

講座

吊床版橋の設計と施工（上）

則 武 邦 具*
熊 谷 紳 一 郎**

1 はじめに

吊床版橋は、橋台間に張り渡して緊張した PC 鋼材を薄いコンクリートで包み込んで床版とし、その上を人や車輛が直接通れるようにした形式の橋である。この形式の橋は、吊構造であるため座屈の問題が無く、材料の特性を生かした軽くて薄い構造が可能となる。

吊床版橋の構造的な特徴は、コンクリート床版が、活荷重の伝達や PC 鋼材の防錆のためばかりでなく、高い伸び剛性を有する引張部材として、また、曲げやねじりに対する補剛桁として全体剛性の改善に大きく寄与する主構造部材として作用することにある。

近年、吊床版橋の構造的な合理性や自然に調和したスレンダーな景観が評価され、実績も増えてきている。

この講座では、吊床版橋の歴史と実績、設計、施工、将来の展望について、上下2回に分けて述べることにする。

2 吊床版橋の歴史と実績

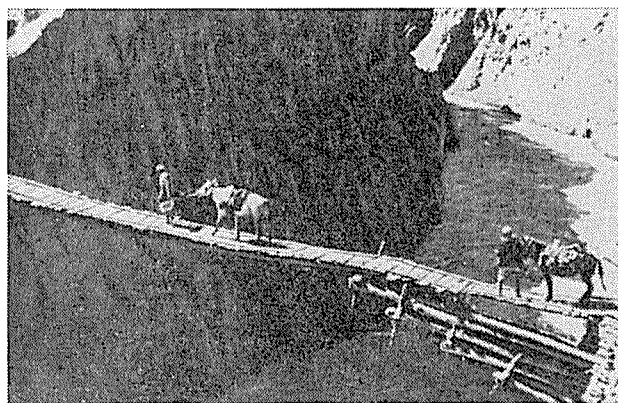
吊構造は、比較的長支間の構造として古代から広く応用されており、基本的には今日の吊床版橋と同様のものが、藤づるなどを利用して中国奥地や中央アジア各地に架けられ、栈道橋として使用されてきた（写真—1）。

今日の吊床版橋は、1958年に西ドイツにある Dyckerhoff & Widmann 社の U. Finsterwalder 博士が、ボスポラス海峡横断橋計画に初めて提案したものである（図—1）。

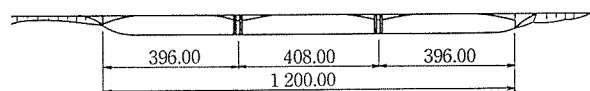
* Kunitomo NORITAKE：住友建設（株）土木部部长

** Shinichiro KUMAGAI：住友建設（株）土木部土木開発課課長

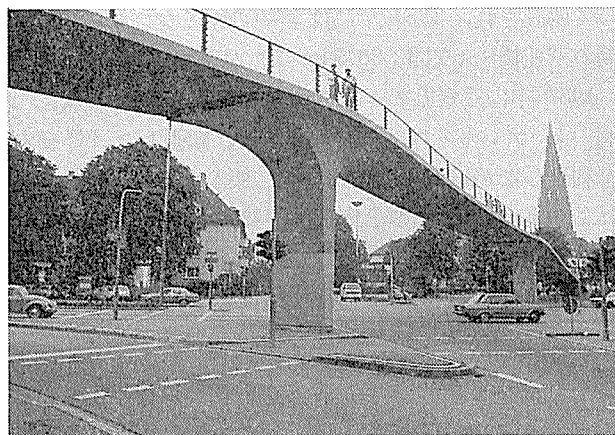
この提案は採用には至らなかったが、1964年にスイスのセメント工場においてベルトコンベアー用の吊床版橋が建設され、その後、西ドイツのフライブルグ市内の歩道橋（写真—2）など十数橋がヨーロッパ各地で建設さ



写真—1 ヤルカンド川峡谷の吊栈道橋



図—1 U. Finsterwalder 提案のボスポラス海峡橋計画案



写真—2 フライブルグ市内の歩道橋

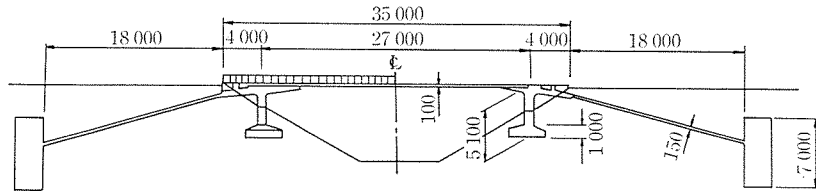


図-2 大阪万博9号歩道橋

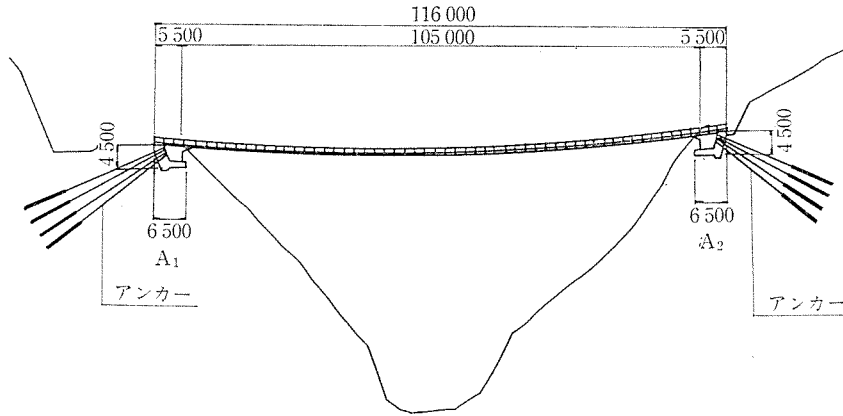


図-3 梅の木轟公園吊橋

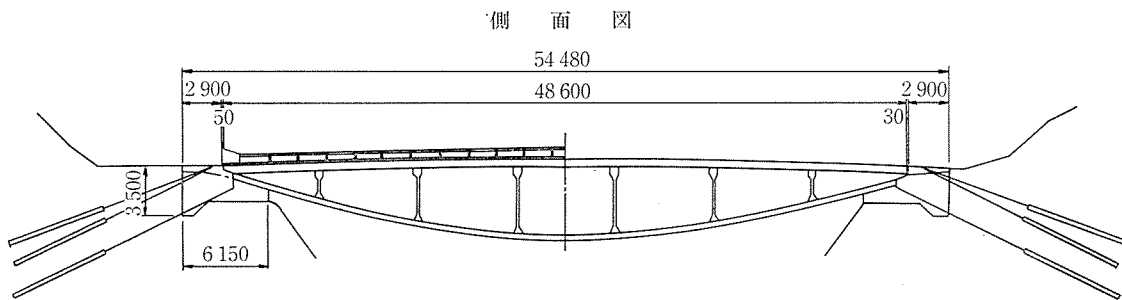


図-4 速日峰橋

れた。

一方、わが国においても、吊床版橋を勉強しようとする官民を越えた若手の技術者たちが、1961年に「吊床版研究グループ」を組織し、その成果を雑誌「道路」などに発表¹⁾した。1969年大阪万博会場内に吊支間21mの9号歩道橋²⁾(図-2)が支保工施工によりわが国で初めて建設され、1984年には宮崎のキャンプ場内で2径間の双龍橋³⁾(支間:36.5m×2)が建設された。

1987年に愛媛県のゴルフ場に支間63mのひぐらし橋⁴⁾が、プレキャスト化した床版を、緊張したPC鋼材を利用しながら支保工を用いずに架設する方法で施工されて以来、長い支間の吊床版橋が架けられるようになり、熊本県泉村に支間105mの梅の木轟公園吊橋(図-3)が建設されるに至っている。

また、1971年、吊床版を応用した構造として、逆アーチ形の吊床版上に脚柱を建て込み、その上部に車道用の床版を載せたKollstrommen橋が建設され、わが国でも1977年宮崎県に速日峰橋⁵⁾(図-4)が建設された。

表-1 わが国の吊床版橋の施工実績

橋名	所在地	完成年	吊支間	備考
万国博9号歩道橋	(大阪)	1969	21.0 m	現在撤去
速日峰橋	宮崎県	1977	48.6 m	PC吊橋
双龍橋	宮崎県	1984	36.5 m×2	支保工無施工
ひぐらし橋	愛媛県	1987	63.0 m	
あずみ野橋	長野県	1988	77.5 m	〃
クレオパトラ橋	北海道	1989	85.0 m	〃
烏山C.C.歩道橋 ⁶⁾	栃木県	1989	63.0 m	〃
梅の木轟公園橋	熊本県	1989	105.0 m	〃
東児ヶ丘橋	岡山県	施工中	68.0 m	〃

表-1 にわが国の吊床版橋の施工実績を示す。

3 設 計

(1) 基本サグ量の設定

曲げ剛性を無視できる吊床版上に等分布荷重 q が作用した場合(図-5)、支間 l の中央におけるサグ量(垂れ下り量) f と水平反力 H との関係は次式で与えられる。

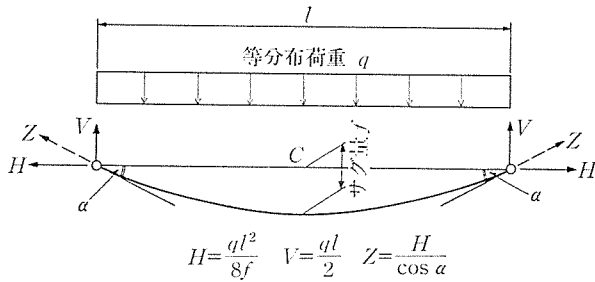


図-5 吊床版のサグと水平力

$$H = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot f} \dots\dots\dots (1)$$

一般の吊床版橋では最急接線角 α が比較的小さいので、吊床版部の自重を等分布とみなしても誤差は小さく、(1) 式を適用することができる。

吊床版橋のサグ量は、(1) 式に示すように水平反力に大きな影響を与えるが、その他にも全体剛性、床版プレストレスの有効導入率、動的振動特性などに大きな影響を与える重要な要素である。例えば、振動特性については、サグ量が小さく強く張られた状態では最低次のモードは弦の振動に近い対称モードとなるが、水平反力を緩めてサグ量がある程度大きくなると逆対称モードが卓越して振幅や固有周期が小さくなる領域が現われ、振動特性を改善することができる (図-6)。

したがって、吊床版橋を設計する際には、これらの特性や経済性を十分に考慮して基本サグ量 (死荷重時におけるサグ量) を設定する必要がある。

(2) 構造解析

曲げ剛性を無視できる吊床版構造で、床版の伸び剛性が比較的大きく荷重載荷による形状変化が小さい場合には、荷重の載荷による水平反力の変化は次式により求めることができる⁷⁾。

$$r^3 - \left[1 - \frac{EA}{2 \cdot l \cdot H_0} \int_0^l \left(\frac{\bar{Q}_0}{H_0} \right)^2 dx - \frac{\alpha \cdot EA}{l \cdot H_0} \cdot \Delta T \cdot l \right] \times r^2 - \frac{EA}{2 \cdot l \cdot H_0} \int_0^l \left(\frac{\bar{Q}_1}{H_0} \right)^2 dx = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 l : 吊床版の支間 (m)

EA : 吊床版の伸び剛性 (t)

H_0 : 荷重載荷前の水平力 (t)

\bar{Q}_0 : l を支間とした単純梁の荷重載荷前のせん断力 (t)

\bar{Q}_1 : l を支間とした単純梁の荷重載荷後のせん断力 (t)

α : 床版の線膨張係数

ΔT : 荷重載荷前後の温度変化 (°)

r : $(= H_1/H_0)$

H_0 : 荷重載荷後の水平力 (t)

<計算例>

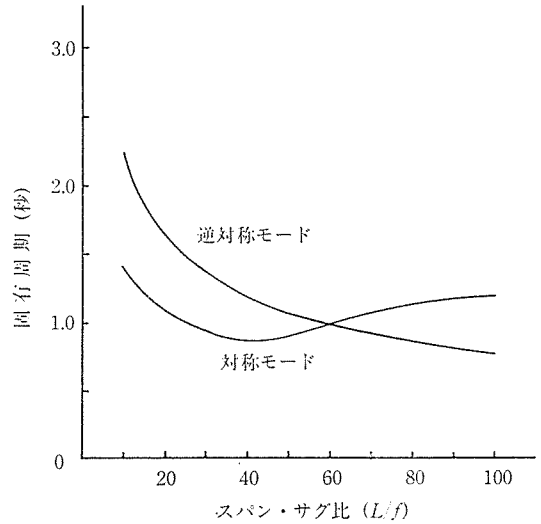


図-6 固有周期とスパン・サグ比

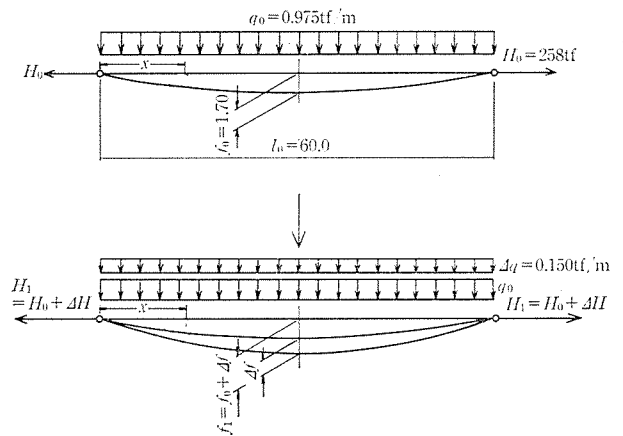


図-7 計算例

図-7 に示すように、支間 60.0 m、基本サグ量 $f_0 = 1.7$ m、伸び剛性 $EA = 1.265 \times 10^6$ t の吊床版橋を考え、 $q_0 = 0.975$ t/m の等分布荷重が作用している状態に $dq = 0.15$ t/m の等分布荷重が載荷された場合の水平反力の変化を計算する。

$$H_0 = \frac{q_0 \cdot l^2}{8 f_0} = \frac{0.975 \times 60.0^2}{8 \times 1.7} = 258.0 \text{ t}$$

$$\int_0^l \left(\frac{\bar{Q}_0}{H_0} \right)^2 dx = \frac{q_0^2 \cdot l^3}{12 \times H_0^2} = \frac{0.975^2 \times 60.0^3}{12 \times 258.0^2} = 0.25706$$

$$\int_0^l \left(\frac{\bar{Q}_1}{H_0} \right)^2 dx = \frac{(q_0 + dq)^2 \cdot l^3}{12 \times H_0^2} = \frac{1.125^2 \times 60.0^3}{12 \times 258.0^2} = 0.34225$$

$$\frac{EA}{2 \cdot l \cdot H_0} = \frac{1.265 \times 10^6}{2 \times 60.0 \times 258.0} = 40.8592$$

$$\Delta T = 0^\circ\text{C}$$

これらを (2) 式に代入する。

$$r^3 - [1 - 40.8592 \times 0.25706 - 0] \cdot r^2 - 40.8592 \times 0.34225 = 0$$

これを解いて、 $r = 1.14593$ を得る。

◇講 座◇

よって、荷重載荷後の水平反力は、

$$H_1 = r \cdot H_0 = 1.14593 \times 258.0 = 295.7 \text{ t}$$

となり、その状態でのサグ量は、

$$f_1 = \frac{(q_0 + 4q) \cdot l^2}{8 H_1} = \frac{1.125 \times 60.0^2}{8 \times 295.7} = 1.712 \text{ m}$$

となる。

(3) 吊床版部に導入されるプレストレス

吊床版は、床版コンクリートが硬化して PC 鋼材との間に付着が生じると、その後に載荷される静荷重や活荷重などによって発生する引張力に対して、コンクリートも含めた床版断面全体で抵抗することになり、コンクリート部材に引張応力が生じる。

このような引張応力に対して、鉄筋で補強してひび割れを制御することも可能であるが、コンクリートに発生する引張応力に対してあらかじめ床版にプレストレスを導入しておけば、耐久性の向上やひびわれによる剛性低下の防止に効果的である。

吊床版は、両端が固定されているが、サグが自由に変化できるために、一般の PC 構造物と同様に橋体が完成した後にプレストレスが導入できる。導入する緊張力に対して床版に有効に作用するプレストレスの量（床版プレストレスの有効導入率）は、基本サグ量の影響を受け、図-8 に示すようにサグ量が大きくなるほど有効導入率は高くなる。

プレストレス導入による水平反力の変化は、(2) 式における温度変化のひずみを導入緊張力 P_t による床版のひずみに置き換えることによって算出することができる。すなわち、(3) 式により求めた $\Delta T'$ を (2) 式に代入することによって求めることができる。

$$\Delta T' = \frac{-P_t}{EA \cdot \alpha} \dots\dots\dots (3)$$

(4) クリープ、乾燥収縮による水平反力の変化

一般の吊床版橋では、軸方向に多くの PC 鋼材や鉄筋が配置されているため、床版コンクリートがクリープや乾燥収縮によって鋼材との間に不静定力 X が発生する(図-9)。

$$X = \frac{-a \cdot \varphi}{1 + a \cdot K \cdot \varphi} \left[-D + \frac{\epsilon_s}{\varphi} \cdot EA + (H_1 - H_0)(1 - a) \right] \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 φ : クリープ係数

ϵ_s : 乾燥収縮度

D : コンクリートに作用している圧縮力 (t)

a : $E_z A_z / EA$

$E_z A_z$: 軸方向鋼材の伸び剛性 (t)

K : リラクセーション関数

$$K = \frac{1}{1 - e^{-\varphi}} - \frac{1}{\varphi} \text{ としてよい。}$$

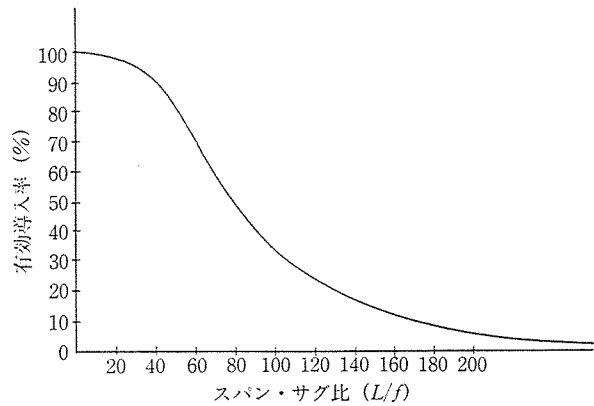


図-8 床版プレストレスの有効導入率とスパン・サグ比

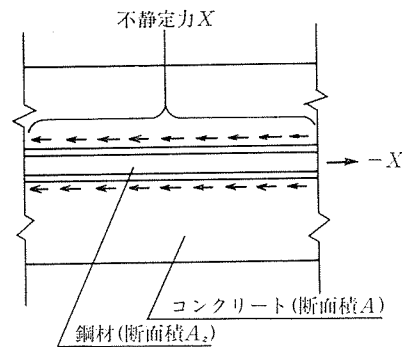


図-9 鋼材とコンクリートとの間に作用する不静定力

また、クリープ、乾燥収縮による水平反力の変化は、(5) 式によって求められる。

$$r^3 - \left[1 - \frac{\varphi}{1 + K \cdot \varphi} \cdot \frac{\bar{D}}{H_0} - \frac{1 + a \cdot K \cdot \varphi}{1 + K \cdot \varphi} \cdot \frac{EA}{2l \cdot H_0} \right] \times \int_0^l \left(\frac{\bar{Q}_0}{H_0} \right)^2 dx \cdot r^2 - \frac{1 + a \cdot K \cdot \varphi}{1 + K \cdot \varphi} \cdot \frac{EA}{2l \cdot H_0} \times \int_0^l \left(\frac{\bar{Q}_0}{H_0} \right)^2 dx = 0 \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $\bar{D} = -D + \frac{\epsilon_s}{\varphi} \cdot EA$

(5) その他の照査

終局荷重作用時の照査 および動的振動解析については、誌面の都合上簡単な説明にとどめる。

終局荷重作用時においては、吊床版部にひび割れが発生するので、吊床版部の平均伸び剛性 (EA) はひび割れの状態により低下してくる⁸⁾。この剛性の変化を考慮するには、式 (2) を用いて水平力 (H) を算出し、その水平力からひび割れの状態を判断して伸び剛性を修正しながら繰り返し計算をすればよい⁹⁾。

また、振動モードの解析や耐風安定性の照査は、補剛桁を有する吊橋の解析理論¹⁰⁾などを参考にすることができる。吊床版は、他の簡易吊橋などに比べて振動特性や耐風安定性はよいが、支間が比較的長い場合は、耐風安定性などを十分に考慮して吊床版部の形状や高欄の種類を選定する必要がある。(以下次号)

参 考 文 献

- 1) 吊床版橋研究グループ：「吊床版橋について（そのⅠ～Ⅳ）」道路，1963.1～1963.4
- 2) 国広，吉田，野尻：「吊床版橋」橋梁と基礎，1969.8
- 3) 村上，藤田，長井，藤元：「吊床版歩道橋（峰の巣キャンプ場橋）の特性（Ⅰ）」プレストレストコンクリート，Vol. 27, No. 4, 1985
- 4) 則武，熊谷：「プレストレストコンクリート吊床版橋」道路とコンクリート，Jun. No. 80, 1988
- 5) 甲斐，徳光，松下，荒川，別府，藤元：「速日峰橋の設計と施工（その1）」プレストレストコンクリート，Vol. 19, No. 6, 1977
- 6) 梶川，斉藤，卜部，中村：「吊床版橋の振動実験」橋梁と基礎，1990.4
- 7) J. Eibl & K. Pell：「Zur Berechnung von Spannbandbrücken」Werner-Verlag, 1973
- 8) F. Leonhardt：「Crack Control in Concrete Structures」IABSE, (S-4), 1977
- 9) 村上，中沢，瀬崎，本間，熊谷：「歩行者用吊床版橋の模型実験（下）」橋梁と基礎，1983.1
- 10) 平井：「鋼橋Ⅲ」（技報堂）

◀刊行物案内▶

P C 定 着 工 法

(1988 年版)

体 裁：B 5 判 126 頁

頒布価格：3 300 円（会員特価 3 000 円）（送料 350 円）

内 容：PC 定着工法総論，一般ケーブル（総論，18 工法），斜張ケーブル（総論，8 工法），シングルストランドケーブル（総論，8 工法），アンボンドケーブル（総論，7 工法），アースアンカーケーブル（総論，10 工法），プレテンション工法総論，PC 定着工法の評定

◀刊行物案内▶

日本原子力発電敦賀 2 号機 PCCV

本書は，プレストレストコンクリート第 28 巻の特別号として発刊されたもので，我が国で初めて採用されたプレストレストコンクリート製原子炉格納容器（日本原子力発電（株）敦賀発電所 2 号機）に関して，その各種模型実験，設計・施工に至る各分野にわたり詳述した貴重な資料です。今後ますます多く採用されるであろう，この種 PCCV を取り扱う関係者にとって，必携の図書と確信します。

ご希望の方は代金を添え（現金書留かまたは郵便振替東京 7-62774）プレストレストコンクリート技術協会宛お申し込みください。

体 裁：B 5 判 128 頁

定 価：3 000 円 送 料：150 円