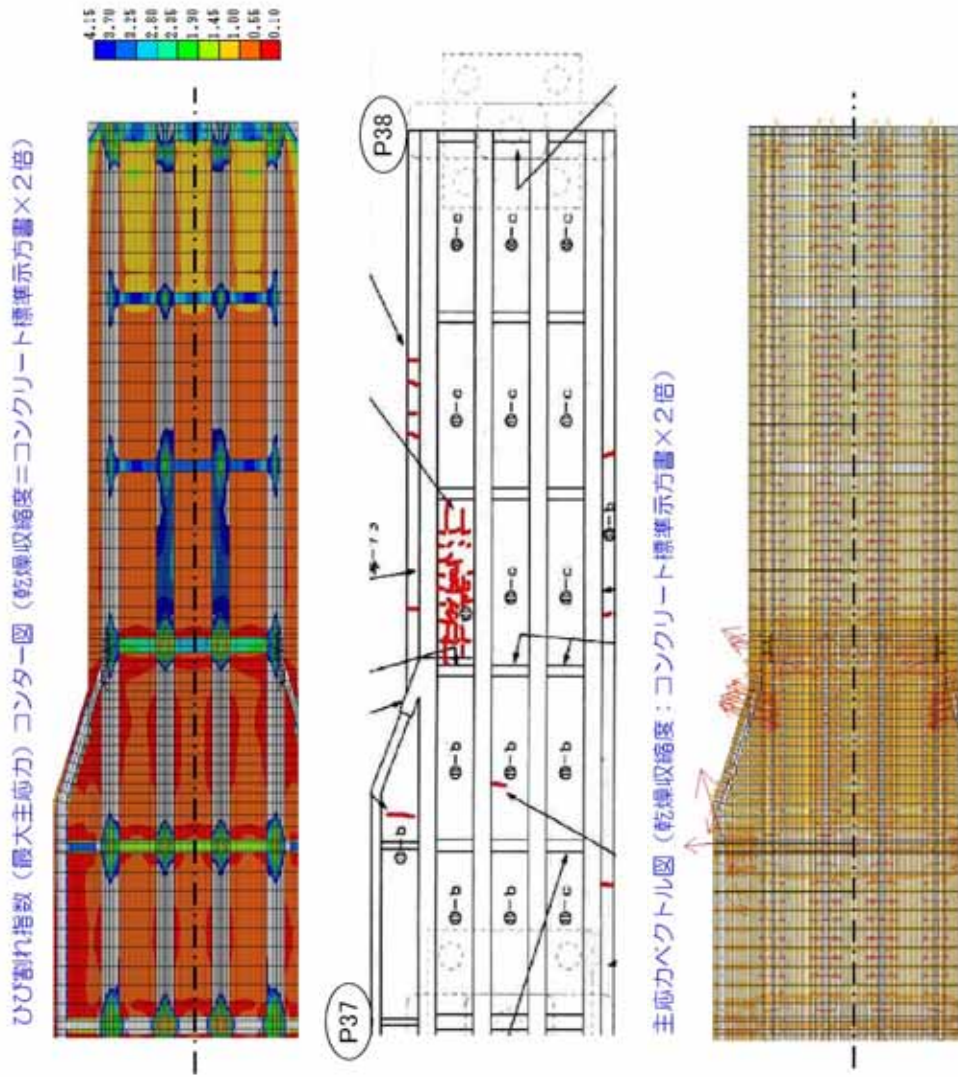


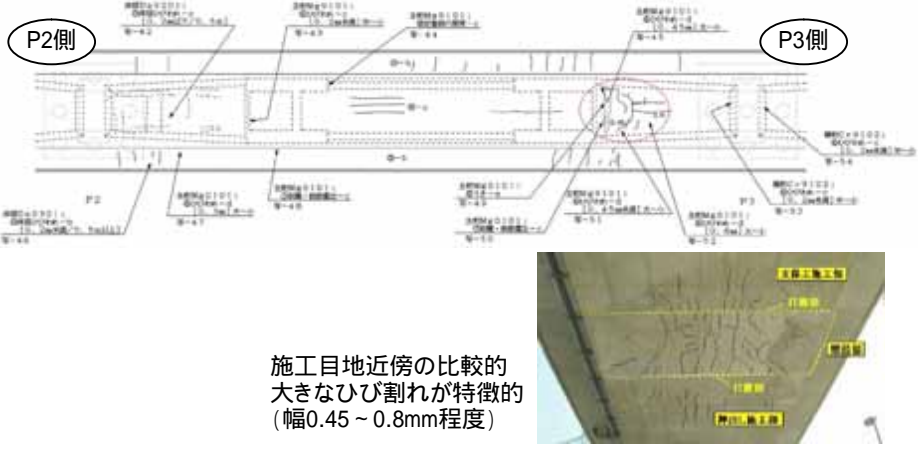
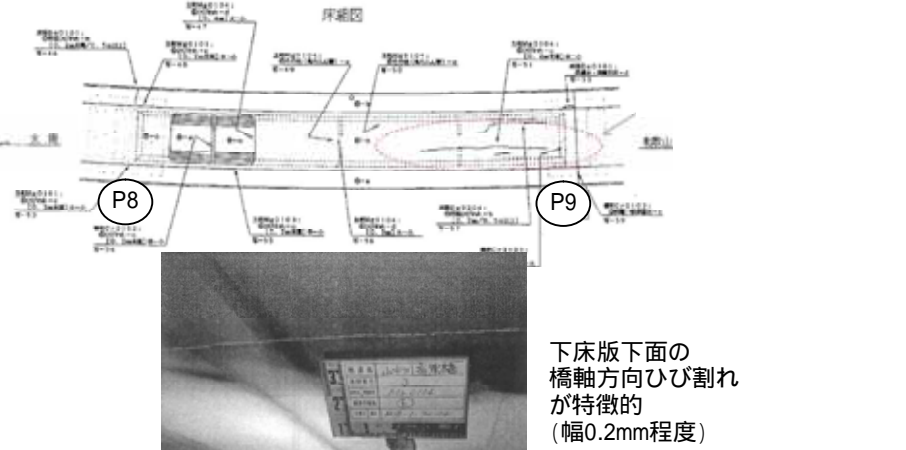

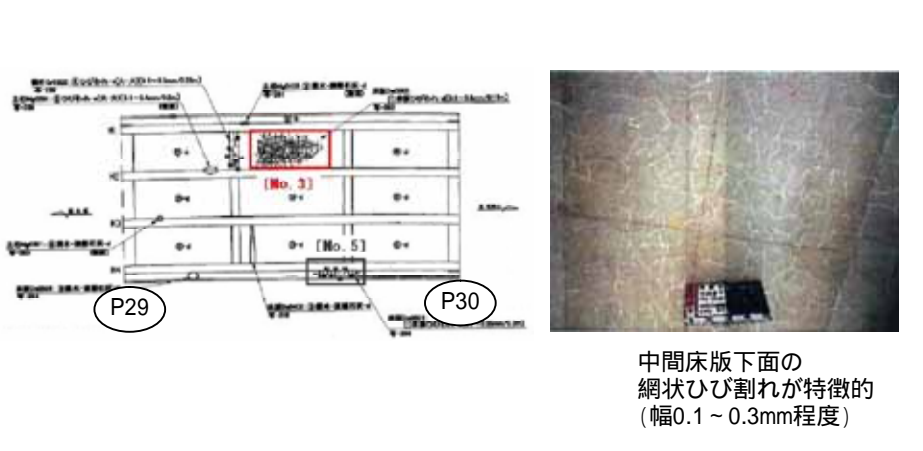
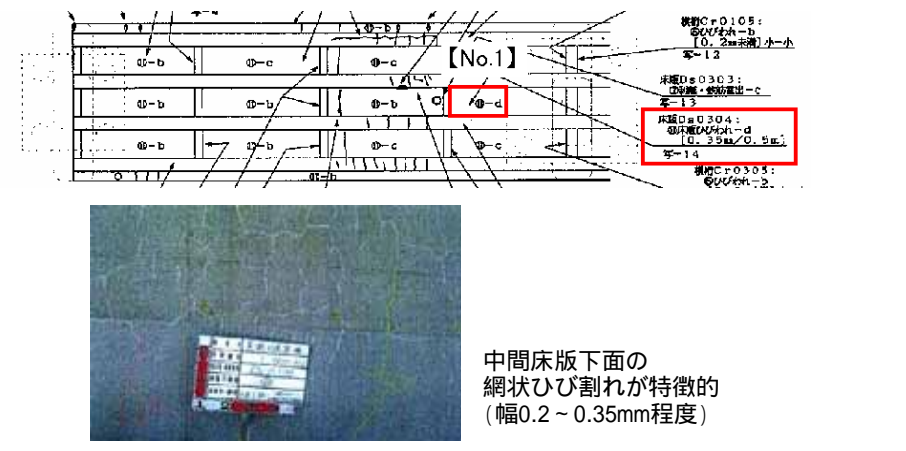
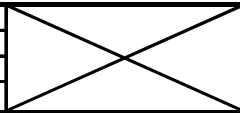
図5 - 45 . 菟砥川高架橋 解析結果と点検調書の対比 (P35 ~ P37)



自然田高架橋と同様、解析はほぼ全域でひび割れ指数が1を切り、主応力の方角は直角方向となっている。実際の変状は床版全域に及んでおり、ひび割れの方角性もないことから、外部拘束の影響は解析より小さいことが窺われる。

図5 - 46 . 菟砥川高架橋 解析結果と点検調書の対比 (P37 ~ P38)

表5 - 5 . 全体系解析結果まとめ

橋梁	山中川東高架橋			山中川高架橋										
構造形式 (解析対象)	PC4径間連続箱桁橋			PC3径間連続箱桁橋										
代表的な劣化部	 <p>施工目地近傍の比較的大きなひび割れが特徴的 (幅0.45 ~ 0.8mm程度)</p>			 <p>下床版下面の橋軸方向ひび割れが特徴的 (幅0.2mm程度)</p>										
劣化部の解析結果	最大主応力(N/mm ²)	乾燥収縮度1倍 6.09	乾燥収縮度2倍 11.06	直角方向(N/mm ²)	乾燥収縮度1倍 0.42	乾燥収縮度2倍 0.73								
	引張強度(N/mm ²)	1.20	1.20	引張強度(N/mm ²)	1.79	1.79								
種々の検討結果	1) クリープの影響を簡易的に評価すると、発生応力は2割程度に低減する。この場合、乾燥収縮度がコンクリート標準示方書式の1.5倍でひび割れ指数が1を切る結果となる。 2) 標準的な乾燥収縮による解析上のひび割れ幅は0.3mm程度になるが、実際のひび割れ幅は0.45mm程度のため、乾燥収縮度が1.5倍程度であった可能性がある。 3) ひび割れ幅の総和を橋体幅で割ったひずみは420 μ程度である。これはコンクリート標準示方書による乾燥収縮度330 μの1.3倍である。			1) 乾燥収縮と温度応力だけでは、下床版下面にひび割れを生じさせる大きな引張力は発生しない。 2) 自重を含む合成応力を考えると、乾燥収縮度が標準の2倍の場合にひび割れ指数が1程度になる。 3) ウェブに橋軸方向に生じているひび割れについては、解析で表現できなかった。										
														
橋梁	自然田高架橋			菟砥川高架橋										
構造形式 (解析対象)	3径間連続プレキャスト合成桁橋			3径間連続プレキャスト合成桁橋										
代表的な劣化部	 <p>中間床版下面の網状ひび割れが特徴的 (幅0.1 ~ 0.3mm程度)</p>			 <p>中間床版下面の網状ひび割れが特徴的 (幅0.2 ~ 0.35mm程度)</p>										
劣化部の解析結果		乾燥収縮度1倍		乾燥収縮度2倍										
	橋軸方向	P28 ~ P29	P29 ~ P30	P30 ~ P31	P28 ~ P29		P29 ~ P30	P30 ~ P31						
種々の検討結果	最大主応力(N/mm ²)	1.04	1.40	1.44	2.66	3.49	3.27							
	引張強度(N/mm ²)	2.41			2.41									
種々の検討結果	1) 損傷が生じていない部位は、解析上、乾燥収縮度を2倍(750 μ程度)にしてもひび割れ指数は1以上ある。 2) 物性値の影響について調べるため、ヤング係数を標準値の85%、圧縮強度を標準値の1.5倍で解析を行った。結果は、発生応力はヤング係数にほぼ比例して低下し、引張強度が圧縮強度に同じ向上することから、ひび割れ指数は大きくなるが、乾燥収縮度が2倍の場合には概ね1を切る結果に変わりはなかった。 3) 中間床版のひび割れ幅(0.1 ~ 0.3mm)、間隔(15 ~ 30cm)より推定されるひずみ量は、平均で890 μ程度となる。													
	最大主応力(N/mm ²) <table border="1" style="display: inline-table; margin-left: 20px;"> <tr> <td></td> <td>乾燥収縮度1倍</td> <td>乾燥収縮度2倍</td> </tr> <tr> <td>P35 ~ P36</td> <td>2.10</td> <td>4.38</td> </tr> <tr> <td>P37 ~ P38</td> <td>1.78</td> <td>3.83</td> </tr> </table>							乾燥収縮度1倍	乾燥収縮度2倍	P35 ~ P36	2.10	4.38	P37 ~ P38	1.78
	乾燥収縮度1倍	乾燥収縮度2倍												
P35 ~ P36	2.10	4.38												
P37 ~ P38	1.78	3.83												
引張強度(N/mm ²) <table border="1" style="display: inline-table; margin-left: 20px;"> <tr> <td></td> <td>乾燥収縮度1倍</td> <td>乾燥収縮度2倍</td> </tr> <tr> <td>P35 ~ P36</td> <td>2.56</td> <td>2.56</td> </tr> <tr> <td>P37 ~ P38</td> <td>2.56</td> <td>2.56</td> </tr> </table>							乾燥収縮度1倍	乾燥収縮度2倍	P35 ~ P36	2.56	2.56	P37 ~ P38	2.56	2.56
	乾燥収縮度1倍	乾燥収縮度2倍												
P35 ~ P36	2.56	2.56												
P37 ~ P38	2.56	2.56												

まとめ

- ・施工手順を追った弾性解析で、クリープ、鉄筋拘束の影響は考慮していない。
- ・劣化が顕著な径間(橋梁)の全体系モデル。
- ・乾燥収縮(コンクリート標準示方書式)と水和熱の影響を考慮。
- ・山中川東高架橋は、標準的な乾燥収縮度で大きな引張応力が発生しているが、応力はクリープの影響を考慮すれば相当緩和すると思われる。
- ・山中川高架橋は、乾燥収縮だけではひび割れを生じられる大きな応力は生じないが、死荷重の応力と合成することで特徴的なひび割れ(下床版下面の橋軸方向ひび割れ)を表現できる。
- ・プレキャスト桁(自然田高架橋、菟砥川高架橋)では、標準的な乾燥収縮度ではひび割れを生じさせる応力が生じず、2倍の乾燥収縮度(600 ~ 750 μ)が必要である。

5 - 3 . クリープ・鉄筋拘束の影響を考慮した解析

5 - 3 - 1 . 解析目的

材料及び構造的要因を考慮した乾燥収縮解析によりひび割れの発生要因を調べる。
解析手法は5 - 3 - 4で述べる。

5 - 3 - 2 . 解析対象

ひび割れが顕著に生じている山中川東高架橋（PC）を解析対象とした。
図5 - 47に山中川東高架橋のひび割れ発生状況を示す。

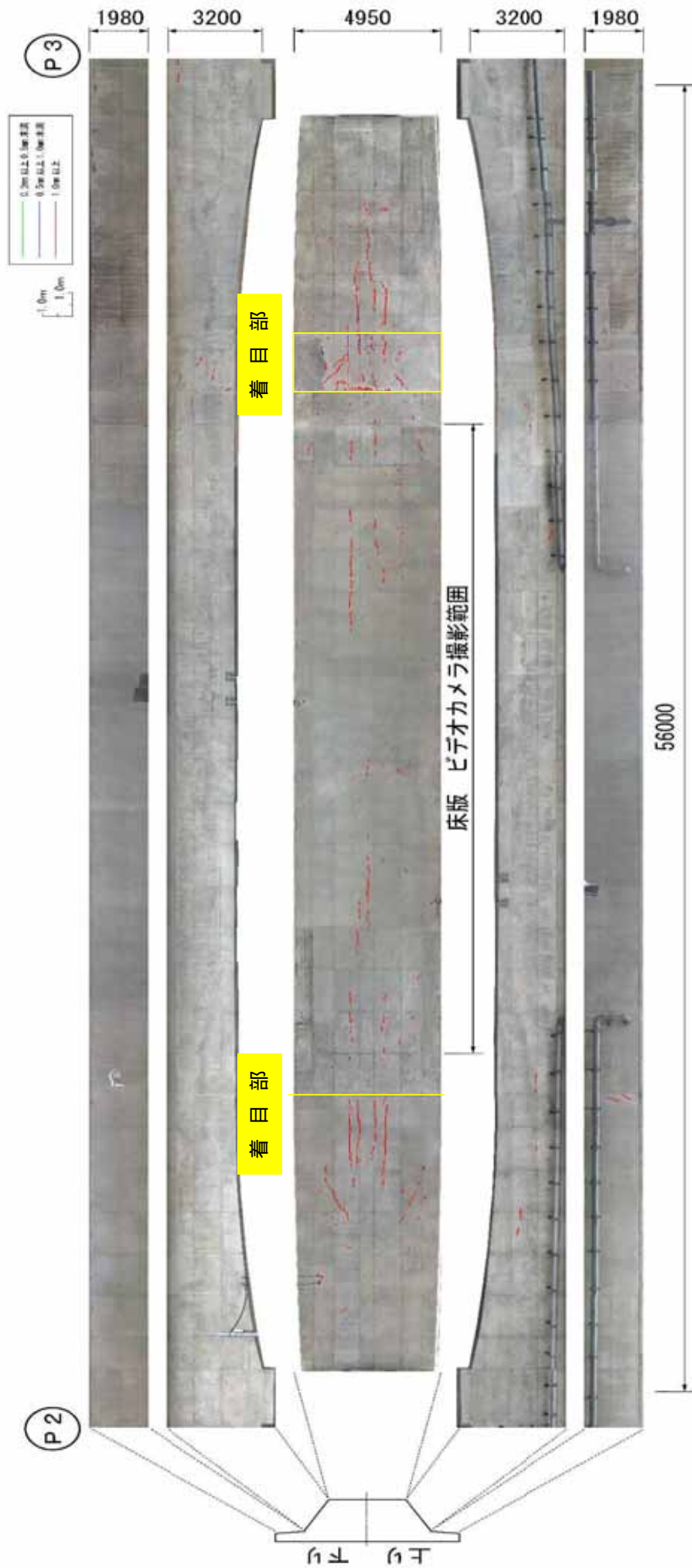


図5 - 47 . ひび割れ発生状況 (山中川高架橋)

5 - 3 - 3 . 解析ケース

表5 - 6 . 解析ケース

番号	ケース	モデル	解析手法
	解析条件を決定するためのケース	JIS 供試体	Step by Step
	要求性能を満足する乾燥収縮量を求めるケース	山中川東	T.B.

T.B. (トロスト・バザン) 法は、乾燥収縮の近似モデル

Step by Step 法は逐次計算による乾燥収縮の厳密モデル

5 - 3 - 4 . 解析手法

コンクリートの乾燥収縮は脱型直後から開始する。そのため乾燥収縮解析ではコンクリートの材齢に伴う弾性係数の変化やクリープによる応力緩和を表現しなければならない。そのため、本解析ではこれらの現象をモデル化した T.B.(トロスト・バザン)法を用いた。以下に、コンクリート材齢と弾性係数およびクリープの考え方と T.B.法の式を示す。なお、ソフトには、上記モデルを解析できる JIP テクノサイエンス社の TimeDACs を使用した。

・ 乾燥収縮解析における弾性係数とクリープの関係

経時変化する弾性係数と乾燥収縮に伴うクリープひずみの関係を下記に示す。

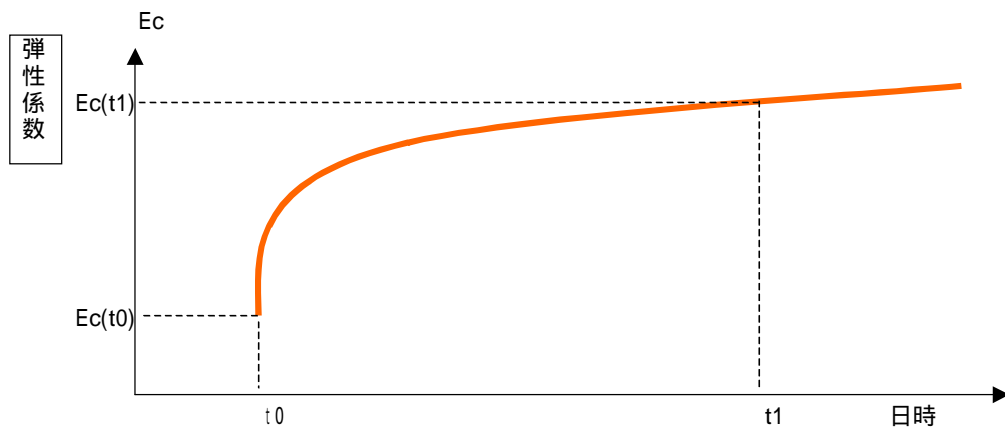


図5 - 48 . 弾性係数の経時変化

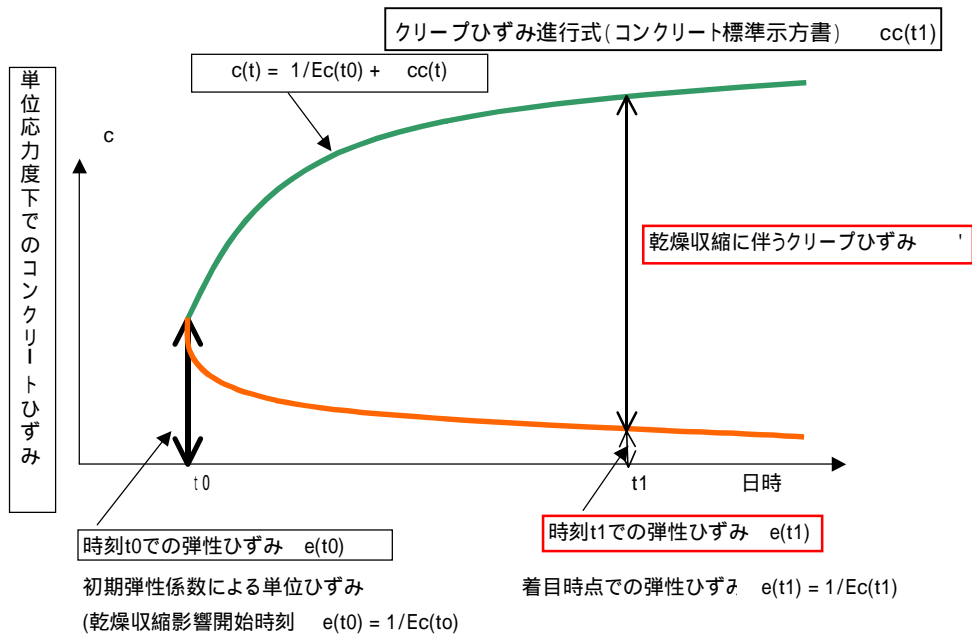


図5 - 49 . 経時変化する弾性係数と乾燥収縮に伴うクリープひずみの関係

乾燥収縮に伴うクリープ係数 ϕ' は、以下ようになる。

$$\begin{aligned} \phi' &= \varepsilon_{cc}(t_1) \times E_c(t_1) \\ &= \varepsilon_{cc}(t_1) / \varepsilon_e(t_1) \end{aligned}$$

解析のうち、条件変更による制限値算出シリーズ以外では、乾燥収縮に伴うクリープ係数を最も大きな値となる $E_c(t_1)$ を用いて算出している。

・乾燥収縮解析における弾性係数とクリープの関係

乾燥収縮により発生した応力によるクリープひずみを考慮したコンクリートひずみ式を下記に示す。

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{sh}(t) + \int_0^{t_1} \frac{\partial \sigma_{sh}(\tau)}{\partial \tau} \cdot \frac{1}{E} \cdot (1 + \phi(t, \tau)) d\tau$$

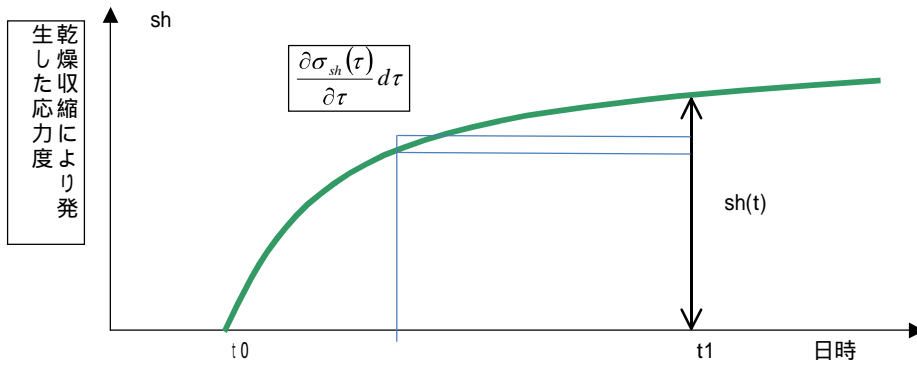


図5 - 50 . 乾燥収縮により発生した応力度

上式を実用法 (T.B.法) で示すと、

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{sh}(t) + \frac{\sigma_{sh}(t_1)}{E(t_0)} (1 + \rho\phi')$$

': クリープ係数

: 材齢係数

コンクリートのひずみを完全拘束 ($\varepsilon_c(t) = 0$) した場合、乾燥収縮により発生する応力度は、次式で表される (T.B.法)。

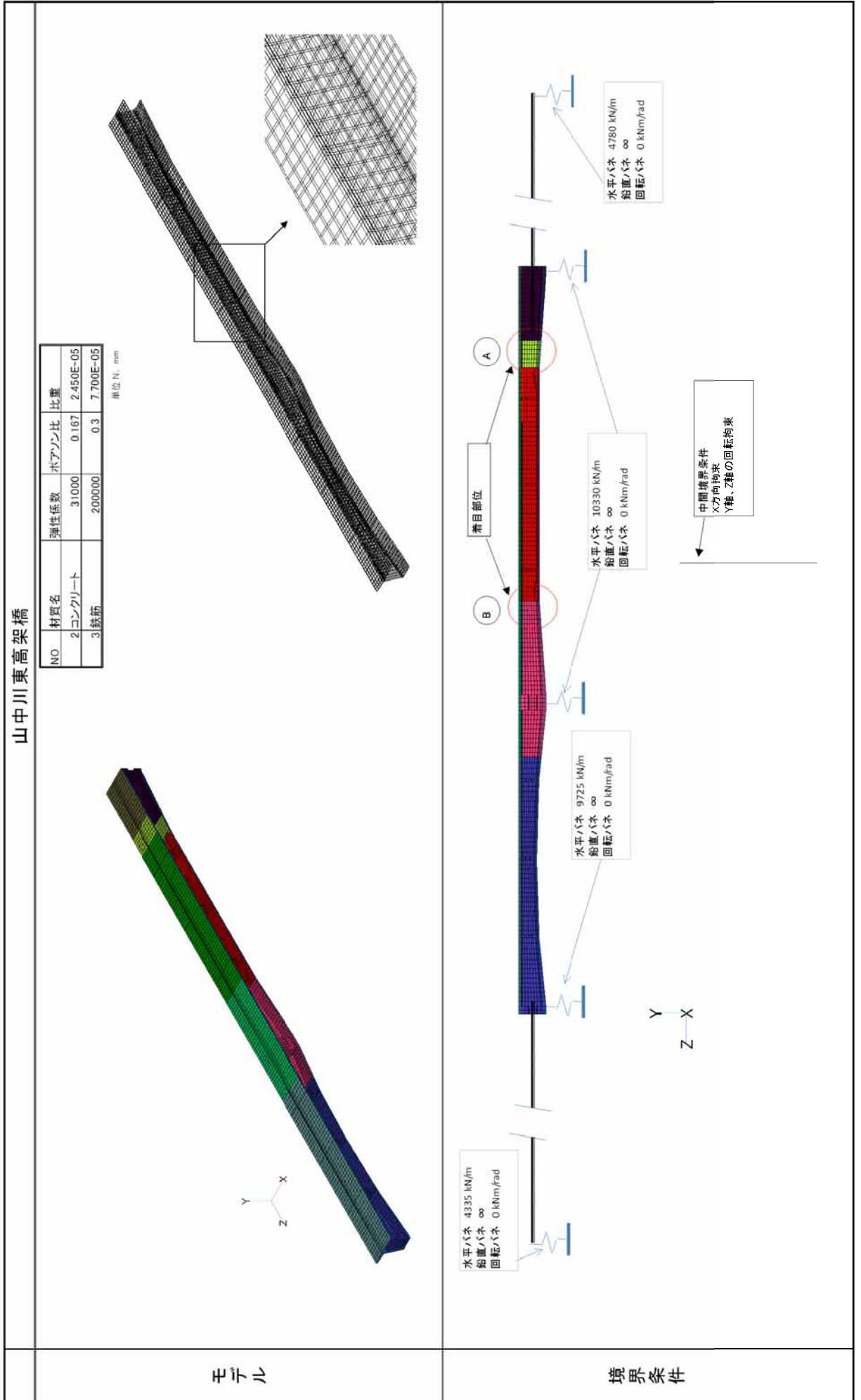
$$\sigma_{sh}(t_1) = \frac{\varepsilon_{sh}(t)}{(1 + \rho\phi')} E(t_0)$$

t0 時点の弾性係数

5 - 3 - 5 . 解析モデル

表5 - 7に、本解析のモデルと境界条件を示す。乾燥収縮では、鉄筋による内部拘束の影響を考慮する必要があることから、鉄筋もモデル化した。さらに、施工ステップも考慮し、既設コンクリートによる拘束の影響も考慮した。図5 - 51に山中川東高架橋の施工ステップを示す。

表 5 - 7 . 解析モデルと境界条件



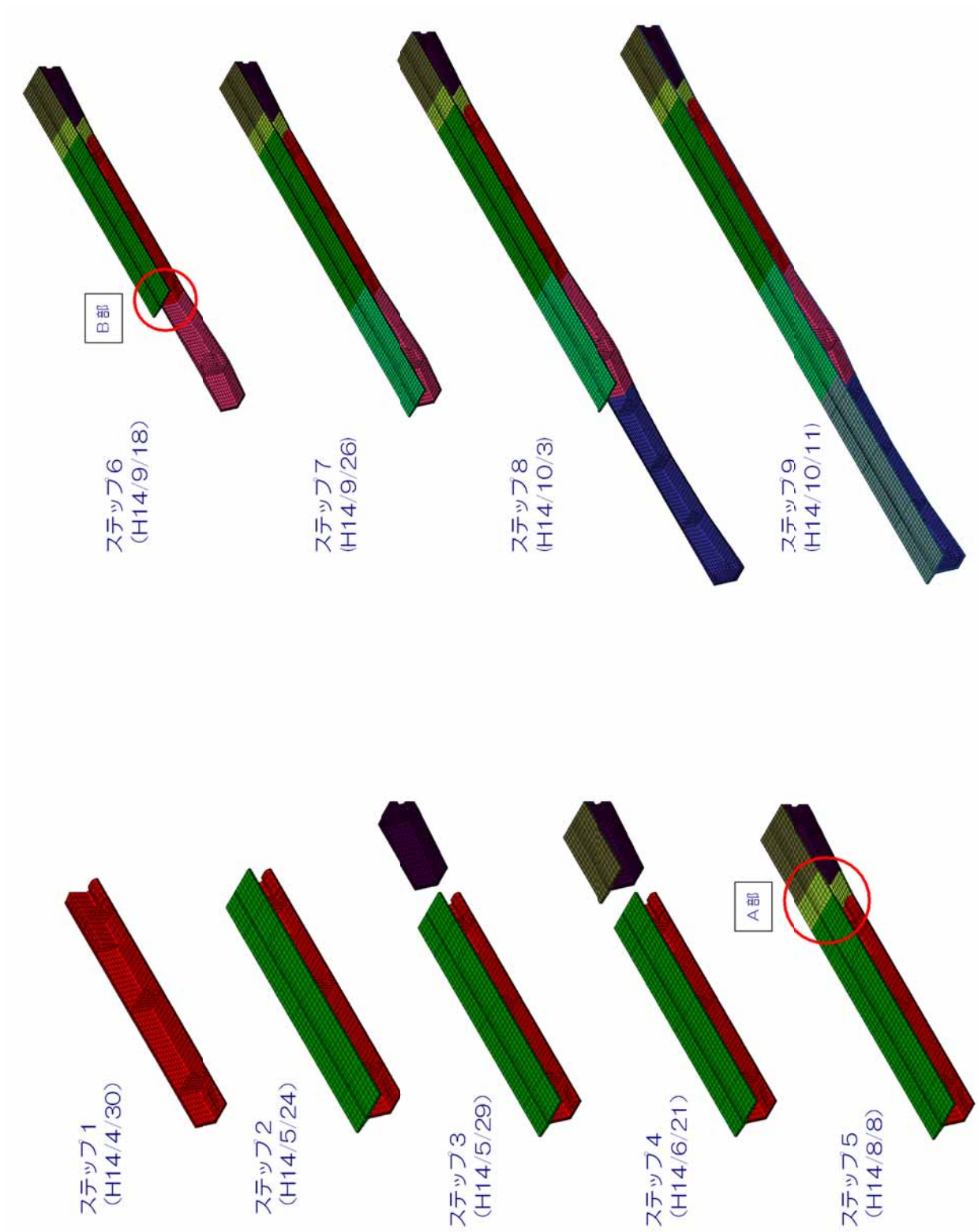


図5-51. 施工ステップ(山中川高架橋)

<クリープの考慮について>

解析では、クリープによって生じるひずみ ε_{cr} は弾性ひずみ ε_e に比例すると仮定している。

$$\varepsilon_{cr} = \phi \cdot \varepsilon_e \quad \text{ここに、}\phi\text{はクリープ係数}$$

このとき、ひずみ ε は応力 σ を弾性係数 E で除したもの ($\varepsilon = \sigma/E$) なので、上式は以下となる。

$$\varepsilon_{cr} = \phi \cdot (\sigma_e / E) \quad \phi = \varepsilon_{cr} / (\sigma_e / E)$$

今回の解析では、まずクリープひずみ ε_{cr} を次式より算出し、試験から求めた静弾性係数 E より、クリープ係数 ϕ を逆算して、クリープによる影響を考慮している。

$$\varepsilon'_{cc}(t, t', t_0) / \sigma'_{cp} = \left[1 - \exp\{-0.09(t-t')^{0.6}\} \right] \cdot \varepsilon'_{cr} \quad \text{(解 5.2.15)}$$

$$\text{ここに、} \varepsilon'_{cr} = \varepsilon'_{bc} + \varepsilon'_{dc} \quad \text{(解 5.2.16)}$$

$$\varepsilon'_{bc} = 15(C+W)^{2.0}(W/C)^{2.4}(\log_e t')^{-0.67} \quad \text{(解 5.2.17)}$$

$$\varepsilon'_{dc} = 4500(C+W)^{-4}(W/C)^{4.2}[\log_e(V/S/10)]^{-2.2}(1-RH/100)^{0.36}t_0^{-0.30} \quad \text{(解 5.2.18)}$$

ε'_{cr} : 単位応力当りのクリープひずみの最終値 ($\times 10^{-10}$ / (N/mm²))

ε'_{bc} : 単位応力当りの基本クリープひずみの最終値 ($\times 10^{-10}$ / (N/mm²))

ε'_{dc} : 単位応力当りの乾燥クリープひずみの最終値 ($\times 10^{-10}$ / (N/mm²))

C : 単位セメント量 (kg/m³) ($260 \text{ kg/m}^3 \leq C \leq 500 \text{ kg/m}^3$)

W : 単位水量 (kg/m³) ($130 \text{ kg/m}^3 \leq W \leq 230 \text{ kg/m}^3$)

W/C : 水セメント比 ($40\% \leq W/C \leq 65\%$)

RH : 相対湿度 (%) ($45\% \leq RH \leq 80\%$)

V : 体積 (mm³)

S : 外気に接する表面積 (mm²)

V/S : 体積表面積比 (mm) ($25 \text{ mm} \leq V/S \leq 300 \text{ mm}$)

t_0 , t' および t : 乾燥開始時, 載荷時および載荷中のコンクリートの有効材齢 (日) であり, 式 (解 5.2.19) により補正した値を用いる。

$$t_0, t' \text{ および } t \text{ に対して } = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad \text{(解 5.2.19)}$$

Δt_i : 温度が T (°C) である期間の日数

T_0 : 1°C

5 - 3 - 6 . 解析結果

(1) 解析条件を決定するためのケース

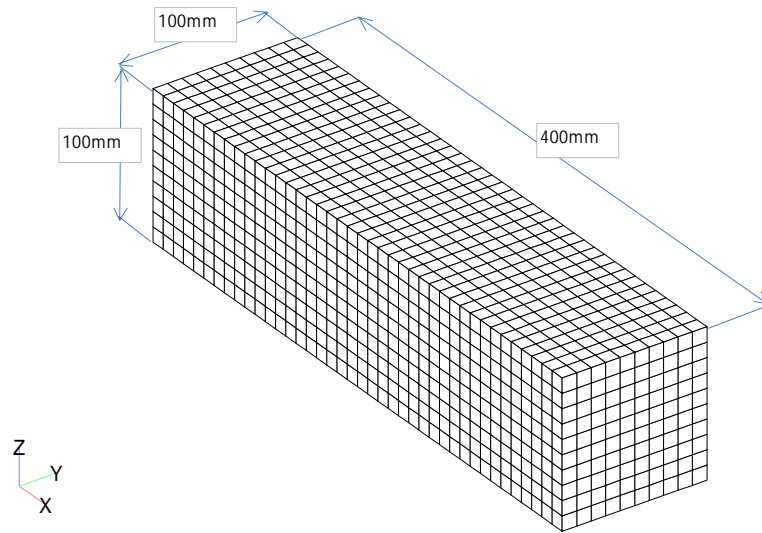
T.B.法の一般式を以下に示す。一般式のうち、乾燥収縮量 ε_{sh} と t_0 時点の弾性係数 $E(t_0)$ は試験やコンクリート標準示方書の式から決定される。そのため、乾燥収縮による発生応力はクリープ係数 ϕ と材齢係数 ϕ' によって決まる。T.B.法では一般的に $\phi = 0.8$ としているが、これは PC 桁を対象とした場合であり、PC の箱桁や RC にも適用できるかは不明である。

$$\sigma_{sh}(t_1) = \frac{\varepsilon_{sh}(t)}{(1 + \rho\phi')} E(t_0)$$

本ケースでは、はじめに JIS 供試体モデルを用いて Step by Step 解析(逐次計算による厳密解)と T.B.法(近似解)の計算を行い、厳密解に一致する解析条件(クリープ係数 ϕ 、材齢係数 ϕ')を定める。

1) 解析モデル

モデルは、乾燥収縮試験に用いる JIS 供試体と同じ $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ とし、軸方向中央に鉄筋が挿入されているモデルとする。図 5 - 5 2 に解析モデルを示し、表 5 - 8 に乾燥収縮量を計算するために必要な条件を示す。



鉄筋
 $A_r = 25\text{mm}^2 \sim 100\text{mm}^2$
 鉄筋比(0.25% ~ 1.0%)
 $E_r = 200000.0 \text{ N/mm}^2$

123456

23456



図 5 - 5 2 . 解析モデル

表 5 - 8 . 計算条件

変数名	環境条件	ータ	体積表面積の計算
C	単位セメント量	452 (kg/m ³)	H= 100 mm
W	単位水量	170 (kg/m ³)	B= 100 mm
RH	相対湿度 (%)	65 (%)	L= 400 mm
VS	体積表面積(mm)	25.0 (mm)	V= 4000000 mm ³
c	圧縮強度	40 (N/mm ²)	S= 160000 mm ²
T0sh	乾燥開始時刻	1 (日)	V/S= 25 mm

2) 計算ケース

計算は、 を決定するためのケースと を決定するためのケースの2つ行う。計算ケースを表5 - 9に示す。

表5 - 9. 計算ケース
決定ケース ($\alpha=0.8$)

検討ケース	計算条件	解析方法
ケース1	を逐次計算する。	Step by step法
ケース2	3日時点の e と cc から を定義する。	T.B.法
ケース3	28日時点の e と cc から を定義する。	T.B.法
ケース4	最終時点の e と cc から を定義する。	T.B.法

決定ケース (3日時点の e と cc から定義した)

検討ケース	計算条件	解析方法
ケース1	を逐次算出する。	Step by step法
ケース2	3日時点の e と cc から を定義する。	T.B.法
ケース5	Step by step法と一致する を逆算する。	T.B.法

3) 計算結果

決定ケース

図5 - 53に、計算結果を示す。これより、材齢係数 を0.8とした場合、3日時点の e と cc からクリープ係数 を定義した場合は逐次計算 (Step by step法) よりやや乖離するものの、28日時点と最終時点の e と cc から を定義した場合はほぼ一致した。これより、 を0.8とした場合、クリープ係数 を28日時点又は最終時点の e と cc から定義すると逐次計算 (Step by step法) とほぼ同様の結果が得られる結果となった。

鉄筋比 0.5%の 乾燥収縮ひずみ量

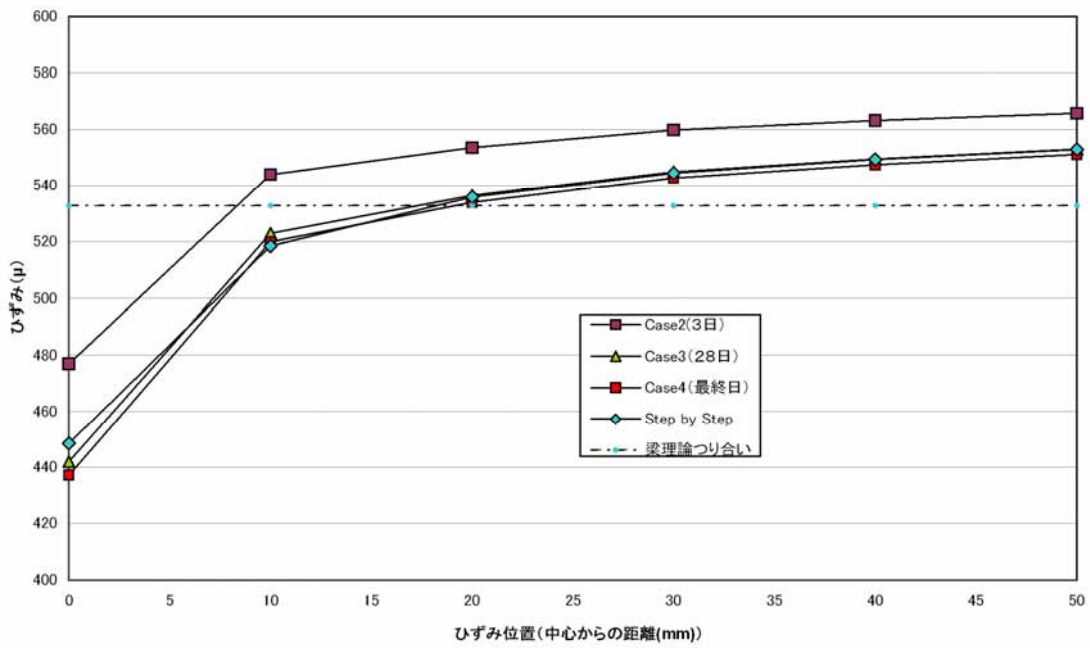


図5 - 53 . 計算結果(決定ケース)

決定ケース

次いで、クリープ係数 ϵ を3日時点の ϵ_e と ϵ_{cc} から定義した場合に逐次計算と一致する ϵ を決定する計算を実施した。結果を図5 - 54に示す。これより、 $\epsilon = 0.39$ とすると、逐次計算 (Step by step 法) と一致する結果となった。

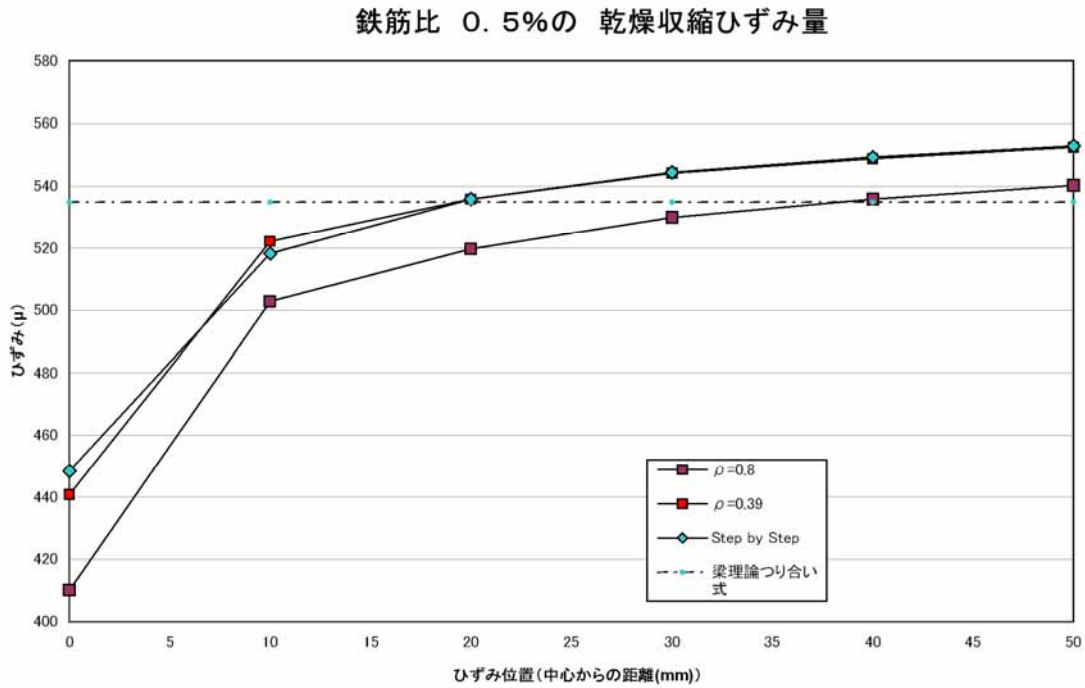


図5 - 54 . 計算結果(決定ケース)

4) 結論

T.B.法による乾燥収縮解析では、クリープ係数 を3日時点の e と cc から定義し、材齢係数 を0.39とする。

委員会での審議にて、クリープ係数 は3日時点の e と cc から定義する方が適切であるとの意見が出されたことから、T.B.法ではクリープ係数 を3日時点の e と cc から定義し、材齢係数 を0.39として乾燥収縮解析を実施する。

(2) 要求性能を満足する乾燥収縮量を求めるケース

1) 解析条件

表5 - 7に示した解析モデルを用いて、T.B.法（材齢係数 = 0.39）による乾燥収縮解析を行った。材料試験から設定したコンクリート特性を表5 - 10、11に示す。さらに、設計計算書の初期応力を比例配分した応力分布を図5 - 55に示す。

表5 - 10 . コンクリート特性(山中川東高架橋 その1)

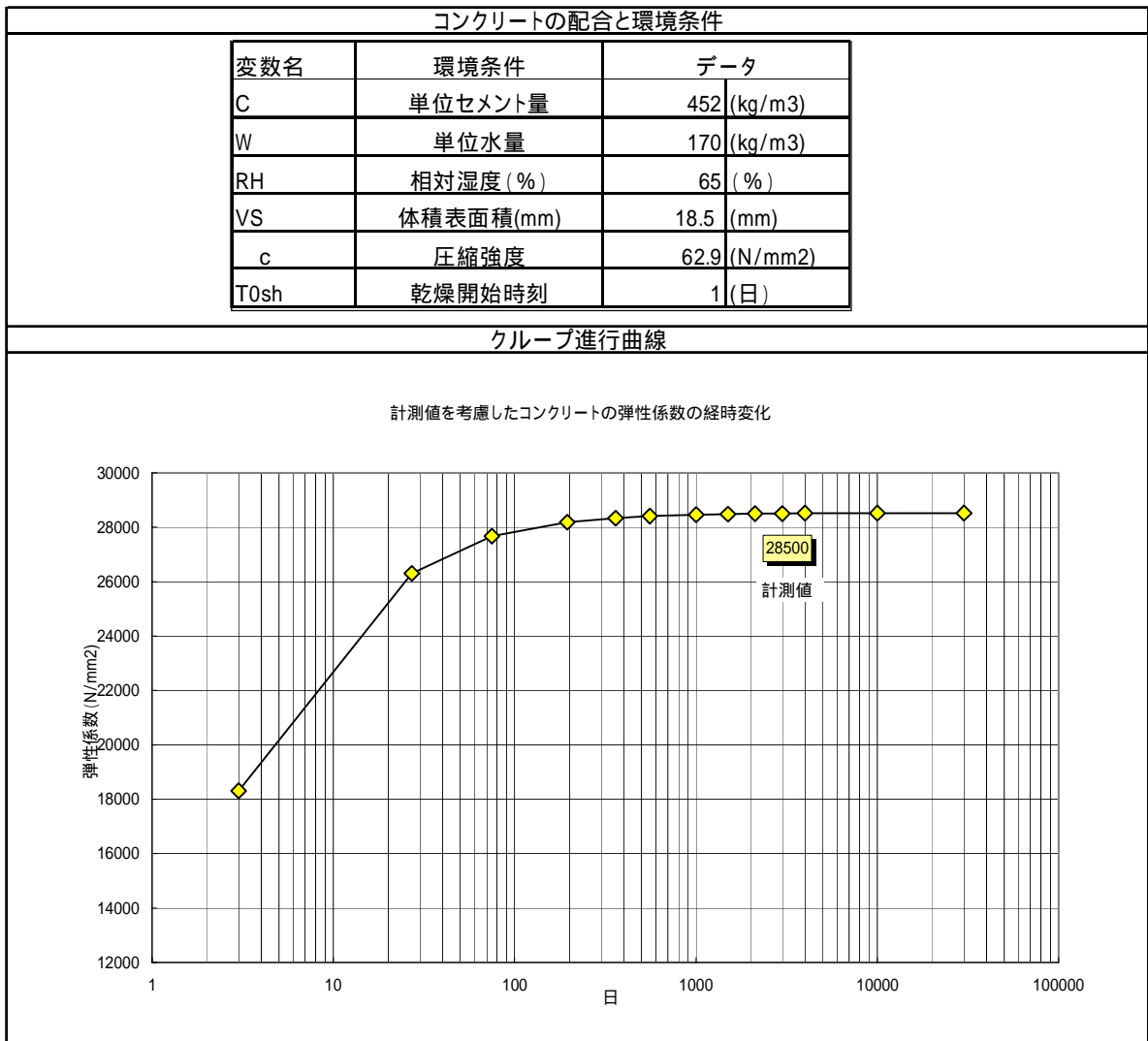
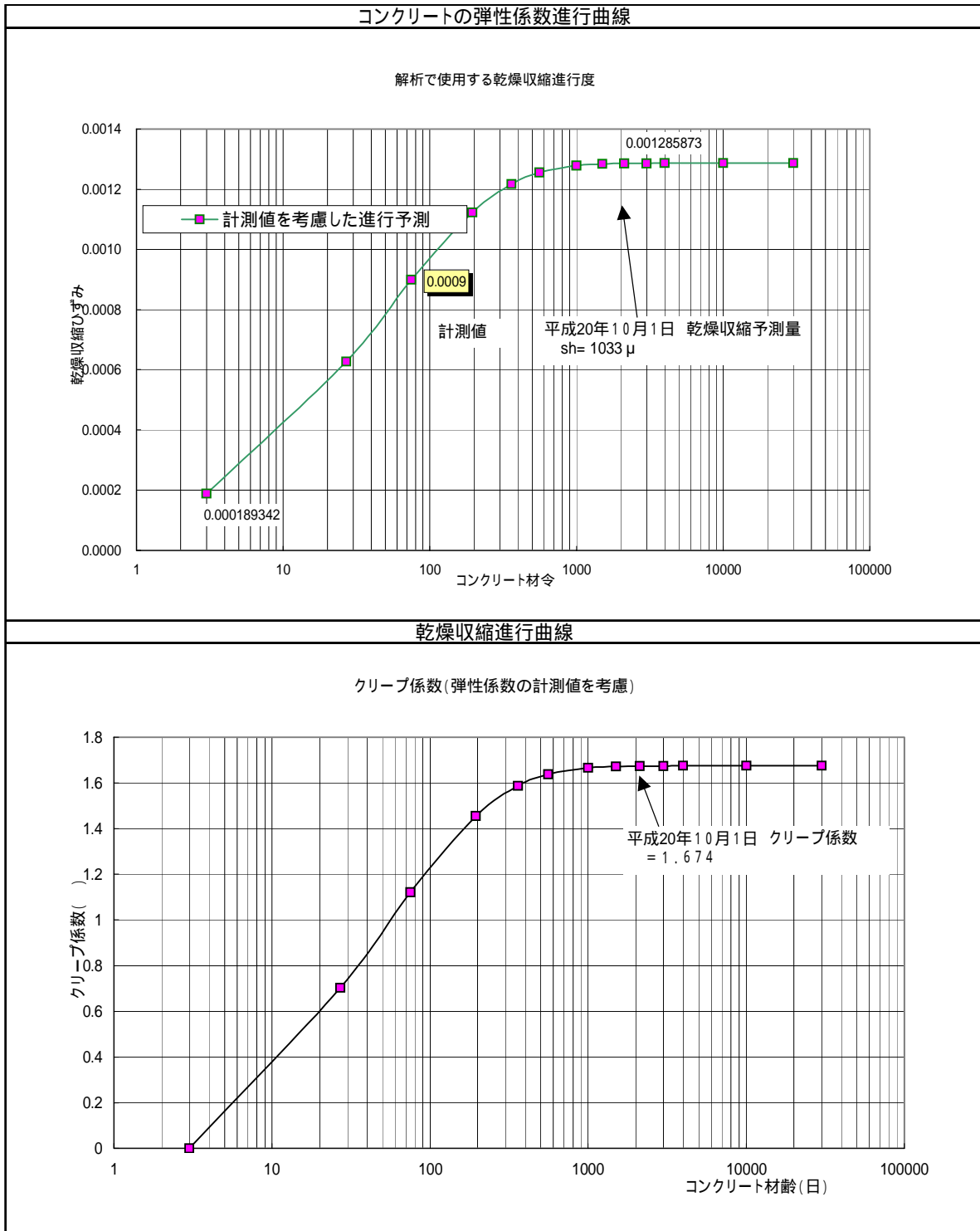
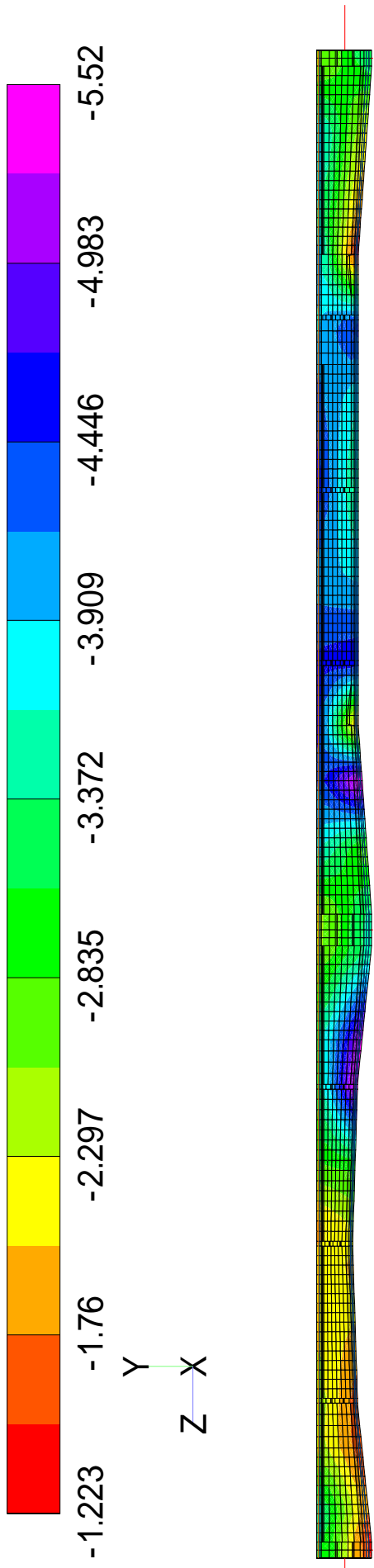


表5 - 11 . コンクリート特性(山中川東高架橋 その2)





Output Set: 初期応力
Contour: SIGZ(j)

图 5 - 5 5 . 初期応力分布 (橋軸方向)

2) 解析結果

再現解析

乾燥収縮解析によって山中川東高架橋のコンクリート表面応力を算出した結果を表5 - 12に示し、それらを表5 - 13にまとめる。なお、表5 - 13の発生応力は初期応力を加えた値である。

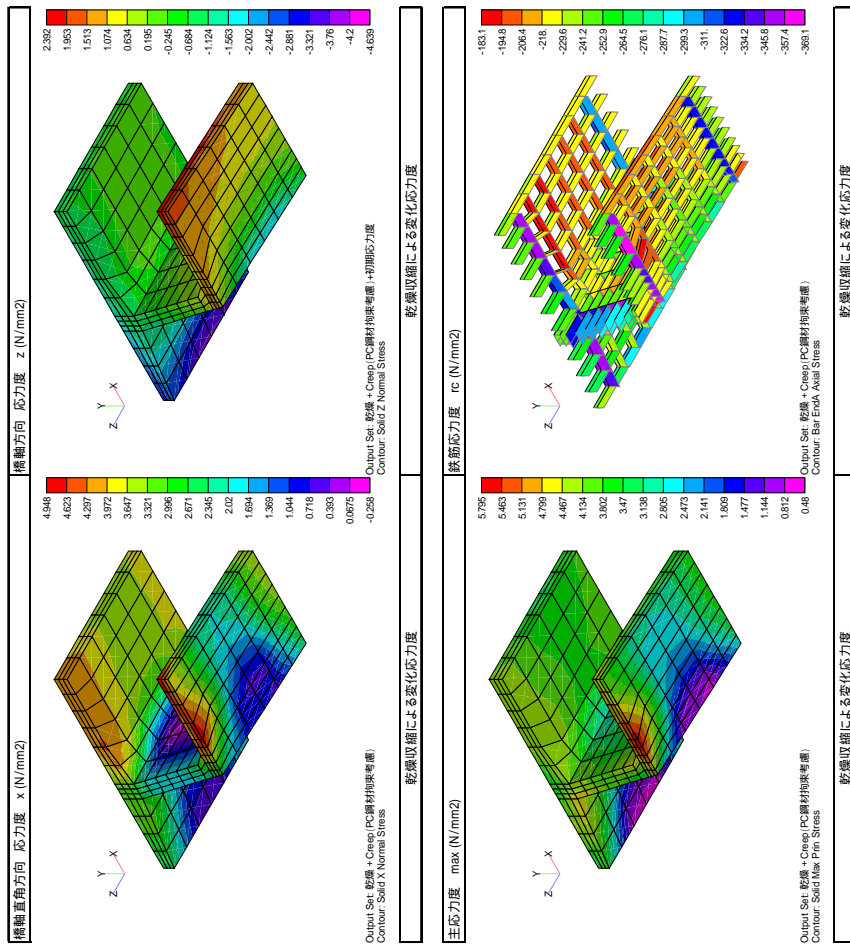
表5 - 12 . 解析結果まとめ(再現解析)

着目部位	A		B	
	橋軸直角 _x	橋軸 _z	橋軸直角 _x	橋軸 _z
最大引張応力 (N/mm ²)	4.948	2.392	5.351	0.974
引張強度 (N/mm ²)	3.64			
ひび割れ指数 $I_{cr(t)}$	0.74	1.52	0.68	3.74

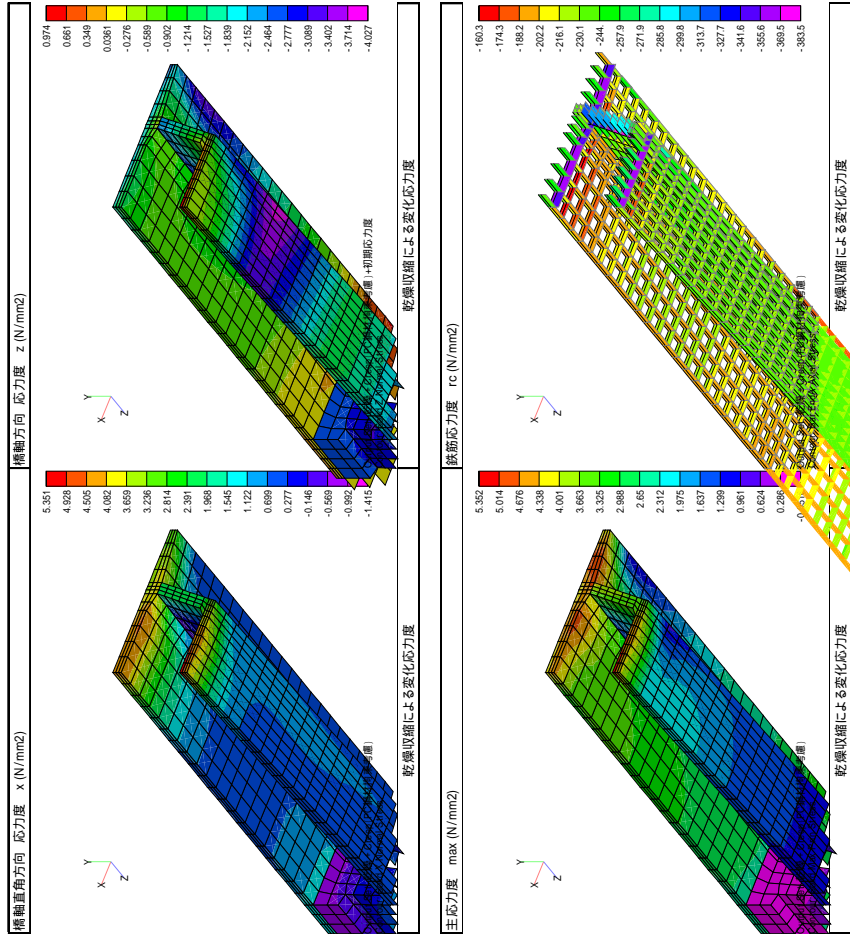
これより、新たに設定した解析モデルでは、ひび割れ指数が着目部位 A、B とともに、橋軸直角方向が 1.0 未満、橋軸方向が 1.0 以上となり、橋軸方向にはひび割れるものの、橋軸直角方向にはひび割れない結果となった。これは、図5 - 47に示す実構造物のひび割れの傾向と一致したことから、本解析モデルは乾燥収縮によるひび割れの発生を良好にシミュレートできると判断できる。

表5 - 13 . コンクリートの表面応力の再現解析、山中川東高架橋

(a) 着目部位 A



(b) 着目部位 B



確認解析

ここでは再現解析のモデルを用いて乾燥収縮量が0と仮定した場合にコンクリート表面に発生する引張応力がどの程度になるのかを確認する。

結果を表5 - 14と表5 - 15に示す。

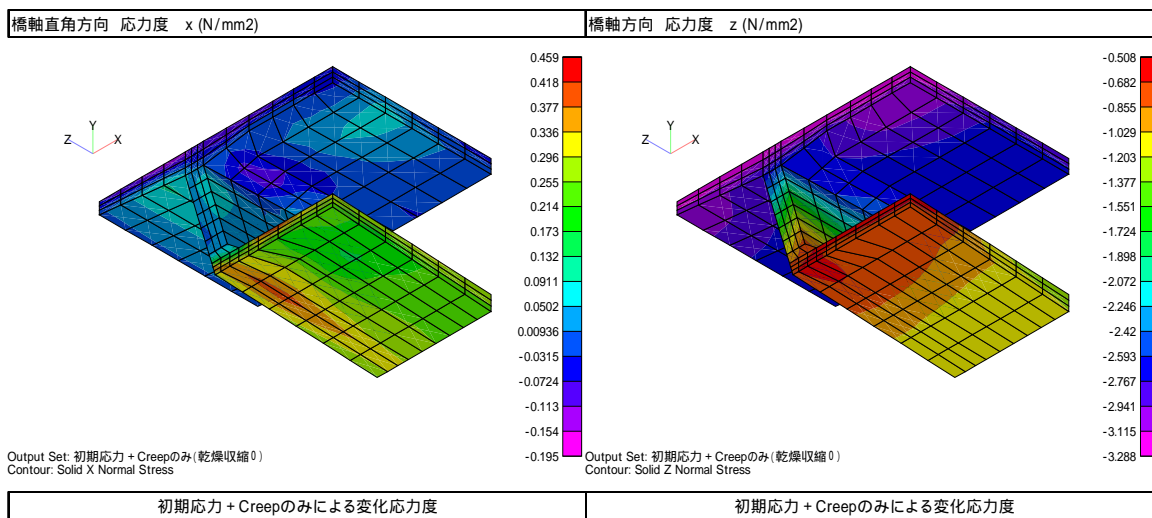
これらより、乾燥収縮量を0と仮定した場合に発生するコンクリート表面の引張応力は小さく、コンクリート表面の引張応力（ひび割れ）にはコンクリートの乾燥収縮が大きく影響することが確認された。

表5 - 14 . 解析結果まとめ(再現解析)

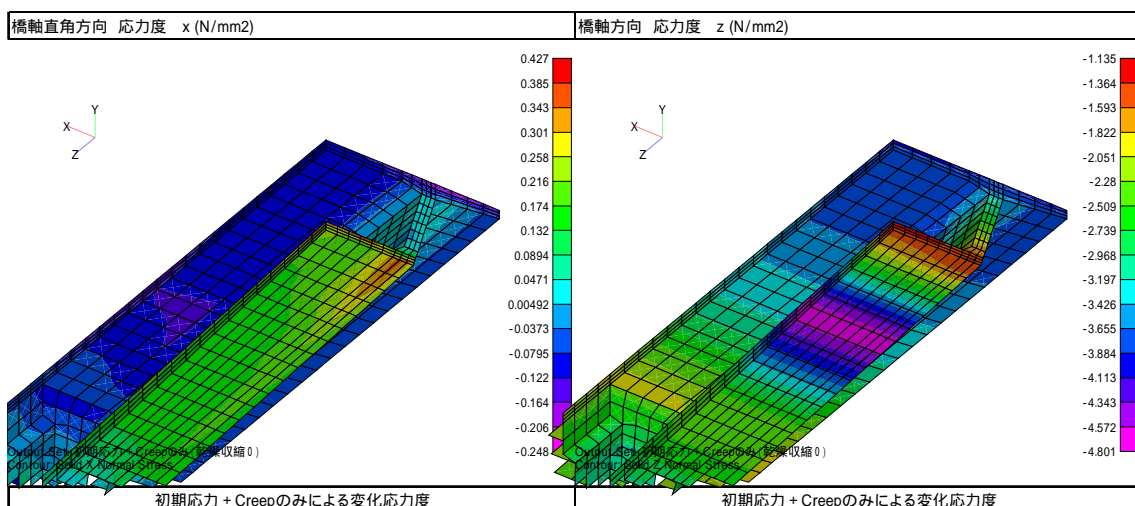
着目部位	A		B	
	橋軸直角 _x	橋軸 _z	橋軸直角 _x	橋軸 _z
最大引張応力 (N/mm ²)	0.459	-0.508	0.427	-1.135
引張強度 (N/mm ²)	3.64			

表5 - 15 . コンクリートの表面応力(確認解析)

(a) 着目部位 A



(b) 着目部位 B



制限値解析

本解析ではひび割れ指数が 1.0 以上、つまりコンクリートの乾燥収縮によって発生する引張応力がコンクリートの引張強度以下に収まる乾燥収縮量を求める。

解析結果として、コンクリート表面の引張応力が引張強度と一致する乾燥収縮履歴を図 5 - 56 に示し、コンクリート表面の引張応力とそのまとめをそれぞれ表 5 - 16、表 5 - 17 に示す。これより、ひび割れ指数が 1.0 以上、つまりコンクリートの乾燥収縮によって発生する引張応力がコンクリートの引張強度以下にするためには、乾燥収縮量を 586 μ 程度に抑える必要がある結果となった。

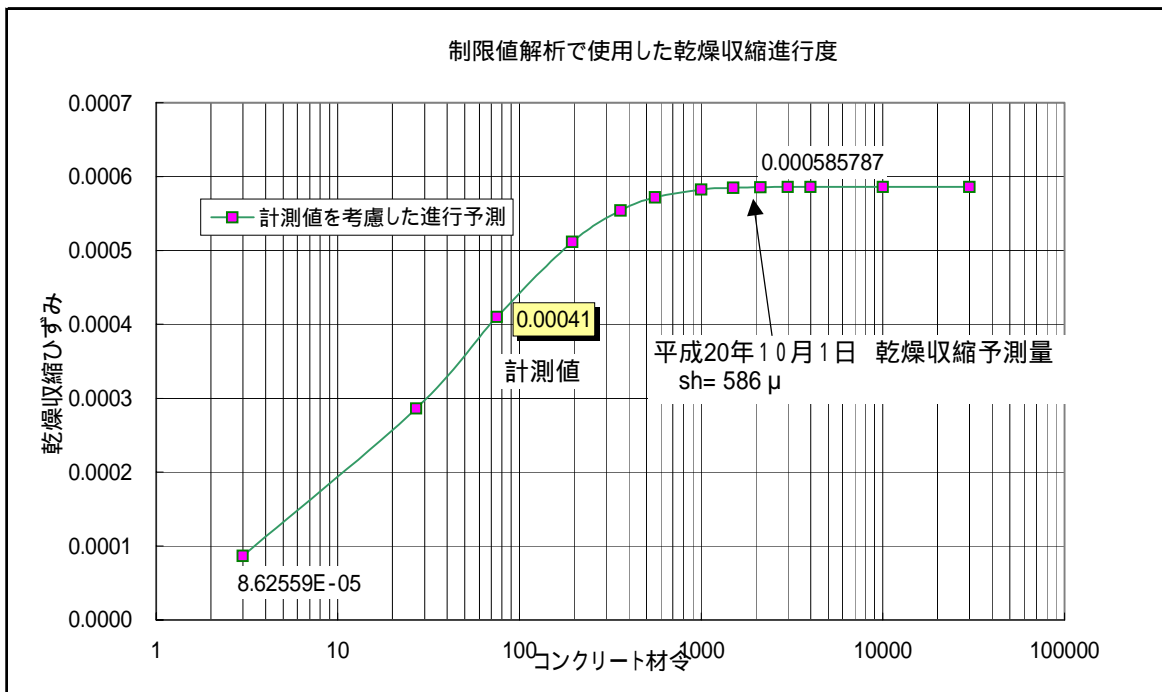


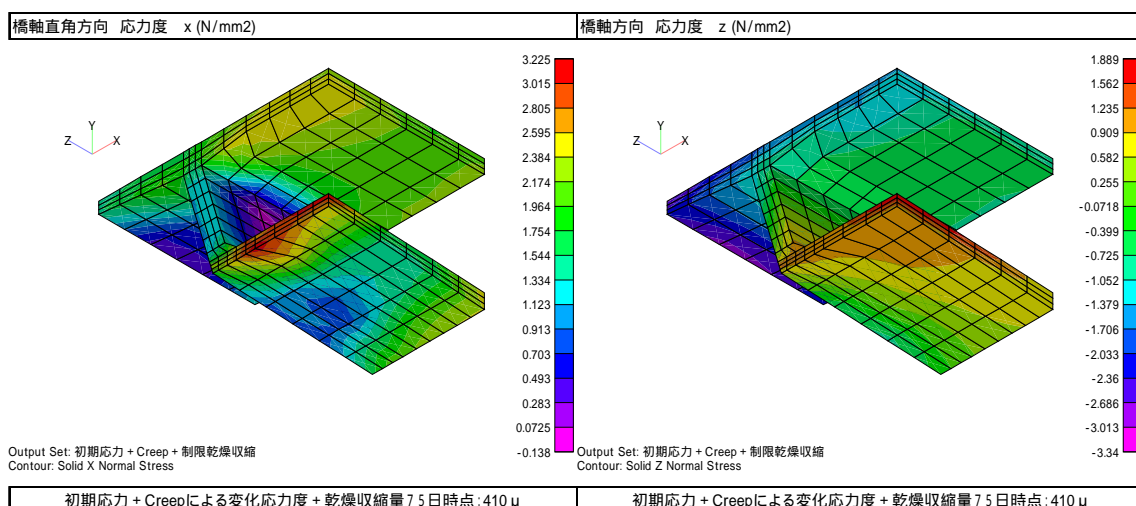
図 5 - 56 . 乾燥収縮履歴 (制限値解析)

表5 - 16 . 解析結果まとめ (制限値解析)

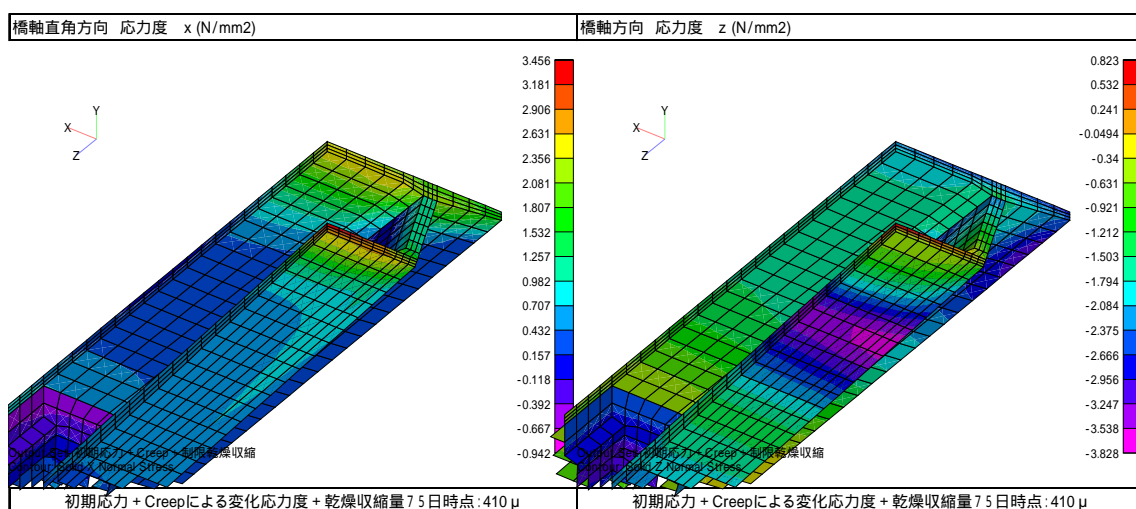
着目部位	A		B	
	橋軸直角 x	橋軸 z	橋軸直角 x	橋軸 z
最大引張応力 (N/mm ²)	3.225	1.889	3.456	0.823
引張強度 (N/mm ²)	3.64			
ひび割れ指数 $I_{cr(t)}$	1.13	1.93	1.05	4.42

表5 - 17 . コンクリートの表面応力 (制限値解析)

(a) 着目部位 A



(b) 着目部位 B



5 - 4 . 部材内部の湿度移動に着目した応力解析

5 - 4 - 1 . はじめに

乾燥収縮によってコンクリート部材内部では湿度移動が生じ、その湿度差によって乾燥収縮ひずみの差異が生じる。このひずみ差により内部拘束応力が発生する。

以下では、温度解析ソフトを用いて、パラメータを温度から湿度に置き換えて、構造物に生じる上記の内部拘束応力を求める。対象とする構造物は、5 - 3と同様にひび割れが顕著な山中川東高架橋とする。解析には、ASTEAMACS(株)計算力学研究センターを用いた。

5 - 4 - 2 . 解析条件

(1) 拡散係数、フィルム係数および収縮係数

本章では3ケースの解析を行った。各ケースで用いた係数を以下に示す。

Case.1 自然田高架橋のコア抜き供試体から求めたフィルム係数、拡散係数および収縮係数を用いた。この値を表5 - 18中に示す。

(山中川東高架橋は自然田高架橋と同一の骨材を使用)

Case.2 フィルム係数および拡散係数は、標準的なコンクリートの値とした。収縮係数は $2,667 \mu / RH$ とした。これは JIS 乾燥収縮試験における 26 週の値が 800μ となる係数である。

Case.3 フィルム係数および拡散係数は、case2 同様に標準的なコンクリートから求めた値である。収縮係数は $2,000 \mu / RH$ (JIS 乾燥収縮試験における 26 週の値が 600μ)、 $2,667 \mu / RH$ (同 800μ)および $3,000 \mu / RH$ (同 880μ)の3つを用いた。

また、表5 - 18に本委員会で既設構造物から採取したコア供試体の乾燥収縮試験から求めた拡散係数、フィルム係数および収縮係数を示す。

表5 - 18 . コア供試体の乾燥収縮試験から求めた各係数

No.	採取場所	細骨材1	細骨材2	粗骨材	躯体全長 (mm)	表面から試験 体中央までの 距離(mm)	発送前 質量 (kg)	到着時 質量 (g)	コア抜き 後質量 (g)	収縮係数 (μ /RH)	フィルム 係数 (mm/日)	拡散係数 (mm^2 /日)	100×100×400mm 供試体での乾燥期 間26週での乾燥収 縮ひずみの計算値 (μ)
1	石田No.1					495	3.63	3,629.5	1,550.0				
2	石田No.2	H産 (海砂)	E産 (砕砂)	E産	1,500	660	4.81	4,807.9	1,518.4	2,930	0.630	$50e^{-15(1-RH)}$	731
3	石田No.3					600	4.12	4,114.5	1,519.1				
4	<small>ジナン、ダ</small> 自然田No.1					310	4.90	4,900.3	1,500.7				
5	自然田No.2	C産 (海砂)	E産 (砕砂)	E産	600	310	4.43	4,423.9	1,477.2	2,725	0.945	$200e^{-15(1-RH)}$	864
6	自然田No.3					310	4.37	4,367.2	1,486.6				
7	<small>ワトガワ</small> 菟砥川No.1					290	4.80	4,802.5	1,529.6				
8	菟砥川No.2	H産 (海砂)	E産 (砕砂)	E産	600	290	4.87	4,873.2	1,529.5	1,955	1.260	$320e^{-15(1-RH)}$	661
9	菟砥川No.3					300	4.57	4,564.9	1,520.9				
10	<small>キンゴウジガワ</small> 金熊寺川No.1					740	5.21	5,211.9	1,533.2				
11	金熊寺川No.2	A産 (海砂)	B産 (砕砂)	B産	1,900	600	4.18	4,173.0	1,532.2	1,973	0.525	$50e^{-15(1-RH)}$	491
12	金熊寺川No.3					660	4.95	4,944.8	1,543.8				

(2) 相対湿度

乾燥開始時の構造物の相対湿度は 100%、外気の相対湿度は 70%一定とした。

(3) 解析モデル

解析モデルを下図に示す。解析では P1～P3 径間に着目した。なお、内部拘束応力に注目するために施工ステップは考慮せず、全径間を同時施工したものとしている。

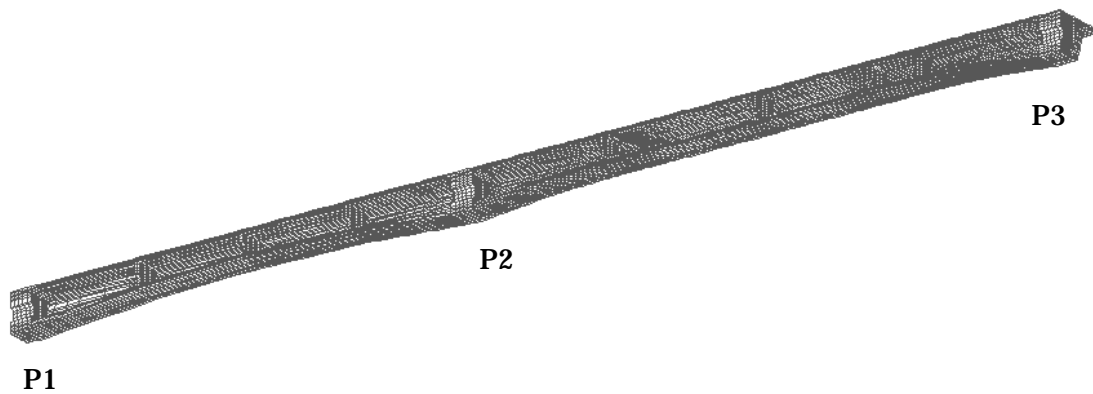


図5 - 57 . 山中川東高架橋解析モデル

5 - 4 - 3 . 解析結果

(1) Case.1

各乾燥期間における構造物下縁側の直角方向応力の解析結果を以下に示す。

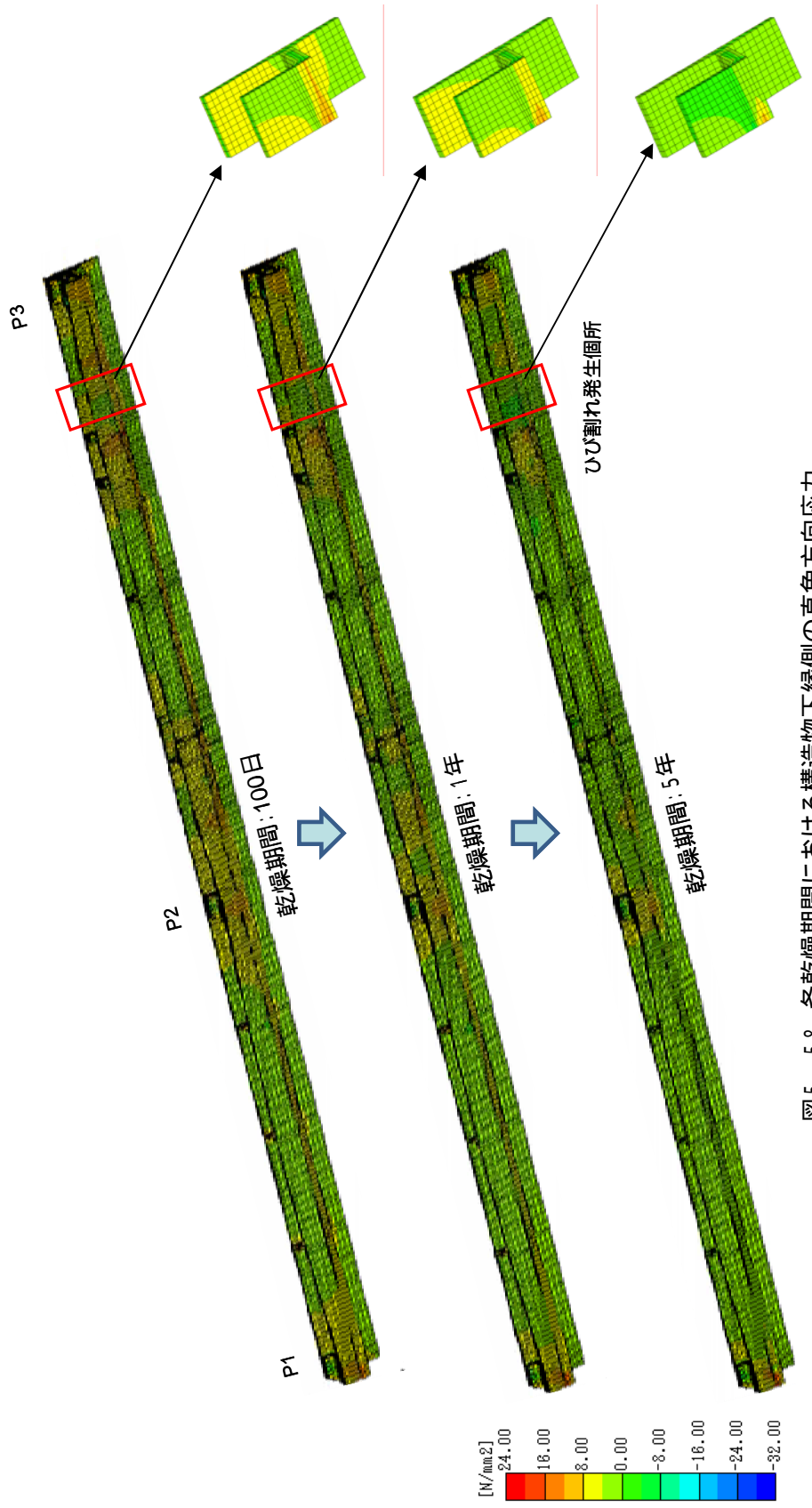


図 5 - 5 8 . 各乾燥期間における構造物下縁側の直角方向応力

図5-59、60に変状が顕著なP2・P3間の間詰め部付近の応力履歴を示す。これらの図によると、間詰め部近傍の最大引張応力は6.0~8.0N/mm²程度となっている。ただし、解析はクリープの影響を考慮しておらず、実構造物に作用する応力は解析結果より小さいと思われる。

また、橋軸直角方向の最大応力は、乾燥期間約100日で発生している。ただし、乾燥開始(脱型)から100日という短期間で実構造物に変状が生じたという記録はない。実際には、雨露の影響等、現地の環境条件により、実構造物における乾燥収縮の進行はこれより遅くなると思われる。

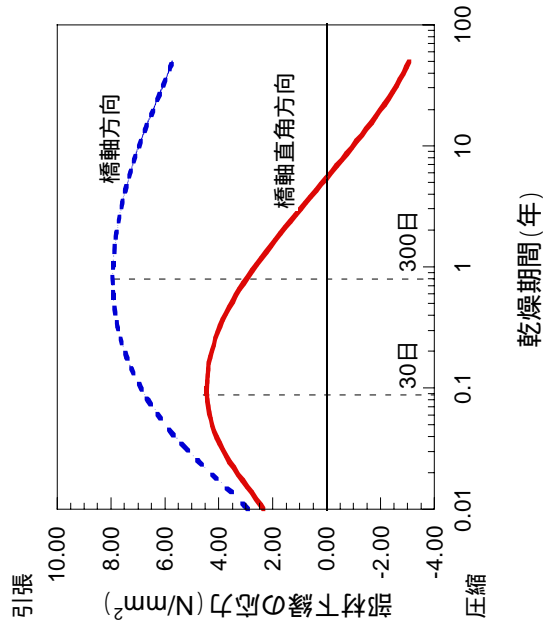
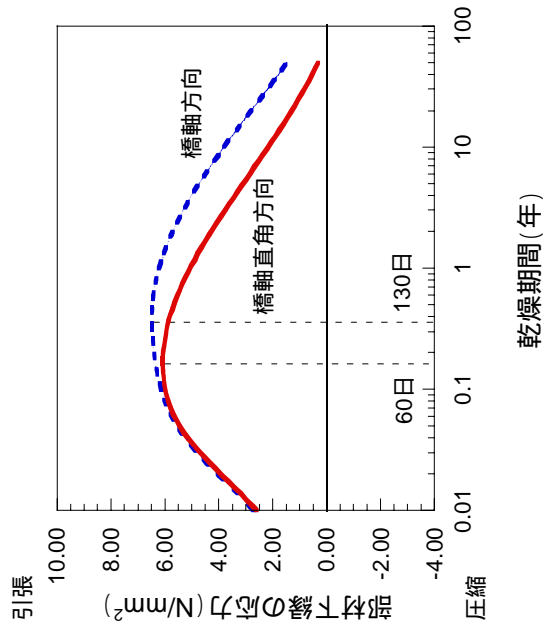
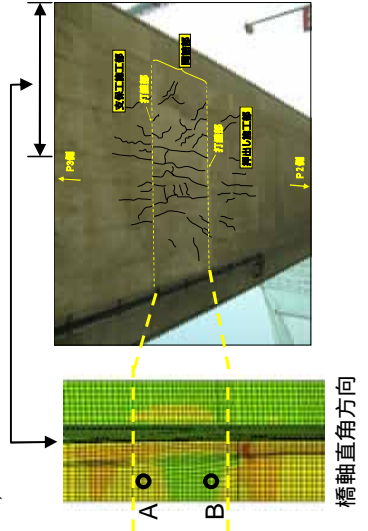


図5-59.点Aにおける部材下縁応力と乾燥期間の関係
(乾燥収縮による応力)

図5-60.点Bにおける部材下縁応力と乾燥期間の関係
(乾燥収縮による応力)



また、図5 - 61、62は乾燥収縮による応力に、死荷重およびプレストレスによる応力を加算したものである。乾燥収縮による応力が卓越しており、図5 - 59、60と大差がない結果となっている。

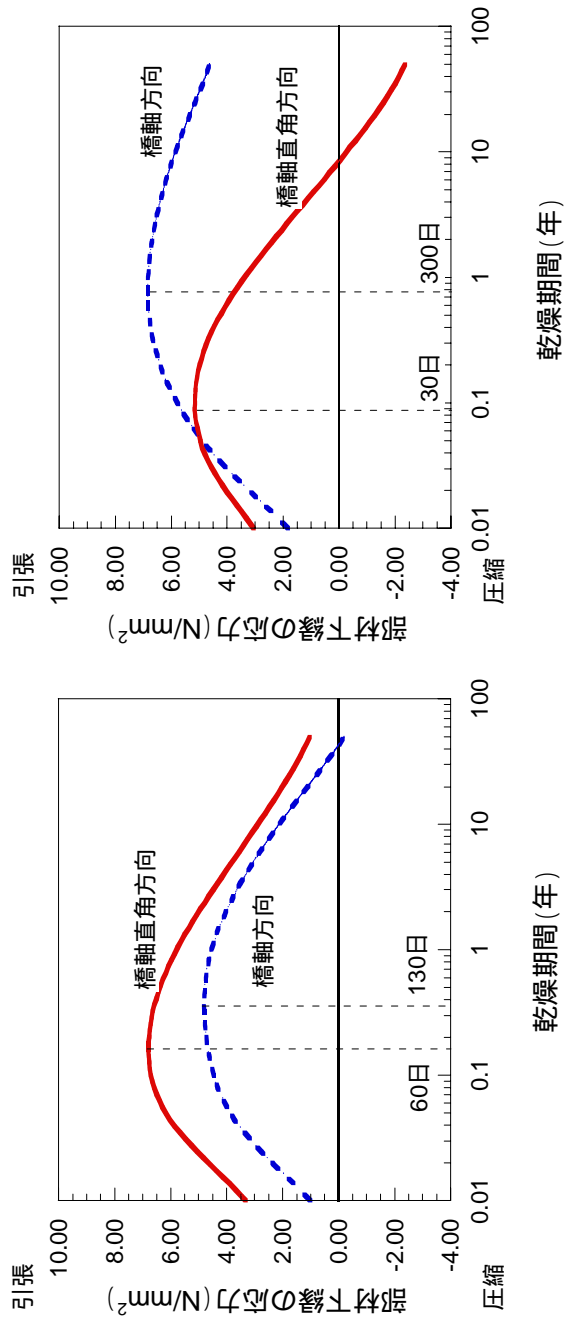


図5 - 61 . 点 A における部材下縁応力と乾燥期間の関係
(死荷重およびプレストレスを考慮)

図5 - 62 . 点 B における部材下縁応力と乾燥期間の関係
(死荷重およびプレストレスを考慮)

(2) Case.2

Case.1 の解析結果によると、解析上の乾燥収縮の進行は、現実より速くなっている。これは、拡散係数およびフィルム係数を、建設後約7年経過した構造物から採取したコア抜き供試体より求めたことが原因であると思われる。

従って Case.2 では、標準的なコンクリートから求めた拡散係数およびフィルム係数を用いて解析を行う。係数は下記に示す。

図5 - 63に間詰部近傍の変状と解析結果（乾燥期間1年）の比較を示す。

解析によると、間詰部そのものよりも両端部に位置する隔壁、横桁部に高いレベルの応力が発生している。このことから、これらの領域で最初にひび割れが発生し、その後、間詰部まで進展した可能性が考えられる。さらに間詰め部は、5 - 2の解析結果より明らかのように、先行施工された部位による外部拘束の影響を強く受けるため、結果として写真として写真のような損傷状態に至ったものと思われる。

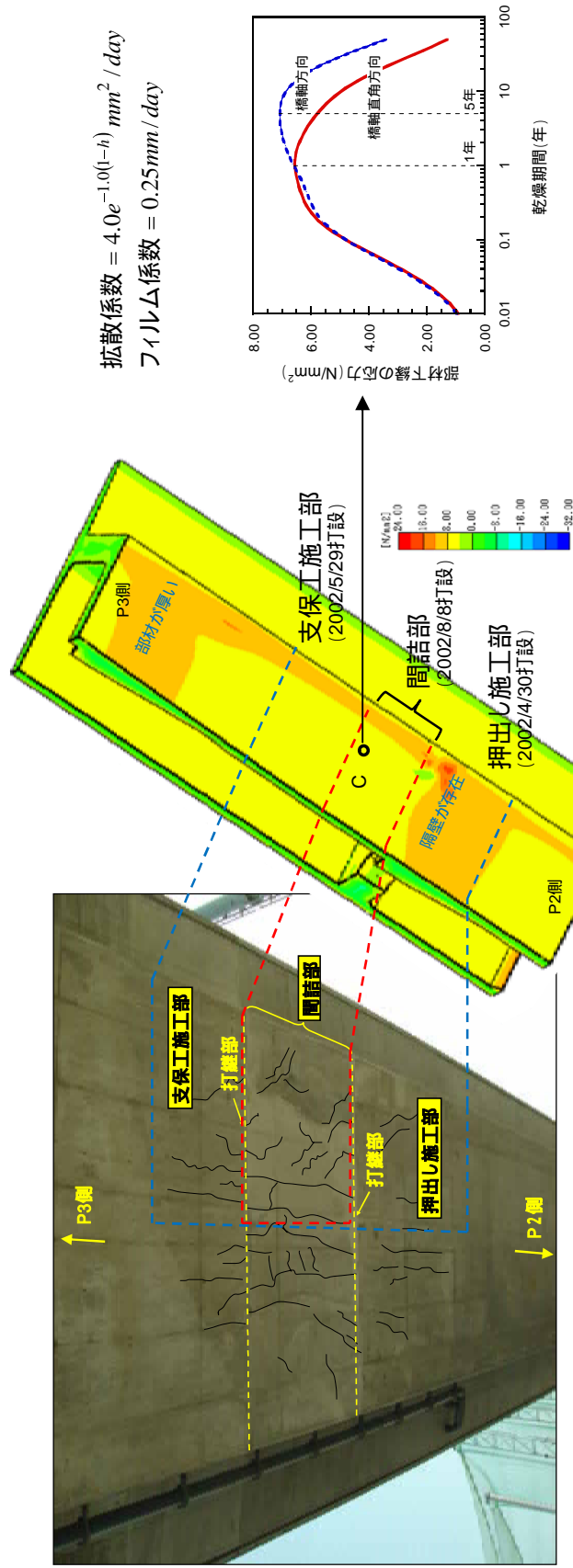


図5 - 63 . 構造物下縁側の変状と解析結果の比較

(3) Case.3

収縮係数の差異により構造物に発生する応力度を、解析によって求めた。用いた収縮係数は $2,000 \mu/RH$ (JIS 乾燥収縮試験における 26 週の値が 600μ)、 $2,667 \mu/RH$ (同 800μ) および $3,000 \mu/RH$ (同 880μ) である。フィルム係数および拡散係数は Case.2 と同じ値を用いた。

以下に示す図は乾燥期間 1 年の間詰部近傍に発生する橋軸直角方向および橋軸方向の応力である。これらの図より、JIS 試験による結果の差異が 80μ 程度でも、構造物の表層部に生じる応力差は小さくなく、注意する必要がある。

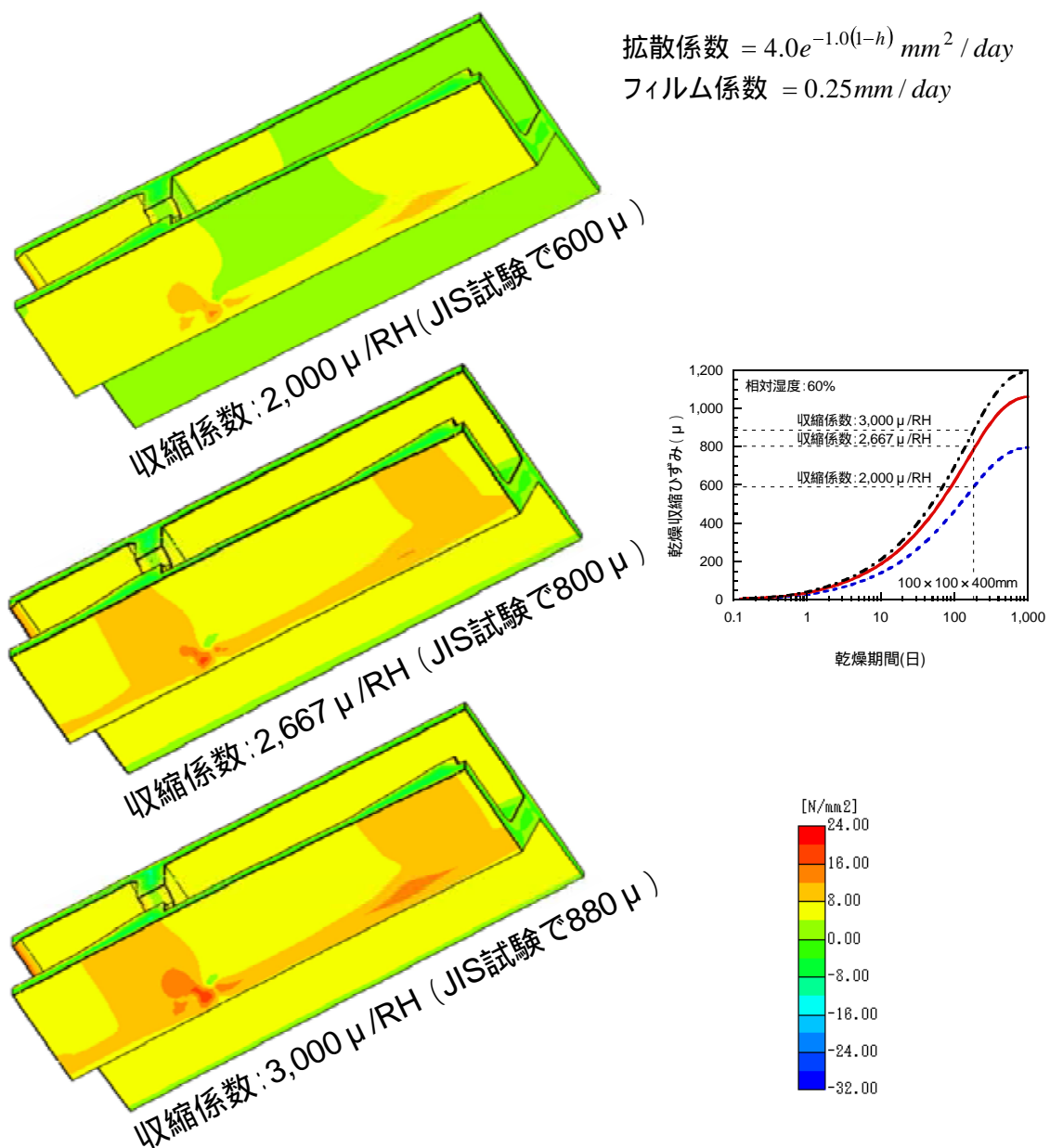


図5 - 64 . 乾燥期間 1 年における乾燥収縮ひずみによる橋軸直角方向の応力

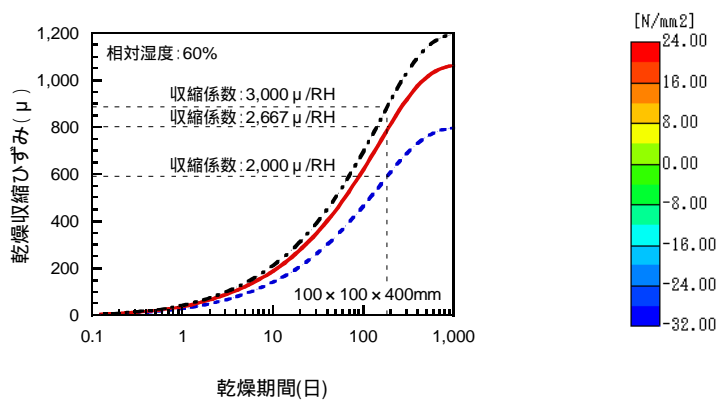
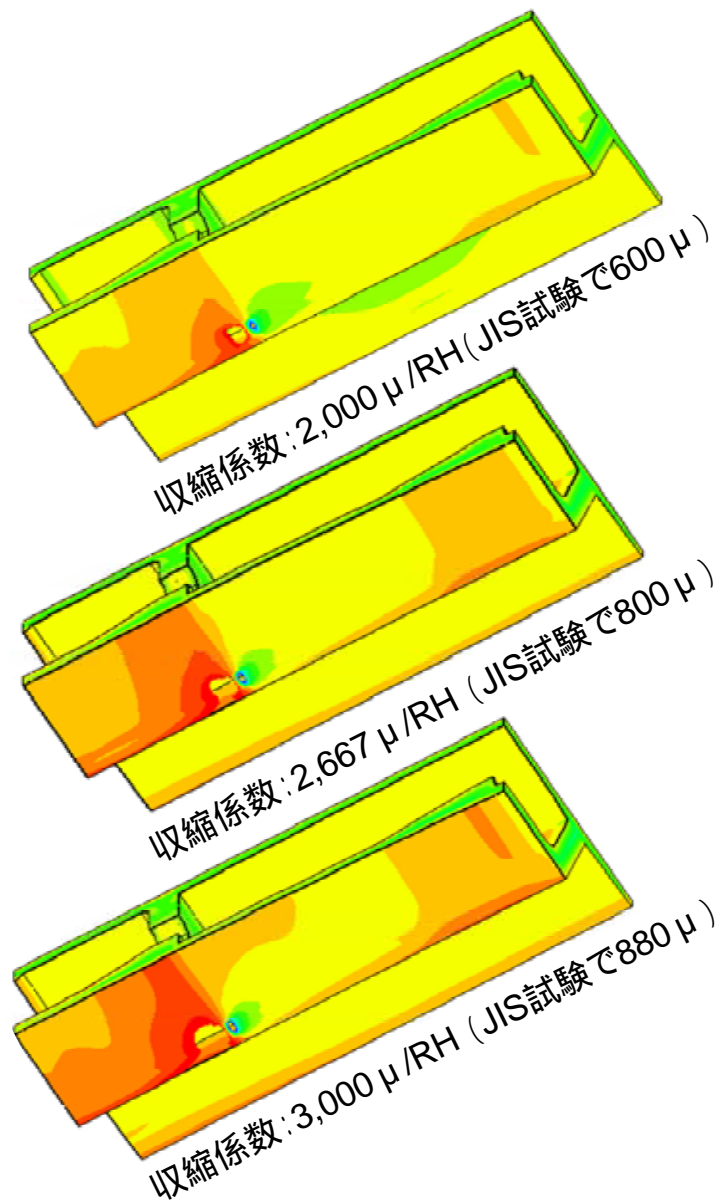


図5 - 65 . 乾燥期間1年における乾燥収縮ひずみによる橋軸方向の応力

5 - 4 - 4 . まとめ

- ・ 温度解析ソフトを用いて実橋を対象に解析を行い、部材中の湿度移動によって生じる内部拘束応力の算定を行った。
- ・ 解析により、実際の変状部付近に高い引張応力が生じていることが確認された。ただし、本解析にはクリープによる応力緩和は考慮しておらず、実際に発生する応力は解析値よりも小さくなると思われる。
- ・ 湿度移動に関するパラメータとして、実構造物から採取したコアより得られる値を使用して解析を行ったところ、応力がピークとなる時期は乾燥開始から100日程度となった。そうした早期に変状が確認されていないことから、解析上の乾燥収縮の進行は、現実より速くなる可能性が示唆された。
- ・ JIS試験による結果が800 μ を想定した解析でも、実際の変状をある程度再現できた。