

プレストレストコンクリート橋の海外との技術比較に関する調査研究 (その 3)

プレストレストコンクリート橋の海外との技術比較に関する調査研究委員会*

1. 床版設計の比較

1.1 床版の設計条件

表 - 1 に、各国規準における設計条件の一覧を示す。

(1) 日本

1) 床版構造

道路橋示方書および設計要領第二集では、床版構造を鉄筋コンクリート (RC) 構造とするかプレストレストコンクリート (PC) 構造とするか、明確な根拠が規定されていない。しかし、活荷重によって発生する断面力を算出する方法として設計曲げモーメントの算定式が与えられており、算定式の適用範囲にしたがって、床版支間が 4 m 以下の場合に RC 床版とし、床版支間が 4 m 以上 (6 m 以下) の場合に PC 床版とするのが一つの判断基準になっている。

なお、道路橋示方書の PC 床版は、引張応力を生じさせ

ないフルプレストレス状態の規定になっているが、旧日本道路公団の設計要領第二集の規定では、PC 床版を、PRC 構造も含めた広義の意味で使用している。

2) 活荷重

活荷重は、総重量 245 kN のトラックを想定しており、輪荷重は 100 kN である。

活荷重による断面力は、道路橋示方書に与えられている設計曲げモーメントの算定式によって算出するのが基本である。算定式は、総重量 245 kN のトラックの走行頻度が比較的高い状況を想定した B 活荷重に対して規定されたもので、走行頻度が比較的低い A 活荷重による断面力は、算定式の結果を 20 % 低減して算出することとされている。

設計要領第二集においても、活荷重による断面力は道路橋示方書の算定式を引用して算出することになっている。ところが、最近、広幅員橋梁における経済性を追求した構

表 - 1 床版の設計条件

| | 道路橋示方書 (日本) | AASHTO (アメリカ) | BS (イギリス) | DIN (ドイツ) | BPEL (フランス) |
|--|--|---|--|--|---|
| 床版構造 | 算定式の適用範囲としては PC 床版 連続版: $L \leq 6.0$ m 片持ち版: $L \leq 3.0$ m RC 床版 連続版: $L \leq 4.0$ m 片持ち版: $L \leq 1.5$ m | 厚さが設計支間の 1/20 未満の場合、ひび割れ制御のために PC 床版とすべき。 | 設計者の技量で判断。 | ARS (ドイツ交通省通達) に、判定グラフあり。張出し床版長で判定、中間床版長は張出し床版長の 2 倍以下。 | 床版支間 6 m 程度が PC 床版と RC 床版の分岐点。 |
| 最小床版厚 $L = 4.75$ m の RC 床版 PC 床版 → 床版構造、中間床版厚 | 最小床版厚の規定あり。 RC: $(40L+110) = 310$ mm PC: $(30L+110) \times 0.9 = 230$ mm → PC 構造。 $t = 280$ mm | 最小床版厚の規定あり。 RC: $(L+3000) / 30 = 267$ mm PC: $0.027L = 135$ mm → PC 構造。 $t = 200$ mm (床版厚は、かぶり) と鋼材配置で決定) | 最小床版厚の規定は不明。 → RC 構造。 $t = 280$ mm | 最小床版厚の規定は不明。 → RC 構造。 $t = 280$ mm (現地技術者にヒアリング調査) | 最小床版厚の規定は不明。 → RC 構造。 $t = 280$ mm |
| 断面力の算出方法 → 活荷重の算出 | 自重・橋面荷重は、梁モデルで算出し、活荷重は、曲げモーメント算定式で算出。 → 算定式で算出 | 活荷重は、①近似解析法: ストリップ法 (フレーム)、②精密解析法 (FEM)、③経験的計設計法などで算出。 → ストリップ法・精密解析法で算出 | 一般的な弾性解析で算出。Westergard, Pucher の弾性理論や Johansen の降伏線理論でもよい。 → FEM で算出 | 版解析が標準。 → FEM で算出 | 版理論の公式、Puffer, FEM 解析などがあり、発注者との協議で決定。 → FEM で算出 |
| 照査方法 材質は、コンクリート: 40N 鉄筋: SD 390 | PC 床版 曲げ引張応力度: 0 N/mm ² (二集の規定では -2.46 N/mm ²) RC 床版 鉄筋応力度: 140 N/mm ² (SD 345) | PC 床版 曲げ引張応力度: -3.16 N/mm ² RC 床版 鉄筋応力度: $Z / (dc \cdot A)^{1/3} = 234$ N/mm ² | PC 床版 仮想曲げ引張: -5.3 N/mm ² (= ひび割れ幅: 0.15 mm) RC 床版 ひび割れ幅: 0.15 mm | PC 床版 永久荷重時: デコンプレッション ひび割れ幅: 0.2 mm RC 床版 ひび割れ幅: 0.2 mm | PC 床版 死荷重時曲げ引張: 0 N/mm ² 鉄筋応力度: 136 (241) N/mm ² RC 床版 鉄筋応力度: 136 (241) N/mm ² () 内はまれな組合せ |
| 活荷重 (トラック重量) | TL 25 ($W = 245$ kN) | HL 93 ($W = 325$ kN) | HB 荷重 ($W = 1800$ kN) | SLW 60/30 ($W = 600$ kN) | Bt 荷重 ($W = 800$ kN) |
| 荷重強度 | 輪荷重: $P = 100$ kN | 輪荷重: $P = 72.5$ kN 分布荷重: $w = 3.1$ kN/m | 輪荷重: $P = 112.5$ kN | 輪荷重: $P = 100$ kN 分布荷重: $w = 33.3$ kN/m ² | 輪荷重: $P = 160$ kN |
| 衝撃係数 組合せ係数 | 曲げモーメント算定式内に包含 記載なし ($\alpha = 1.0$) | $1 + i = 1.33$ 圧縮応力照査用: $\alpha = 1.0$ ひび割れ制御用: $\alpha = 0.8$ | 記載なし 活荷重時: $\alpha = 1.2$ (温度時は $\alpha = 1.0$) | 記載なし $\alpha = 1.0$ | $1 + i = 1.14$ まれな組合せ: $\alpha = 1.2$ 頻繁な組合せ: $\alpha = 0.72$ |
| 載荷状況 | 曲げモーメント算定式で算出 | 輪荷重および分布荷重を載荷 | 輪荷重を載荷 | 輪荷重および分布荷重を載荷 | 輪荷重を載荷 |
| 備考 | 曲げ引張応力度の () 内は、設計要領第二集の規定 | | | | いわゆる PC 床版の制限値 曲げ引張: 0 (-3.0) N/mm ² () 内はまれな組合せ |

造形式の床版が提案され始めた。鋼少数主桁橋に搭載する PC 床版や、箱桁断面をリブ付き PC 床版やストラット付き PC 床版とした事例がそれである。これら新形式の PC 床版を、床版支間の適用範囲を越えて設計する場合は、設計曲げモーメントの算定式の適用範囲を延長して用いることもあるが、床版構造を有限要素法（以下、FEM）でモデル化し、輪荷重を載荷させた状態を FEM で解析している。

3) 照査方法

横方向の設計は、主方向の設計と同様、許容応力度法によって照査している。すなわち、RC 床版であれば、コンクリートの圧縮応力度と鉄筋の引張応力度が許容値を満足するように鉄筋量を設定する。PC 床版の場合は、道路橋示方書と設計要領第二集で若干異なり、道路橋示方書は、活荷重時におけるコンクリートの応力度が引張を許容しない（許容引張応力度：0 N/mm²）が、設計要領第二集は、全死荷重時はフルプレストレス、設計荷重時は曲げひび割れ発生限界としている。

4) 試設計方針

今回の試設計では、床版支間が 4.75 m で、RC 床版にする算定式の適用範囲を超過してしまうため、PC 床版として設計を行う。活荷重は B 活荷重とする。

応力度の制限値は、諸外国がいわゆる PRC 構造であることから、設計要領第二集に準拠して、コンクリートの曲げ引張応力度をひび割れ発生限界とする。床版厚は、PC 床版としての最小床版厚の 230 mm に対して、床版横締め PC 鋼材配置の余裕等を考慮して 280 mm とする。

床版設計における照査断面は、図 - 1 に示す①断面～③断面とする。

- ①：張出し床版付根部
- ②：中間床版支点部
- ③：中間床版支間部

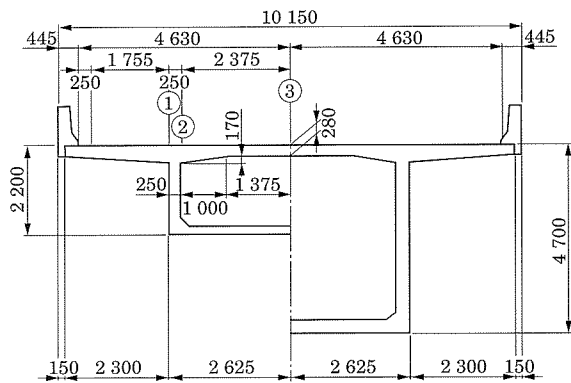


図 - 1 床版の照査断面

(2) アメリカ

1) 床版構造

AASHTO LRFD では、床版構造の決定に関連し、解説文 (c 9.7.1.1) に「床版厚さが設計支間の 1 / 20 未満の版については、ひび割れ制御のため支間方向のプレストレスングを考慮すべきである」という記載がある。最小床版厚の規定に関しては、RC 構造、PC 構造とも 175 mm 以上の規

定があるが、発注者の指定があれば、以前の Standard 版と同様の表 - 2 に示す算定式を用いることもできると記述されている。しかし、一般には両者を満足する床版厚としており、これによれば、床版の支持間隔が 5.0 m の場合、RC 構造では 267 mm 以上、PC 構造では 175 mm 以上である。

表 - 2 最小床版厚 (AASHTO Standard)

| | 単純版 | 連続版 |
|-------|----------------------|-------------------|
| RC 床版 | $1.2(L + 3000) / 30$ | $(L + 3000) / 30$ |
| PC 床版 | $0.030 L$ | $0.027 L$ |

ただし、165 mm 以上

2) 活荷重

活荷重は、HL 93 という総重量 325 kN の車両を想定しており、輪荷重として 72.5 kN、分布荷重として 3.1 kN/m² を載荷する。

AASHTO LRFD では、活荷重による断面力の算出方法に、①近似解析法、②精密解析法、③経験的設計法などがある。一般的には、近似解析法が用いられているが、床版が平行支持されて斜角がないという条件があり、特殊なケースにおいては、FEM を用いた精密解析法も多く行われているようである。

近似解析法は、死荷重の場合と同様に 2 次元フレーム解析によって算出し、床版支持間隔で決まるストリップ幅で割り戻して、活荷重による単位幅あたりの断面力とするもので、ストリップ法とも呼ばれる。精密解析法には、FEM 解析や 3 次元折板解析などがあり、FEM 解析では、WHEEL LOAD と LANE LOAD を載荷する。

3) 照査方法

設計方法は、限界状態設計法が用いられている。

RC 床版の場合は、曲げひび割れを制御するために鉄筋応力度を 234 N/mm² 以下に制限するとともに、収縮・温度に対する最小鉄筋配置を規定している。PC 床版の場合は、コンクリートの引張応力度で制限するとともに、ひび割れモーメントの 1.2 倍に抵抗する最小鉄筋量を規定している。

4) 試設計方針

今回の試設計では、床版厚は、床版横締め PC 鋼材の配置スペースとかぶり厚から 200 mm とする。床版構造は、床版厚が床版支持間隔 5.0 m の 1 / 20 (= 250 mm) 未満であるため、PC 床版とする。活荷重による断面力は、床版が平行支持されているので、算出方法が簡易である近似解析法によって算出することとする。

PC 床版との比較として、RC 床版としても設計することとし、そのときの床版厚を日本の PC 床版と同厚の 280 mm とする。また、活荷重による断面力については、近似解析法の場合と FEM の場合で算出し、解析手法の違いによる断面力の比較を行うものとする。

(3) イギリス

1) 床版構造

BS 5400 には、PC 構造と RC 構造を明確に分ける規定や通例がない。床版構造の決定は、設計者にゆだねられるのが一般的で、床版支間が 6 m 程度以下の場合は RC 床版と

するのが一般的のようである。

2) 活荷重

活荷重は、HB 荷重という 4 軸の車両が想定される。“BD 37 / 01 : Loads for Highway Bridges”¹⁾によると、HB 荷重の軸荷重は、高速道路および幹線道路、主要道路、その他公道に対して、それぞれ 450 kN (輪荷重 112.5 kN)、375 kN (輪荷重 93.75 kN)、300 kN (輪荷重 75 kN) である。

BS 5400 では、曲げモーメントおよびせん断力は一般的な弾性解析によって算出することとされており、また、Westergaard や Pucher の弾性理論や Johansen の降伏線理論を用いてもよい。

3) 照査方法

横方向の設計は、主方向の設計と同様に限界状態設計法によって行われる。限界状態は、終局荷重状態と使用限界状態が設定されており、終局限界状態は部材の破壊に対する照査を曲げおよびせん断に関して行い、使用限界状態は曲げに対する照査を行う。

床版の設計では、せん断応力度 v が、終局せん断応力度 v_c に部材厚係数 ξ_s (部材厚 2 000 mm のとき 0.70, 100 mm のとき 1.50) を乗じた値より小さい時にはせん断鉄筋は不要であることが記述されている。また、RC 部材における使用限界状態の照査項目は、ひび割れ幅の制限のほか、コンクリートの圧縮応力度が $0.50 f_{cu}$ (曲げ), $0.38 f_{cu}$ (軸圧縮), 鉄筋応力度の制限値が $0.75 f_y$ を、それぞれ上回ってはならないことが規定されている。

4) 試設計方針

今回の試設計では、HB 荷重として軸荷重 450 kN (総重量 1 800 kN) を考慮する。死荷重および活荷重はシェルを用いた FEM 解析を行い、プレストレスについてはフレーム解析を用いるものとする。なお、床版構造は、床版支間が 6 m 以下なので、今回の試設計では RC 床版とする。

(4) ドイツ

1) 床版構造

DIN 1045 では、コンクリート構造物に関する一般的な事項が規定されているのみで、床版構造の判定基準まで記載はないが、ARS (Allgemeine Rundschreiben Strassenbau : ドイツ交通省発行の通達) には、張出し床版付根厚と床版支間から判定するグラフがある。ドイツにおいては、本試設計程度の橋梁規模の場合、RC 床版を採用している事例が多いようである。

2) 活荷重

活荷重は SLW 60 / 30 という総重量 600 kN の 6 輪車両を想定している。

活荷重による断面力の算出方法に関し、DIN 1045 には明確な記載がないが、DIN 1045 規準設計アプリケーションの手法説明では従来どおり版解析を標準としている。

3) 照査方法

横方向の設計は、主方向の設計と同様に限界状態設計法によって行われる。使用限界状態における許容ひび割れ幅は 0.2 mm である。なお、主方向の設計で行ったように、 $(D + 0.2 \times L + 0.9 \times P)$ という荷重組合せ (若干の活荷重を考慮するとともにプレストレスを低減) においてデコ

ンプレッション状態であることを確認する必要がある。

ひび割れ幅の算出方法には、鉄筋応力度と鉄筋径等から直接算出する方法と、いくつかの簡略化した前提条件を導入することで推定する方法の 2 つの方法がある。

4) 試設計方針

今回の試設計では、線形 FEM 解析によって活荷重による断面力を算出することとする。床版構造は、現地技術者に問い合わせた結果を踏まえて RC 床版とし、上床版厚は、日本の PC 床版と同厚の 280 mm とする。支間中央部のウェブ厚は、主方向の設計では 340 mm であるが、床版の設計では、ウェブ間隔を日本の場合と合わせるために、ウェブ厚を 250 mm とする。

(5) フランス

1) 床版構造

BPEL 91 には、RC 床版と PC 床版の適用範囲の決めはない。床版支間 6 m 程度が両者の分岐点になっており、床版支間が 6 m 以下の場合には RC 床版とするのが一般的のようである。

2) 活荷重

活荷重は、Bt 荷重というトラック荷重を想定しており、輪荷重 160 kN、車体幅は 3.0 m で、後輪と後輪の軸間隔は 1.35 m である。BPEL 91 の制定時に比べて荷重が増加したため、使用限界状態の場合で 1.2、終局限界状態の場合で 1.07 の係数を乗じている。また、衝撃係数の算出式が与えられている。

活荷重による断面力の算出方法は、版理論の公式や、Puffer, FEM 解析等があり、発注者と設計者との協議によって決めている。

3) 照査方法

設計方法は、限界状態設計法が用いられている。

荷重の組合せにおける活荷重の係数は、使用限界状態のまれな組合せの場合で 1.2、頻繁な組合せの場合で 0.72、終局限界状態では 1.6 である。鉄筋 SD 390 の使用限界状態における制限値は、頻繁な荷重組合せの場合 136 N/mm^2 ($= 0.35 f_c$)、まれな組合せの場合

$$241 \text{ N/mm}^2 = \min \left[2/3 \cdot f_c, 110 \sqrt{1.6 \times (0.6 + 0.06 f_c)} \right] \text{ である。}$$

4) 試設計方針

今回の試設計では、FEM 解析を用いて活荷重による断面力を算出する。床版構造は、床版支間が 6 m 以下であることから RC 床版とする。支間中央部のウェブ厚は、主方向の設計では 300 mm であるが、床版の設計では、ウェブ間隔を日本の場合と合わせるために 250 mm とする。

1.2 床版設計の比較分析

(1) 床版構造

今回の試設計では、幅員 10 m の箱桁床版を対象とした。RC 床版の支間は、道路橋示方書の算定式の適用範囲としては 4 m 以下であり、日本の場合には PC 床版とした。諸外国の場合、各国の規準に明確な記載はないが、現地技術者のヒアリング調査結果等を踏まえて、アメリカ (AASHTO LRFD) は PC 床版、イギリス (BS 5400)、ドイツ (DIN

1045) およびフランス (BPEL 91) は RC 床版とした。

床版厚は、表 - 3 に示すように、AASHTO LRFD の場合は独自に 200 mm に設定したが、それ以外の BS 5400, DIN 1045 および BPEL 91 における床版厚は、道路橋示方書の PC 床版厚の 280 mm を準用したにすぎず、各規準 (BS 5400, DIN 1045 および BPEL 91) の RC 床版厚が道路橋示

表 - 3 床版構造と床版厚

| | | 道路橋示方書 (日本) | AASHTO (アメリカ) | BS (イギリス) | DIN (ドイツ) | BPEL (フランス) |
|----------|----|----------------|------------------|--------------|--------------|----------------|
| 床版 構造 | PC | ○ | ○ | | | |
| | RC | | | ○ | ○ | ○ |
| 床版厚 | | 280 mm | 200 mm | 280 mm | 280 mm | 280 mm |

方書の PC 床版厚と同じになるように規定されているというわけではない。

(2) 活荷重強度・衝撃係数

活荷重は、表 - 4 に示すように、道路橋示方書の場合、245 kN のトラック荷重を想定しており、1 輪あたりの荷重は 100kN である。設計要領第二集では、かつては TT 43 という大型トレーラーを考慮して割増係数を乗じていた時期もあったが、現在では道路橋示方書の荷重値と同じ活荷重が用いられている。AASHTO LRFD, BS 5400 および DIN 1045 の場合は、1.5 ~ 7 倍の総重量であるが、1 輪あたりの荷重は 72.5 ~ 112.5 kN と同程度である。BPEL 91 の場合は、総重量が約 3 倍、1 輪あたりの荷重も 1.6 倍の 160 kN と大きいのが特徴的である。

活荷重の衝撃については、道路橋示方書の場合、算定式に包含されているため、輪荷重による断面力の理論的根拠が不明確であるとともに、衝撃としてどの程度を見込んでいるかを分離することができない。諸外国の規準のうち、衝撃を明確に規定しているのは AASHTO LRFD (= 1.33) と BPEL 91 (= 1.14) である。BS 5400 と DIN 1045 は、衝撃に関する記述がないため、ここでは 1.0 として活荷重による断面力を算出した。組合せ係数は、AASHTO LRFD (圧縮応力度照査用の SERVICE I : 1.0, ひび割れ制御用の SERVICE II : 0.8), BS 5400 (活荷重時を照査する

表 - 4 活荷重強度

| | 道路橋示方書 (日本) | AASHTO (アメリカ) | BS (イギリス) | DIN (ドイツ) | BPEL (フランス) |
|------|----------------|------------------|--------------|--------------|----------------|
| 車両重量 | 245 kN | 325 kN | 1 800 kN | 600 kN | 800 kN |
| 輪荷重 | 100 kN | 73 kN | 113 kN | 100 kN | 160 kN |

Combination1 : 1.2), BPEL 91 (まれの組合せ : 1.2, 頻繁な組合せ : 0.72) で規定されている。

(3) 活荷重による断面力

活荷重による断面力は、道路橋示方書の場合、床版支間と輪荷重強度を変数とする算定式を用いて算出した。諸外国の規準の場合は、道路橋示方書のように簡易式が与えられていないので、輪荷重を集中荷重 (あるいは載荷範囲を考慮した分布荷重) として、また車両荷重を分布荷重として載荷したモデルを FEM によって解析した。

活荷重による断面力は、道路橋示方書と各規準を比較すると、表 - 5 のとおりである。床版方向の断面力を道路橋

表 - 5 活荷重による断面力

| | 道路橋示方書 (日本) | AASHTO (アメリカ) | BS (イギリス) | DIN (ドイツ) | BPEL (フランス) |
|------|----------------|------------------|--------------|--------------|----------------|
| 計算方法 | 算定式 | ストリップ法 | FEM | FEM | FEM |
| 床版方向 | 100 % | 34 ~ 96 % | 96 ~ 153 % | 44 ~ 64 % | 107 ~ 160 % |
| 橋軸方向 | 100 % | 規定なし | 52 ~ 74 % | 34 ~ 47 % | 76 ~ 174 % |

示方書の場合と比べると、AASHTO LRFD で 34 ~ 96 %, BPEL 91 で 107 ~ 160 % である。

(4) PC 床版としての設計結果

PC 床版として設計を行った結果、表 - 6 に示すように、道路橋示方書で設計する場合、床版横締め PC 鋼材の配置間隔は 625 mm となった。AASHTO LRFD の場合は、道路橋示方書での床版厚よりも薄い 200 mm であるにもかかわらず 1 250 mm となったが、これは床版横締め PC 鋼材量を決定する中間床版中央断面における活荷重による断面力が小さい (道路橋示方書の 34 %) ためである。

各規準によって、床版横締め PC 鋼材量の決定根拠は異なり、発生断面力の差異も加味する必要があるが、結果的にもっとも厳しい状態は、道路橋示方書の活荷重時であった。DIN 1045 と BPEL 91 は、活荷重時の制限値が緩いため、死荷重時 (引張応力を発生させない) で決まり、床版横締め PC 鋼材の配置間隔は両者とも 1 000 mm となった。BS 5400 の場合は、配置間隔が 2 000 mm と広いが、床版厚を

表 - 6 PC 床版としての設計結果

| | 道路橋示方書 (日本) | AASH (アメリカ) | BS (イギリス) | DIN (ドイツ) | BPEL (フランス) | |
|------|----------------|----------------|--------------|--------------|----------------|------------|
| 床版厚 | 280 mm | 200 mm | 280 mm | 280 mm | 280 mm | |
| 鋼材間隔 | 625 mm | 1 250 mm | 2 000 mm | 1 000 mm | 1 000 mm | |
| 制限値 | 死荷重時 | フルプレストレス (0) | 曲げ引張 (-3.16) | 照査外 | デコンプレッション (0) | 曲げ引張 (0) |
| | 活荷重時 | 曲げ引張 (-2.46) | 曲げ引張 (-3.16) | 仮想曲げ (-5.3) | ひび割れ幅 (0.2 mm) | 鉄筋応力 (241) |
| 備考 | | | | | まれの組合せ | |

網掛けは、横締め鋼材量の決定根拠、応力度の単位は、N/mm²

240mm にすると配置間隔は 1 000 mm になり、AASHTO LRFD に似た状態であった。

(5) 橋軸方向の設計

橋軸方向の鉄筋量は、表 - 7 に示すように、床版方向の設計結果と同様、道路橋示方書の場合にもっとも多く必要

表 - 7 橋軸方向の設計結果

| | 道路橋示方書 (日本) | AASHTO (アメリカ) | BS (イギリス) | DIN (ドイツ) | BPEL (フランス) |
|------|----------------|------------------|-----------------|----------------|----------------|
| 鉄筋量 | 100 % | 22 ~ 32 % | 64 ~ 69 % | 37 ~ 53 % | 64 ~ 100 % |
| 決定根拠 | 鉄筋応力 (140) | 最小鉄筋 | ひび割れ幅 (0.15 mm) | ひび割れ幅 (0.2 mm) | 鉄筋応力 (136) |
| 備考 | | | | | まれの組合せ |

応力度の単位は、N/mm²

であることがわかった。AASHTO LRFDでは、PC床版の場合における橋軸方向の規定がないことが特徴的である。

1.3 床版設計についての考察

(1) 床版構造の決定根拠について

床版構造の決定根拠は、活荷重（輪荷重）の大小とも相関しておらず、不明確であるが、RC床版となるのがイギリス・ドイツ・フランスのヨーロッパ諸国であることから、大陸規模での地域性や歴史的背景、耐久性や補修等に対する考え方などが内在しているものと推測される。

日本の場合には、旧規準でつくられた床版に不具合が生じた経緯があり、RC床版の最小床版厚を増厚する改訂や、RC床版の床版支間は3m以下が望ましいなどの知見が示されている。一方、ヨーロッパ諸国では、RC床版が、日本よりも広い床版支間でも採用されるようであるが、過積載車両の通行がなく床版の損傷が生じにくいいためか、床版打替を是認してでも初期コストを抑えることを善としてのことか、本試設計の検討範囲内ではその真意を明確にするには至っていない。

(2) 活荷重による断面力の算出方法について

主桁の設計では、死荷重による断面力と活荷重による断面力の比率が8：2程度であるため、活荷重が断面力や主方向PC鋼材量に与える影響は小さい。ところが、床版

の設計の場合、死荷重と活荷重による断面力の割合が同程度であるため、活荷重による断面力の変動が床版横締めPC鋼材量に及ぼす影響は大きい。

日本においても、昭和53年に制定された当時の道路橋示方書の算定式を適用するのではなく、輪荷重を実際に載荷したモデルを解析して適切な衝撃係数で割り増した断面力を用い、合理的に設計するような改定が望まれる。

2. 概算工費の比較

2.1 概算工費の算出条件

(1) 数量計算

試設計計算の結果を踏まえ、概略数量の算出を行った。また、鉄筋量については、コンクリート1m³当たりの鉄筋量を算出して、それを全コンクリートの体積に掛け合すといった方法によることとし、1m³当たりの鉄筋量は、柱頭部主桁部分の橋軸方向1m当たりの鉄筋量と、支間中央付近の主桁部の橋軸方向1m当たりの鉄筋量とを算出し、その平均値をコンクリート1m³当たりの鉄筋量とした。

(2) 直接工事費の算出

5箇国の概略数量を基に、それぞれの橋梁を日本の同じ環境下で施工すると仮定して、橋面工費を含まない直接工事費を算出することとした。また、各工種の単価設定は、

表-8 各規準による上部工概算数量および概算直接工事費比較表

| 名称 仕様 | 単価 | 単位 | 道路橋示方書(日本) | | AASHTO(アメリカ) | | BS(イギリス) | | DIN(ドイツ) | | BPEL(フランス) | | | | | | |
|-------------------|-----------|----------------|------------|-------------------------------------|--------------|---------|-------------------------------------|-------------|----------|-------------------------------------|-------------|---------|-------------------------------------|-------------|---------|-------------------------------------|-------------|
| | | | 数量 | 金額 | 数量 | 金額 | 数量 | 金額 | 数量 | 金額 | 数量 | 金額 | | | | | |
| 直接工事費 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 主桁製作工 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| コンクリート工 ① | 25 000 | m ³ | 1 339.0 | 0.761m ³ /m ² | 33 475 000 | 1 271.0 | 0.722m ³ /m ² | 31 775 000 | 1 304.0 | 0.741m ³ /m ² | 32 600 000 | 1 460.0 | 0.830m ³ /m ² | 36 500 000 | 1 335.0 | 0.759m ³ /m ² | 33 375 000 |
| 型枠工 外枠張出し部 ② | 13 000 | m ² | 1 977.0 | | 25 701 000 | 1 977.0 | | 25 701 000 | 1 977.0 | | 25 701 000 | 1 977.0 | | 25 701 000 | 1 977.0 | | 25 701 000 |
| 型枠工 外枠支保工部 ③ | 10 000 | m ² | 943.0 | | 9 430 000 | 943.0 | | 9 430 000 | 943.0 | | 9 430 000 | 943.0 | | 9 430 000 | 943.0 | | 9 430 000 |
| 型枠工 内枠 ④ | 10 000 | m ² | 1 837.0 | | 18 370 000 | 1 867.0 | | 18 670 000 | 1 864.0 | | 18 640 000 | 1 797.0 | | 17 970 000 | 1 824.0 | | 18 240 000 |
| 型枠工 小口枠 ⑤ | 10 000 | m ² | 252.0 | | 2 520 000 | 220.0 | | 2 200 000 | 233.0 | | 2 330 000 | 269.0 | | 2 690 000 | 244.0 | | 2 440 000 |
| ②+③+④+⑤=A | | | | | 56 021 000 | | | 56 001 000 | | | 56 101 000 | | | 55 791 000 | | | 55 811 000 |
| ①+A=B | | | | | 89 496 000 | | | 87 776 000 | | | 88 701 000 | | | 92 291 000 | | | 89 186 000 |
| 各国のB-日本のB | | | | | 0 | | | -1 720 000 | | | -795 000 | | | 2 795 000 | | | -310 000 |
| 鉄筋工 ⑥ | 190 000 | ton | 226.3 | 169 kg/m ³ | 42 997 000 | 156.8 | 123 kg/m ³ | 29 792 000 | 247.1 | 190 kg/m ³ | 46 949 000 | 181.0 | 124 kg/m ³ | 34 390 000 | 214.9 | 161 kg/m ³ | 40 831 000 |
| 各国の⑥-日本の⑥ | | | | | 0 | | | -13 205 000 | | | 3 952 000 | | | -8 607 000 | | | -2 166 000 |
| PC工(縦締め12S12.7) ⑦ | 1 400 000 | ton | 20.3 | 15.2 kg/m ³ | 28 420 000 | 14.3 | 11.3 kg/m ³ | 20 020 000 | 18.7 | 14.3 kg/m ³ | 26 180 000 | 20.8 | 14.2 kg/m ³ | 29 120 000 | 21.5 | 16.1 kg/m ³ | 30 100 000 |
| PC工(縦締め19S15.2) ⑧ | 1 200 000 | ton | 24.6 | 18.4 kg/m ³ | 29 520 000 | 23.8 | 18.4 kg/m ³ | 28 560 000 | 28.2 | 21.6 kg/m ³ | 33 840 000 | 24.6 | 16.8 kg/m ³ | 29 520 000 | 28.1 | 21.1 kg/m ³ | 33 720 000 |
| ⑦+⑧=C | | | | | 57 940 000 | | | 48 580 000 | | | 60 020 000 | | | 58 640 000 | | | 63 820 000 |
| 各国のC-日本のC | | | | | 0 | | | -9 360 000 | | | 2 080 000 | | | 700 000 | | | 5 880 000 |
| PC工(横締め14S21.8) ⑨ | 1 800 000 | ton | 8.1 | 6.1 kg/m ³ | 14 580 000 | 3.7 | 2.9 kg/m ³ | 6 660 000 | 0.0 | - kg/m ³ | 0 | 0.0 | - kg/m ³ | 0 | 0.0 | - kg/m ³ | 0 |
| ⑦+⑧+⑨=D | | | | | 72 520 000 | | | 55 240 000 | | | 60 020 000 | | | 58 640 000 | | | 63 820 000 |
| 各国のD-日本のD | | | | | 0 | | | -17 280 000 | | | -12 500 000 | | | -13 880 000 | | | -8 700 000 |
| 架設工 ⑩ | 20 000 | ton | 3 348.0 | | 66 960 000 | 3 178.0 | | 63 560 000 | 3 260.0 | | 65 200 000 | 3 650.0 | | 73 000 000 | 3 338.0 | | 66 760 000 |
| 支承工 ⑪ | | kN 番 | 2 500.0 | | 10 000 000 | 2 300.0 | | 9 200 000 | 2 300.0 | | 9 200 000 | 2 600.0 | | 10 400 000 | 2 400.0 | | 9 600 000 |
| ⑩+⑪=E | | | | | 76 960 000 | | | 72 760 000 | | | 74 400 000 | | | 83 400 000 | | | 76 360 000 |
| 各国のE-日本のE | | | | | 0 | | | -4 200 000 | | | -2 560 000 | | | 6 440 000 | | | -600 000 |
| 直接工事費計 | | | | | 281 973 000 | | | 245 568 000 | | | 270 070 000 | | | 268 721 000 | | | 270 197 000 |
| 各国の直工-日本の直工 | | | | | 0 | | | -36 405 000 | | | -11 903 000 | | | -13 252 000 | | | -11 776 000 |
| 日本を1.0とした直接工事費の比率 | | | | | 1.00 | | | 0.87 | | | 0.96 | | | 0.95 | | | 0.96 |

(社) プレストレスト・コンクリート建設業協会の保有する実績を基に定めることと表 - 8 に各規準による工事費比較を示す。

各国における実際の工事費には、物価、為替レート、品質規格等さまざまな要因が関係しているため、この結果の差異をそのまま各国の建設コストの差と見なすことはできないが、設計規準の違いにより算出された主要材料の差が、どの程度工事費に反映されるのかを比較するための尺度の1つとなると考える。

2.2 概算工費の比較分析

(1) コンクリート数量について

コンクリート数量の差異は、表 - 9 に示すように、各規準で部材厚が異なることが要因である。

DIN 1045 の最小ウェブ厚は、規定により 340 mm とする

表 - 9 各規準による部材厚表

| | 道路橋示方書 (日本) | AASHTO (アメリカ) | BS 5400 (イギリス) | DIN (ドイツ) | BPEL (フランス) |
|--------|----------------|------------------|-------------------|--------------|----------------|
| ウェブ厚最大 | 400 | 250 | 250 | 500 | 400 |
| ウェブ厚最小 | 250 | 250 | 250 | 340 | 300 |
| 下床版厚最大 | 300 | 300 | 500 | 500 | 250 |
| 下床版厚最小 | 200 | 200 | 250 | 200 | 200 |

ため、他の規準に対し多少数量が多くなっている (BPEL 91 は 300 mm, その他の規準は 250 mm)。

また、AASHTO LRFD の上床版は、プレストレスを導入することにより床版厚を 200 mm としたため、その他の規準より多少数量が少なくなっている (他の規準は 280 mm)。

(2) 横方向 (上床版) 構造について

道路橋示方書・AASHTO LRFD は PC 構造、BS 5400・DIN 1045・BPEL 91 は RC 構造であり、PC 鋼材 (21.8 mm を使用) の配置間隔は、道路橋示方書が 625 mm, AASHTO LRFD が 1250 mm である。

(3) 鉄筋量 (1 m² 当たり) について

表 - 10 に各規準による配筋表を示す。

・上床版の橋軸直角方向

BS 5400 および BPEL 91 は D 25, D 19 を配筋 (RC 床版) DIN 1045 も RC 床版であるが D 19 を配筋

・上床版の橋軸方向

道路橋示方書および BPEL 91 は D 19 (D 16) を配筋, AASHTO LRFD および DIN 1045 は D 13 を配筋

・標準部 (支間中央当り) の下床版橋軸方向

道路橋示方書, BS 5400 および BPEL 91 は D 25 を 125 mm 間隔で配筋, AASHTO LRFD は D 16 を配筋

表 - 10 各規準による配筋表

| 柱頭部断面 | 道路橋示方書 (日本) | | | AASHTO (アメリカ) | | | BS 5400 (イギリス) | | | DIN (ドイツ) | | | BPEL (フランス) | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------------|---------|---------|----------------|---------|---------|-----------|---------|---------|-------------|---------|---------|-----|
| | 鉄筋径 | 間隔 (mm) | 重量 (kg) | 鉄筋径 | 間隔 (mm) | 重量 (kg) | 鉄筋径 | 間隔 (mm) | 重量 (kg) | 鉄筋径 | 間隔 (mm) | 重量 (kg) | 鉄筋径 | 間隔 (mm) | 重量 (kg) | |
| 直角方向鉄筋 (1 m 当たり) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| スターラップ | D 16 | 125 | 256 | D 13 | 125 | 160 | D 19 | 125 | 392 | D 19 | 100 | 456 | D 13 | 125 | 160 | |
| 上スラブ | 上 | D 16 | 125 | 120 | D 13 | 125 | 80 | D 25 | 125 | 312 | D 19 | 125 | 176 | D 25 | 125 | 312 |
| | 下 | D 16 | 125 | 120 | D 13 | 125 | 80 | D 19 | 125 | 152 | D19D13 | 125 | 137 | D 19 | 125 | 176 |
| 下スラブ | 上 | D 19 | 125 | 96 | D 16 | 125 | 64 | D 13 | 125 | 40 | D 13 | 150 | 34 | D 13 | 250 | 24 |
| | 下 | D 16 | 125 | 72 | D 16 | 125 | 72 | D 13 | 125 | 40 | D 13 | 150 | 37 | D 13 | 250 | 24 |
| 橋軸方向鉄筋 (1 m 当たり) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 上スラブ | 上 | D 13 | 250 | 46 | D 13 | 250 | 46 | D 13 | 250 | 46 | D 13 | 150 | 65 | D 13 | 250 | 46 |
| | 下: 張出し | D 16 | 125 | 72 | D 13 | 250 | 23 | D 13 | 125 | 45 | D 13 | 150 | 32 | D 13 | 125 | 46 |
| | 下: 中間部 | D 19 | 125 | 104 | D 13 | 250 | 23 | D 16 | 125 | 74 | D 13 | 150 | 31 | D 19 | 125 | 104 |
| ウェブ | | D 13 | 250 | 73 | D 13 | 250 | 73 | D 13 | 250 | 78 | D 13 | 200 | 84 | D 13 | 200 | 87 |
| 下スラブ | 上 | D 13 | 250 | 23 | D 13 | 250 | 23 | D 13 | 250 | 24 | D 13 | 200 | 23 | D 13 | 250 | 23 |
| | 下 | D 13 | 250 | 23 | D 13 | 250 | 23 | D 13 | 250 | 24 | D 13 | 200 | 27 | D 13 | 250 | 23 |

| 標準部断面 | 道路橋示方書 (日本) | | | AASHTO (アメリカ) | | | BS 5400 (イギリス) | | | DIN (ドイツ) | | | BPEL (フランス) | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------------|---------|---------|----------------|---------|---------|-----------|---------|---------|-------------|---------|---------|-----|
| | 鉄筋径 | 間隔 (mm) | 重量 (kg) | 鉄筋径 | 間隔 (mm) | 重量 (kg) | 鉄筋径 | 間隔 (mm) | 重量 (kg) | 鉄筋径 | 間隔 (mm) | 重量 (kg) | 鉄筋径 | 間隔 (mm) | 重量 (kg) | |
| 直角方向鉄筋 (1 m 当たり) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| スターラップ | D 13 | 125 | 80 | D 13 | 125 | 80 | D 13 | 250 | 40 | D 13 | 250 | 38 | D 13 | 125 | 80 | |
| 上スラブ | 上 | D 16 | 125 | 120 | D 13 | 125 | 80 | D 25 | 125 | 312 | D 19 | 125 | 176 | D 25 | 125 | 312 |
| | 下 | D 16 | 125 | 120 | D 13 | 125 | 80 | D 19 | 125 | 152 | D19D13 | 125 | 132 | D 19 | 125 | 176 |
| 下スラブ | 上 | D 13 | 125 | 40 | D 16 | 125 | 64 | D 13 | 125 | 40 | D 13 | 150 | 34 | D 13 | 250 | 24 |
| | 下 | D 13 | 125 | 40 | D 16 | 125 | 72 | D 13 | 125 | 40 | D 13 | 150 | 37 | D 13 | 250 | 24 |
| 橋軸方向鉄筋 (1 m 当たり) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 上スラブ | 上 | D 13 | 250 | 46 | D 13 | 250 | 46 | D 13 | 250 | 46 | D 13 | 150 | 65 | D 13 | 250 | 46 |
| | 下: 張出し | D 16 | 125 | 72 | D 13 | 250 | 23 | D 13 | 125 | 45 | D 13 | 150 | 32 | D 13 | 125 | 46 |
| | 下: 中間部 | D 19 | 125 | 104 | D 13 | 250 | 23 | D 16 | 125 | 74 | D 13 | 150 | 31 | D 19 | 125 | 104 |
| ウェブ | | D 13 | 250 | 46 | D 13 | 250 | 46 | D 13 | 250 | 32 | D 13 | 200 | 32 | D 13 | 250 | 41 |
| 下スラブ | 上 | D 25 | 125 | 183 | D 16 | 125 | 72 | D 19 | 125 | 115 | D 13 | 200 | 23 | D 13 | 250 | 23 |
| | 下 | D 25 | 125 | 183 | D 16 | 125 | 72 | D 25 | 125 | 216 | D 25 | 200 | 107 | D 25 | 125 | 183 |

：比較的少ない

：比較的多い

(最大引張応力度：道路橋示方書 = - 6.1 N/mm²,
AASHTO LRFD = - 1.3 N/mm², BS 5400 = - 5.0 N/mm²,
DIN 1045 = - 3.5 N/mm², BPEL 91 = - 4.0 N/mm²)

(4) PC 鋼材について

表 - 11 に各規準による PC 鋼材本数を示す。AASHTO LRFD と BS 5400 で PC 鋼材量が少ないのは、表 - 9 に示すように、ウェブ厚を薄くでき、自重による断面力が小さくなったことが主因であると考えられる。

表 - 11 各規準による PC 鋼材本数

| | 道路橋示方書 (日本) | AASHTO (アメリカ) | BS 5400 (イギリス) | DIN (ドイツ) | BPEL (フランス) |
|-----------------------------------|----------------|------------------|-------------------|--------------|----------------|
| 架設ケーブル (内ケーブル 12S12.7) | 26 本 | 20 本 | 22 本 | 26 本 | 26 本 |
| 側径間連続ケー ブル (外ケーブル 19S15.2) | 6 本 | 6 本 | 6 本 | 6 本 | 6 本 |
| 中央径間連続 ケーブル (外ケーブル 19S15.2) | 6 本 | 6 本 | 8 本 | 6 本 | 8 本 |

2.3 概算工費についての考察

各国の規準に従って試設計を行い、工事費を算出した結果(表 - 8)を見ると、PC 鋼材数量の増減、鉄筋数量の増減の順で、全体工事費におよぼす影響が大きいことがわかる。

BS 5400, DIN 1045 および BPEL 91 については、床版を RC 構造としていることにより、PC 鋼材数量が道路橋示方書と比較して小さな値となる。さらに DIN 1045 については、RC 床版として配筋される鉄筋量と、主方向の PC 鋼材量が比較的少ないことにより、BS 5400, DIN 1045 および BPEL 91 の中では一番安価となった。

AASHTO LRFD については、上床版厚を他の規準に比べ 80 mm 薄くしていることによる影響で、コンクリート数量が少なくなっており、さらに死荷重減により、支承工や架設工といった工費が削減している。また、主方向の PC 鋼材量が 5 つの規準の中で一番少ないこと、上床版の橋軸方向鉄筋量が他の規準と比較して少なくなったことにより、工事費がもっとも安くなったと考えられる。

3. ま と め

本研究では、高速道路のプレストレストコンクリート橋に関して、日本の規準と海外の規準の AASHTO LRFD (アメリカ)・BS 5400 (イギリス)・DIN 1045 (ドイツ)・BPEL 91 (フランス) を用いて実際の橋梁の比較設計をおこなった。仕様規定である道路橋示方書に比べ、海外の規準は主に性能規定となっており、かなりの部分で技術者の判断による裁量が許されているため、今回の試設計で規準から読みとれない部分についてはできるかぎり各国の実務者にヒアリングをおこなった。結果的にはミニマムの設計になっている可能性があるものの、さまざまな知見が得られた。本研究の成果が、今後の道路橋示方書の改訂にあたっての参考資料となることを期待する。その際、大きなテーマとして、

- ・使用限界状態におけるコンクリートの制限値
- ・限界状態設計法に向けた荷重係数と安全係数
- ・耐久性を確保した床版の合理的な設計法

が挙げられる。

ヨーロッパは、ユーロコードを基本にして各国独自の規準の細部を規定する作業が進行中である。各国で車両規制はあるにしても、国境を越えて車両が行き交う状態に対して違った荷重と制限値で設計すると、おのおのの構造物が持つ安全性の差をどのようにキャリブレーションするかが最後の課題として残るといわれている。道路橋示方書を改訂する際は、材料のばらつきや供給環境・施工の不確実性などわが国特有の歴史や事情を鑑み、また、国策としての安全性の付与など総合的に調査・検討したうえで行わなければならない。今後は、耐久性にかかわる事項に関する各国の違いを比較し、ライフサイクルコストに対する考え方を整理していくことが課題である。

参 考 文 献

- 1) Design Manual for Roads and Bridges Part14 BD37/01 : Loads for Highway Bridges, 2001

その3執筆者

今村 晃久・山藤 俊広・中山 良直

加藤 卓也・越野 英樹・今枝 拓也

(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会)

【2005年11月29日受付】