

## 鋼床版橋のグースアスファルト舗装熱による挙動

—札幌大橋における計測と数値解析—

Behaviour of a Steel - Plate - Deck - Bridges by Heating during Gussasphalt  
Pavement Works

—Research on Sapporo - Oh - Hashi (Bridge)—

本名 一夫\* 桜田 昌之\*\* 城ヶ端政次\*\*\*

Kazuo HONNA, Masayuki SAKURADA and Masatsugu JOHGAHATA

鋼床版を有する橋において、グースアスファルト舗設後、舗装死荷重による以上のたわみが生じることが最近現場で注目されている。これは、舗設熱によってデッキプレートに大きな圧縮応力が生じた後、冷えて引張応力が発生するからである。

この現象を定量的に把握するため、札幌大橋のグースアスファルト舗設時に、橋体の温度・ひずみ・たわみを計測するとともに、慣用法による数値解析を行った。計測の結果、若干の残留たわみが見られたが、橋の機能と耐荷力に影響を与えるものではなかった。また、数値解析はかなり正確に現象を表わすことができた。

〈鋼床版；グースアスファルト；熱応力〉

Additional deflections have been observed at steel-plate-deck-bridges after Gussasphalt pavement works. These deflections are caused by tensile stresses in deck plates which show after heat and thermal compressive stresses are released.

To analyze the phenomenon, we observed strains, temperatures, and deflections of Sapporo-Oh-Hashi (bridge) while pavement works were executed.

The bridge showed deflection which has had no critical influence on its functioning and durability. We also carried theoretical calculations with a conventional method, and the results were in agreement with the observations in the bridge.

Keywords : steel-plate-deck-bridge, gussasphalt, thermal stress.

## まえがき

鋼床版橋面舗装において特に求められる性状は、鋼床版との接着性、鋼床版の変形に追従する能力および防水性であり、この要求を満たすものとしてグースアスファルトが一般的に基層に用いられている。

ところで最近、グースアスファルト施工後に、予定したキャンバー以上に橋面が下がるということが現場でしばしば問題となっているが、これは次のように説明され

る。グースアスファルトは、クッカー車内で220～260℃程度に加熱して舗装面に流しこまれるが、その際、直下の鋼床版表面温度は最大100～120℃程度になり、熱膨張しようとする。しかし、デッキプレートの熱変形が橋体自身によって拘束されているために、大きな圧縮応力が発生する。これと、すでにデッキプレートに生じている死荷重応力および製作架設応力との合計が鋼材を塑性域にまでいたらしめると、温度低下後、鋼材はもとの応力

\*構造研究室長 \*\*同室主任研究員 \*\*\*同室員

(死荷重応力+製作架設応力)よりも引張側に移行しようとする。こうして引張残留応力(絶対値は「引張り」ではない)がデッキプレート一帯に発生したとき、それに応じた沈下が生じるわけである。

構造研究室および札幌開発建設部札幌新道建設事務所では、札幌大橋のグースアスファルト舗設に際して、橋体に生じる熱、ひずみおよびたわみ値の変化を調べるとともに、これに対する数値解析を行ってみた。合わせて、舗設時熱応力の低減とたわみ超過回避の方策について考察した。

### 1. 温度変化を受けるはりの挙動

図-1は両端完全固定ばりを例に、熱応力を説明したものである。無応力の完全固定ばりが $T^{\circ}C$ の温度差を受けたとき、①のポイントまで伸びようとするが、途中で

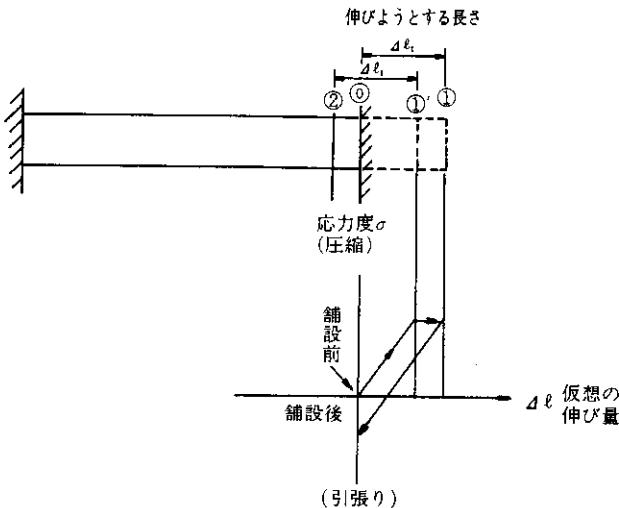


図-1 温度が上昇、下降するときの完全固定ばりの応力履歴

圧縮降伏しているのが拘束を解放しても①'のポイントまでしか伸びない。次に温度を $0^{\circ}C$ まで下げるが、このときの仮想の出発点は①'なので、 $0^{\circ}C$ の状態では②のポイントまで逆に縮もうとする。しかし、はりは④の位置で固定されたままなので、引張残留応力が発生する。

実橋でははりがデッキプレートに相当し、壁がウエブなどに相当する。図では完全固定ばりなので壁は動かず、はりは温度差分の応力を100%受けるが、実橋でははり(デッキプレート)と壁(ウエブなど)との間で剛性・断面積に相応した応力の調整が行われる。

### 2. 現地計測の概要

#### 2.1 橋梁概要

札幌大橋は一般国道337号道央新道の石狩川横断部に架けられた札幌市と当別町を結ぶ橋梁であり、本年8月10日に開通した。橋長は985.3mで、大小4連の3径間連続げた橋で構成されている。完成前、最後の工事である橋面舗装に際し、札幌側の3径間連続鋼床版2主板げた1連(図-2)においてグースアスファルト舗設による熱応力の計測を行った。橋面舗装は車道部基層 $t=4$ cm、同表層 $t=4$ cm、歩道部 $t=3$ cmであり、このうち車道部基層がグースアスファルトである。

#### 2.2 舗装施工概要

グースアスファルトは、精製トリニダットアスファルトおよび針入度40~60のストレートアスファルトをバインダーとし、これらと骨材の混合物をプラントで $190^{\circ}C$ 前後で加熱混合したものである(表-1, 2)。これをクッカー車に投入し、リュエル流動性が20秒以下になるまで車内で攪はん、加熱を行う。施工目標としてリュエル

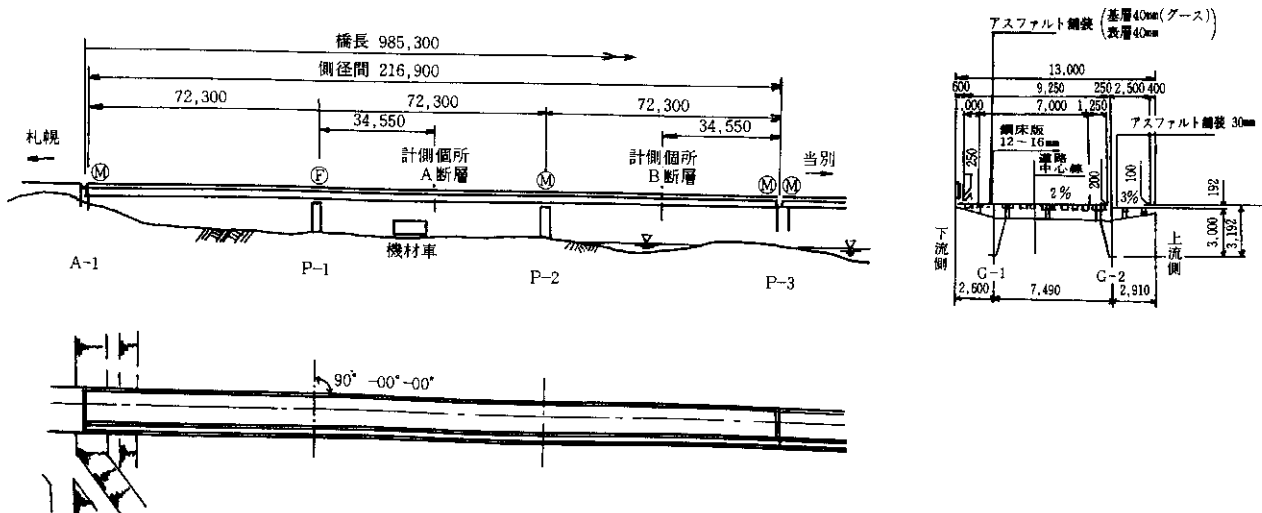


図-2 札幌大橋側径間一般図

表-1 グースアスファルト配合

材 料		配 合 (重量%)
砕 石 13~5	(小樽市 見晴町産)	23.8
砕 石 5~2.5	( — " — )	20.1
粗 目 砂	(勇払郡 浜厚真産)	13.7
細 目 砂	(石狩郡 知津狩産)	7.3
石 粉		26.5
ストアス 40/60		6.375
精製トリニダット アスファルト	(南 米 トリニダット島産)	2.125

表-2 混合条件

骨材加熱温度	190℃	±10℃
ストアス加熱温度	175℃	± 5℃
石粉加熱温度	150℃	
ドライミキシング	60秒	
ウェットミキシング	35秒	
目標排出温度	180℃	
1 バ ッ チ 重 量	500kg	

流動性12秒程度、施工温度240℃程度とされた。現場でのクッカー車内合材温度は223~230℃、舗設後の合材最高温度は133~165℃であった。

グース舗装作業手順は、第1次機械施工として下流側(幅4.0m)を、第2次施工として上流側(幅4.0m)を行い、その後残る両サイドを人力舗設で行った。



写真-1 グースアスファルト舗装状況(2次施工)

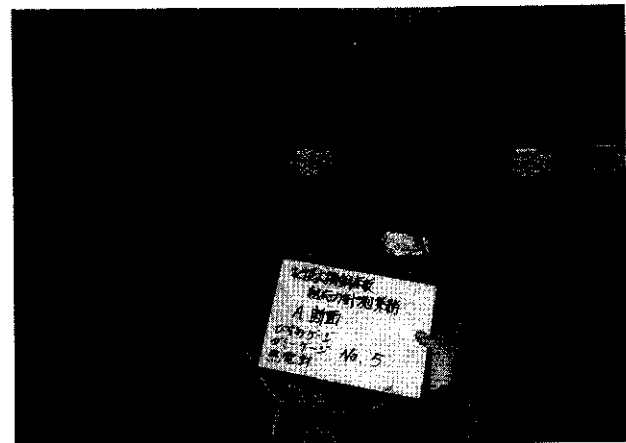
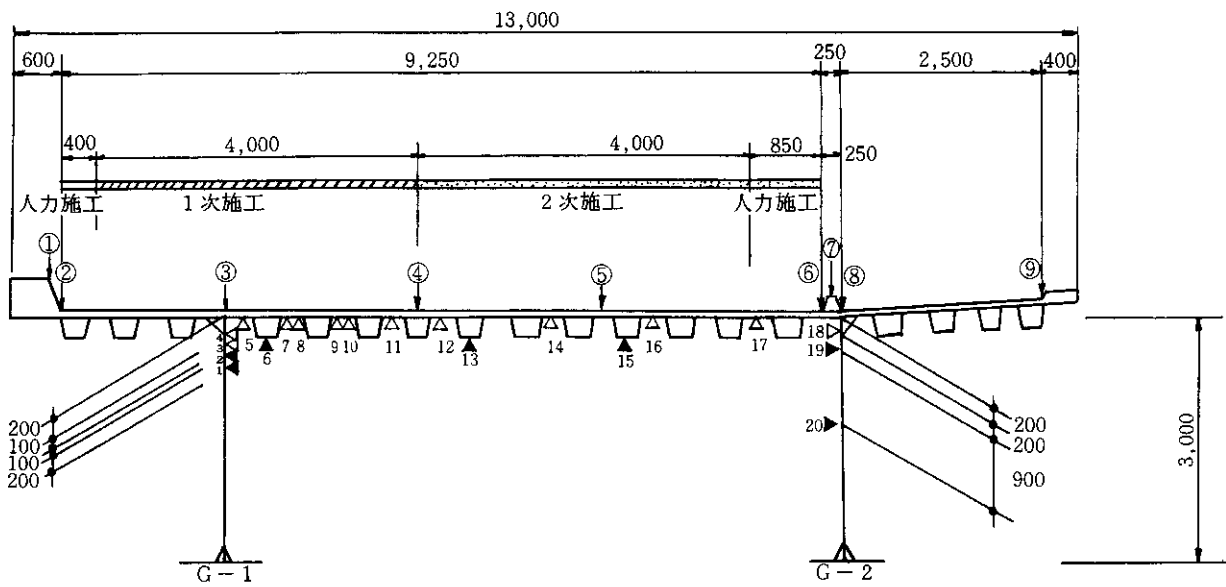


写真-2 ひずみゲージ熱電対設置状況



△高温ゲージ ▲一般ゲージ ↓レベル計測位置

図-3 舗設手順および温度、ひずみ、レベル計測箇所

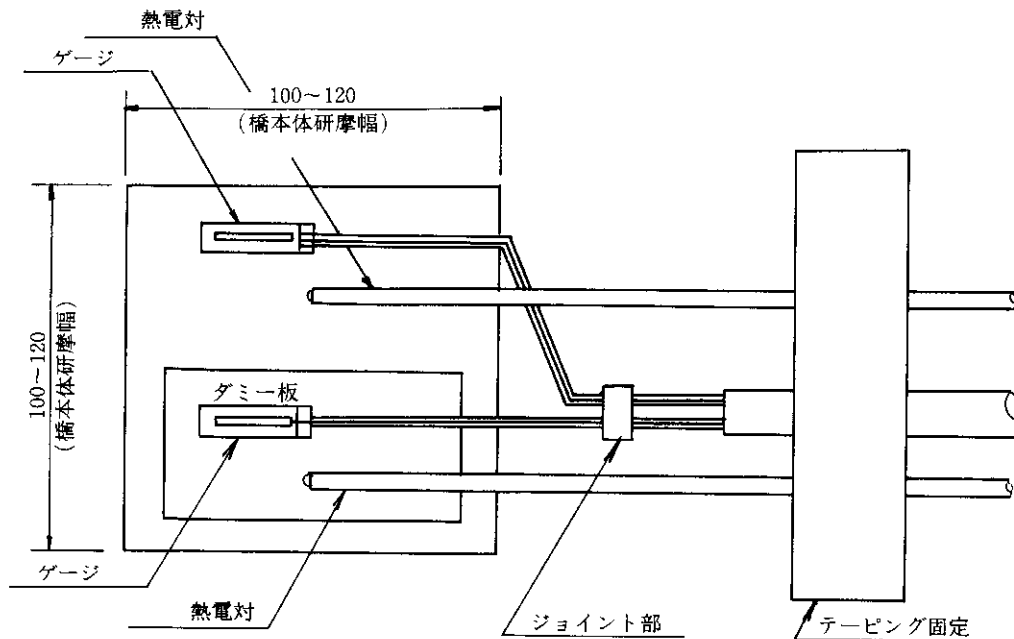
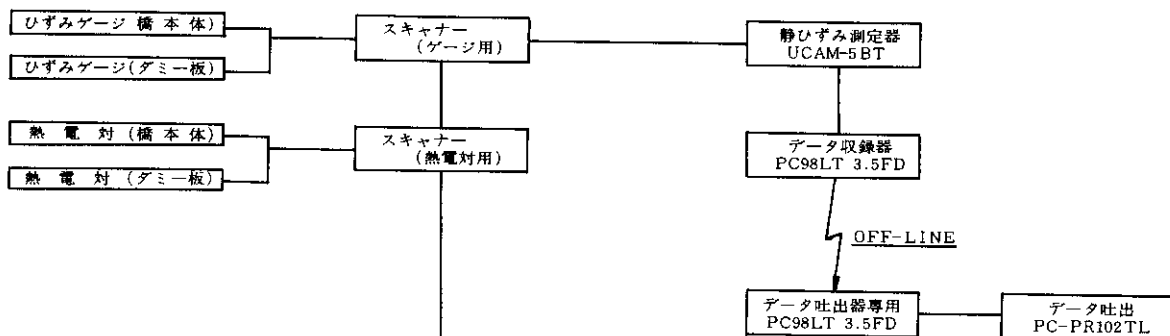


図-4 ゲージ、熱電対取付け略図

**A断面**



**B断面**

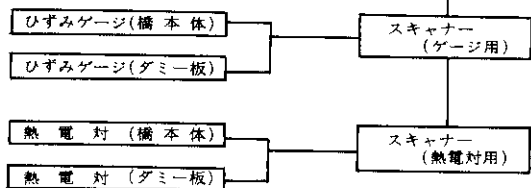


図-5 計測ブロック図

舗設幅は、広い方が熱応力が小さくなるので、1台のフィニッシャーの最大施工幅である4.0mとした。

2.3 計測項目および計測箇所

計測箇所は中央径間の中央部 A 断面、側径間の中央部 B 断面 (図-2) の2断面とし、各断面内にデッキプレートを中心に20個の計測点を設けた (図-3)。

けたのたわみ変化は、レベル測量によって計測した。

けたの鉛直変位は日照の影響でも生じてくるので、舗装前後のたわみ変化は、橋体各部の温度差が最も少ない時刻での計測結果で比較しなければならない。このため、舗装前および各段階の舗装作業終了後、午前4時にレベル計測を行った。レベル計測箇所は橋軸方向に等間隔に11断面をとり、各断面ごとに①~⑨のポイントを計測点とした (図-3)。

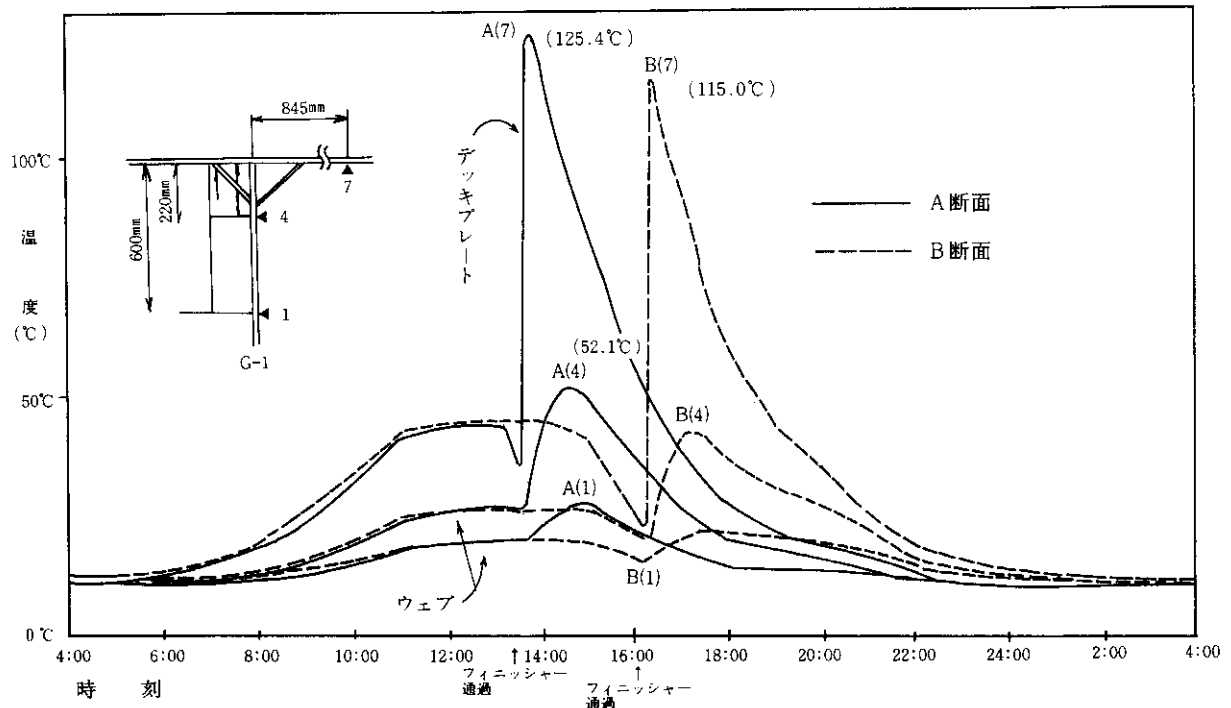


図-6 橋体温度の経時変化 (1次施工時)

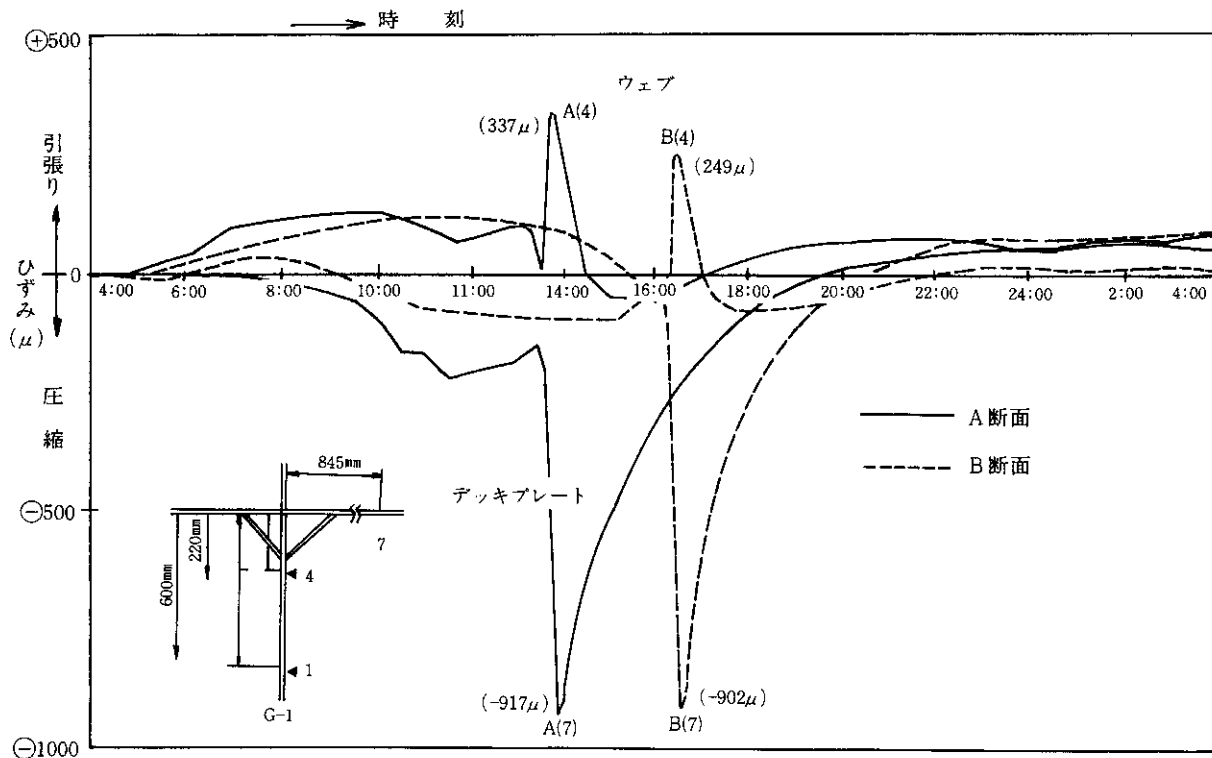


図-7 橋体ひずみの経時変化(1次施工時)

#### 2.4 計測システム

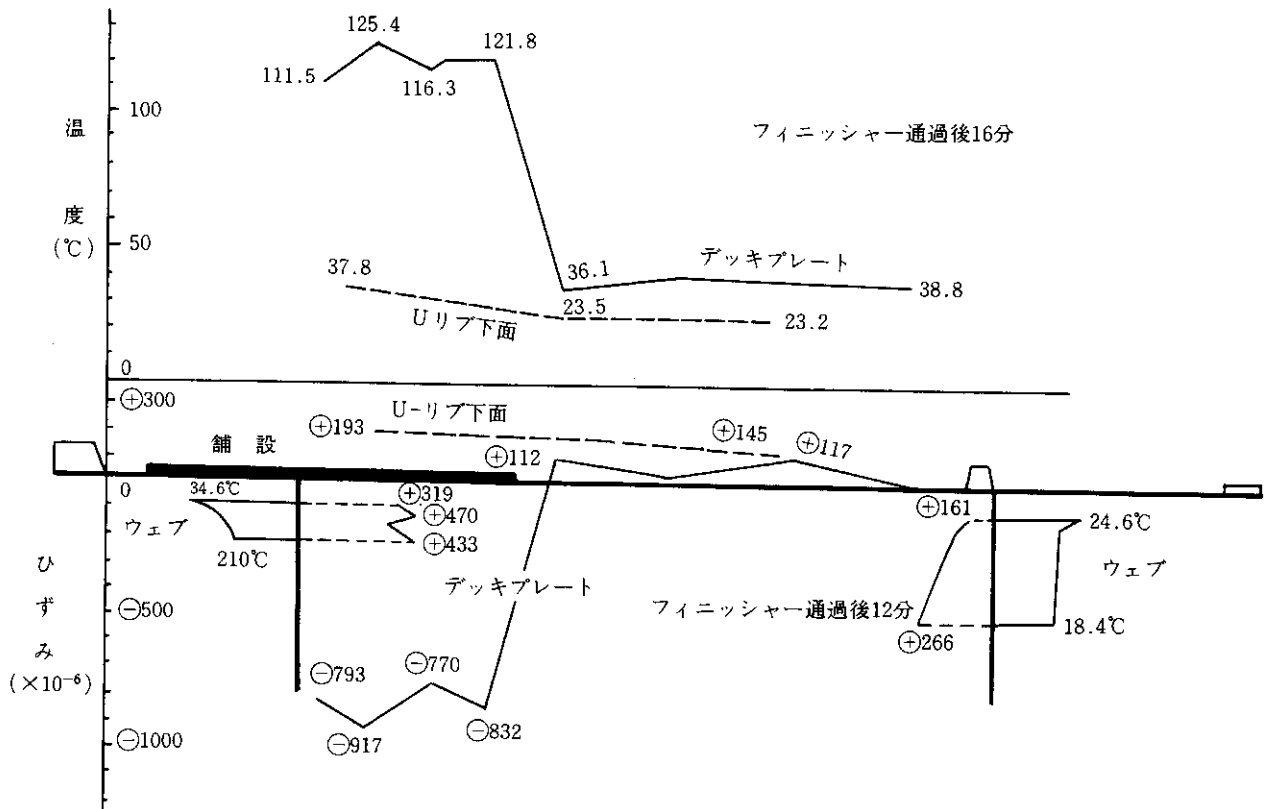
各計測点にはひずみゲージと熱電対を、橋本体およびダミー版に1セットとして取り付け(図-4), アクティブ・ダミー法により測定精度の向上を図った。

鋼床版ひずみ測定に用いるひずみゲージは、鋼床版の温度により次の2種のタイプを用いた。

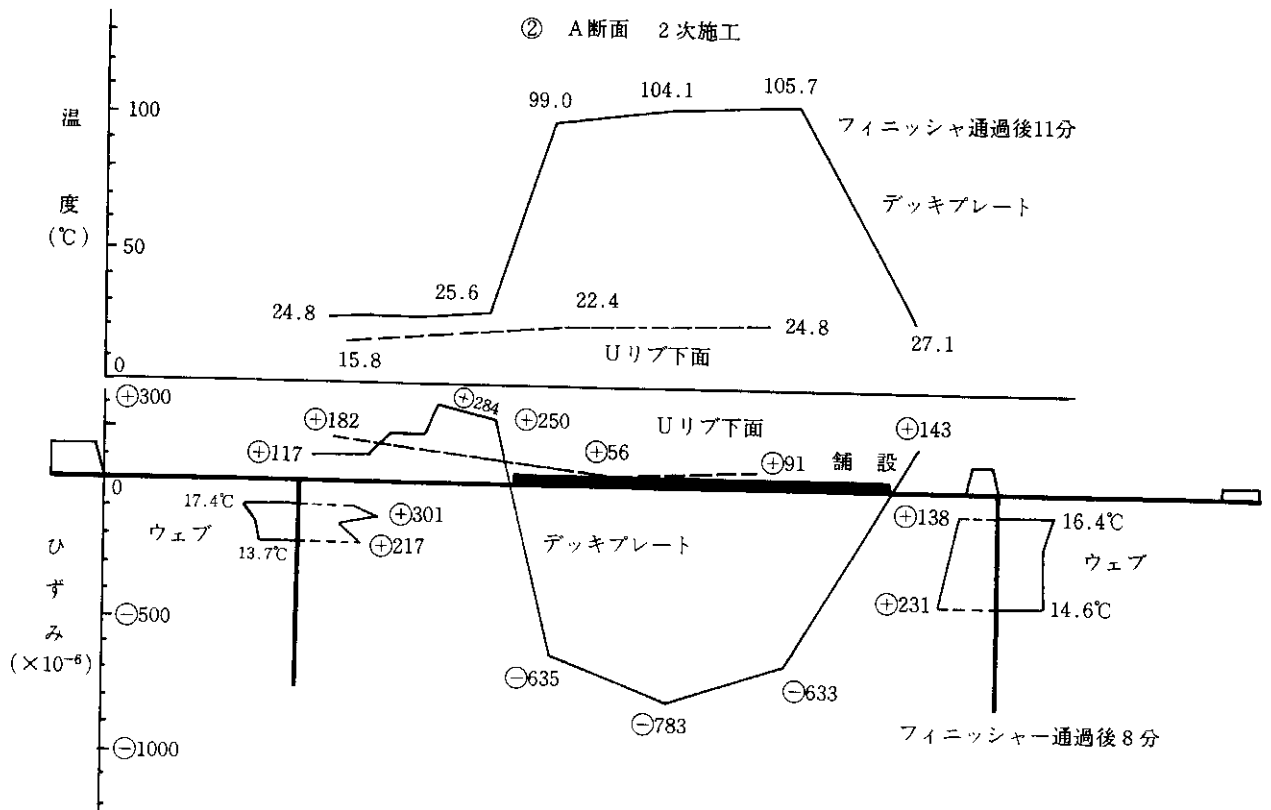
①高温用: KH-5-350-G4-11

(+10~+300°C, 図-3 測定点△)

① A断面 1次施工



② A断面 2次施工



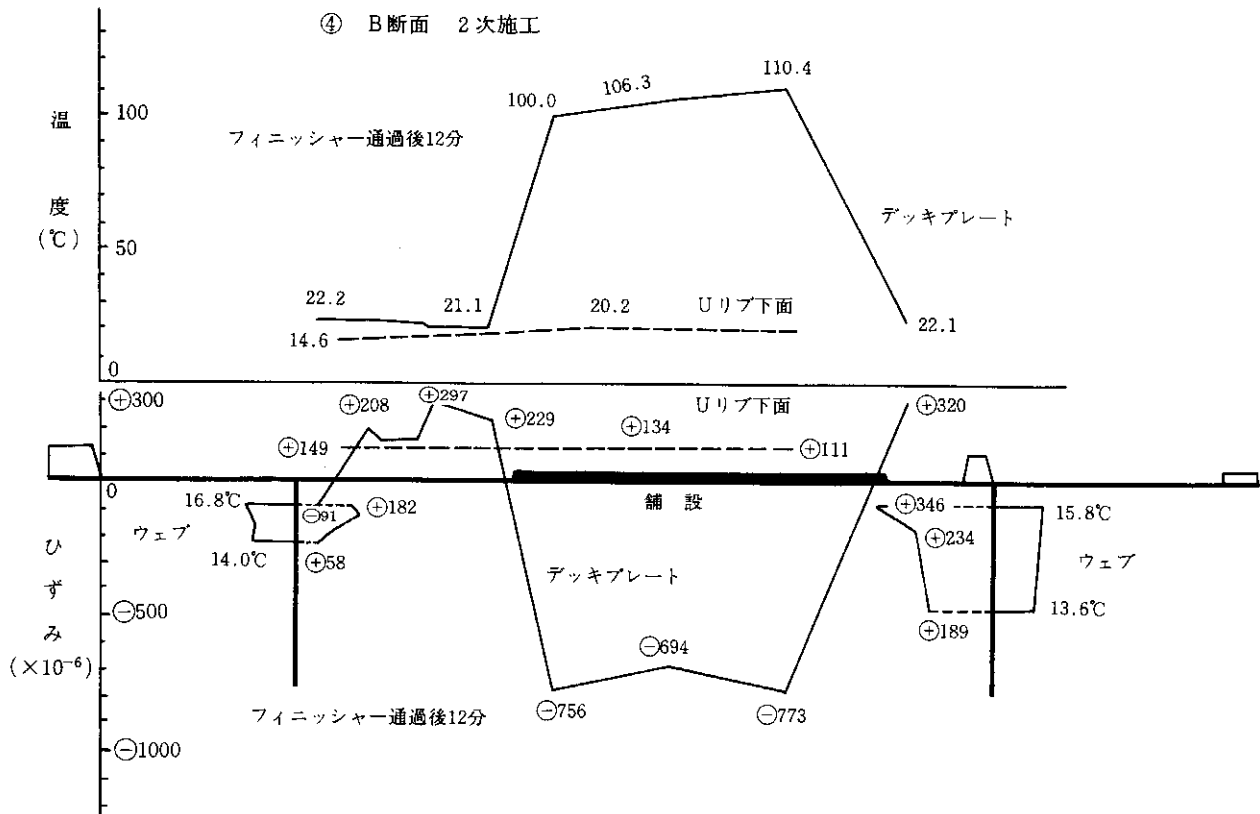
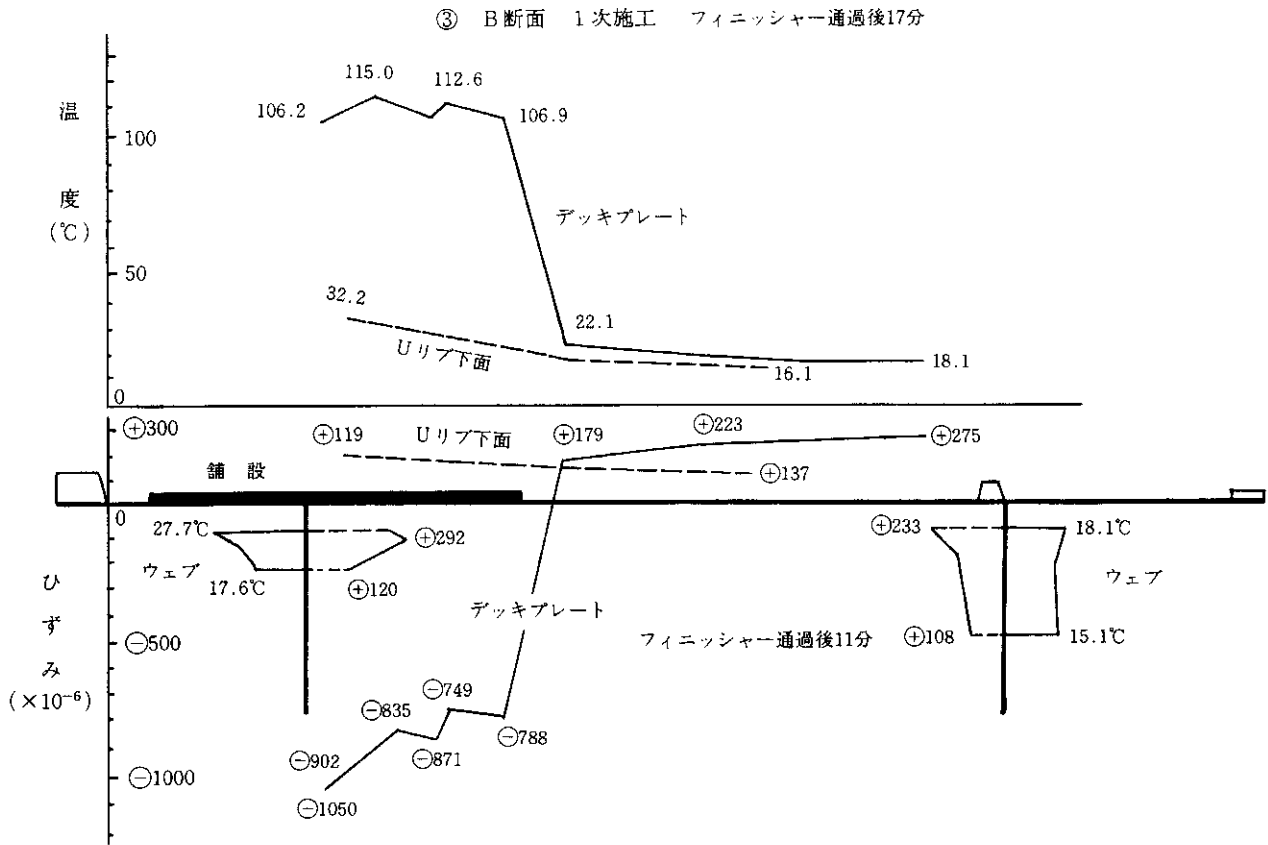


図-8 温度・ひずみの断面内分布(グースアスファルト機械舗設)

②通常用：KFC-5-C1-11

(+10~+100°C, 図-3測定点▲)

ダミー版は本体と同じ材質(SM-41)で、80×40×5mmのものを熱変形を拘束せず、かつ本体とほぼ同じ温度になるように取りつけ、コーティング剤(KE48RTV)で防湿処理を行った。高温ひずみゲージはスポット溶接を行い、通常用は接着剤(CC-15A)で接着した。

計測されたひずみと温度は、スキャナーおよび静ひずみ測定器(UCAM-5BT)を経由してデータ収録器(PCLT)に納め、パソコン(PC-9801)で整理した(図-5)。

### 3. 計測結果

#### 3.1 温度

##### 3.1.1 温度の経時変化

1次施工におけるデッキプレートとウェブの温度経時変化を、図-6に示す。

デッキプレートの温度は、フィニッシャーの通過(アスファルト合材の流込み)とともに急上昇し、10数分後に最高温度に達する。この状態においてデッキプレートとウェブの温度差は最大であり、その値はA断面で約100°C、B断面で95°Cである。

ウェブの温度上昇はやや緩やかであり、最高温になったのはフィニッシャーの通過後、45分~1時間である。デッキプレート、ウェブとも、最高温に達した後は緩やかに温度が下降し、約6時間後にはほとんど常温に戻っている。

図-6で、A断面のデッキプレートが舗設前にも40°C程度に上がっているのは、日照の影響である。

なお、フィニッシャー通過直前に全計測点で温度が下がる現象が見られるが、理由は不明である。

##### 3.1.2 温度の分布

断面内の温度分布を見る(図-8)。デッキプレートは、舗設直下では大体100~120°Cまでの最高温度になるが、舗設幅からわずかに離れたところでは常温のままである。橋軸方向についても、前述のとおりフィニッシャーが通過してはじめて急に温度が上昇しているから、要するに、舗設個所以外のデッキプレートはまったく温度上昇しなかったといってよい。

デッキプレートが最高温度のときのウェブの温度は、G-1上端から20cmの位置(計測点4)では34.6°C(A断面、1次施工)または27.7°C(B断面、同)となり、反対側G-2げたよりも10°C上昇したが、上端から40cmの位置(測定点No.3)ではほとんど常温のままである。

2次施工時は、舗設個所がけたをはずれているので、G-1、G-2とも温度上昇しなかった。右側人力舗設時でも、デッキプレートは108°Cまでになっているが、G-2のウェブ上端(計測点19)では2~3°Cしか温度上昇しなかった(図-10)。そして約30分後、デッキプレートの温度が100°C程度に下がったところ、ウェブの温度は最高になるが、値は50°C程度である(図-6、A(4))。

舗設直下のUリブの下面も、ウェブと同様にデッキプレート最高温度時では、それ以外のUリブ下面よりも10数°C高くなる程度であった。

以上をまとめると、本橋では舗設直後の温度上昇範囲は舗設部デッキプレートに限られ、それ以外の部材は30分ぐらい時間をおいてから、ピークを迎えたのである。

なお、デッキプレートの上面の温度およびデッキプレート厚み内の温度を調べるため、事前に模型実験舗装を行ったが、デッキプレート上面、内部、下面、すべて同じ温度であった。

##### 3.1.3 日照の影響

デッキプレートの日照による温度、合材温度およびデッキプレートの最大温度の関係を、表-3から見る。

表-3 合材温度、外気温、橋体温度

		A 断面		B 断面	
		1次施工	2次施工	1次施工	2次施工
合材温度	クッカー車内	225	226	223	230
	舗設後最大	165	133	138	137
デッキプレート 最大温度(下面)		(A-7)	(A-16)	(B-7)	(B-16)
熱影響部以外の けたの温度		(A-1)	(A-19)	(B-1)	(B-19)
デッキプレートの 日照による温度		(A-12,14, 16,17の平均)	(A-5,7,8, 9,10,11の 平均)	(B-12,14, 16,17の平均)	(B-5,7,8, 9,10,11の 平均)
外 気 温		16	14	14	13
天 候		晴 れ	曇 り	晴 れ	曇 り

(注:( )内は計測点を示す)

4ケースのうち、舗設後合材温度はA断面1次施工で特に高いが、このときデッキプレートは日照で平均38°Cになっている。そしてデッキプレートの最大温度もA断面1次施工時において125°Cと、4ケース中最高である。したがって、デッキプレートが舗装以前に日照で暖められることは舗設後の合材温度を高くし、結果はデッキプレート自体の舗設時温度が高くなることにつながるといえよう。



表-4 デッキプレートの温度(°C)と、ひずみ(圧縮- $\mu$ , 引張り+ $\mu$ )

計測点	舗設前 (朝4:00)		舗設時		舗設後 (翌朝4:00)			
	温度	ひずみ	最高温度	最大ひずみ	温度	ひずみ		
1次 断面	A	5	10	0	112	-793	10	+68
		7	10	0	125	-917	10	+63
		8	10	0	122	-878	10	+186
		9	10	0	116	-770	10	+96
		10	10	0	119	-773	10	+200
	B	5	12	0	107	-1050	12	—
		7	12	0	115	-902	12	+91
		8	12	0	112	-837	12	+52
		9	12	0	107	-871	12	+34
		10	12	0	113	-749	12	+182
		11	12	0	107	-788	12	+102
平均	11	0	115	-847	11	+108		
2次 断面	A	12	11	+18	102	-666	11	+200
		14	11	+34	105	-783	10	+204
		16	12	+78	106	-686	11	+169
	B	12	12	+18	101	-762	12	+158
		14	12	+59	106	-698	12	+154
		16	12	+88	110	-773	12	+159
	平均	12	+49	105	-728	11	+174	
総平均					-807		+130	

(注1) 最高温度と最大ひずみは同時ではなく、若干のタイムラグがある。  
 (注2) 太字は各ケースの最大値である。  
 (注3) 2次施工は1次施工の翌日に行った。  
 (注4) B断面計測点5の舗設後ひずみは不計測。

### 3.2 ひずみ

#### 3.2.1 温度上昇時のひずみ

原因・結果の関係から当然ではあるが、ひずみの時間的变化(図-7)の様子も、温度のそれ(図-6)と同じになった。デッキプレート熱影響部では、温度の上昇に合わせて圧縮ひずみも急増しており、最大圧縮ひずみは、A断面で-917 $\mu$ (計測点7)、B断面で-1050 $\mu$ (計測点5)である(表-4)。これらは、弾性範囲ならば応力で2000 kgf/cm<sup>2</sup>前後に相当する量であるが、ピーク以降は温度よりも早いペースで低下し、温度がもとに戻ったとき、ひずみはもと以上に戻る。すなわち、当初の応力よりも引張側に移行している(絶対値では圧縮域にある)。その理由は、冒頭に述べたとおりである。ウェブはデッキプレートの変形を拘束するものであるから、デッキプレートと正負逆のひずみを生ずる。すなわち、デッキプレート圧縮ひずみがピークのときに、A断面のウェブ上端(測定点4)では+337 $\mu$ 、B断面では+249 $\mu$ の引張ひずみを生じている(図-7)。

ひずみの断面内分布も温度分布を反映して、舗設直下のデッキプレートのみ高い圧縮ひずみが生じ、Uリブおよびその他のデッキプレートには、ウェブ同様に引張ひずみが生じている(図-8)。

#### 3.2.2 舗設後のひずみ

「まえがき」で述べたように、舗設後はデッキプレートに引張ひずみが生じると予測された。機械と人力により、車道部幅9.25mのグース舗設がすべて完了した翌朝4:00のデッキプレート残留引張ひずみは、A断面平均107 $\mu$ 、B断面平均112 $\mu$ であった(表-5)。

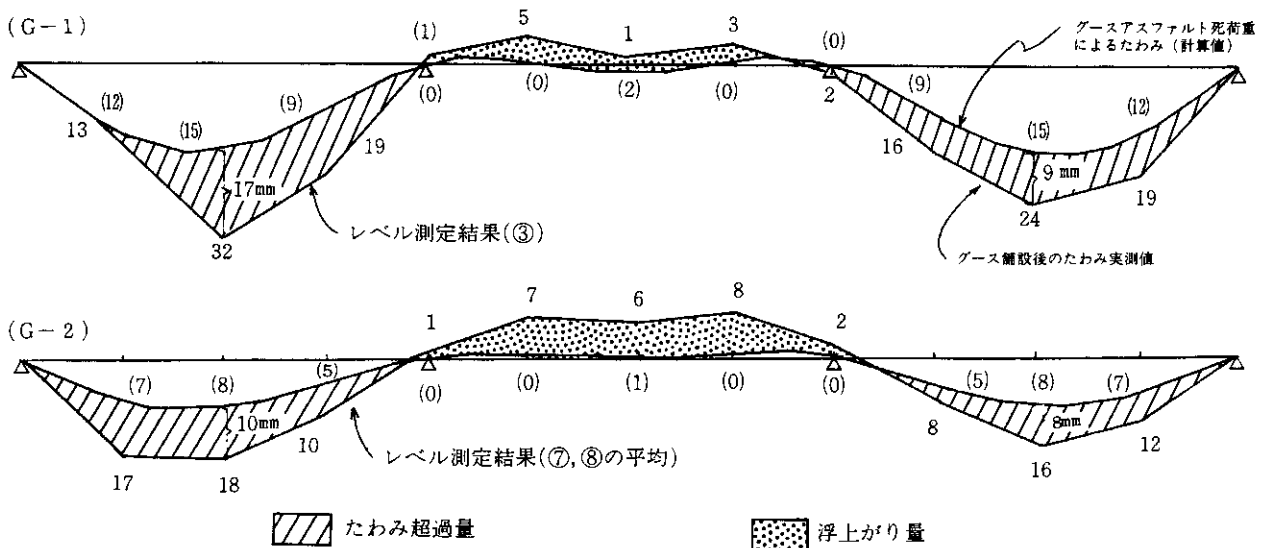


図-9 グースアスファルト全幅完了後のたわみ  
 (( )内はアスファルト死荷重による計算たわみ、他は実測たわみ)

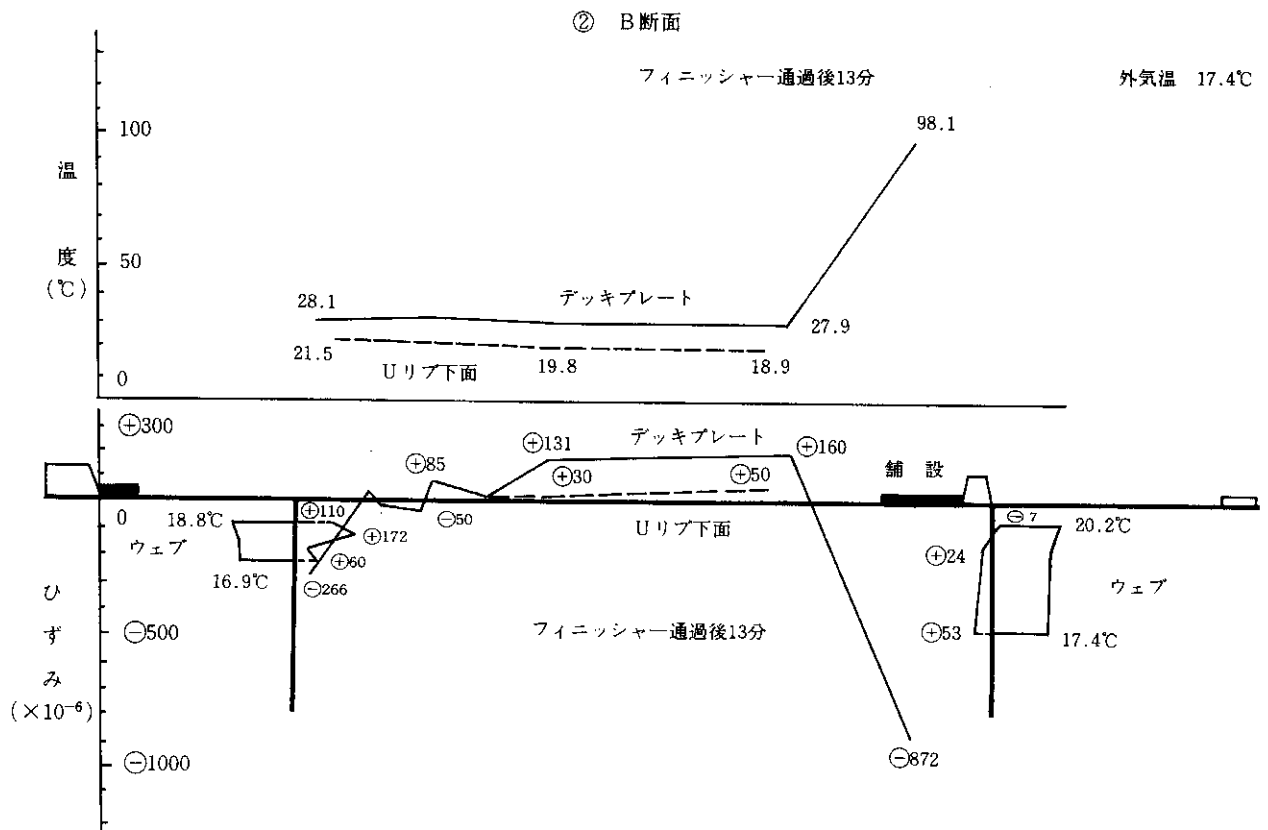
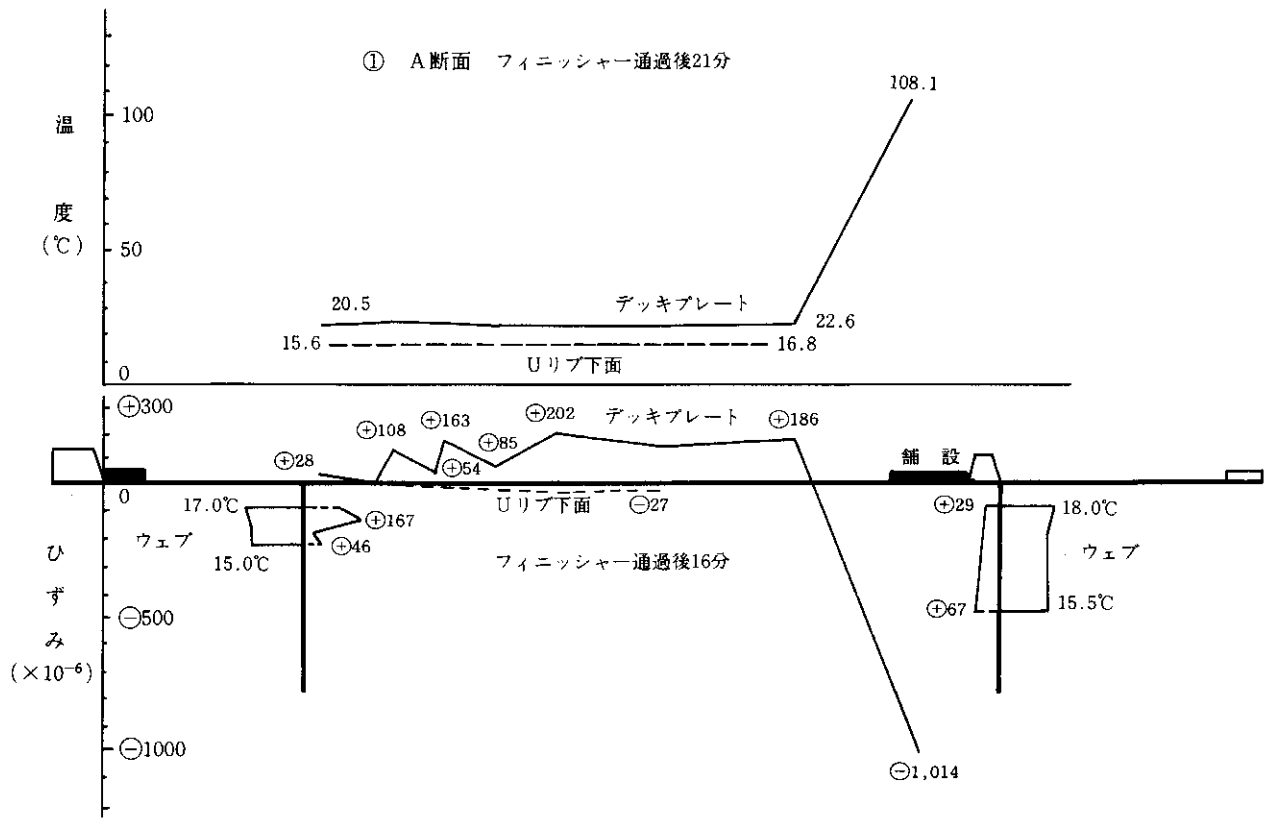


図-10 温度・ひずみの断面内分布(グースアスファルト人力舗設)

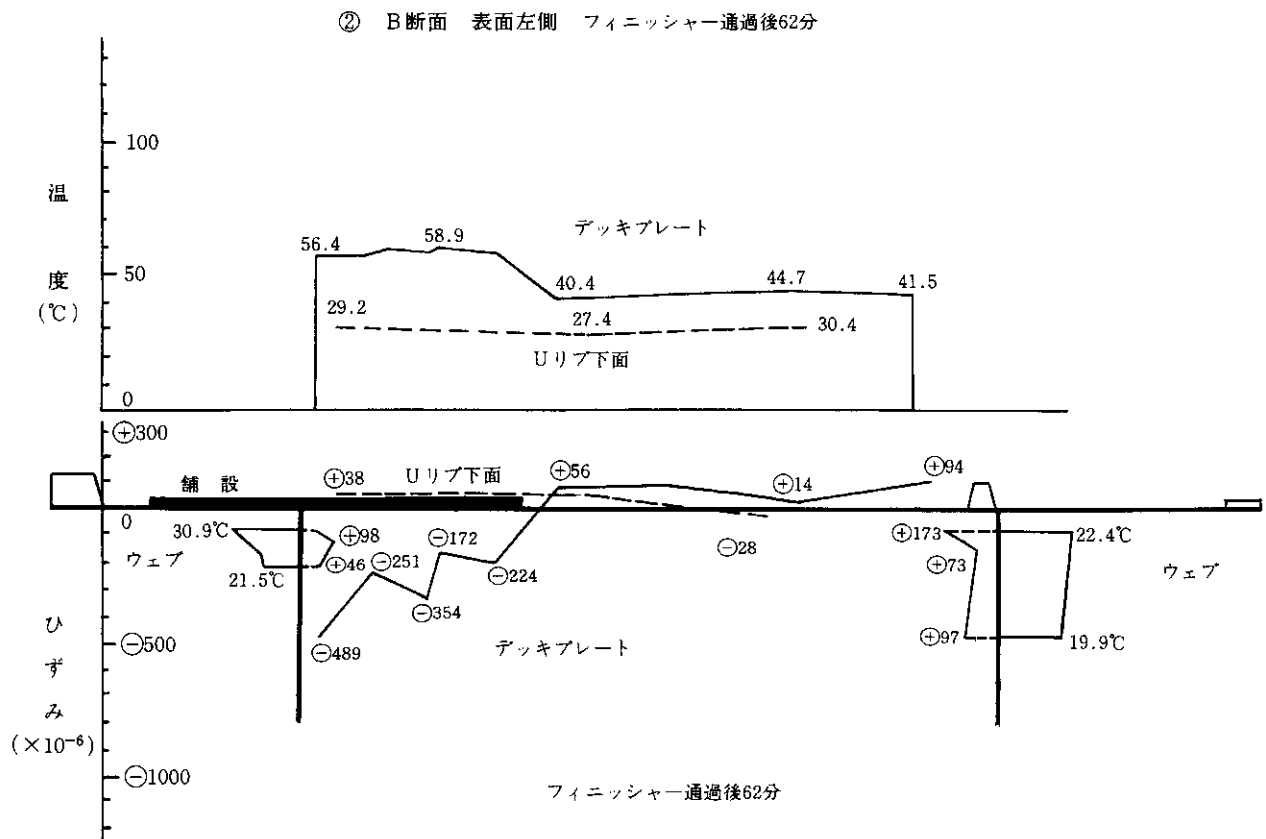
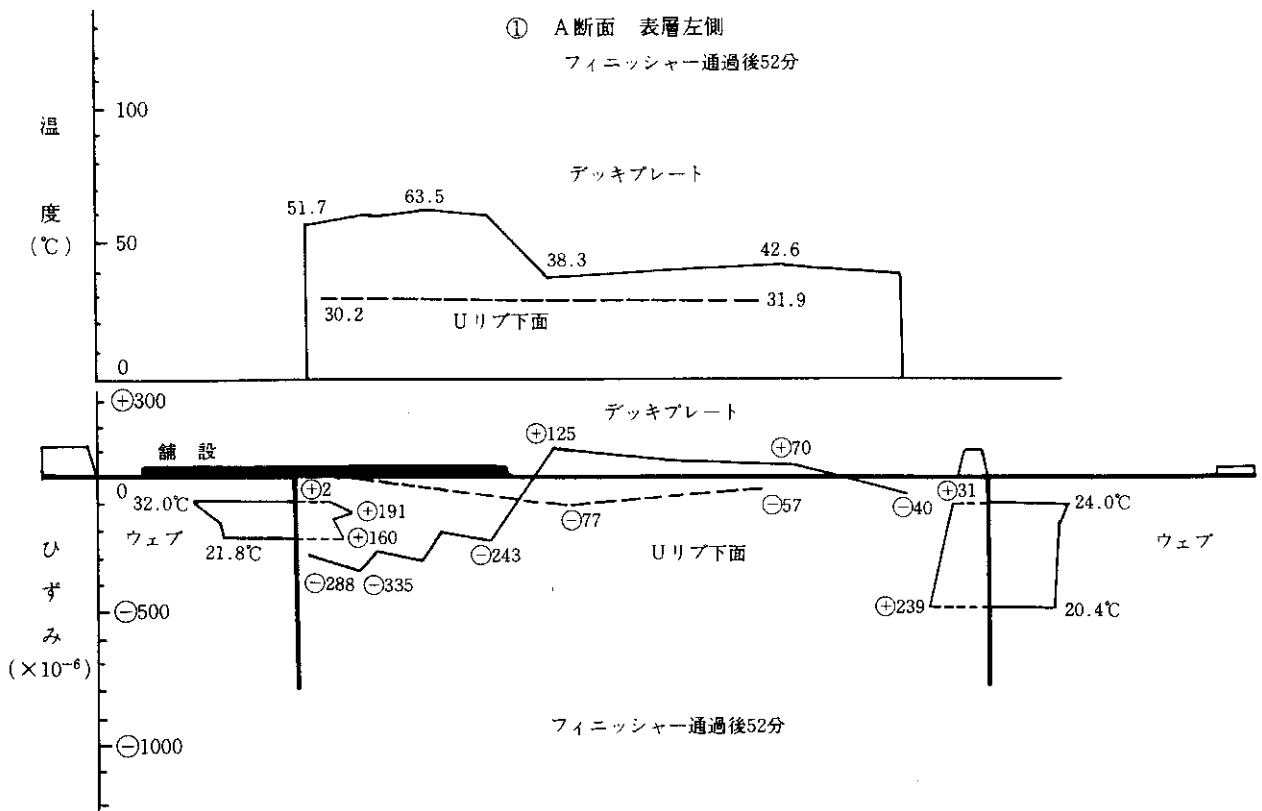


図-11 温度・ひずみの断面内分布(表層機械舗設)

表—5 車道部グースアスファルト全幅完了後のデッキプレート残留  
ひずみ (完了後翌朝4:00)

(単位: 引張り+ $\mu$ )

計測点 No.	5	7	8	9	10	11	12	14	16	17	平均	総平均
A 断面	50	21	101	59	173	82	191	162	160	72	107	110
B 断面	—	60	12	—	140	61	140	130	133	218	112	

(注: —は不計測)

ここでいう「引張りひずみ」は、本橋計測当初の状態をひずみゼロとしての意味であるから、それ以前に死荷重などによる圧縮ひずみがあるので、絶対値ではデッキプレートは圧縮域にある。

舗設後のひずみの分布は各計測点でバラツキがあるが、大まかには、拘束の大きい中央部で大きな引張りひずみが生じている。

### 3.3 たわみ

図-9に、グースアスファルト舗設が車道部全幅完了した翌日午前4:00における両主げた上のレベル計測結果およびグースアスファルト死荷重たわみ(計算値)を示す。

上げたG-1のたわみは、舗装上面のレベル計測値から舗装厚40mm分を差引いて求めた。G-2は、地覆上⑦点と歩道部⑧点(未舗装)の平均値から求めた。これらグース舗設後の上げたのたわみと、グース死荷重たわみとの差が熱応力による残留たわみであり、図-9に斜線などで示す部分である。

G-1では、左スパンで最大17mm、右スパンで最大9mmのたわみ超過が、中央スパンでは逆に最大5mmの浮上がりが生じている。

G-2では、左側で最大10mm、右側で最大8mmのたわみ超過が生じ、中央スパンでの浮上がりは最大8mmであった。

側径間がたわみ超過で、中央径間が浮上がりになるのは、側径間では鋼重分も含めて死荷重応力が大きいために、圧縮塑性域に進入する量がそれだけ大きいことおよび、側径間のけた剛性が高い(中央径間の1.7倍の断面係数をもっている)ことによる。つまり、剛性の高い両サイドが強い力で下方にたわもうとするため、中央で浮上がりが生じたものである。

G-1左サイドスパンで見られた17mmのたわみ超過が、他の3カ所(G-1右、G-2左・右スパン)と比較して突出しているが、理由は不明である。他の3カ所では、最大たわみ超過量が9mm、8mm、10mmと整合しているので、本橋の場合、最大たわみ超過量は平均9mmと見てよいと考える。

### 3.4 グース人力舗設および表層舗設時の温度・ひずみ

機械舗設後に、車道部の残る両サイドを人力作業で舗設した。このうち、G-2上の幅0.85mの人力舗装について温度・ひずみを計測した(図-10)。

人力舗設において、舗設直下のデッキプレート温度とウェブとの温度差は、A断面で92.6°C(=108.1-15.5)、B断面で80.7°C(=98.1-17.4)であるから、幅4mの機械舗設の場合よりもやや小さい。舗設幅が狭く、合材の量が少ないため、打設後の合材温度が機械舗設時よりも低くなったのではないと思われる。

しかし、舗設幅が狭いことは変形拘束が大きくなることにつながるため、温度差が若干小さいわりに、最大圧縮ひずみは1014 $\mu$ (A断面)、872 $\mu$ (B断面)となり、機械舗設時と変わらない。

表層は通常のアスコンである。この舗設時のデッキプレート最大温度は各計測点平均50°C程度であり、最大圧縮ひずみは平均300 $\mu$ 程度であった(図-11)。

## 4. 数値解析および考察

### 4.1 考え方

本章の目的は、デッキプレート温度上昇個所の圧縮塑性域進入量と、それに続いて生じる残留引張りひずみを知ることにある。その意味からは、[応力度]ではなく、すべて[ひずみ]で考えるべきであるが、同じことなので、なじんでいる[応力度]で考え、計算する。

計算法は、道路橋設計便覧(日本道路協会)の温度差応力算定式に準じた弾性計算とする。温度上昇部が圧縮塑性すると、その時点で完全拘束状態となるので、厳密には弾塑性計算をすべきであるが、塑性域進入の程度がさほど大きくないので、すべて弾性計算としても誤差は小さいと考えた。

デッキプレートのみがT°C温度上昇した場合について、当該温度上昇部の応力を求める。

まず、図-12のようにいったんデッキプレートとウェブとを境界で切断した上で、温度上昇による膨張長さを軸力Pで圧縮し、その後に再度結合したと考える。この状態で軸力Pを解放すると、けたに対して引張力が加わることになる。力Pはけたの中立軸において、PとMに置換えられる。Pは温度上昇部に対しては内力として、

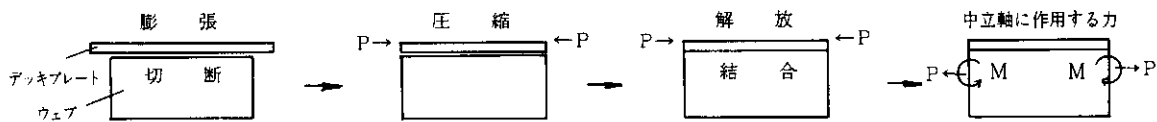


図-12 熱応力計算の考え方

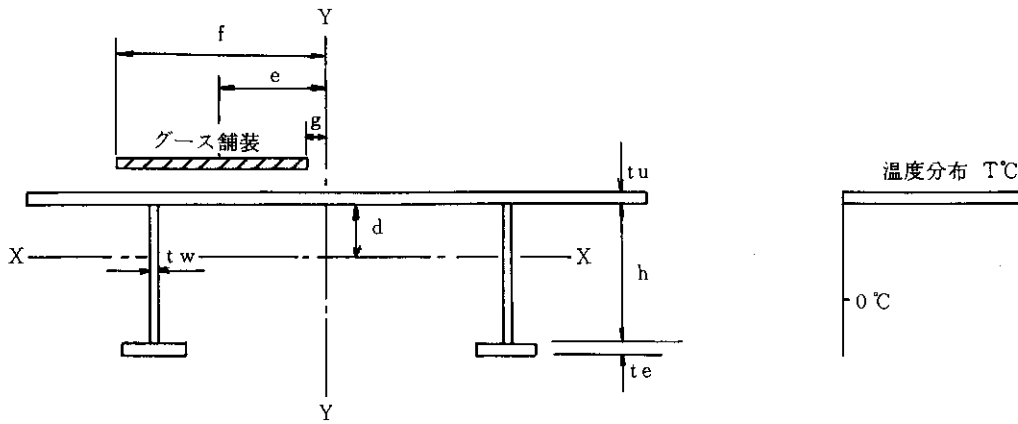


図-13 計算式の各定数

それ以外の部分に対しては外力として作用するものであり、次のように表わされる。

$$\sigma_T = \epsilon E = \alpha T E \text{ より } P = E \alpha T \cdot A_U$$

( $\sigma_T$ : 熱応力,  $\epsilon$ : 熱ひずみ,  $E$ : 弾性係数,  $\alpha$ : 線膨張係数,  $T$ : 上昇温度,  $A_U$ : 熱影響部の床版断面積,  $P$ : 熱膨張しようとする力)

温度上昇部のデッキプレートの応力度は、次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \sigma_T = & -E\alpha T + \frac{P}{A} + \frac{P}{I_x} \left( d + \frac{t_u}{2} \right) d \\ & + \frac{P}{I_y} (g-f) e - \frac{M_x}{I_x} d \\ & - \frac{M_y}{I_y} (g-f) \end{aligned}$$

(不静定モーメントによる X 軸まわりの曲げ)

(不静定モーメントによる Y 軸まわりの曲げ)

(A: 橋体の全断面積,  $I_x$  ( $I_y$ ): X 軸 (Y 軸) まわりの断面 2 次モーメント,  $t_u$ : デッキプレートの厚さ)

式は完全拘束時の熱応力 ( $-E\alpha T$ ) が、軸方向変形と X 軸まわりおよび Y 軸まわりの曲げ変形で緩和されることを表わしている。不静定モーメントによる曲げ応力は、橋梁の不静定構造によるけたの変形拘束によって、上記

の応力緩和が減じられることを意味する。

#### 4.2 計算条件

上式により、札幌大橋のグースアスファルト舗設時熱応力について、表-6 に示す 6 ケースの計算を行う。断面内温度分布は、1 次施工 (下流側) での実橋計測結果に準じて、舗設直下デッキプレート A 断面 120°C, B 断面 115°C, 舗設箇所外デッキプレート A 断面 40°C (日照の影響), B 断面 20°C, ウェブ・下フランジ・U リブ 20°C とし、ウェブなどを 0°C とした温度差を計算条件とする (表-7)。計測結果ではウェブ上端, U リブでも若干の温度上昇があったが、計算への影響が小さいとみられるので考慮しない。

橋軸方向の温度分布は、A 断面におけるデッキプレートの経時温度変化曲線に基づいて、表-7 の計算条件のように設定する。鋼材の線膨張率は、実測結果により  $11.7 \times 10^{-6}$  とする。

#### 4.3 計算結果と実測値の比較

6 ケースの計算のうち、実際施工と対比しうるのはケース 1 とケース 1' である。

表-6 熱応力計算ケース

計算条件	計算対象断面(図-2参照)	
	A 断面	B 断面
下流側のみ舗設	ケース 1	ケース 1'
上流側のみ舗設	ケース 2	ケース 2'
上・下流側同時舗設	ケース 3	ケース 3'

表-7 熱応力計算一覧

計算条件		A 断面			B 断面		
		ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 1	ケース 2'	ケース 3
温度差	橋軸方向						
	断面内						
熱応力	①完全拘束熱応力 $\sigma$ ( $-\alpha ET$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )						
	②軸方向変形による 応力緩和 ( $P/A$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )						
	③曲げ変形による応力緩和(X軸) ( $M_x/I_x \cdot y_x$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )						
	④曲げ変形による応力緩和(Y軸) ( $M_y/I_y \cdot y_y$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )						
$\sigma_T$	不静定モーメントによる応力緩和の低減						
	軸						
ケース舗装および舗設車両による応力 $\sigma_{A+L}$ (kg/cm <sup>2</sup> )							
小計 (熱応力 + 舗装・舗設車 $\sigma_T + \sigma_{A+L}$ )							
鋼重による応力 $\sigma_D$							
舗設時応力 ( $\sigma_T + \sigma_{A+L} + \sigma_D$ )							

〔熱応力  $\sigma_T$ 〕+ 〔舗装・舗設車応力  $\sigma_{A+L}$ 〕をみると、ケース1で1734~1908 kgf/cm<sup>2</sup> (826~909  $\mu$ 相当)、ケース1'で1755~1932 kgf/cm<sup>2</sup> (836~920  $\mu$ 相当)である。計測結果では、A断面のデッキプレート最大ひずみが770~917  $\mu$ 、B断面が749~1050  $\mu$ であるから(図-14)、実測と計算はよく一致している。上記計算法を、本件に適用することの妥当性が示されたと考える。

#### 4.4 完全拘束熱応力の緩和量

次に、舗設個所による熱応力の違いを比較してみると、

けた断面の中央に位置する上流側舗設(ケース2, 2')では、温度上昇部に対するY軸まわりの(平面的な)変形拘束が強いので、 $[\sigma_T + \sigma_{A+L}]$ は下流側舗設(ケース1, 1')の場合よりも平均100 kgf/cm<sup>2</sup>高い熱応力となる(表-7)。完全拘束熱応力のダウン率も、77~82%にとどまっている(表-8)。

一方、上下流側同時舗設を想定したケース3(3')は、けた断面積に占める温度上昇部の割合が高いので、熱応力は3者の中で最小であり、完全拘束熱応力は60~63%

に低減される。

B断面の完全拘束熱応力のダウン率  $\sigma_T/\sigma_0$  が A断面よりも高いところとどまっているのは、B断面では、けたの剛性が高い（下フランジ断面積が大きい）ので、デッキプレートに対する拘束が大きいからである。拘束緩和の内訳をみると、ケース1（A断面）では軸方向変形分（表-7、②）が527 kgf/cm<sup>2</sup>、不静定力を差引いた X

軸曲げ変形分（③-⑤）が40 kgf/cm<sup>2</sup>、Y軸曲げ変形分（④-⑥）が227~53 kgf/cm<sup>2</sup>である。ケース1'（B断面）では軸方向変形分が287 kgf/cm<sup>2</sup>、不静定力を差引いた X軸曲げ変形分が127 kgf/cm<sup>2</sup>、Y軸曲げ変形分が228~51 kgf/cm<sup>2</sup>である。

A断面の軸方向変形による熱応力緩和量がB断面の約2倍となったのは、前述のように、A断面では下フランジ断面積が小さく、したがって変形拘束が小さいことと、A断面ではデッキプレート全体が日照で20°Cの温度差を持っていることによる。

しかし、この20°Cの温度差は、A断面の X軸曲げ変形による熱応力緩和量を40 kgf/cm<sup>2</sup>と、小さいものにもいるので、功罪相半ばしている。

以上の計算から、熱応力を低く抑えるには、けた全体の中に占める温度上昇部の面積を大きくとる、すなわち、1回の舗設幅を広くとればよいことがわかる。

#### 4.5 たわみ超過量の計算および製作架設応力の逆算

舗設時応力 ( $\sigma_T + \sigma_{A.L} + \sigma_D$ ) はケース1（A断面）で1876~2050 kgf/cm<sup>2</sup>、ケース1'（B断面）で2071~2248 kgf/cm<sup>2</sup>となるが（表-7）、実橋における応力度も測定結果からみて実際にこの程度のもと考えられる。

一方、残留ひずみが実橋において平均130  $\mu$ （273 kgf/cm<sup>2</sup>相当）発生しており（表-4）、計算キャンバーを越えるたわみの最大値はA・B断面平均9 mmである（図-9）。したがって冒頭で述べたような、[熱応力による塑性域進入] → [残留引張ひずみ] → [残留たわみ] という図式の進行したことが考えられる。

ここで、実橋に見られた9 mmの残留たわみを発生させるための、当初内力としての残留引張応力を計算する。

熱応力および製作架設応力の分布がデッキプレート全

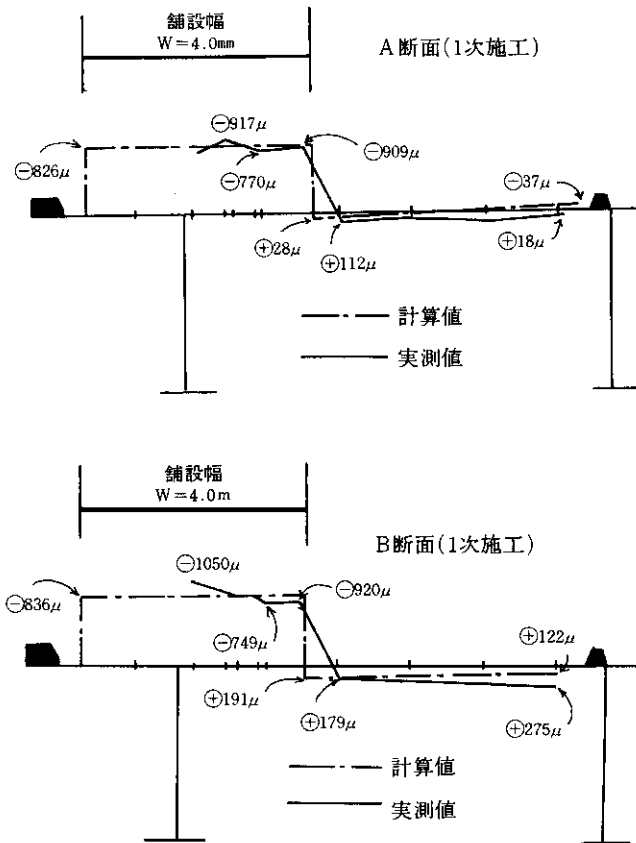


図-14 実測ひずみと計算値の比数

表-8 各計算ケースにおける完全拘束熱応力のダウン率  $\left( \frac{\text{熱応力 } \sigma_T}{\text{完全拘束熱応力 } \sigma_0} \right)$

	A 断面			B 断面		
	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 1'	ケース 2'	ケース 3'
$\sigma_0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	2,457			2,334		
$\sigma_T$ (kg/cm <sup>2</sup> )	1,663 1,837 $\sigma_T=1,750$	1,903 1,861 1,882	1,349 1,622 1,485	1,692 1,869 1,780	1,933 1,888 1,911	1,330 1,590 1,460
$\frac{\sigma_T}{\sigma_0} \times 100(\%)$	71	77	60	76	82	63

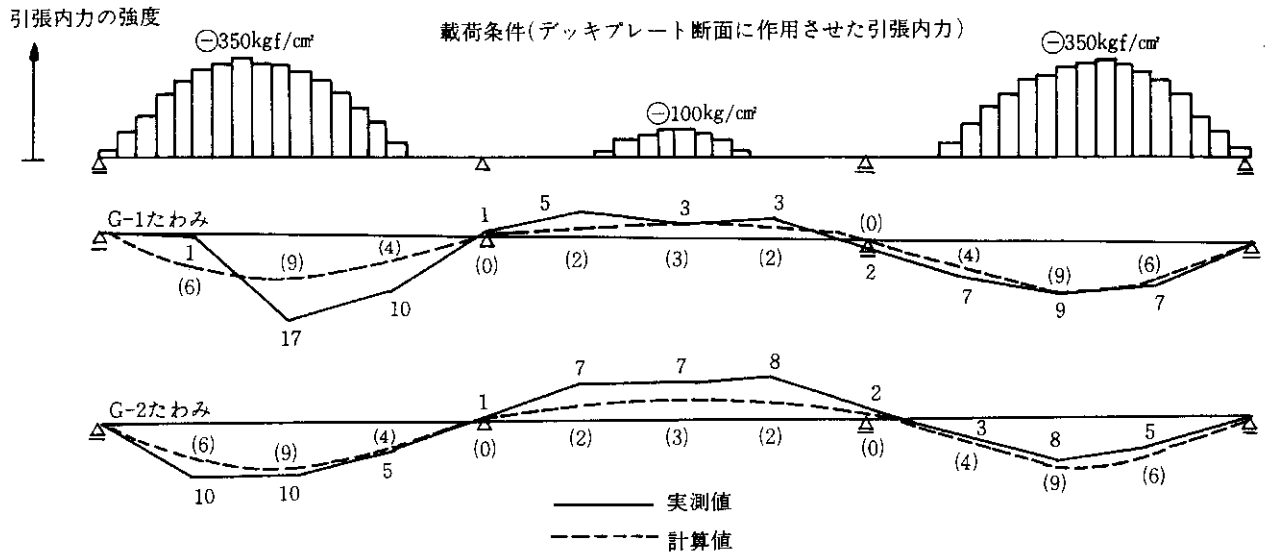


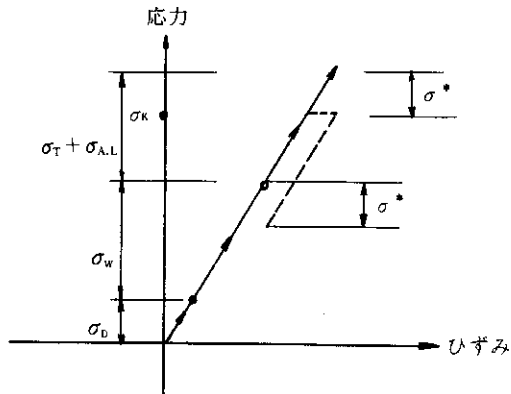
図-15 たわみ超過量の実測値と計算値の比較 (単位: mm ( ) 内は計算値)

域で均一と仮定すると、塑性域進入量の差は残る死荷重の差と同じである。よって、引張応力の分布のさせかたは死荷重応力分布を考慮して行うこととした。

2, 3回のトライアル計算の結果、図-15に示す引張応力を内力として作用させたときに、実橋と同程度のたわみが算定された。

要するに、サイドスパン中央に9 mmのたわみが生じたことから、A断面で100 kgf/cm<sup>2</sup>、B断面で350 kgf/cm<sup>2</sup>の引張内力が作用しているのではないかといえるわけである。

死荷重応力、熱応力以外にデッキプレートに働く応力としては、Uリブ溶接および現場溶接による残留応力や架設時の応力が考えられる。これをここでは、「製作架設応力  $\sigma_w$ 」と呼ぶことにする。



〔実際には点線の経路をたどって引張内力が発生する〕

図-16 各応力の関係

以上の各応力の関係は、次式または図-16のように表わされる。

$$\begin{aligned} \text{引張内力 } \sigma^* = & \text{降伏応力 } \sigma_k - [\text{鋼重応力 } \sigma_D + \text{熱応力 } \\ & \sigma_T + \text{グース舗装・舗設車面による応力 } \\ & \sigma_{AL}] - \text{製作架設応力 } \sigma_w \end{aligned}$$

鋼材の降伏点は、ミルシートから29 kgf/mm<sup>2</sup>である。上式のうち、製作架設応力の値だけが未知であり、これを逆算するとA断面(ケース1)については、

$$\begin{aligned} \sigma_w &= \sigma_k - [\sigma_D + \sigma_T + \sigma_{AL}] - \sigma^* \\ &= 2900 - [(1876 + 2050)/2] - (-100) \\ &= 1037 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

(注1:  $[\sigma_D + \sigma_T + \sigma_{AL}]$ は表-7の値を平均した)

(注2: 符号は圧縮を+としている)

同様にB断面(ケース1')について、

$$\begin{aligned} \sigma_w &= 2900 - [(2071 + 2248)/2] - (-350) \\ &= 1091 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

と算出される。

前記計算の製作架設応力はデッキプレート断面に一樣に生じたものとしての計算値であるが、現実には複雑な分布になっているものと思われる。

しかしいずれにせよ、本橋における残留応力および残留たわみの値は、橋の耐荷力と機能に支障となるものではない。



## 5. ま と め

### 5.1 現地計測結果から

- ① グースアスファルト合材の温度はクッカー車内で223~230°C, 舗設後は133~165°C, デッキプレート  
の最高温度は123~106°Cであった。日照によるデ  
ッキプレート温度の上昇は舗設後の合材温度を高くし,  
デッキプレート自身の舗設時温度を上げるという傾  
向がある。
- ② デッキプレートの温度は, フィニッシャー通過10  
数分後にピークに達し, 数時間後にはほとんど常温  
に戻る。
- ③ 舗設直下のデッキプレートの最大熱圧縮ひずみは  
各測点平均807 $\mu$ であるが, 温度の低下とともに減少  
する。
- ④ デッキプレート最高温度時の舗設熱の分布範囲は,  
平面的にも深度方向にも小さく, 50°C以上の高温に  
なるのは舗設直下のデッキプレートのみであった。  
Uリブの温度もウェブ上端部同様に, 30°C前後にと  
どまった。
- ⑤ 舗設後のデッキプレート残留引張ひずみは各測点  
平均110 $\mu$ であり, 橋の耐荷力に支障のない量である。
- ⑥ 舗設後のたわみ超過量 (設計キャンバー以上のけ  
た沈下量) は最大9 mm, 支間の1/8033であり, 橋  
の機能に影響がないものである。

### 5.2 数値計算結果から

- ① 慣用計算による舗設時熱応力は, 実橋計測値とよ  
く一致している。
- ② 計算による完全拘束熱応力のダウン率  $\sigma_T/\sigma_0$  は,  
2車線同時舗設 (舗設幅8.0 m) において60%にまで  
下がるが, 最も拘束の強いB断面中央部舗設 (舗設  
幅4.0 m) では82%にとどまる。
- ③ 観測された残留たわみを生じさせるためには, サ  
イドスパン中央部のデッキプレートに平均350 kgf/  
cm<sup>2</sup>の引張力が内力として働いていると計算される (し  
たがって, 実際に生じる応力度は350 kgf/cm<sup>2</sup>以下と  
なる)。
- ④ 上記引張応力分が, 舗設時の圧縮塑性域進入量と  
なる。デッキプレートが, この量まで圧縮領域に達  
するための「製作架設による圧縮応力」を試算して  
みると, 1000 kgf/cm<sup>2</sup>強であった。ただし, この試  
算は鋼材の降伏点を2900 kgf/cm<sup>2</sup>, 弾性係数を温度  
に関係なく  $2.1 \times 10^6$  kgf/cm<sup>2</sup>とした場合のものであ  
る。

今回の計測および計算結果からは, デッキプレートの  
グースアスファルト舗設時熱応力を低減する方策の1つ

として, 1回あたりの舗設幅を広くとることがい  
える。

上記④の「製作架設による圧縮応力」というものは,  
従来あまりいわれなかったものである。本報告でこうい  
う応力を算出するにいたった経緯と, それに関する問題  
点を以下にまとめる。

現地計測の結果, デッキプレートに100 $\mu$ 程度の引張ひ  
ずみが生じたこと, サイドスパン中央に9 mm前後のた  
わみ超過が見られたこと, それらの関係が数値計算から  
も妥当とされたことから, 鋼材は一時的に圧縮降伏域に  
入ったものと推定される。

デッキプレートにかかる圧縮応力としては, 死荷重応  
力, クッカー車応力, そして熱応力があるが, これらの  
合計では降伏応力に達しない。ここで, これ以外の応力  
として考えられるものに「製作架設による圧縮応力」が  
あるわけである。しかし, その応力の実際の分布, 発生  
機構などは今のところ推測の域をでないので, 今後は工  
場製作時からのひずみ追跡作業が必要となる。また, 以  
上のほかの要因の存在についても, 考察を続ける必要も  
ある。

### あ と が き

グースアスファルト舗設時には, 一時的にデッキプレ  
ートに大きな圧縮応力が働くが, すぐに低下するもので  
あり, 橋の耐荷力や機能に支障となるものではない。し  
かし若干の残留たわみは発生するので, 熱応力を事前に  
計算して, 残留たわみ分をあらかじめキャンバーの中に  
含めておくのも一方法である。

その計算について今回は慣用的な方法で行ったが, 計  
算値と実測値はかなりよく一致している。今後, 各種の  
橋梁に対する適用性を検証する必要があるが, 実用的に  
はこの手法で計算して十分ではないかと思われる。しか  
し, 舗設時の圧縮塑性域進入量を計算するためには製作  
架設応力を把握しなければならないので, この面の正確  
なデータの収集が必要となってくる。

今後, 他の橋においてさらに試験調査を行うとともに,  
有限要素法を用いるなどして現象の定量的な把握に努  
めたい。

最後に, 札幌大橋の計測を実施した札幌開発建設部札  
幌新道建設事務所の各位に対し, 謝意を表する。

### 参 考 文 献

- 1) 日本道路協会; 鋼道路橋設計便覧, 昭和55年 8月
- 2) 桜木忠勝, 長尾 厚; グースアスファルト舗装の舗  
設温度による鋼床版への影響—東関東自動車道・利

根川橋一，日本道路公団技術情報第92号，1988年4月

- 3) 本荘清司，彦坂 熙，村山隆之；鋼床版連続箱桁橋の熱応力について，土木学会第36回年次学術講演会

講演概要集，第1部，昭和56年10月

- 4) 寺田博昌，明石重雄，益子和雄；I断面突合わせ溶接時の変形挙動，土木学会第33回年次学術講演会講演概要集，第1部，昭和53年9月

\*

\*

\*