

アクリル模型によるホロースラブ橋の載荷実験

音 川 庫 三*
安 孫 子 敏 雄**

1. ま え が き

首都高速道路公団の高速道路5号線Ⅱ期は、池袋で5号線Ⅰ期と接続し、中仙道、板橋区前野町を經由して高島平に到る延長約8.6kmの区間である。この中で第562工区～第565工区(板橋区泉町～前野町、図-1)は延長約2kmで一部を除いて、図-2および写真-1に示すような、1本柱橋脚上を支承としたスパン25m～29m、幅員18m、桁高1.1mの3径間連続PCホロースラブ橋を標準としている。一般的に線支承されているホロースラブ橋の場合は、設計上荷重分配等で問題となることは少ないが、図-2のように2点で支承されるホロースラブ構造は例も少なく、設計上明確でない点もある。例えば、① 横方向の荷重分配性状、② 支承上横桁の有効幅等があげられる。これらの解明のために、アクリル樹脂板(パラグラス)による模型実験を実施し、設計計算等について検討を行ったので、その概要を報告するものである。

2. 実験方法

2.1 模型形状および予備試験

この実験は、ホロースラブの局所的な応力状態を知るのが目的であるため、アクリル模型を使用した。なお模型の縮尺は、1/50とし、その断面形状寸法は図-3の

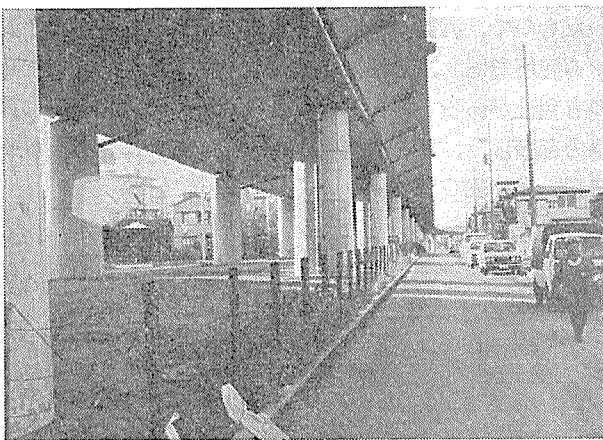


写真-1 第562工区のホロースラブ橋

通りである。模型の製作はスラブを上下2個に分割加工し、残留歪み除去のため、電気炉で熱処理(70°C～80°C、3～8hr)後、接着剤(バラダイン)により接合し、24hr

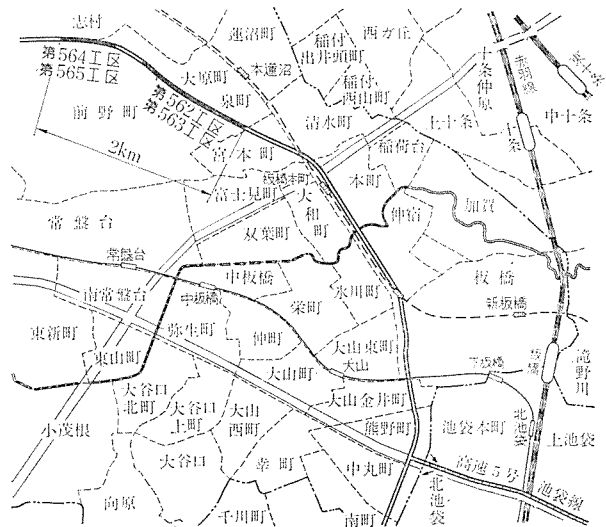


図-1 案内図

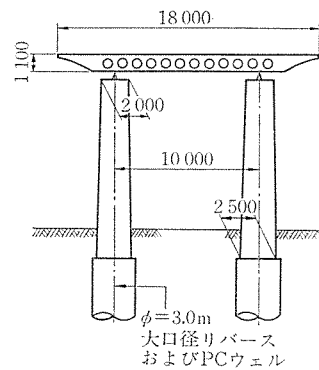


図-2 一般断面図

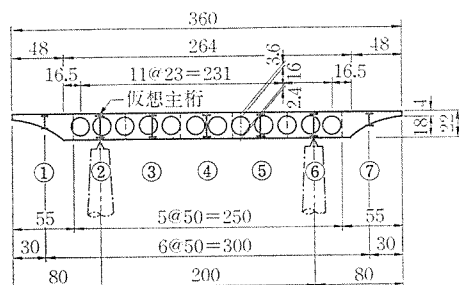


図-3 格子解析用断面図

* 首都高速道路公団保全施設部保全企画課
** 首都高速道路公団保全施設部保全技術課

自然乾燥後、さらに接着強度を増す目的で熱処理(80°C, 5 hr)を行った。支点は端支点を X 型ピン支承, ヒンジ部をコロ支承とし, 中間支点は厚さ 5 mm, $\phi=20$ mm のゴム支承で強制沈下ができる装置を設けて, 写真-2 に示すような橋脚を製作した。予備試験としては, アクリルの弾性係数を算定するため, 熱処理および接着剤の影響を調べるため, 3 種類の供試体 (①一体型, ②中心接着型, ③下端接着型) の単純梁を製作し, これに載荷を行い弾性係数を求めた。この結果 3 種類の供試体についてはいずれも大差なく, $E=3.20 \times 10^4$ kg/cm² を得た。計測器は測定点に泊ゲージおよびダイヤルゲージを使用した。載荷実験はアクリルに対する影響を少なくするため, 温度; 14°C (温度差 1°C~2°C), 湿度; 60% と一定に保てる地下 5 m のシールド内で行った。

2.2 載荷方法

荷重は, 小型油圧ジャッキ (1.0 t) により 10 kg~60 kg まで緩速載荷法で, 測定は 10 kg 毎に行い 3 回繰り返した。また載荷位置および載荷状態は次のように行った。

- a) センタースパンおよびサイドスパンの中央で集中載荷 (幅員の中央部および偏心部, 写真-3)。
- b) 中間支承の支承と支承の中央で集中載荷。
- c) 中間支承の 1 支承を強制沈下させる。

3. 解 析

実験結果と解析値を比較するため, ホロースラブの単一棒解析, 平面格子理論 (以下格子解析) を行い, また有限要素理論解析 (以下有限要素解析) を比較の参考にする目的で行った。

3.1 格子解析の諸定数

ホロースラブは, 図-3, 図-4 に示すように, 主桁 ②, ⑥を支承上に配置し, 橋軸方向に全体で 7 本の仮想主桁を持ち, かつ橋軸直角方向は仮想横桁を支承付近で比較的細かく配置した平面格子とし, 断面充足率, 固定度などを考慮して各々の断面性能を換算して求めた。この結果は表-1 で示す通りで, 電算のプログラムは, GRID を使用した。

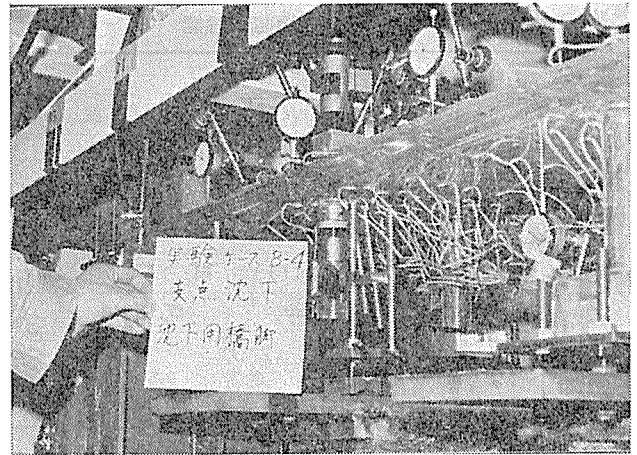


写真-2 支点沈下の載荷実験

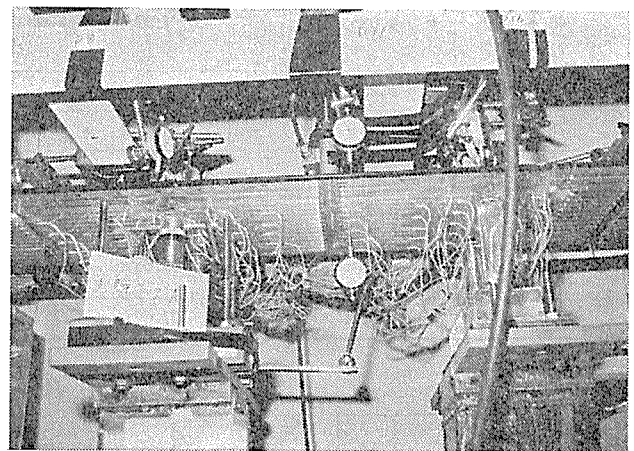


写真-3 センタースパン幅員中央載荷実験

3.2 有限要素解析の諸定数

平板の曲げ問題としては, 矩形要素による有限要素法を用いた, 要素の分割は, 比較を容易にするため, 格子の分割に合せ, 要素内版厚一定の直交異方性版として取り扱った。スラブ両側の変断面部分および中央ホロ一部分の換算は, 要素内の歪みエネルギーが等しくなるように版厚および換算弾性係数を決定した。なお変断面部分の等価版厚と換算弾性係数の関係は, (1)~(5) の一般式で表わされる。この場合, 応力換算は, 図-5 のよう

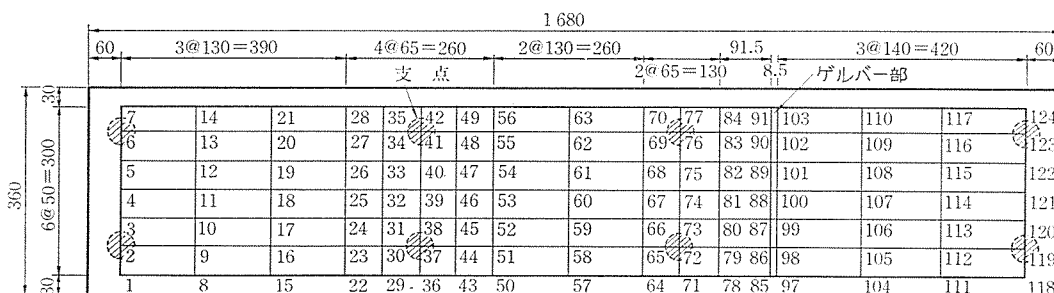
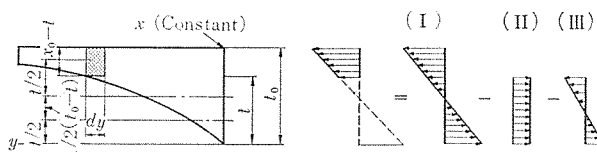


図-4 格子解析用平面系

表一 格子解析用断面性能

| 主 桁 No. | 橋 軸 方 向 | |
|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | 曲 げ 剛 度 (I) | 振 り 剛 度 (J) |
| ①, ⑦ | $2.38 \times 10^{-8} \text{ m}^4$ | $0.992 \times 10^{-8} \text{ m}^4$ |
| ② ~ ⑥ | $3.63 \times "$ | $10.12 \times "$ |
| POINT No. | 橋 軸 直 角 方 向 | |
| | 曲 げ 剛 度 (I) | 振 り 剛 度 (J) |
| 1 ~ 7 | $10.07 \times 10^{-8} \text{ m}^4$ | $27.17 \times 10^{-8} \text{ m}^4$ |
| 8 ~ 14 15 ~ 21 57 ~ 63 | $8.02 \times "$ | $9.59 \times "$ |
| 22 ~ 28 50 ~ 56 64 ~ 70 | $6.03 \times "$ | $7.04 \times "$ |
| 29 ~ 35 43 ~ 49 71 ~ 77 | $4.02 \times "$ | $4.32 \times "$ |
| 36 ~ 42 | $5.25 \times "$ | $10.58 \times "$ |
| 78 ~ 84 | $6.33 \times "$ | $13.05 \times "$ |
| 85 ~ 91 | $3.63 \times "$ | $6.22 \times "$ |
| 92 ~ 96 | $5.26 \times "$ | $9.23 \times "$ |
| 104 ~ 110 111 ~ 117 | $8.68 \times "$ | $10.66 \times "$ |
| 118 ~ 124 | $10.39 \times "$ | $27.62 \times "$ |



図一五 応力換算図

に仮定し、変位関数は二次の項まで考慮している。

$$U_x = U_{x(I)} - U_{x(II)} - U_{x(III)} \dots\dots\dots(1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} U_{x(I)} &= \frac{1}{2} \cdot E_x \cdot \frac{t_0^3}{12} \cdot \omega_x^2 \cdot dy \dots\dots\dots(2) \\ U_{x(II)} &= \frac{1}{2} \cdot E_x \cdot t \left\{ \omega_x \cdot \frac{1}{2} \cdot (t_0 - t) \right\}^2 \cdot dy \dots\dots\dots(3) \\ U_{x(III)} &= \frac{1}{2} \cdot E_x \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right)^3 \cdot \frac{t_0^3}{12} \cdot dy \dots\dots\dots(4) \end{aligned} \right.$$

$$U_y = \frac{1}{2} \cdot E_y \cdot (t_0 - t)^3 \cdot \frac{1}{12} \cdot \omega_y^2 \cdot dy \dots\dots\dots(5)$$

等価版厚を t_e とすれば歪みエネルギーは、(6), (7) 式で表わされる。

$$U_x = E_x \cdot \frac{t_e^3}{24} \cdot \omega_x^2 \cdot dy \dots\dots\dots(6)$$

$$U_y = E_y \cdot \frac{t_e^3}{24} \cdot \omega_y^2 \cdot dy \dots\dots\dots(7)$$

ここに、

$$\{A\} = \left\{ 1 - 3 \left(\frac{t}{t_0} \right) + 6 \left(\frac{t}{t_0} \right)^2 - 4 \left(\frac{t}{t_0} \right)^3 \right\}$$

$\{B\} = \left\{ 1 - 3 \left(\frac{t}{t_0} \right) + 3 \left(\frac{t}{t_0} \right)^2 - \left(\frac{t}{t_0} \right)^3 \right\}$ とすると
(1), (6) と (5), (7) 式より等価版厚; t_e が (8) 式として得られる。

$$t_0^3 \int \{A \text{ or } B\} dy = t_e^3 \int dy \dots\dots\dots(8)$$

$$\therefore t_e = \sqrt[3]{\frac{\{A\} \text{ or } \{B\}}{\int dy}} \cdot t_0$$

橋軸方向の等価版厚 (t_{ex}) に対する橋軸直角方向の弾性係数は (9) 式によって換算する。

$$E_{y'} = \left(\frac{t_{ey}}{t_{ex}} \right) \cdot E_y \dots\dots\dots(9)$$

ここに

U_x, U_y ; 歪みエネルギー

E_x, E_y ; 換算弾性係数

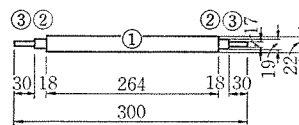
t_0 ; 版厚

t_{ex}, t_{ey} ; 等価版厚

ω_x, ω_y ; 曲率

これらの結果を整理すると、図一六および表一となる。

なお解析結果の計算値の主なものを図一七で示している。



図一六 有限要素解析用換算断面図

表一 有限要素断面性能

| | 主 版 ① | 張 出 版 ② | 張 出 版 ③ |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 換算弾性係数 E_x (t/m ²) | 2.69×10^5 | 2.50×10^5 | 2.50×10^5 |
| " E_y (t/m ²) | 2.20×10^5 | 2.64×10^5 | 0.44×10^5 |
| 等 価 版 厚 (m) | 0.0220 | 0.0192 | 0.0170 |

4. 実験結果と検討

4.1 計算値と実測値の比較

橋軸方向について、センタースパンの幅員の中央および偏心載荷時の支承位置断面および載荷位置断面の計算値と実測値の応力比較は、図一七に示す通りである。全体的には、格子解析による計算値と比較して10%~20%程度実測値の方が大きい傾向を示し、載荷直下が最も大きく、載荷位置より遠ざかるに従って計算値に近づいている。また参考として行った有限要素解析による計算値と格子解析による計算値は大差ない値を示している。橋軸直角方向について、中間支承の中央載荷およびサイドスパン、センタースパンの中央載荷時の応力分布の実測

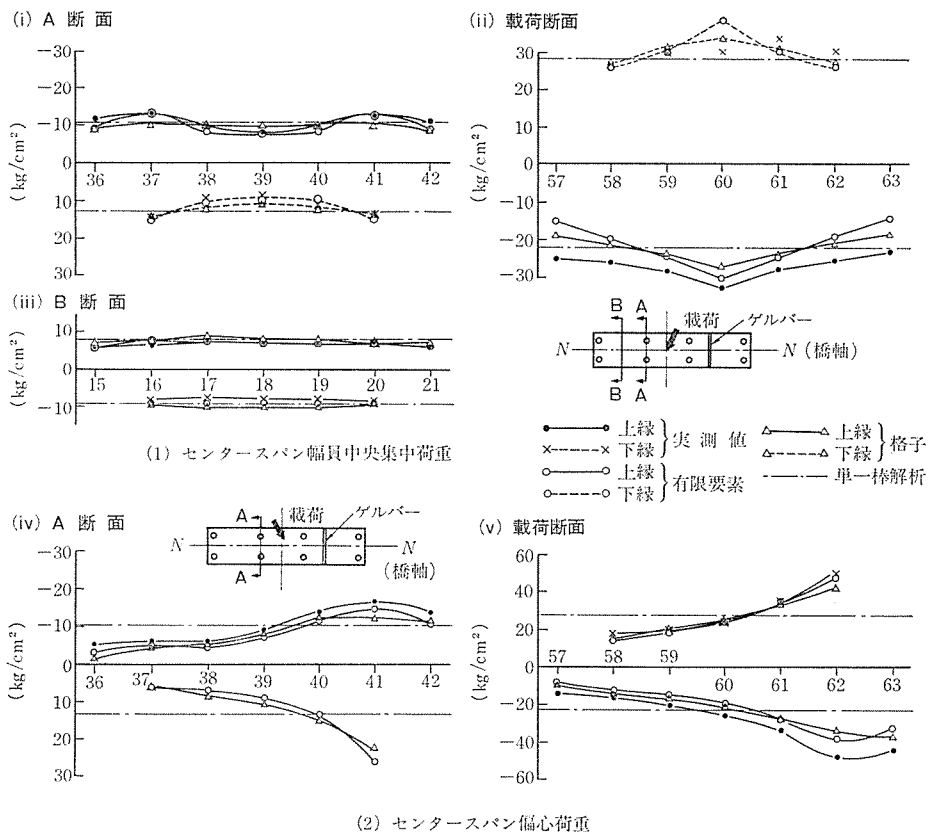


図-7 橋軸方向応力分布図

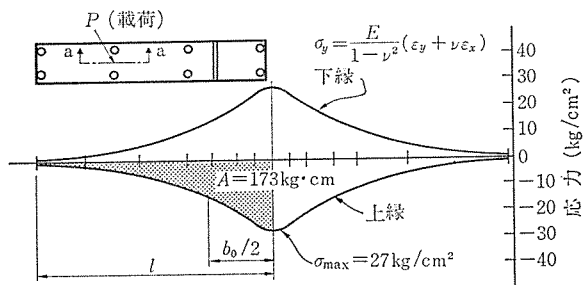


図-8 橋軸直角方向応力分布図 (実測値)

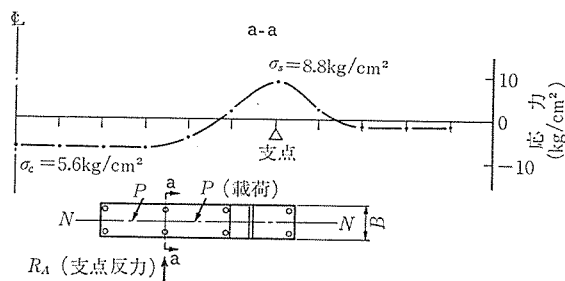


図-9 橋軸直角方向応力分布図 (実測値)

値を図-8, 図-9 に示す。

4.2 橋軸方向の荷重分配について

a) 載荷断面直下では, 中央載荷, 偏心載荷いずれの場合も載荷位置に大きな応力が発生し, 単一棒解析で計

算された応力に比較して 10%~120% 程度大きくなっている。格子解析および有限要素解析で計算された応力は, この値が最大 70% 程度と多少小さめの値となっている (図-7-ii, v)。

b) 中間支承上では, 載荷断面直下の場合と同様支承上に大きな応力が発生し, 単一棒解析の計算応力に比較して 20%~60% 程度大きくなっている。また格子解析 (有限要素解析も含めて) による計算応力と比較すると 100% 程度大きくなっている (図-7-i, iv)。

c) 載荷されていない支間の中央では, 単一棒解析の計算応力と大差ないと考えられる (図-7-iii)。

4.3 橋軸直角方向の荷重分配について

a) 支承上横桁の有効幅

図-8 に示す中間支承の中央集中載荷による応力分布の実測値より有効幅を算出してみる。有効幅 b_0 は (10) 式で与えられる。

$$\frac{b_0}{2} = \frac{1}{\sigma_{\max}} \int_0^l \sigma_y \cdot dx \dots\dots\dots (10)$$

$$\therefore b_0 = \frac{2A}{\sigma_{\max}} = 12.81 \text{ cm}$$

σ_{\max} ; 最大応力
 σ_y ; 応力分布

l ; 応力が0になる点までの距離

$$A; \int_0^l \sigma_y \cdot dx$$

また設計に際しての有効幅を「プレストレストコンクリート道路橋示方書」(日本道路協会, 昭和43年3月, 以下PC道示) 8.7-(3)により, 算出し, 比較してみる。ここでPC道示による有効幅; b_0' は(11)式で与えられる。

$$b_0' = \frac{2 \cdot (n-1)}{6} \times c + b = \frac{2(13-1)}{6} \times 2.1 + 4.4 = 12.80 \text{ cm} \dots\dots\dots(11)$$

ここに 図-3 の模型寸法より

n ; ホローとホローの間を主桁とした場合の数 (13)

c ; 主桁の間隔 (2.1 cm)

b ; 支承上横桁の充腹部幅 (4.4 cm)

この結果実測値より算出した有効幅 (b_0) と上記 (11) 式より算出した有効幅 (b_0') はほとんど一致した。

b) 支承上曲げモーメントを算出する場合の荷重の取り方と応力度

図-9 はセンタースパンおよびサイドスパンの幅員の中央集中荷重 (50 kg) した時の中間支承上の実測値による応力分布図 (スラブ上縁) であり, 支承上の応力; $\sigma_s = 8.8 \text{ kg/cm}^2$, 支承と支承の中央の応力; $\sigma_c = 5.6 \text{ kg/cm}^2$ が得られた。ここで設計に際しての計算方法について検討してみる。日本道路公団 (以下道路公団) では, 図-10 に示すようなホロースラブについて, 設計要領 (昭和47年度改訂版) 第2集の橋梁上部工で以下のような方法で設計を行うものとしている。

$$M_s = -\frac{1}{2} \cdot \omega \cdot l_1^2 - 2m \cdot l_1 - 2S \cdot l_1^2 \dots\dots\dots(12)$$

$$M_c = \frac{1}{8} \cdot \omega \cdot l_2^2 - \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot l_1^2 \dots\dots\dots(13)$$

$$\omega = \frac{R}{b} \dots\dots\dots(14)$$

M_s ; 支承上曲げモーメント

M_c ; 支承と支承の中央の曲げモーメント

ω ; 横桁設計荷重

R ; 橋軸方向反力

m ; 張出しスラブつけね橋軸方向単位幅当りの曲げモーメント

S ; 張出しスラブつけね橋軸方向単位幅当りのせん断力

しかし 図-11 で示すように, 実際設計しようとするホロースラブは, 張出部の断面形状が 図-10 と比較して変化しており, 剛度も変わるため, 図-11 に示すように仮

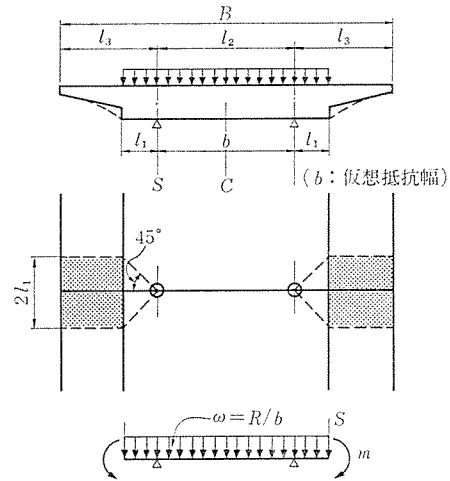


図-10 支承上横桁設計要領図

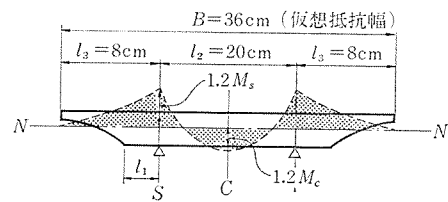


図-11 支承上横桁の設計曲げモーメント図

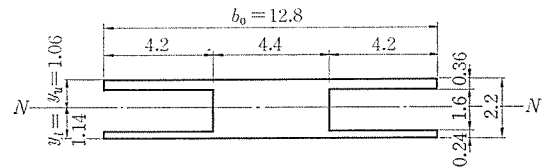


図-12 有効幅を考慮した支承上横桁断面図 (模型)

想抵抗幅 b を B とし, 以下に述べるように一部適用方法を変え, (15)~(17) 式で支承上横桁設計の際の断面力を算出し検討してみる。

$$M_s = -\frac{1}{2} \cdot \omega \cdot l_2^2 = -61.12 \text{ kg-cm} \dots\dots\dots(15)$$

$$M_c = \frac{1}{8} \cdot \omega \cdot l_2^2 - \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot l_1^2 = 34.38 \text{ kg-cm} \dots\dots(16)$$

$$\omega = \frac{R_A}{B} = \frac{11P}{8} \cdot \frac{1}{B} = 1.91 \text{ kg/cm}^2 \dots\dots(17)$$

ここに

M_s ; 支承上曲げモーメント

M_c ; 支承と支承の中央の曲げモーメント

ω ; 横桁設計荷重

R_A ; 図-9 の荷重々重状態で, $P=50 \text{ kg}$ とし, スラブを単一棒として解析した場合の中間支点の反力

また応力算出は, 図-12 の断面形状で, a) で求められた有効幅; $b_0=12.8 \text{ cm}$ を用いて行う。したがってスラ

ブ上縁より中立軸までの距離; $y_u=1.06$ cm, 断面二次モーメント; $I=8.47$ cm² が得られ, スラブ上縁の応力は $\sigma=\frac{M}{I}\cdot y_u$ より, $\sigma_s'=7.7$ kg/cm², $\sigma_c'=4.30$ kg/cm² となり, 実測値より求めた応力; σ と比較すると, 支承上で, $\frac{\sigma_s'}{\sigma_s}=0.9$, 支承と支承の中央で, $\frac{\sigma_c'}{\sigma_c}=0.8$ が得られた。

5. ま と め

5.1 橋軸方向の設計について

4.2 で述べたように格子解析による計算値(参考計算の有限要素解析も含めて)と実測値の荷重分配は, ほぼ同様の傾向を示している。すなわち格子解析による計算値と実測値との荷重分配係数の比は, センタースパンの中央載荷の時, 支承上では 1.0, 載荷断面では 0.9, センタースパンでの偏心載荷の時, 支承上では 0.9, 載荷断面では 0.8 となっている。このことから判断すると, 横断方向の荷重分配性状については, 設計の際, 格子解析による計算値との比を 10%~20% の範囲で割増した値を設計断面力として使用するのが妥当であると考えられる。また格子解析時の仮想主桁は, 支承上に桁を配置することとし, 仮想横桁は, 支承附近で比較的細かく配置することが大切であると思われる。

5.2 橋軸直角方向の設計について

4.3 で述べたように, 支承上横桁の有効幅の算定方法は, PC道示の式を使用して計算した有効幅と実測値より計算した有効幅とが一致しており, 設計の際, この方法で有効幅を算定するのはほぼ差しつかえないと考えられる。また支承上横桁の設計に際しては, 道路公団の設計要領による方法で, 一部適用方法を変えて計算した値と実測値の比が, 支承上では, $\sigma_s=0.9$, 支承と支承の中央では, $\sigma_c=0.8$ となっており, 設計の際に 4.3 で検討した(15)~(17)式で断面力を算出し, かつこの計算値の 20% 程度割増して設計断面力とするのが妥当と考えられる。ただし本実験は, 支承間隔と張出部の長さの比が図-3に示すように 2.5:1 なので, この比が大きく異なる場合は, 再度検討する必要がある。

以上ホロースラブ橋の載荷実験について述べてきたが, この実験結果のもとに首都高速道路5号線Ⅱ期第562工区~第565工区のホロースラブ橋は設計され, すでに供用開始されている。

最後に本実験を行うに当たり, 首都高速道路公団の前田邦夫氏, 大内雅博氏, 山寺徳明氏に多大な御指導を得たことに深く感謝致します。

1977.3.9・受付

◀刊行物案内▶

プレストレスト コンクリート構造物の設計実技

体 裁: A4判 113 頁
 定 価: 2000 円 送 料 400 円
 内 容: (A) PC緊張材定着部材端区間の設計 (B) 建築構造物における設計例 (C) 道路橋における設計例 (D) 鉄道橋の設計例 (E) PCパイルベント橋脚の設計例
 お申込みは代金を添えて, (社)プレストレストコンクリート技術協会へ

◀刊行物案内▶

プレストレスト コンクリート橋の設計・施工上の最近の諸問題

体 裁: A4判 116 ページ
 定 価: 1500 円 送 料 400 円
 内 容: (1) PC橋の施工開始前の諸問題, (2) PC橋の工事ならびに施工管理について, (3) 新しいPC設計方法について, (4) 最近の話題の橋梁
 お申込みは代金を添えて, (社)プレストレストコンクリート技術協会へ