

## 鋼道路橋コンクリート系床版の構造と設計の現状と課題

—長支間床版の設計手法および若材齢時のひび割れ解析手法—

Structural Problems and Analytical Methods on early stage pre-stressed Concrete Decks of Steel Highway Bridges in Japan

碓山 晴久<sup>1</sup>, 山本 晃久<sup>2</sup>, 高林 和生<sup>3</sup>, 田中 正明<sup>4</sup>, 戸川 邦彦<sup>5</sup>,  
玉置 一清<sup>6</sup>, 上阪 康雄<sup>7</sup>, 正司 明夫<sup>8</sup>, 野瀬 智也<sup>9</sup>, 和内 博樹<sup>10</sup>

Haruhisa IKARIYAMA, Akihisa YAMAMOTO, Kazuo TAKABAYASHI, Masaaki TANAKA, Kunihiko TOGAWA  
Kazukiyo TAMAKI, Yasuo KOSAKA, Akio SYOJI, Tomoya NOSE, Hiroki WAUCHI

<sup>1</sup>(株)東京鐵骨橋梁 技術開発部 (〒108-0023 東京都港区芝浦 4-18-32)

<sup>2</sup>工修 川崎重工(株) 橋梁・水門技術部 (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島 8 番地)

<sup>3</sup>工修 松尾橋梁(株) 技術開発室 (〒550-0005 大阪市西区西本町 3-1-43)

<sup>4</sup>工修 (株)栗本鐵工所 企画開発部 (〒590-0977 大阪府堺市大浜西町 2-2)

<sup>5</sup>極東工業(株) 開発室 (〒732-0052 広島市東区光町 2-6-31)

<sup>6</sup>工修 三井住友建設(株) 技術研究所 (〒329-0432 栃木県河内郡南河内町仁良川 1726)

<sup>7</sup>Dipl.-Ing. コサカ設計アソシエーツ (〒141-0031 東京都品川区西五反田 2-11-15-202)

<sup>8</sup>オリエンタル建設(株) 第二技術部 (〒102-0093 東京都千代田区平河町 2-1-1)

<sup>9</sup>工修 JIP テクノサイエンス(株) システム技術研究所 (〒600-8815 京都市下京区中堂寺粟田町 93 番地)

<sup>10</sup>(株)CRC ソリューションズ 建設技術部 (〒136-8581 東京都江東区南砂 2-7-5)

Recently in Japan, due to a demand of decreasing the number of main girders in highway bridges from a view of the structural simplification and laborsaving in the construction field, the span lengths of deck slabs have become longer. Consequently, the pre-stressed concrete slabs and the composite deck slabs have been employed increasingly because of their higher durability even for long span slabs. However, more rational design and structure of these slabs are requested. This paper describes present the state of the art and problems on the design and structure of such slabs.

Furthermore, tensile cracking in cast-in-place concrete at the early age is a problem at a traveling formwork method. This problem is evaluated by an analysis introducing an appropriate temperature history of early age concrete and an expansive concrete effect. This paper also describes those analytical results for cast-in-place concrete PC slabs.

*Key Words: decks of steel highway bridges, structure of decks, analytical methods of early aged concrete decks*

### 1. はじめに

近年、わが国の鋼道路橋において、コストの縮減・施工の省力化・疲労耐久性の向上などを目的として、2主桁橋・少数主桁橋・開断面箱桁橋などの新しい橋梁形式が提案され、積極的に実橋に適用されている。さらに、鋼道路橋は非合成桁として設計されることが一般的であったが、実挙動との整合性などに配慮して、合成桁としての設計への移行が本格化している。

従来、鋼道路橋では鋼桁が主構造であり、床版は橋面工の一部のように取り扱われる傾向にあったが、上記のような変遷にともない、床版の役割がより重要になり、疲労耐久性が高く長支間化が可能なプレストレストコンクリート床版（以下、PC床版と称す）や鋼・コンクリート合成床版（以下、合成床版と称す）が適用されるに至っている。

これらのPC床版および合成床版に関して、床版の長支間化にともなう設計曲げモーメントや最小床版厚の設定、

プレキャスト床版や合成床版の鋼部材の現場継手部における接合方法、鋼桁と床版との取り付け部であるハンチの要求性能など構造上の課題に関する検討が重要となっている。また、若材齢時床版の解析上の課題としては、PC床版の版厚の増大にともなう温度応力の評価、クリープ・乾燥収縮の取扱い、膨張材の効果などに関する検討が必要である。

本論文は、「土木学会鋼構造委員会道路橋床版の調査研究小委員会」の活動の一環として、本小委員会の第3分科会の床版構造WGおよび床版解析WGにおいて、前述したPC床版および合成床版に関する主要な検討課題についてまとめ、今後の活動方針を示すものである。

### 2. 床版の設計手法

#### 2.1 概要

コンクリート床版が、橋梁の主要部材として認識されるようになり、長支間床版に適用可能なPC床版や合成床

版について各所で研究開発が進められている。しかし、長支間の床版が採用されはじめてからの歴史は浅いため、十分な知見が得られたとは言えない項目が、残されているのが現状である。

本章では、PC床版と合成床版に関して、より合理的な床版の設計を行うために、検討の余地を残していると考えられる「設計曲げモーメント」「接合部」「床版の最小厚」「ハンチ」の4つの項目に着目し、現状と課題について言及する。

## 2.2 設計曲げモーメント

### 2.2.1 PC床版の設計曲げモーメント

平成14年3月に道路橋示方書<sup>1)</sup>(以下、道示と称す)が改訂され、鋼橋編にもPC床版のT荷重による設計曲げモーメント式が記載された。基本的に従来のコンクリート橋編の準用であるため、支間が6mを超える場合の設計曲げモーメント式は定義されていない。解析によってこれを定義する試み<sup>2)</sup>が従来より行われているが、実際の工事では工区や物件ごとにFEM解析によって算出している事例が多い<sup>3)</sup>。また、図2-2-1に示すように、道示式では連続版の中間支点部および片持版の支点部の橋軸直角方向設計曲げモーメント式では、従来より規定されている範囲に比して安全側の規定となっていたり、不連続となる点が存在するため、より合理的な設計式の設定が望まれている。

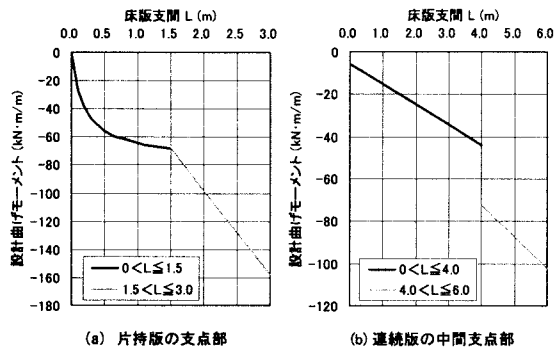


図2-2-1 道示のT荷重による設計曲げモーメント

### 2.2.2 合成床版の設計曲げモーメント

合成床版では土木学会の「鋼構造物設計指針 PART B<sup>4)</sup>」に規定される支間8mまでの設計活荷重曲げモーメント式を適用している事例が多い。支間が8mを超える長支間床版への適用に際しては、コンクリート打設時のたわみの検証や負曲げ部のひび割れに関する確認が必要と思われる。

### 2.2.3 少主桁橋における検討課題

鋼2主桁橋の支間部の死荷重曲げモーメントは、多主桁橋に比べて張出し部の死荷重による影響が大きく、連続版に近い挙動となるが、中間横桁や垂直補剛材による

回転拘束の影響も無視できないため、設計時には単純支持と固定支持の二種類のモデルによって解析している事例が多い。しかし両方のモデルを満足する設計は不経済になる場合もあるため、回転バネモデルを用いて適切に曲げモーメントを算出する手法<sup>5)</sup>が提案されている。また、非常駐車帯の設置等により張出し長が大きい場合には、張出し部の荷重の影響で支間中央部に負の曲げモーメントが算出される事例がある。このような場合には、PC鋼材の配置への影響が大きいため、実際の挙動に即した設計曲げモーメントとなっているかどうかの検討が重要である。

### 2.2.4 張出し部の設計

張出し部の床版を対象とした研究は従来あまり行われてこなかった。近年になって張出し部の輪荷重走行試験が実施され、支点部の橋軸直角方向の負曲げモーメントは道示式よりもかなり小さいことや、張出し部には橋軸直角方向の正の曲げモーメントが発生していることが報告<sup>6)</sup>されており、実際の挙動に即した設計手法の研究が進められている。

### 2.2.5 直交異方性の影響

橋軸方向と橋軸直角方向の剛性の違いによる異方性の存在によって、橋軸直角方向の曲げモーメントが危険側となる問題が以前から指摘され<sup>7)</sup>、種々の検討が行われている。I形鋼格子床版では異方性を考慮した設計曲げモーメント式が提案されている。一方、PC床版では、橋軸方向にプレストレスを導入せずRC構造となる場合には、異方性が大きくなることも考えられるため、この影響を考慮した設計手法の確立が望まれている。

## 2.3 床版の最小厚

### 2.3.1 最小厚の規定の変遷

床版の最小厚規定の変遷を、連続版のRC床版を例に表2-3-1に示す。当初の示方書では、車道のRC床版の最小有効厚さを11cmと規定し、これに鉄筋のかぶりを2.5cm、鉄筋直径を1.3cmとして最小全厚を14cmとした。その後、S43年の道示より16cm以上に引き上げられ、S53の通達以降は大型車の交通量や支持けた剛性による付加曲げモーメントの係数を乗ずることになり、橋梁の設計条件に応じて床版の最小厚をさらに厚くするように改訂された。

当初の示方書では、床版の最小厚の規定は確実な床版施工を行うための最小厚として設定されており、設計曲げモーメントも主鉄筋方向のみを規定し、配力鉄筋量は主鉄筋量に対する比率として設定されていた。その後、重交通の増大にともない、床版の損傷事例が多発したため、床版厚の増大や配力鉄筋方向の設計曲げモーメント規定の追加、重交通による設計曲げモーメントの割増しなどを行い、現在に至っている。

表 2-3-1 RC床版（連続版）の最小厚規定の変遷<sup>1)</sup>

| 技術基準     | 床版の最小厚   |
|----------|--|
| T 15 細則  | 規定なし   |
| S 31 鋼道示 | 14cm (有効厚 11cm, かぶり 2.5cm)   |
| S 43 道示  | $d_0 = 3L + 9 \geq 16\text{cm}$  |
| S 46 通達  | $d_0 = 3L + 11 \geq 16\text{cm}$   |
| S 53 通達  | $d_0 = 3L + 11 \geq 16\text{cm}$<br>$d = k_1 \cdot k_2 \cdot d_0$<br>k1: 大型車交通量の係数<br>k2: 付加モーメントの係数         |
| S 55 道示  | $d_0 = 3L + 11 \geq 16\text{cm}$<br>(S53 通達は適用)  |
| H2 道示    | $d_0 = 3L + 11 \geq 16\text{cm}$<br>$d = k_1 \cdot k_2 \cdot d_0$<br>k1: 大型車交通量, 補修の難易等の係数<br>k2: 付加モーメントの係数 |
| H8 道示    | $d_0 = 3L + 11 \geq 16\text{cm}$<br>$d = k_1 \cdot k_2 \cdot d_0$<br>k1: 大型車交通量の係数<br>k2: 付加モーメントの係数         |

### 2.3.2 現在の考え方

近年, 道路橋床版の損傷メカニズム<sup>8)</sup>が明らかにされ, 有害なひびわれの発生が床版の劣化に影響することが知られている。道示においても, 荷重によって床版のコンクリートに生じる曲げ引張応力度をある限界内におさえて, 有害なひびわれの発生をできるだけ少なくすることを目的に, 鉄筋の許容応力度の規定や床版の最小厚の規定を設けている。このような観点から床版厚の検討を行った研究<sup>9)</sup>として, 自重や活荷重による床版上下縁の曲げ引張応力度とコンクリートの曲げ引張強度とを, コンクリート強度や床版支間を変化させて比較検討したものがあ。この研究によれば, 現行道示における床版厚に大型車交通の割増係数を考慮する場合, 道示の床版厚は安全側となることがわかった。また, 近年, 注目されている長支間床版としての PC 床版に関して床版の最小厚の検討を行い, 床版コンクリートに生じる曲げ引張応力度から床版厚を設定し, 道示との比較を行っている。

### 2.3.3 今後の試み

現行の床版厚の規定は, 曲げモーメントのみによって設計した断面ではせん断耐力が小さくなるので, 床版の最小厚の規定を設けてせん断耐力を確保しようとしたものと考えられる。しかし, 床版が長支間化すると, 曲げモーメントに抵抗する床版厚で十分なせん断耐力が確保されるため, 床版の最小厚の規定は不要になると思われる。この観点から検討した研究として, 床版支間 2m~6m の範囲に対してコンクリートのせん断疲労破壊と曲げモーメントによる鉄筋の疲労破壊とに着目した研究<sup>10)</sup>がある。この研究は, RC 床版を対象に床版厚の設定フローを検討したものであるが, 設計曲げモーメントにより設定した初期設計断面に対して, コンクリートのせん断疲労破壊の照査と曲げモーメントによる鉄筋の疲労破壊照査とを行い, 床版の最小厚を決定する手順を提案している。図 2-3-1 に, その床版厚の計算フローを示す。

前述した研究成果<sup>10)</sup>とともに, 床版支間の増大にもなる床版剛性の低下や有害な振動の発生を防止することも課題としてあげられる。これらを加味して, RC 床版のみならず, PC 床版や合成床版などの床版形式に求められる要求性能に着目した, 合理的な床版厚の決定手順を設定することが今後の課題と考える。

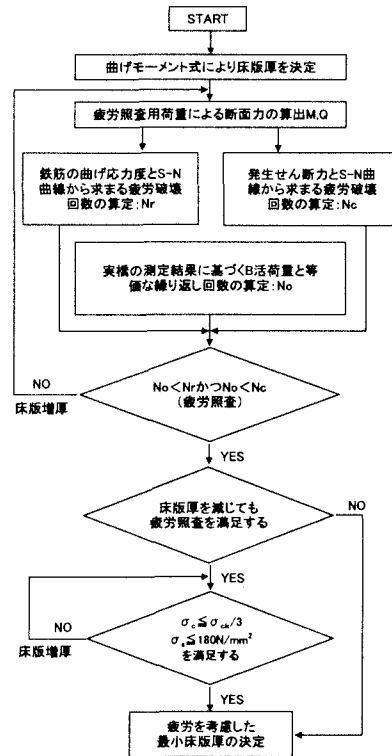


図 2-3-1 疲労を考慮した最小床版厚の計算フロー<sup>10)</sup>

### 2.4 接合部

鋼道路橋の床版は, ①現場作業の省力化 ②工期短縮 ③建設費縮減 ④高耐久性化 ⑤床版長支間化 などのニーズを満足させるため, プレキャスト構造の PC 床版やプレファブ構造の合成床版などの採用が増加している。これらは, 工場で作成されたパネル部材どうしを現場で接合する必要があり, その接合方法として, 各種の接合法が提案されている。

#### 2.4.1 PC 床版の接合構造

PC 床版の接合部の構造には, 橋軸方向にプレストレスを導入する PC 構造とプレストレスを導入しない RC 構造がある。

PC 構造の接合方法は, 図 2-4-1 に示す床版目地に無収縮モルタルを充填する方法や, 図 2-4-2 に示す床版目地部をマッチキャストとする方法がある。

一方, RC 構造は, 図 2-4-3 に示すようなループ継手が一般的に用いられている。しかしループ継手は, 床版製作時の作業性能や現場でのループ内への鉄筋挿入など施工性の問題も指摘されている。これらを改善する方法と

して、図 2-4-4 のような現場での施工性を考慮したループ継手や図 2-4-5、図 2-4-6 に示すような継手構造も提案されている。

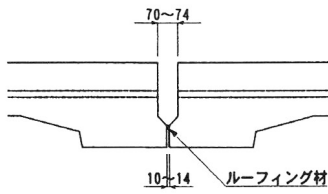


図 2-4-1 無収縮モルタル充填接合部<sup>11)</sup>

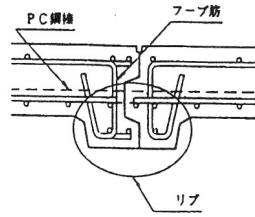


図 2-4-2 マッチキャスト床版接合部<sup>11)</sup>

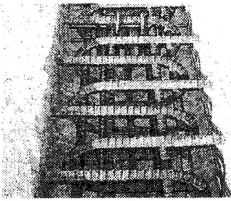


図 2-4-3 ループ継手

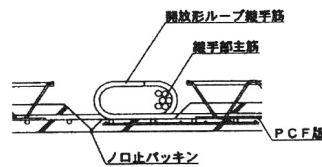


図 2-4-4 ループ継手  
(ハーフプレハブ合成床版)

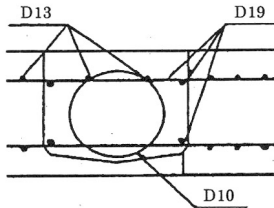


図 2-4-5 らせん鉄筋継手<sup>12)</sup>

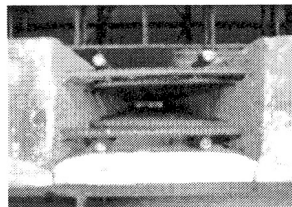


図 2-4-6 重ね鉄筋継手<sup>13)</sup>

#### 2.4.2 合成床版の接合構造

合成床版の底鋼板は、パネル部材を工場製作した後に現場にてパネル間を接合することにより、下側鉄筋の機能を受け持つ以外にコンクリート打設時の型枠も兼用するという特徴を持つ。現在、合成床版に使用されている接合方法として、図 2-4-7 に示す高力ボルト摩擦接合タイプ、図 2-4-8 に示す高力ボルト引張接合タイプ、図 2-4-9 に示すスタッドボルト+鉄筋タイプがある。

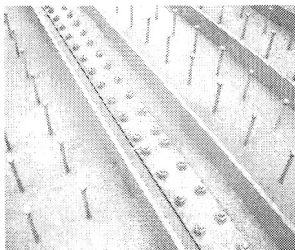


図 2-4-7 高力ボルト摩擦接合

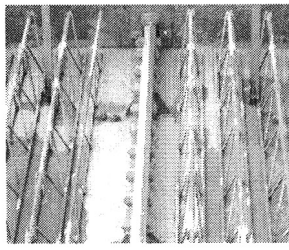


図 2-4-8 高力ボルト引張接合

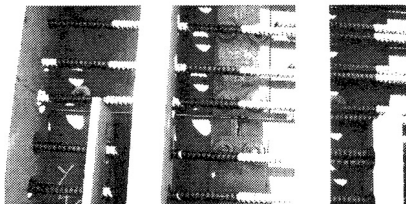


図 2-4-9 スタッドボルト+鉄筋

床版接合部の性能評価は、静的載荷試験や輪荷重走行試験などを行い、接合構造ごとに安全性の確認が行われている。しかし、①使用条件、②設計方法、③使用材料、

④構造細目、⑤メンテナンスなど、接合部の強度・耐久性以外の要求性能や特徴について調査された事例は少ない。これら要求性能や特徴を接合構造ごとに整理・比較し、合理的な接合構造の設計を行っていくことが今後の課題である。

#### 2.5 ハンチ

鋼橋の支持桁部とコンクリート系床版の連結部には、一般にハンチが設置されている。この場合のハンチには①応力緩和、②応力部材、③高さ調整の3つの意味合いが含まれていると考えられる。

①は応力緩和のために中間床版部と鋼桁上床版部を摺り付ける区間で、②は設計断面としての必要部材である。③は横断勾配などを吸収して計画路面高を確保するための余裕寸法であり、桁上の負の曲げモーメントに対して断面の余裕代を確保することになる。ここでは、①の応力緩和構造という観点から、ハンチについて述べる。

##### 2.5.1 規定の変遷

鋼道路橋の RC 床版にハンチの設置が初めて推奨された規定は、「鋼道路橋の合成ゲタ設計施工指針(S40.7)」(表 2-5-1)であり、この背景には、重交通の増大に伴い RC 床版の損傷が報告され始めたことが挙げられ、最小床版厚の増加とともに応力緩和構造として採用されたと考えられる。

表 2-5-1 ハンチの主要規定(道示等)の変遷

| 技術基準   | 記述内容   |
|--------|--|
| S40 指針 | ・ハンチをつけるのがよい<br>・傾斜は1:3よりゆるやかにするのがよい                   |
| S48 道示 | ・8cm以上のハンチには用心鉄筋を配置するのがよい<br>・用心鉄筋の間隔は床版の下側鉄筋の間隔と同じとする |
| S55 道示 | ・傾斜がきつい場合は、1:3までを床版の有効断面とする<br>・用心鉄筋の間隔は下側鉄筋間隔の2倍以下とする |
| H14 道示 | 支持けた上フランジが厚くなる場合のハンチは、上フランジ上面から摺り付ける(解説)               |

##### 2.5.2 ハンチの形状

ハンチを設置するのは、鋼桁上フランジの端部位置であり、大きなせん断力が作用する個所である。道示では、規定する曲げモーメントおよび最小床版厚を満足する場合は、せん断力に対する照査は省略してよいとされているが、せん断耐力を向上させる意味からも、ハンチの設置は有効な方策であることを認識しておきたい。ハンチの傾斜は、道示に規定されているとおり、1:3よりゆるやかにするのが好ましいと考えられる。ハンチ高さについては定量的な基準は無いが、ハンチ高さを8cm程度以上として勾配を1:5としたときに局所応力緩和に有効であるという報告事例<sup>14)</sup>(図 2-5-1、図 2-5-2)がある。

応力緩和の構造として、床版下面をアーチ形状とする事例も報告<sup>15)</sup>されており、有効的な1つの方法である。ハンチの設置は、せん断耐力を確保する方法でもあり、

せん断耐力とハンチの必要性の関係を明確にすることが今後の課題である。

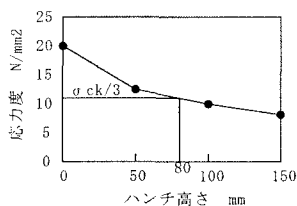


図 2-5-1 ハンチ高さと応力度

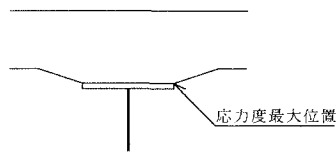


図 2-5-2 応力度最大位置

### 3. 若材齢コンクリート床版の解析

#### 3.1 概要

橋長の長い合成桁の施工においては、鋼桁架設後、移動型枠を用いてコンクリート床版を分割して順次施工する工法が採用されるケースが多い。この場合、硬化するコンクリートの水和熱あるいは自己収縮・乾燥収縮等の発生により、先に施工されたコンクリート床版および鋼桁がコンクリートの収縮を拘束し、コンクリート床版に大きな引張応力が発生しやすくなる<sup>16)</sup>。とくに床版厚が厚い場合には水和熱が高くなるため温度応力は大きくなる傾向にある。また、非合成桁であっても、鋼桁とコンクリート床版の接合部にずれが生じにくい構造の場合においては、合成桁としての挙動を示すことから、同様の問題が発生しやすくなる。

近年の解析ソフトや電子計算機の発達、大容量化により、ソリッド要素を用いた立体FEMモデルなどのように拘束度を厳密に評価できる解析手法を用いる場合、入力データが適切であれば、上記の問題に対して十分に精度の高い解析結果を得ることができる現状にある。しかし、適切な解析結果を得るためには、入力データである若材齢時におけるコンクリートの物性を把握することが重要と考える。

本章では以下に、若材齢時におけるコンクリート床版に発生する応力を把握するために特に重要であると考えられる、温度応力、クリープ・乾燥収縮、膨張材の評価方法に関する現状と課題に関して述べる。

#### 3.2 温度応力

##### 3.2.1 床版の温度応力解析

従来、温度応力とは、部材寸法の大きい構造物特有の問題であると考えられてきたが、鋼桁上の床版においても、少数主桁化による床版厚の増大、PC床版の採用、また移動型枠施工などによりコンクリートの早期の強度発現が要求されたことなどから、温度応力の検討対象であることが指摘されている。しかしながら、土木学会コンクリート標準示方書<sup>17)</sup>（以下、コン標示）に規定される温度応力解析手法は、基本的には部材厚の大きいマスコンクリートを想定したものと考えられ、放熱の影響が極めて大きく、最高温度に達するのが0.5日～1日程度という床版部材に適用する場合、必ずしも妥当とはいえない

い課題が残されていると言える。以下に、コンクリート床版の温度応力解析に影響を及ぼす代表的な要因とその課題を述べる。

##### 3.2.2 床版の温度応力解析に影響を及ぼす要因

###### 1) コンクリートの断熱温度上昇特性

コンクリートの水和発熱は、セメントや混和材など使用材料の種類、単位セメント量や、水セメント比などの配合、打ち込み温度などにより変化する。断熱温度上昇特性の設定は試験によるのが原則であるが、通常は、コン標示に示される推定式を用いられることが多いようである。しかし、終局温度上昇量の推定が図3-2-1に示すように比較的精度よくても、この推定式を部材厚が小さい床版部材に直接用いた場合、図3-2-2に示すように部材中心部の最高温度の温度解析結果が実測値に比べ相当量異なるとの指摘<sup>18)</sup>がある。床版の温度応力解析においては、終局温度上昇量の設定よりも、図3-2-1の試験値に見られる打ち込み直後0.5日程度までの立ち上りのS字型の曲線に着目した断熱温度上昇特性の設定が重要であるとされている。

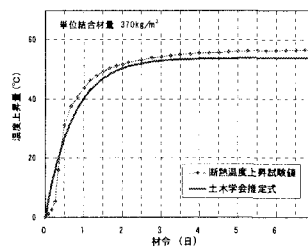


図 3-2-1 断熱温度上昇特性の推定式と試験値の比較例<sup>18)</sup>

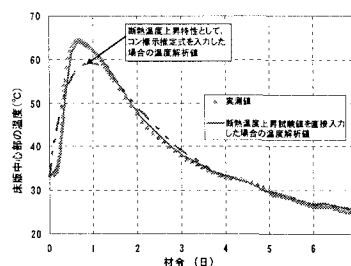


図 3-2-2 床版厚 56cm の実測値と温度解析の比較例<sup>18)</sup>

###### 2) 熱伝達率

コンクリート床版の温度解析では、コンクリートの熱境界面(コンクリート表面)において考慮する放熱条件の設定が、部材中心部の最高温度の解析結果にまで影響する。境界近傍の空気層の対流拡散により熱伝達境界の特性を解析に厳密に取り入れる方法もあるが、簡便な手法として、コン標示に示される、コンクリートの露出面での熱伝達率、マット・散水による養生などによる熱伝達率などを用いる例が多い。また、野外においては、日射の影響や風速などが、熱伝達率の設定に大きな影響を及ぼすと考えられるが、これらを事前に予測し、解析に反

映することは困難である。

### 3) 使用材料

コンクリートの断熱温度上昇特性、熱伝導率、比熱は温度解析に影響を与え、線膨張係数、ヤング係数、引張強度、圧縮強度は温度変化により発生する温度応力解析に影響を与える。コンクリートの熱伝導率は、使用されるコンクリートの骨材の種類、骨材量、水セメント比の影響、コンクリートの含水状態等の影響を受けるといわれている。また、温度依存性があり、コンクリート内部の水分移動によって時間変化すると考えられる。線膨張係数は水中養生と気中養生で異なり、気中養生のほうが水中養生よりも大きくなる傾向がある。ヤング係数、引張強度、圧縮強度は、時間の関数として定式化されたものが用いられているが、初期の立ち上がり時は変化率も大きいため、解析ステップの設定や、初期の材料特性の設定が非常に重要となってくる。

### 4) クリープの影響

床版の温度応力は、コンクリート打込み後1～2日後の若材齢期に発生するため、クリープの影響を大きく受けることになる。コン標示では、このクリープの影響を簡便に求める近似解法として、材齢3日までのヤング係数を0.73倍とする有効弾性係数法が示されている。この手法は、厳密なクリープ解析に比べ安全側の値を与えるものとの報告<sup>19)</sup>もある。後述する乾燥収縮による応力と温度応力を足し合わせて考慮する場合や、完成系での温度応力の残留分の算定を行う場合などにおいて、より合理的な応力解析を行うためには、クリープの適切な評価は今後の大きな課題である。

## 3.3 クリープ・乾燥収縮

### 3.3.1 クリープ・乾燥収縮の影響

コンクリート床版の設計・施工において、クリープ・乾燥収縮の影響を考慮することが求められる。クリープ・乾燥収縮は、コンクリート床版に引張応力を生じさせ、ひび割れを誘発する原因になり得るからである。とくに、若材齢の床版コンクリートにおいて、クリープ・乾燥収縮による影響を的確に把握することが求められるが、その大きさは、使用コンクリート材料、施工厚さ、湿度・気温、養生条件、施工ブロックの打設順序および材齢、鉄筋比、プレストレス量などによって変わってくる。ここで問題となるのは、クリープ・乾燥収縮が時間とともに変化する性質を有することであり、さまざまな計算モデルが提唱されているものの、計算式から実際に近い値をつかむのは非常に困難であるといえる。よって、基準類で相当量の鉄筋を有する若材齢のコンクリート床版を対象にしたものは現在皆無に等しい。近年、若材齢のコンクリート部材に対しては、土木学会、コンクリート工学協会において活発な研究活動が進められており、

RC部材については供試体試験をもとにしたクリープ・乾燥収縮の予測式が提案されている。

また、実際の工事では、コンクリート床版の施工時に発生する温度応力や収縮応力によるひび割れに対処するため、低熱ポルトランドセメントや、後述する膨張材などを組み合わせて使うケースが増えてきた。こうした場合に実構造物の温度応力変化を的確にとらえるためには、若材齢時のヤング係数、引張強度のほか、クリープ・乾燥収縮による影響、すなわちクリープ係数などの特性値をつかんでおくことが必要となってきた。

### 3.3.2 基準類によるクリープ・乾燥収縮の取扱い

平成14年に改訂された現行の道示において、とくに若材齢時のコンクリートに対する計算式は含まれておらず、一般式からクリープ・乾燥収縮を求めた場合には、実情にそぐわない計算結果となる。

一方、コン標示は平成8年の改訂以来、道示とは異なった計算方法を採用しており、おもな相違点は水セメント比(W/C)および体積表面積比(V/S)を導入したことである。また、鉄筋比1%の場合のRC部材について、低減されたクリープ係数を与えている。算定式はもともと供試体試験データを基礎として求められたものであるので、均一に配筋された鉄筋比1%のRC部材では、実状に近い結果が得られる。

コンクリート工学協会「若材齢コンクリートのクリープ・乾燥収縮研究委員会」が平成14年に提案した予測式<sup>20)</sup>では、さらに載荷開始時材齢における圧縮強度を導入しており、低鉄筋量のRC部材への適用は、より現状に近い結果が得られるが、実際のコンクリート床版への適用には、まだ問題が残されているといえよう。なお、コン標示では、条件の複雑な場合に、Bazantの式<sup>21)</sup>、ACI-209の式、CEB-FIP(1990)の式などを用いて算定することを推奨している。

### 3.3.3 コンクリート床版における計測結果

若材齢コンクリート床版のクリープ・乾燥収縮を対象とした計測は、まだ非常に少ない。その中で数藤ら<sup>22)</sup>は、クリープ・乾燥収縮およびPC鋼材のリラクゼーションによるプレストレス力の減少量などを調査するために、屋内実験場にて連続鋼合成2主桁橋の1/2縮尺模型を作製し、若材齢を含む計測をおこなっている。ここでは橋軸直角方向にプレストレス力があたえられた場所打ちPC床版を使用し、橋軸方向には中間支点部の負曲げモーメントに対応する目的で、ジャッキアップダウンによるプレストレスの導入がおこなわれた。

数藤らの屋内実験の結果をみると、若材齢コンクリート床版の乾燥収縮ひずみの実測値は、道示算定式と比べ、明らかに低い値を示している。またクリープひずみに関しては、それほど差がないが、これは直接的なクリープひずみ計測ではないためと考えられる。

### 3.4 膨張材

#### 3.4.1 現状と課題

コンクリート配合時に膨張材を添加することは、コンクリートのひび割れ抵抗性を向上させるのに有効であることは多くの実績もあり、よく知られている。しかし、膨張材の添加は現場での管理が容易でない、試験等によって直接的にその効果を確認することができない、定量的な評価手法が確立されていない等の理由で、従来はプレキャスト製品への使用が主であり、場所打ちコンクリートに普及しているとは言い難い状況であった。

また、若材齢で導入されるケミカルプレストレスは、クリープによってその大部分が損失するのではないかと懸念があるが、機械的プレストレスに比べてクリープ損失が小さいという報告<sup>23)</sup>もある。また、膨張コンクリートは引張応力下で非線形挙動を示し、これによる変形性能がひび割れ抵抗性を改善するとの報告<sup>24)</sup>もある。膨張コンクリートの材料特性については未解明な部分も多いが、一般的には、比較的膨張量が小さい収縮補償レベルの添加量(単位膨張材量 30kg/m<sup>3</sup>程度)であれば、通常のコンクリートと材料特性に大きな相違はないと考えることができる。

近年、鋼主桁橋の場所打ち PC 床版において、温度応力等による初期ひび割れの問題が顕在化し、その対策として収縮補償レベルの膨張材の採用実績が増加してきた。これらの実績では、実橋計測や床版を 1m 程度に切出した大型模型(ダミー床版)等によりパラメトリックな試験を実施しているものもあり、その定量的評価の試みが数多く報告されている。ここでは、場所打ち PC 床版に一般的に採用されることの多い収縮補償コンクリートに着目して、その定量的評価手法の現状を整理する。

#### 3.4.2 定量的評価手法

##### 1) 膨張コンクリート設計施工指針<sup>25)</sup>

単位膨張材量が比較的大きいケミカルプレストレスコンクリートの定量的評価手法として、辻の研究<sup>22)</sup>による「単位体積あたりの膨張コンクリートが拘束鋼材に対してなす仕事量は一定である」という仮定に基づく式(1)が提案されている。本手法の特徴は、標準の一軸拘束供試体(例えば、JIS A6202)のデータが得られれば、異なる拘束鉄筋比の構造物にも適用することができ、実用的な手法と言える。

$$\sigma_{cp} = \sqrt{2U \cdot E_s \cdot pr} \quad (1)$$

U: 単位体積当たりの膨張エネルギー

(JIS 拘束膨張率試験により評価することが可能)

E<sub>s</sub>: 拘束材のヤング係数

pr: 拘束鋼材比 (A<sub>r</sub>/A<sub>c</sub>)

A<sub>r</sub>: 拘束材の断面積

A<sub>c</sub>: コンクリート断面積

しかし、膨張材量が小さい収縮補償コンクリートに対

する式(1)の適用性は不明確である。本指針では、収縮補償コンクリートは乾燥収縮によってコンクリートに生ずる引張応力を相殺すると評価するのみであり、ケミカルプレストレスの計算は省略するものと規定されている。

また、クリープの影響については、養生条件や拘束状態の影響が大きいことが記述されているが、ケミカルプレストレスの長期的な損失について具体的な算定手法は示されていない。

##### 2) FEM 解析による評価手法

文献 16) および 27) ~ 30) には、コンクリート床版と鋼桁をソリッド要素でモデル化し、コンクリートの膨張ひずみが鋼桁に拘束されることによって床版に導入される圧縮応力を算定する手法が報告されている。膨張ひずみは、実際に配置される鉄筋量と同じ量を配置したダミー床版試験の計測値が用いられている。この場合、鉄筋拘束によるケミカルプレストレスは、別途算定して足し合わせるか、もしくは安全マージンとして無視することになる。

若材齢時のコンクリートのヤング係数は時間ごとに大きく変化し、これらを逐次累加して応力計算を行うのであるが、このヤング係数の進行曲線と膨張ひずみの進行曲線の設定が結果に大きく影響することから、これら設定の標準化が望まれる。

また、クリープの影響を考慮する方法として、温度応力解析で用いられることが多い、若材齢のヤング係数を低減する有効弾性係数法が簡便であり、その適用性が現在検討されているところである。

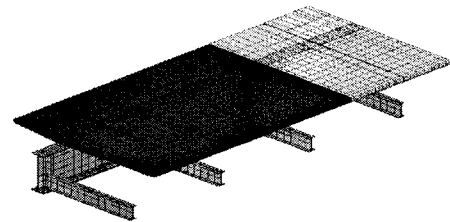


図 3-4-1 FEM 解析モデルの例<sup>24)</sup>

### 3.5 解析 WG での取組み

解析 WG で取扱うテーマは、主に若材齢時におけるコンクリート床版に生じる現象であり、輪荷重などが作用する前にコンクリート床版に蓄積される固有応力の定量的評価である。この分野は、古くから研究の対象として取り組まれてきた課題であるが、ここに挙げた様々な現象は、ほぼ同時に生じることからその分離が容易でないこと、環境条件など不確定な要因に左右されることなどから、定性的な挙動は理解されつつも、その定量的評価は未だ確立されたとは言えないテーマである。

本 WG では、解析を行うにあたり必要となる入力データについて、現行基準での取り扱いを調査し、その定量的な評価が困難、不確定因子があると思われる事項を整理する。そのすべてを厳密に把握することは難しいと考え

るが、それぞれの項目が応力解析結果に及ぼす影響度を、パラメトリックスタディの実施等によって明確にし、その重要性に優先順位をつけることを当面の課題と考える。最終的には、入力データおよび解析モデルの標準化を提案することを目標とするものである。

#### 4. おわりに

以上に PC 床版および合成床版に関する床版の構造上および床版の解析上の課題について述べた。これらの検討課題に関して、「土木学会鋼構造委員会道路橋床版の調査研究小委員会」の第3分科会の床版構造WGおよび床版解析WGにおいて、平成16年を目処に研究成果をまとめる予定である。

#### 【参考文献】

- 1) 道路橋示方書，日本道路協会
- 2) 例えば，宮崎，中野，糟谷，島田，加藤，園田：道路橋長支間床版の設計曲げモーメント式の検討，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp. 71-76，1998. 11
- 3) 例えば，本間，河西，林，松村：長支間場所打ち PC 床版（藁科川橋）の FEM 解析に基づく設計曲げモーメント，土木学会第 55 回年次学術講演会 CS-278，pp. 556-557，2000. 9
- 4) 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物（平成 9 年版），土木学会 鋼構造委員会，1997. 9
- 5) 坂本，中藪，安川，稲葉，長井：2 主桁橋における床版の死荷重曲げモーメント算定式の提案，構造工学論文集 Vol. 48A，pp. 1409-1416，2002. 3
- 6) 街道，渡辺，橋，松井，堀川：床版張出し部の輪荷重走行試験および曲げモーメント性状について，構造工学論文集 Vol. 48A，pp. 1429-1439，2002. 3
- 7) 例えば，松井，江頭，石崎：長支間床版の設計曲げモーメント式に関する 2，3 の考察，鋼構造年次論文報告集第 3 巻，pp. 215-220，1995. 11
- 8) 松井繁之：床版の技術開発—耐久性の向上，施工合理化—，橋梁と基礎（1997. 8），pp. 84-94
- 9) 横山，堀川：道路橋床版の最小厚さに関する研究，構造工学論文集，Vol. 48A（2002. 3），pp. 1169-1176
- 10) 松井，江頭，桐川：長支間 RC 床版の疲労設計法に関する一考察，構造工学論文集，Vol. 44A（1998. 3），pp. 1117-1124
- 11) 道路橋床版の新技术と性能照査型設計，（社）土木学会 鋼構造委員会 鋼橋床版の調査研究小委員会，2000. 10
- 12) 松井，竹中，安福，長谷川：らせん鉄筋を有する P c a 床版継手部の性能について（静的実験），土木学会第 54 回年次学術講演会，1999. 9
- 13) 千葉，藤井，堀川，谷口，戸川：輪荷重疲労試験によるプレキャスト RC 床版新継手の疲労特性，土木学会第 57 回年次学術講演会，2002. 9
- 14) 山本，大垣，作川，伊藤，川尻，福岡：「連続合成 2 主桁橋（千鳥の沢川橋）の PC 床版設計，施工」，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，土木学会，1998. 11
- 15) 猪熊，本間，丸山，河西：「長支間場所打ち PC 床版の設計と施工計画」，第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集，土木学会，2000. 10
- 16) 高瀬，寺田，福永，石川：場所打ち PC 床版の材齢初期における膨張材効果の評価方法に関する一提案，コンクリート工学年次論文集 Vol. 24，No. 1，2002
- 17) 土木学会，コンクリート標準示方書 設計編 [平成 8 年制定]，1996. 3
- 18) 寺田，本間，益子，玉置：場所打ち PC 床版の温度応力解析に関する一考察，土木学会第 57 回年次学術講演会 2002. 9
- 19) 吉武，中村，永井，浜田：若材齢コンクリートの水和反応進行の影響を考慮した引張クリープ推定式の提案，土木学会論文集，No. 634/V-45，1991. 11
- 20) 日本コンクリート工学協会，コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形に関するシンポジウム，2001. 7
- 21) Bazant, Baweja: Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures, Model B3, Materials and Structures, RILEM Paris, Vol. 28, pp. 357-365, 1995
- 22) 数藤，若林，岩田，松野，安田，松井：連続合成鋼 2 主桁橋 PC 床版のクリープ・乾燥収縮による経時変化，第 2 回床版シンポジウム講演論文集，2000. 10
- 23) 岡村，辻：ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の力学的特性，土木学会論文集，No. 225，1974
- 24) 細田，岸：膨張モルタルの非線形挙動とひび割れ抵抗性の機構について，土木学会論文集 No. 683，V-52
- 25) 土木学会，膨張コンクリート設計施工指針，1993. 7
- 26) 辻：コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎的研究，土木学会論文集 No. 235，1975
- 27) 倉田，江頭，和内：膨張材の効果を考慮した場所打ち PC 床版の施工時 FEM 解析，第 57 回土木学会年次学術講演会 CS-1，2002. 9
- 28) 橋，高瀬，白川，立川：1m 供試体を用いた膨張材の効果に関する実験的検証，第 57 回土木学会年次学術講演会 CS-1，2002. 9
- 29) 師山，塩永，倉田：コンクリート床版における膨張材の効果と鉄筋量の関係に関する解析的検討，第 57 回土木学会年次学術講演会 CS-1，2002. 9
- 30) 阿部，佐藤，成田，高林：少数主桁橋梁の PC 床版における膨張材による応力低減に関する実験的研究，第 57 回土木学会年次学術講演会 I-11，2002. 9