

長支間 PC 床版 2 主桁橋の床版-鋼桁接合部の経時挙動計測

Time-dependent stress behavior of girder-slab connecting part of two I-girder bridges with long span PC slabs

済藤英明*, 大垣賀津雄**, 山本晃久***, 猪本真****

Hideaki SAITO, Kazuo OHGAKI, Akihisa YAMAMOTO, Makoto INOMOTO

*川崎重工業㈱ 関東技術研究所 構造システム研究部 (〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚 118 番地)

**工修 川崎重工業㈱ 関東技術研究所 構造システム研究部 (〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚 118 番地)

***工修 川崎重工業㈱ 鉄構・機器事業部 橋梁・水門総括部 橋梁開発部 (〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚 118 番地)

****川崎重工業㈱ 鉄構・機器事業部 橋梁・水門総括部 橋梁開発部 (〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚 118 番地)

This paper presents time-dependent behavior of girder-slab connecting part of two I-girder bridges with long-span prestressed concrete slab. Recently construction plans of prestressed concrete slab, whose span is over 10 meters, have been going on in Japan, too. However we haven't yet resolved some problems, which have occurred with the long-span slab. Therefore the time-dependent measurement using full-scale models is carried out, and the strain of the headed studs, the stress of the vertical stiffener, the different temperature between the slab and the girder and so on are investigated.

Key Word: long span PC slab, connecting part, different temperature, shear connector(headed stud)

キーワード: 広幅員 PC 床版, 接合部, 温度差, ずれどめ (頭付きスタッド)

1. はじめに

近年, 建設費の縮減が求められる中, 鋼橋建設においては合理化・省力化の検討が進められており, 経済性, 耐久性および維持管理の容易さなどの観点から, 有力な構造形式の一つとして, 欧州諸国で多く見られるような広幅員の PC 床版を有する少数主桁橋が注目を集め, 関係各所で設計・施工が見受けられるようになってきた¹⁾.

このような少数主桁橋では床版支間が大きくなるため橋軸直角方向曲げモーメントによるずれ止めへの作用力が無視できなくなる。すなわち, この床版の曲げモーメントは, 横桁位置の主桁上フランジが垂直補剛材により局所的に拘束されるために, ずれ止めに従来の多主桁橋では見られなかった曲げ引抜き力を作用させることになる。一方, この種の橋梁の構造形式で対傾構, 横構を省略する場合, 風荷重や地震荷重などの橋軸直角方向力に対しては, 床版が主要部材となり力の伝達に寄与することを期待するため, 床版と鋼桁をずれ止めにより十分結合させておかなければならない。このことから, 鋼桁-床版接合部は非常に重要な部位であると考えられるので, 筆者らはこの接合部の曲げ引抜きに着目した実験研究を行っている²⁾.

ところで, 海外においては床版支間 10m 程度の広幅員

PC 床版 2 主桁橋が数橋施工されている³⁾。わが国では, これまで床版支間 6m 程度までのものがほとんどであったが, 近年, 床版支間 10m を超える広幅員 PC 床版の施工計画が進められている状況にあり⁴⁾, 床版の長支間化にともなう種々の課題を検討しておく必要がある。

このような状況の中, 床版の長支間化にともなう構造上の問題点を抽出・解決するために, 床版支間 10m の実物大供試体を製作し, 鋼桁とコンクリートの温度差や供試体各部位のひずみについて経時計測を行った⁵⁾。

本研究は, 長支間 PC 床版を有する 2 主桁橋の設計法確立に資するために, コンクリート打設時からの経時計測によって得られた約半年間のデータから, 供用開始前の各種荷重によるずれ止め(頭付きスタッド)や垂直補剛材の応力状態, コンクリートのクリープ, 乾燥収縮による同部位の長期挙動や応力状態を把握することを目的としており, 本文は計測されたデータの特徴とそれに対する考察について報告するものである。

2. 計測概要

2. 1 供試体

経時計測対象とした供試体は, 種々の制約条件を考慮して, 図-1 に示すように, 床版支間 10m, 幅員 14.4m

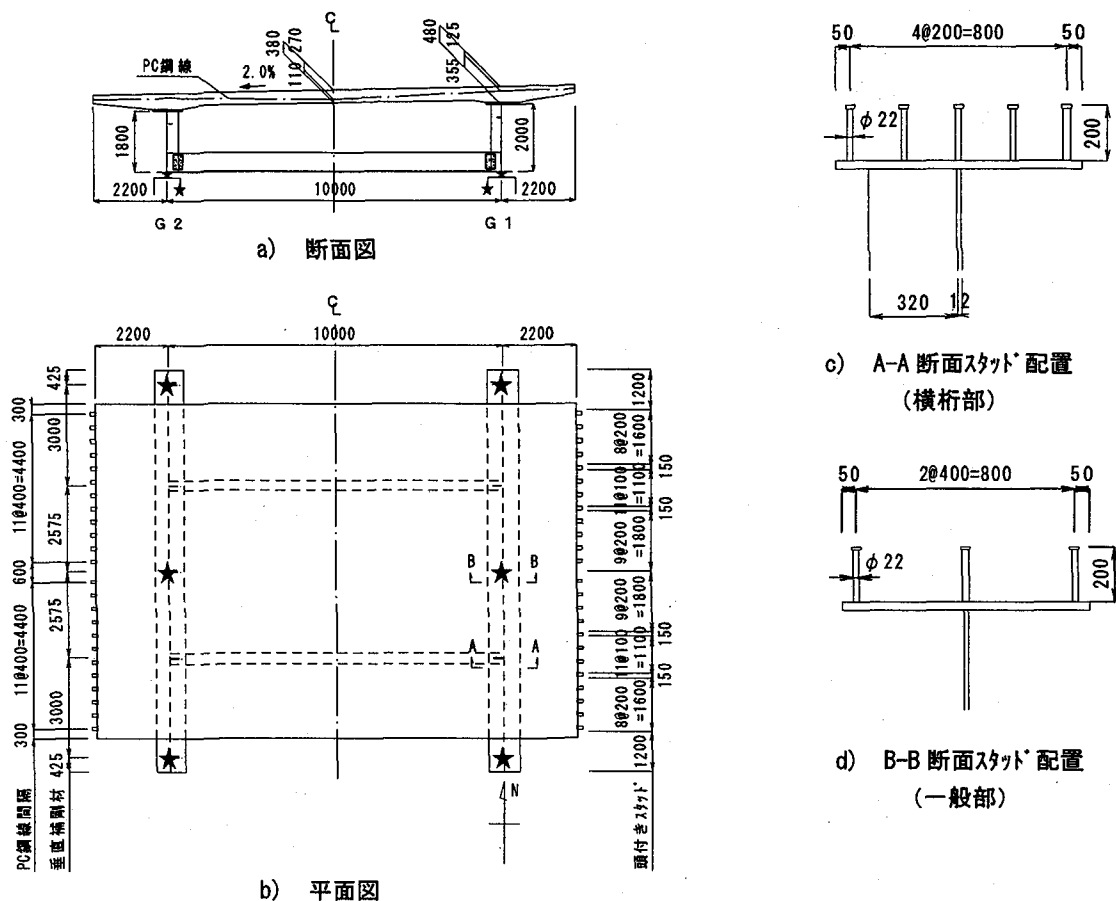


図-1 供試体一般図

表-1 供試体鋼桁断面諸元

上フランジ (mm) 幅×板厚	下フランジ (mm) 幅×板厚	腹板 (mm) 高さ×板厚	横桁間隔 (m)
900×32	650×12	G1: 2000×12 G2: 1800×12	5.15

※主桁の橋軸方向長さは12mである。

の橋軸直角方向断面に2%の横断勾配を持つ長支間PC床版を有する2主桁橋であり、床版の橋軸方向施工長さは10mとしている。床版厚は一般部で38cm、ハンチ部で48cmである。横締め用のPC鋼線は、プレグラウトタイプのシングルストランド19本より線28.6φを使用し、床版支間中央部で下側に8cm、主桁上断面で上側に11.5cm偏心させ400mm間隔で配置した。また橋軸方向には配力鉄筋としてD22を125mm間隔で、橋軸直角方向には補強鉄筋としてD13を100mm間隔で配置した。鋼桁断面諸元を表-1に示す。ずれ止めには頭付きスタッドを用い、同図c)、d)に示すように、横桁近傍では橋軸直角方向に5本、横桁から離れた一般部では3本配置とした。

床版と鋼桁の接合部である上フランジ上面は、工場製作後の酸化皮膜(黒皮)状態とした。また供試体は、同図

b)中に示す★印の位置に支持架台を設け、鋼桁が南北の方向を向くように設置した。

2. 2 計測方法

計測はパーソナルコンピュータを用いた自動計測とした。コンクリート打設からPC鋼線緊張作業前までは1時間ごとの、PC緊張後からは2時間のインターバル計測とし、平成11年2月から約半年間の経時計測を実施した。また自動インターバル計測の他に、PC鋼線緊張時および壁高欄荷重載荷時には、それぞれの荷重作用前後の供試体の挙動を確認するために計測を行っている。

2. 3 計測項目

以下の項目について経時計測を行った。

- ① 鋼桁および床版内部の温度
- ② 頭付きスタッドの軸方向ひずみ
- ③ 垂直補剛材のひずみ

3. 計測結果

3. 1 床版と鋼桁の温度差

鋼桁、床版内部の温度および両者の温度差の経時変化を図-2に示す。床版温度は、床版支間中央断面の上下

表面から約 50mm の深さで 2 点、鋼桁温度は 2 本の主桁腹板の桁高中心位置で表裏 2 枚、合計 4 点で計測した。それぞれの温度はこれらの計測値の平均値としている。同図より、鋼桁と床版の温度差は大きくても約±6℃程度であることがわかる。この値は、現行の道路橋示方書⁶⁾に(以下、道示と呼ぶ)Ⅱ9.2.7 規定されている合成桁の設計荷重として見込む鋼桁と床版の温度差±10℃という値よりやや小さいものである。

3. 2 頭付きスタッドの挙動

(1) プレストレスおよび死荷重による影響

プレストレス、床版自重および壁高欄荷重により頭付きスタッドに発生する軸方向応力および曲げ応力を計測した。計測対象とした頭付きスタッドは、図-1に示した横桁位置すなわち垂直補剛材直上の A-A 断面と、横桁間隔の中心位置の B-B 断面に配置されたものとした。また、ひずみゲージはスタッド基部より 30mm の位置に橋軸直角方向に 2 枚貼り付け、軸方向応力は両者の平均より、曲げ応力は両者の差より求めた。

プレストレスによる影響は、プレストレス導入前から全 P C 鋼線緊張後までの変化量を、床版自重による影響は底型枠脱型前後の変化量を示している。また壁高欄荷重による影響は、床版張出し部先端に壁高欄を擬似した H 型鋼を載荷したときの変化量を示している。その際、使用した H 型鋼は重量が 0.64tf/m であったので、張出し側載荷による主桁上の曲げモーメントを実際の壁高欄相当荷重 (0.97tf/m) による値と一致させるために、計測したデータを係数倍 (0.97/0.64 倍) して壁高欄荷重による応力値とした。

a) 軸方向応力

A-A 断面および B-B 断面におけるスタッドの軸方向応力を図-3に示す。同図中、正值は引張力を、負値は圧縮力を示している。同図より、床版自重の影響では全スタッドが圧縮力を受けているが、プレストレスおよび壁高欄荷重載荷時において、A-A 断面に配置された垂直補剛材直上の S-1 と S-2 が 12~28N/mm² の比較的大きな引張応力を受けていることがわかる。これはプレストレスおよび壁高欄荷重により発生しており、床版支間部の浮き上がりに起因したフランジの首振り回転変形が垂直補剛材により拘束されるためと考えられる²⁾。この引張応力は、P C 鋼線の偏心曲折位置、床版の張出し長さ等に左右されると思われるが、現在建設されている P C 床版 2 主桁橋における P C 鋼線配置や床版張出し部にブラケットを取り付けていない構造を考えると、本計測結果と同様の挙動を示すことが予想される。したがって、活荷重載荷以前に頭付きスタッドには軸方向引張り力が作用することとなるため、設計上注意を要する部位であると考えられる。

一方、垂直補剛材の拘束の無い一般部 (B-B 断面) に配置されたスタッドには、同図 b) よりわかるように、い

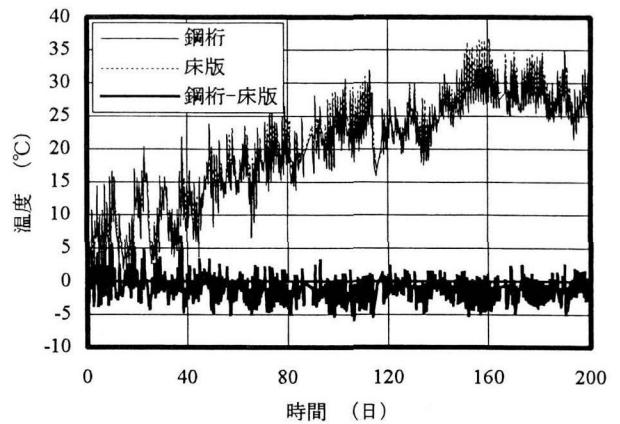
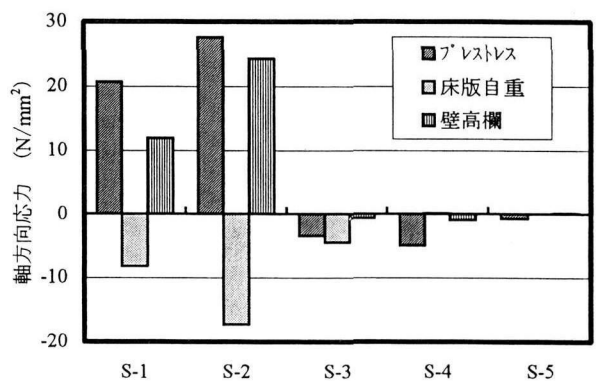
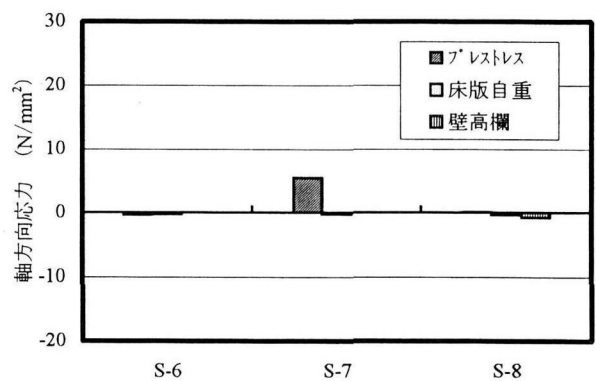


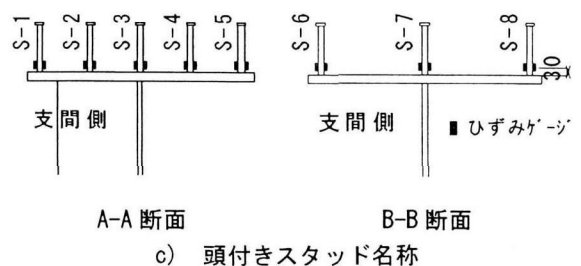
図-2 鋼桁と床版の温度差の経時変化



a) A-A 断面 (横桁部)



b) B-B 断面 (一般部)



c) 頭付きスタッド名称

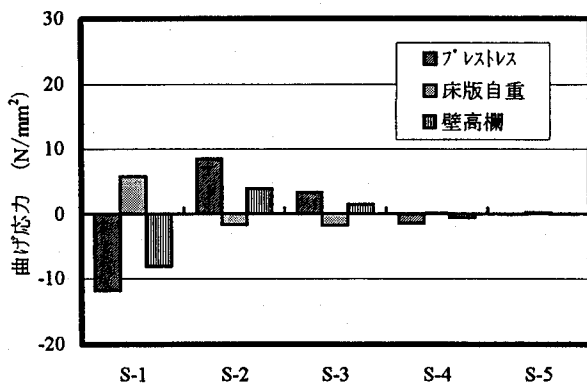
図-3 各種荷重による頭付きスタッドの軸方向応力

ずれの荷重が作用した場合にも軸方向応力がほとんど発生しておらず、一番大きな S-7 でもプレストレス導入時に発生する 6N/mm^2 程度にとどまっている。

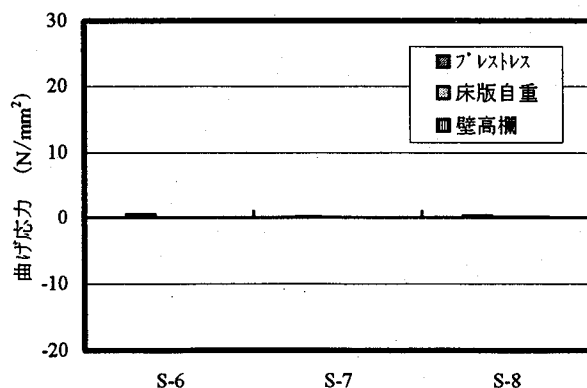
このことは、横桁部ではフランジ腹板の首振り変形が垂直補剛材により拘束を受けているのに対して、一般部ではこの変形を拘束するものがないので、フランジと床版は密着した状態で首振り変形が生じており、そのため、接合部スタッドには引張応力が発生しにくいと考えられる。

b) 曲げ応力

A-A断面およびB-B断面におけるスタッドの曲げ応力を図-4に示す。同図中、正值は床版張出し側への曲げを、負値は床版支間側への曲げを受けることを示している。横桁部を示した同図 a) より、S-1 が、プレストレスと壁高欄荷重によって床版支間側へ、床版自重によって張出し側へ曲げを受けるという挙動を示していることがわかる。一方、S-2、S-3 はそれらと正反対の挙動を示している。S-4、S-5 では、S-1 と同方向の曲げ応力を受けるものの、その値は $1/10$ 以下の小さいものである。また最大曲げ応力は S-1 のプレストレス導入時に 12N/mm^2 程度であり、その他はすべて 10N/mm^2 以下であり、軸方向応力に比べ小さい値となっている。また同



a) A-A断面 (横桁部)



b) B-B断面 (一般部)

図-4 各種荷重による頭付きスタッドの曲げ応力

図 b) より、垂直補剛材の無い一般部では曲げ応力もほとんど発生していないことがわかる。

(2) 温度差による挙動

図-3、4に示したように、比較的大きなひずみが発生した S-2 スタッドの軸方向と曲げひずみについて、2、3日間の経時変化を図-5に示す。図中には、鋼桁と床版の温度差もあわせて示している。同図より、軸方向ひずみ、曲げひずみとも鋼桁と床版の温度差と相関があることがわかる。実際には、鋼桁内で温度勾配を有しており、直射日光が当たる下フランジ側とあたらない上フランジ側では温度差が生じ、それに伴い計測値も変化すると考えられるが、ここでは鋼桁高さの中央の値を代表値と考えて整理している。また同図における曲げひずみが、1日に約 100μ 変動しているのに対し、軸方向ひずみは最大 650μ 程度の変動量となっている。このことから、頭付きスタッドは、鋼桁と床版の温度差により比較的大きな軸方向の引張りひずみが生じており、この部分の設計において無視できないレベルの値であると考えられる。頭付きスタッドの曲げ引抜きに対する設計法の検討においては、変動する活荷重のみならず、床版と鋼桁の温度差荷重による日変化を含めたものを想定し、疲労問題として扱う必要があると考えられる。

(3) クリープ・乾燥収縮による挙動

a) 軸方向ひずみ

クリープ・乾燥収縮の影響による頭付きスタッドの軸方向ひずみの経時変化を図-6に示す。横軸はプレストレス導入直後からの経過時間を示している。計測対象は 3.2(1)と同じ横桁位置の A-A断面と、一般部の B-B断面とした。また図-5に示したように、スタッドのひずみは、鋼桁と床版の温度差日変化の影響を受けやすいので、ここでは温度変化が小さいと考えられる明け方4時に採取したデータのみをプロットした。

同図 a) より、A-A断面の垂直補剛材直上に配置された S-1、S-2 と床版張出し側に配置された S-5 に引張ひず

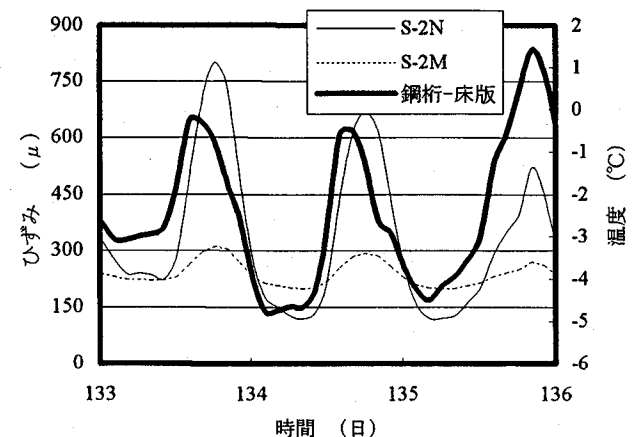
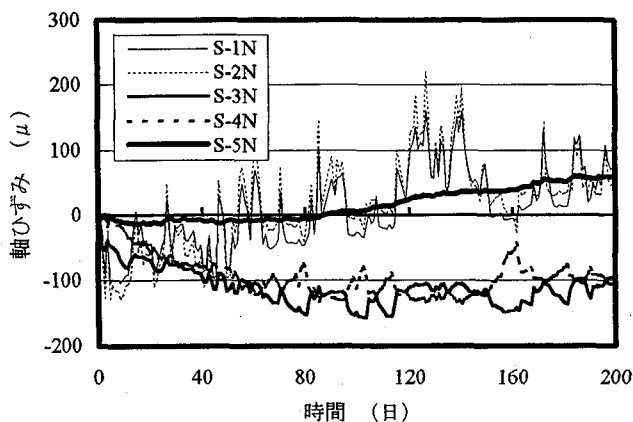
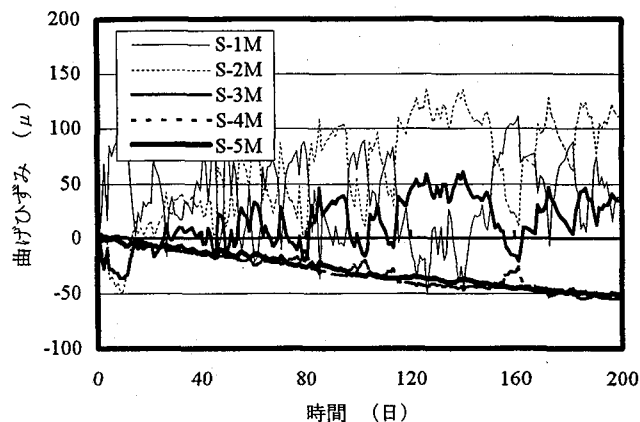


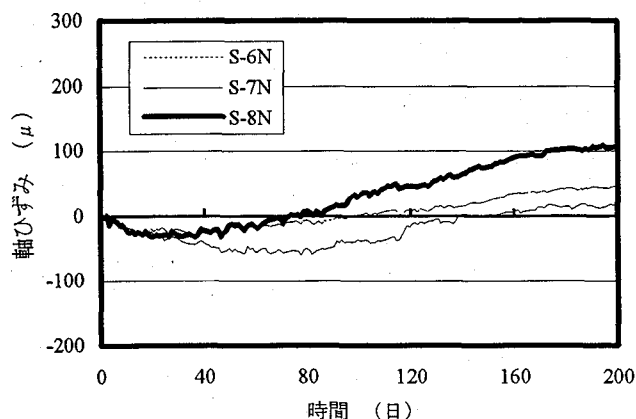
図-5 スタッドひずみと温度差の関係



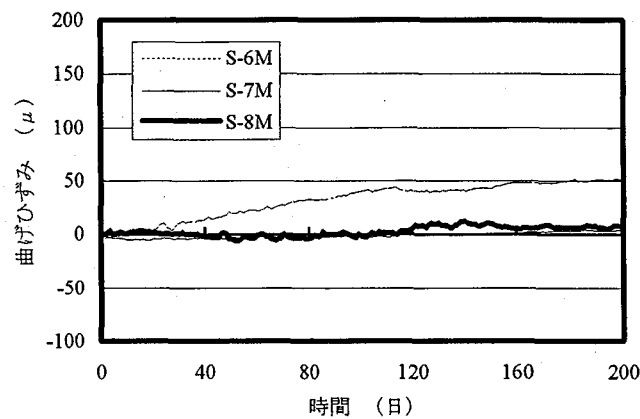
a) A-A断面 (横桁部)



a) A-A断面 (横桁部)



b) B-B断面 (一般部)



b) B-B断面 (一般部)

図-6 頭付きスタッド軸方向ひずみの経時変化

図-7 頭付きスタッド曲げひずみの経時変化

みが生じており、200日において前者2本は約 100μ 弱、後者は約 50μ 程度に変化していることがわかる。また腹板直上のS-3とその横のS-4は約 100μ の圧縮ひずみとなった。一方、同図b)よりB-B断面においては、最も張出し側に配置されたS-8と床版支間側に配置されたS-6に引張ひずみが生じており、それぞれ 100μ 、 40μ に変化している。また腹板直上のS-7は、約80日経過時において約 60μ の圧縮ひずみが生じていたが、最終的にほぼ0のひずみ量となっていた。

以上より、頭付きスタッドの軸方向ひずみが経時的に増加、もしくは減少する傾向を示すことから、コンクリートのクリープ・乾燥収縮の影響を受けているものと考えられる。しかしながら、その値は約 100μ 以下であり、応力にして 20N/mm^2 程度の小さなものといえるので、クリープ・乾燥収縮による軸ひずみは、設計上あまり問題にならないと思われる。

b) 曲げひずみ

クリープ・乾燥収縮の影響による頭付きスタッドの曲げひずみの経時変化を図-7に示す。同図a)より、横桁部の腹板から床版支間側に配置されたS-2、S-3において

は張出し側へ、腹板より張出し側に配置されたS-4、S-5においては、床版支間側へ曲げられる挙動を示している。また、その値は200日間で前者では約 $50\sim 100\mu$ 、後者では約 50μ となっており軸方向ひずみとほぼ同等であることがわかる。また同図b)より、S-6以外はほとんどひずみが発生しておらず、クリープ・乾燥収縮の影響による床版の変形にフランジが追従していることがうかがえる。また軸方向ひずみと同様にクリープ・乾燥収縮による曲げひずみは、約 100μ 以下であり、設計上特に重要視するものではないと思われる。

3.3 垂直補剛材の挙動

(1) プレストレスおよび死荷重による影響

プレストレス、床版自重および壁高欄荷重により垂直補剛材に発生する主応力を表-2に、矢線図を図-8に示す。垂直補剛材の主応力は、同図中に示す計測位置に貼り付けた3軸ゲージより求めた。主応力が作用する角度は、鉛直方向下向きの軸を基準として時計回りを負、反時計回りを正とした。プレストレス、床版自重、壁高欄荷重の各種死荷重については、3.2(1)に示したとおり

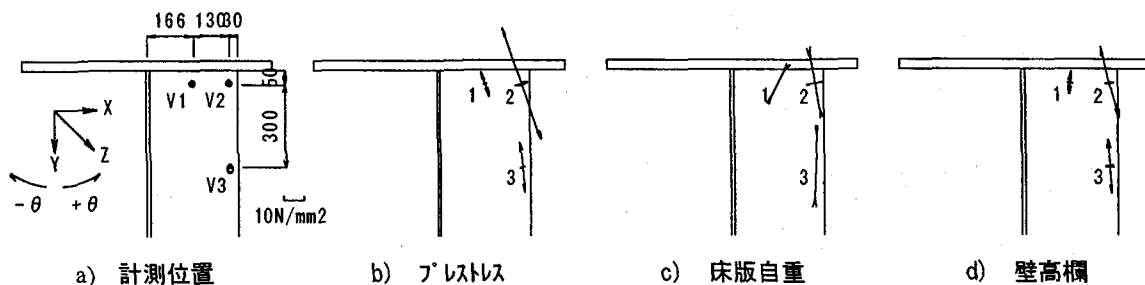


図-8 各種荷重による垂直補剛材主応力分布

表-2 各種荷重による垂直補剛材主応力

荷重	計測点	σ_1 N/mm ²	σ_2 N/mm ²	θ°
プレストレス	1	6.2	0.9	20.7
	2	28.0	2.9	19.1
	3	11.9	1.0	5.0
床版自重	1	-0.2	-6.6	-26.0
	2	-2.1	-12.9	10.3
	3	-0.2	-15.4	-1.8
壁高欄	1	5.6	1.3	-4.1
	2	17.3	2.0	15.1
	3	13.0	-0.2	2.9

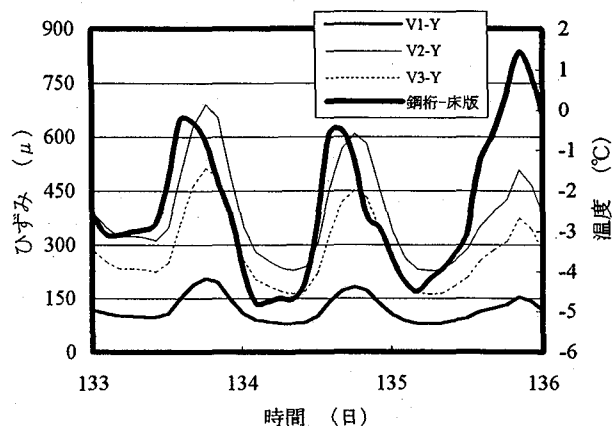


図-9 垂直補剛材鉛直方向ひずみと温度差の関係

である。同図表より、プレストレスおよび壁高欄荷重によってV2位置に他の部位より大きい引張応力が発生し、それぞれ 28N/mm^2 、 17N/mm^2 となっていることがわかる。また床版自重によりV2に 13N/mm^2 、V3に 15N/mm^2 の圧縮応力が生じている。以上より、垂直補剛材直仕端部近いV2の位置は、各種荷重による影響を受けやすい部位であり、プレストレスおよび壁高欄荷重により大きな引張応力が生じるといえる。

(2) 温度差による挙動

垂直補剛材の鉛直方向ひずみについて、2、3日間の経時変化を図-9に示す。図中には、鋼桁と床版の温度差もあわせて示している。同図より、頭付きスタッドの場合と同様に、垂直補剛材の鉛直方向ひずみも鋼桁と床版の温度差と相関があることがわかる。またV2、V3の鉛直ひずみがV1比べ大きな変動を示しており、その日変動量はそれぞれ約 450μ 、 375μ となっている。このことより、V2、V3のように垂直補剛材の自由端に近い位置の鉛直方向ひずみは、鋼桁と床版の温度差の影響を受けやすいといえる。

(3) クリープ・乾燥収縮による挙動

クリープ・乾燥収縮の影響による垂直補剛材主応力および主応力面の傾斜角の経時変化を図-10に示す。同図

a), b), c)はそれぞれV1～V3における計測値であり、頭付きスタッドの場合と同様、外気温が安定していると考えられる明け方4時に採取したデータのみをプロットした。

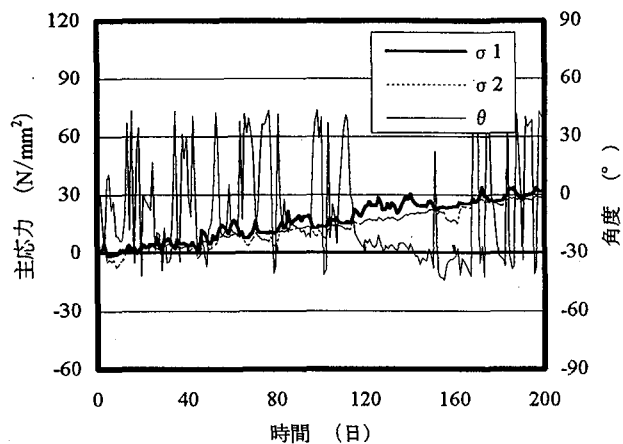
同図より、すべての計測点において時間の経過とともに主応力が引張り側に増加する傾向が見られ、V1～V3の最大主応力は200日で約 30N/mm^2 に達していることがわかる。また主応力の作用する角度は、全ての計測位置において $\pm 30^\circ$ 程度の日変動が生じていることがわかる。

これらのことから、垂直補剛材上端部に生じるクリープ・乾燥収縮による主応力は約半年で 30N/mm^2 程度であり、設計上無視し得る値であると考えられる。

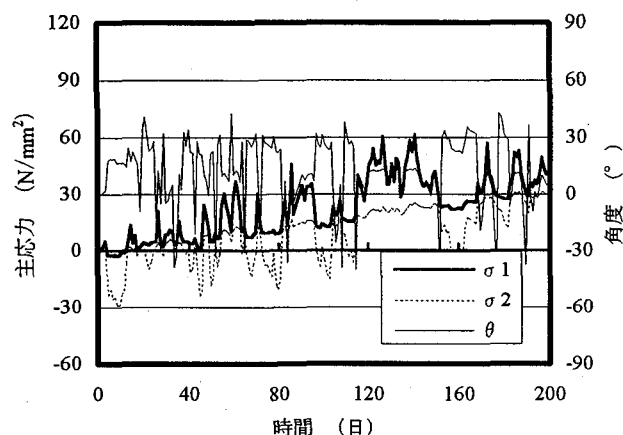
4. まとめ

本計測より得られた結果をまとめると以下のとおりである。

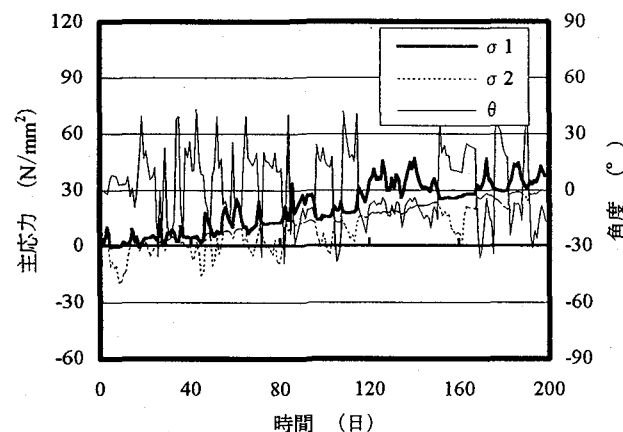
- ① 鋼桁と床版の温度差は最大でも 6°C 程度であり、道示⁶⁾Ⅱ9.2.7の規定値 $\pm 10^\circ\text{C}$ よりやや小さいものであった。
- ② 横桁部の垂直補剛材直上に配置されたスタッドには、プレストレスや壁高欄荷重の影響により、供用開始



a) V1



b) V2



c) V3

図-10 垂直補剛材主応力の経時変化

前から引抜き力が作用する可能性が高い。

- ③ 垂直補剛材やその直上に配置された頭付きスタッドには、床版のクリープ・乾燥収縮の影響により長期的に引張り応力が作用する。しかしながら、その値は小さく設計上特に重要視するものではないと思われる。
- ④ また、同部位には鋼桁と床版の温度差によっても引張り応力が生じ、その値は、頭付きスタッドで最大約 650μ (約 130 N/mm^2)、垂直補剛材上端部で最大約 550μ (約 110 N/mm^2) 発生しており、設計上重要であり、合理的な構造詳細を検討する必要がある。

以上、実物大長支間PC床版の経時計測から得られたデータを示すとともに、いくつか考察を報告した。今後、長支間PC床版2主桁橋の設計において、横桁部垂直補剛材上のずれ止めの設計に関して、床版と鋼桁の温度差を受ける上に、活荷重による変動応力が生じることを前提に、ずれ止め曲げ引抜き疲労の検討を行う必要があると考えている。

最後に、本研究を進めるに際して、長岡技術科学大学・長井正嗣教授、ならびに日本道路公団関係各位よりご指導等を頂きましたことを心より感謝致します。

参考文献

- 1) 田村陽司, 川尻克利, 大垣賀津雄, 作川孝一: PC床版連続合成2主桁橋「千島の沢川橋」の設計, 橋梁と基礎, Vol.32, No.9, pp.18~22, 1998.9
- 2) 済藤英明, 八部順一, 山本晃久, 大垣賀津雄, 長井正嗣: 合成2主桁橋のずれ止め引抜き実験と設計法に関する一考察, 第4回復合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.127~132, 1999.11
- 3) Michel VIRLOGEUX: ASSOCIATION OF PRESTRESSED CONCRETE AND STEEL FOR BRIDGE CONSTRUCTION, Association Francaise pour la Construction, Contributions for the Symp. of IABSE, Leningrad, USSR, pp.57~90, Sept., 1991
- 4) 猪熊康夫, 本間淳史, 杉崎幸樹, 丸山勝: 長支間場所打ちPC床版鋼2主桁橋(藁科川橋)の計画, 土木学会第54回年次学術講演会概要集, CS-142, pp.284~285, 1999.9
- 5) 済藤英明, 大垣賀津雄, 猪本真, 西尾研二, 長井正嗣: 広幅員PC床版2主桁橋の鋼桁-床版結合部の経時挙動, 土木学会第55回年次学術講演会概要集, CS-37, 2000.9
- 6) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編, 1996.12

(2000年9月14日受付)