

# 鉄鉄コンクリート鉄道高架橋の軽量化

国有鉄道構造物設計事務所

技師 深谷 俊 明

## 1. ま え が き

国鉄における高架橋は、各種の構造型式の変遷を経てラーメン構造のものが多く採用されている。このラーメン構造の高架橋は、設計方法の進歩発達により漸次軽量化されているが、なお軽量化の余地があるので、ここに簡単に検討することとした。

## 2. 国鉄における高架橋の建設経過

国鉄における高架橋は、図-1および表-1に示すように、東京・神戸・大阪・名古屋・横浜・等の市街地において発達し、局部的には地形の関係で佐世保・下関の一部にも建設され、単線換算延長は表-2が示すように100kmにも及んでいる。

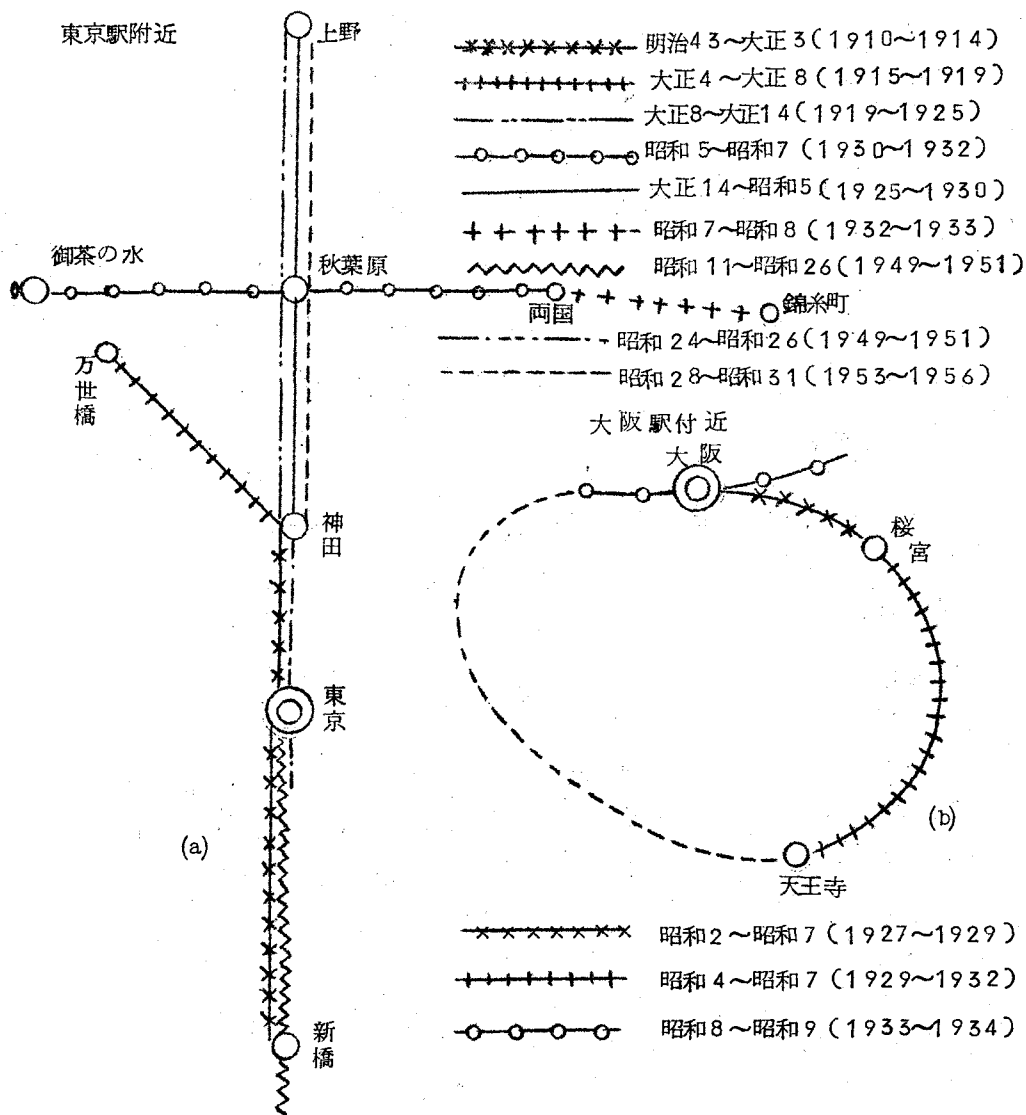


図 - 1

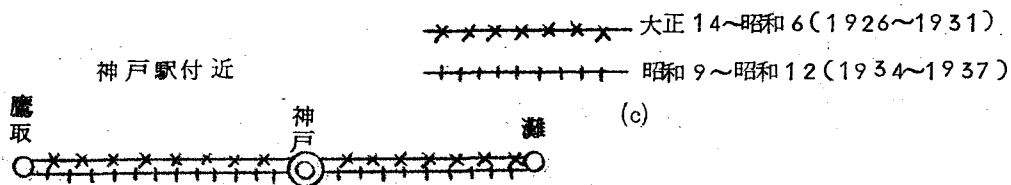


表 1

| 年 代                     | 国鉄における<br>設計示方書             | 土木学会標準<br>示 方 書 | 示方書に示されている許容応力度                       |                                                                                          | 設計に使用された許容応力度                         |                                       | 高 架 橋 の 建 設 期 間                              | 備 考     |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|---------|
|                         |                             |                 | $\sigma_{ca}$ $\text{kg}/\text{cm}^2$ | $\sigma_{sa}$ $\text{kg}/\text{cm}^2$                                                    | $\sigma_{ca}$ $\text{kg}/\text{cm}^2$ | $\sigma_{sa}$ $\text{kg}/\text{cm}^2$ |                                              |         |
| 1914<br>(大正3年)          | 達684号<br>鉄筋コンクリート<br>橋梁設計心得 |                 | 42<br>(600#/10")                      | 1,056<br>(150,000#/10")                                                                  | 42<br>(600#/10")                      | 1,056<br>(150,000#/10")               | 神田ー万世橋<br>上野ー神田                              | 関 東 震 災 |
| 1931<br>(昭和6年)          |                             | 土木学会標準<br>示方書   | 65                                    | 1,200                                                                                    | 53<br>(750#/10")                      | 1,120<br>(160,000#/10")               | 上野ー神田<br>御茶の水ー西国<br>東京ー浜松町                   |         |
| 1936<br>(昭和11年)         |                             | 標準示方書第<br>1次改訂  | 65                                    | 1,200                                                                                    | 55                                    | 1,200                                 | 大阪ー上淀<br>桜宮ー天王寺<br>神戸市街線(山側)                 |         |
| 1940<br>(昭和15年)         |                             | 標準示方書第<br>2次改訂  | 70                                    | 1,200                                                                                    | 60                                    | 1,200                                 | 横浜駅附近<br>両国ー錦糸町<br>佐世保<br>下関駅附近<br>神戸市街線(海側) |         |
| 1949<br>(昭和24年)         |                             | 標準示方書第<br>3次改訂  | 70                                    | 1,200                                                                                    | 55                                    | 1,300                                 | 東京ー神田                                        |         |
| 1955<br>1956<br>(昭和31年) | 土木構造物の<br>設計基準案             | 標準示方書第<br>4次改訂  | 80*<br>$\sigma_{28}/3$                | **<br>{ 1,400(SS39, SS41)<br>1,600(SS49, SS50)<br>1,400(SS39, SS41)<br>1,600(SS49, SS50) | 65                                    | 1,400                                 | 上野ー神田                                        | 第2次世界大戦 |
|                         |                             |                 |                                       |                                                                                          | 80                                    | 1,600                                 | 大阪環状線<br>名古屋中央線<br>仙台貨物線<br>横浜根岸線            |         |

\*, \*\*のほかに、つぎのように規定されている。

$\sigma_c=45$  にたいし  
 $\sigma_s=1200$  (SS39, SS41)  
 $\sigma_s=1200$  (SS49, SS50)  
 $\sigma_c=50$  にたいし  
 $\sigma_s=1300$  (SS39, SS41)  
 $\sigma_s=1400$  (SS49, SS50)  
 $\sigma_c=65$  にたいし  
 $\sigma_s=1300$  (SS39, SS41)  
 $\sigma_s=1500$  (SS49, SS50)



表 - 2

| 年次                      | 建設延長 (m) | 延長合計 (m) |
|-------------------------|----------|----------|
| 1915 (大正4年) まで          | 8,114    | 8,114    |
| 1916～1925 (大正5年～大正14年)  | 11,112   | 19,226   |
| 1926～1935 (大正15年～昭和10年) | 59,154   | 78,380   |
| 1936～1945 (昭和11年～昭和20年) | 20,188   | 98,568   |
| 1946～1955 (昭和21年～昭和30年) | 3,913    | 102,481  |
| 1956～1957 (昭和31年～昭和32年) | 544      | 103,025  |

国鉄における最初の高架橋は、東京－新橋間のレンガアーチの高架橋であるが（図－2参照）、その後東京－万世橋間に鉄筋コンクリートアーチでレンガ側壁、鉄筋コンクリート単純版と壁式橋脚との組合せ（図－3参照）、鉄筋コンクリート連続版と壁式橋脚との組合せ、など各種型式の高架橋がこの区間に建設され、ついで神田－上野間には単純版とラーメン橋脚との組合せが、また神戸市街線（山側）には連続版ラーメン橋脚とを組合せたものが建設された。これらの過程を経て神戸市街線（海側）、大阪城東線（図－4参照）、大阪－上淀間、神田－上野間に相ついでラーメン構造の高架橋が建設され、今日では、このラーメン構造の高架橋が高架型式の大部分を占めるようになった（図－5、6参照）。しかし、配線状態、地盤支持力、高架下空間の利用、等に応じて、フラットスラブ構造、壁式構造、合成桁・PC桁を利用したもの、等の例も相当見られる。

Technical drawing of a symmetrical mechanical part, likely a bracket or support structure, shown in a half-section view. The drawing includes the following dimensions:

- Overall Width:** 1200 (indicated at the top and bottom).
- Section Line:** A diagonal line with hatching on the right side, indicating a half-section.
- Top Section Dimensions:**
  - Top flange width: 1500
  - Top flange height: 5500
  - Top flange thickness: 1500
  - Top flange width (inner): 1500
- Middle Section Dimensions:**
  - Middle flange width: 3500
  - Middle flange height: 1700
  - Middle flange thickness: 1700
  - Middle flange width (inner): 1700
- Bottom Section Dimensions:**
  - Bottom flange width: 3200
  - Bottom flange height: 4500
  - Bottom flange thickness: 4500
  - Bottom flange width (inner): 3200
- Other Dimensions:**
  - Overall height: 1200 (indicated on the left side).
  - Overall width (inner): 3400 (indicated on the left side).
  - Overall width (outer): 400 (indicated on the left side).

- 110-

東京 - 萬世橋間スラブ式高架橋

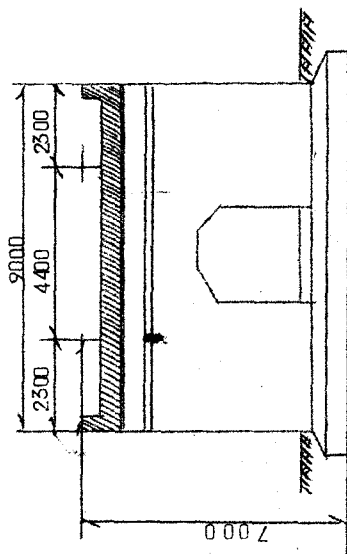
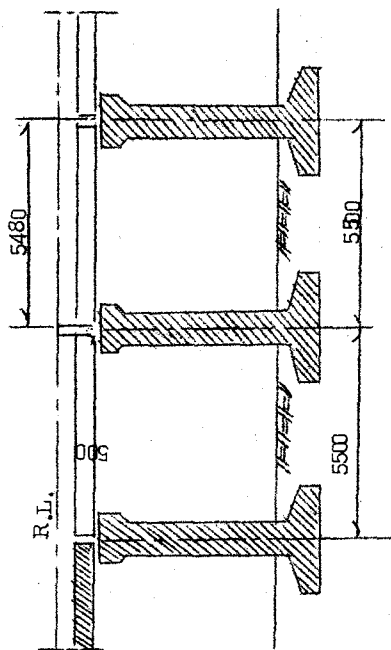


図 - 3

城東線 2 柱 3 径間標準型高架橋

側 面

縦 断 面

横 断 面

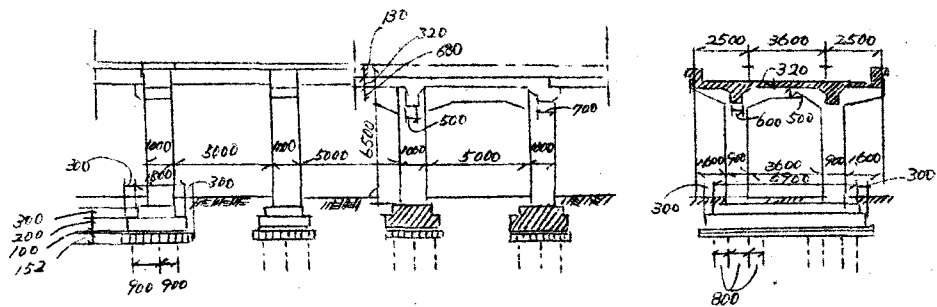


図 - 4

有楽町新橋間外濠添高架橋

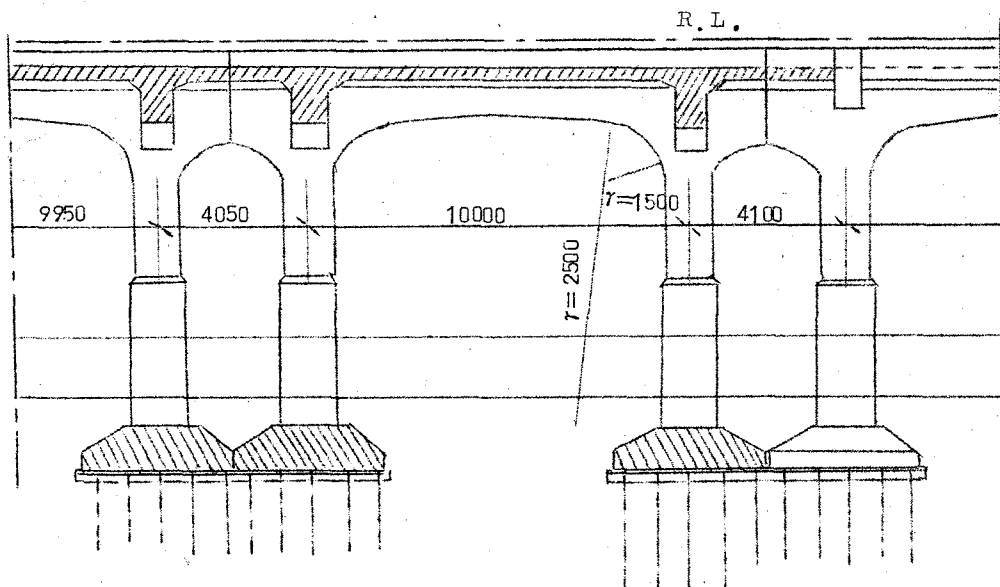


図 - 5

### 3. 40年間に於ける鉄筋コンクリート造高架橋の軽量化

鉄筋コンクリート造高架橋におけるコンクリート体積は、構造型式、設計方法、荷重、許容応力度、高さ、幅員、鋼材価格、地震の影響、等の設計条件によつて異なるものであるが、代表的と思われる諸実例について、複線1m当りのコンクリート体積を計算し、これを年代順にしたものが表-3である。表-3は、約40年間における経済設計への努力が、軽量化への道を歩んでいたことを示しているものと考えられる。

表 一 3

| 区 間       | 建設年度      | 荷 重        | スパン(m) | 型 式               | 地震の影響   | m <sup>3</sup> /m |
|-----------|-----------|------------|--------|-------------------|---------|-------------------|
| 上野 — 神田   | 1919~1925 | E33(KS-15) | 5.48   | 2線3柱 連続版          | 考慮せず    | 17.3              |
| 神戸市街線(山側) | 1926~1931 | KS-18      | 5.5    | 2線2柱 連続版          | "       | 15.2              |
| お茶の水 — 両国 | 1930~1932 | KS-15      | 5.5    | 2線箱型ラーメン 単純版      | 水平震度0.2 | 14.5              |
| 大阪 — 上淀   | 1933~1934 | KS-18      | 5.5    | 2線3柱 3スパンラーメン 単純版 | "       | 13.3              |
| 神戸市街線(海側) | 1934~1937 | KS-18      | 5.5    | 2線2柱5スパンラーメン 単純版  | "       | 14.3              |
| 東京 — 浜松町  | 1936~1942 | KS-18      | 5.0    | 2線3柱5スパンラーメン      | "       | 13.2              |
| 東京 — 神田   | 1949~1951 | KS-18      | 6.5    | 2線3柱4スパンラーメン      | "       | 13.0              |
| 大阪環状線     | 1956~     | KS-18      | 6.0    | 2線2柱持出梁つき3スパンラーメン | 水平震度0.3 | 10.8              |
| 中央線(名古屋)  | 1957~     | KS-18      | 6.0    | 2線2柱持出梁つき3スパンラーメン | "       | 10.8              |

#### 4. ラーメン構造高架橋における各部断面の変遷

国鉄における高架橋は、前述のように、ラーメン構造の高架橋が大部分を占めているので、ラーメン構造の高架橋を対象に、各部断面の変遷を検討する。

ラーメン構造の高架橋をスラブ・柱・基礎の3部分にわけて、コンクリート体積の比率を求めると、大体つぎのようになる。

|              |     |
|--------------|-----|
| スラブ部分（はりを含む） | 60% |
| 柱 部 分        | 15% |
| 基 礎 部 分      | 25% |

基礎部分のコンクリート体積は、地盤支持力や基礎工によつて変動が大きいから、本項では、スラブおよび柱の断面寸法について検討することとした。

##### (1) スラブ部分

この スラブ部分には、はりを含めているが、スラブとはりとの体積比は7：3程度であるから、高架橋の軽量化を図るには、スラブを薄くするのが最も有効であると考えられる。

##### (A) スラブ断面

土木学会制定の鉄筋コンクリート標準示方書が初めて制定された昭和6年以前に設計された高架橋のスラブは、一方向版として計算されていたため、つぎの例が示すように、相当厚く設計されていた。

表 - 4 (A)

| 区 間               | 型 式     | スパン (m) | スラブの厚さ (cm) |
|-------------------|---------|---------|-------------|
| 上 野 - 神 田         | 2 線 3 柱 | 5.4 8   | 3 7. 6      |
| お 茶 の 水 - 両 国     | 2 線 2 柱 | 7. 4    | 5 0         |
| 神 戸 市 街 線 ( 山 側 ) | 2 線 2 柱 | 5. 5    | 4 0         |

しかし、土木学会の鉄筋コンクリート標準示方書が制定されてからは、二方向版として設計されるようになり、また、最近の改正で許容応力度の増加により、表-4 ( B ) のように相当薄く設計されるようになった。

表 - 4 (B)

| 区 間        | 型 式       | スパン (m) | スラブの厚さ (cm) |
|------------|-----------|---------|-------------|
| 東京 - 浜松町   | 2 線 2 柱 式 | 5.0     | 30          |
| 大 阪 環 状 線  | 2 線 2 柱 式 | 6.0     | 30          |
| 中央線 (名古屋)  | 2 線 2 柱 式 | 6.0     | 30          |
| 第二御徒町 (東京) | 2 線 2 柱 式 | 6.0     | 25          |

このスラブの厚さは、荷重、許容応力度、スパン、版の固定度によつて変化するものであるが、つぎの設計条件を対象に計算すれば、スラブの厚さは許容応力度に応じて、表-5のような値となる。

設 計 条 件      荷 重 :  $K S - 18$   
                     スパン : 長スパン    6.5 m  
                                         短スパン    4.5 m

表 - 5

|                  | 許 容 応 力 度 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) |                   | スラブの厚さ (cm) |
|------------------|---------------------------------------|-------------------|-------------|
| 一 向<br>方 版       | $\sigma_c = 40$                       | $\sigma_s = 1200$ | 50          |
|                  | $\sigma_c = 50$                       | $\sigma_s = 1200$ | 45          |
| 二<br>方<br>向<br>版 | $\sigma_c = 40$                       | $\sigma_s = 1200$ | 40          |
|                  | $\sigma_s = 50$                       | $\sigma_s = 1200$ | 35          |
|                  | $\sigma_s = 60$                       | $\sigma_s = 1200$ | 30          |
|                  | $\sigma_s = 80$                       | $\sigma_s = 1400$ | 25          |

## (B) はり断面

はり部分のコンクリート体積は、既述のように少なく、高架橋の軽量化に大きい影響を与えるものではないが、従来の高架橋の諸実例から、はり断面を選んで年代順にならべたのが表-6である。表-6からはり断面の傾向としては、はりの高さは小さく、はりの幅は大きくなりつつあることを知ることができる。

表 - 6

| 区 間       | 型 式  | ス パ ン                   | はり高さ                    | はりの幅                       |
|-----------|------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 上野 - 神田   | 2線3柱 | 5.48 <sup>m</sup> (18') | 91.4 <sup>cm</sup> (3') | 76.2 <sup>cm</sup> (2' 6") |
| お茶の水-両国   | 2線2柱 | 7.4                     | 150                     | 60                         |
| 天王寺附近     | 2線2柱 | 6.0                     | 100                     | 65                         |
| 神戸市街線(海側) | 2線2柱 | 5.5                     | 115                     | 85                         |
| 有楽町-浜松町   | 2線3柱 | 6.0                     | 90                      | 60                         |
| 大阪環状線     | 2線2柱 | 6.0                     | 90                      | 90                         |
| 中央線(名古屋)  | 2線2柱 | 6.0                     | 90                      | 80                         |

## (2) 柱 部 分

柱部分のコンクリート体積も、高架橋で占める割合は少ない。従来の諸実例から柱断面を選んで年代順にならべたのが表-7である。表-7から柱断面の傾向としては、漸次小さくなりつつあることを知ることができる。

表 - 7

| 区 間       | 型 式  | ス パ ン                   | 柱 の 寸 法                                                 |
|-----------|------|-------------------------|---------------------------------------------------------|
| 上野 - 神田   | 2線3柱 | 5.48 <sup>m</sup> (18') | 76.2 <sup>cm</sup> × 76.2 <sup>cm</sup> (2' 6" × 2' 6") |
| お茶の水-両国   | 2線2柱 | 7.4                     | 120 × 120                                               |
| 天王寺附近     | 2線2柱 | 6.0                     | 95 × 100                                                |
| 神戸市街線(海側) | 2線2柱 | 5.5                     | 115 × 85                                                |
| 有楽町-浜松町   | 2線3柱 | 6.0                     | 90 × 60                                                 |
| 大阪環状線     | 2線2柱 | 6.0                     | 80 × 80                                                 |
| 中央線(名古屋)  | 2線2柱 | 6.0                     | 80 × 80                                                 |

## 5. 従来のラーメン構造高架橋にたいする検討

既述のように、ラーメン構造の高架橋は、施工方法および設計方法の進歩発達により、現

在では昭和初期に比較して、0.3程度の地震係数を考えても70～80%程度軽量化されるようになった。しかし、スパン割、断面の選定、支承構造、等を検討するとき、なお軽量化の余地があるので、ここにその大略を述べる。

### (1) スパン割

高架橋のスパン割は、5.5～6.0 m程度の等スパンとするのが普通とされているが、多スパンラーメンはこれをスパンとすれば軽量化できるのか、等スパンとしない方が軽量化できるのか、未だ十分検討されていない。図-7は剛比が一定で、固定支承のn等スパンラーメンのxスパンにのみ載荷した場合に、xスパンにおこるスパンモーメント $M_{max}$  ( $= nMxWI^2$ ) の係数 $nMx$ の計算結果を示したものである。

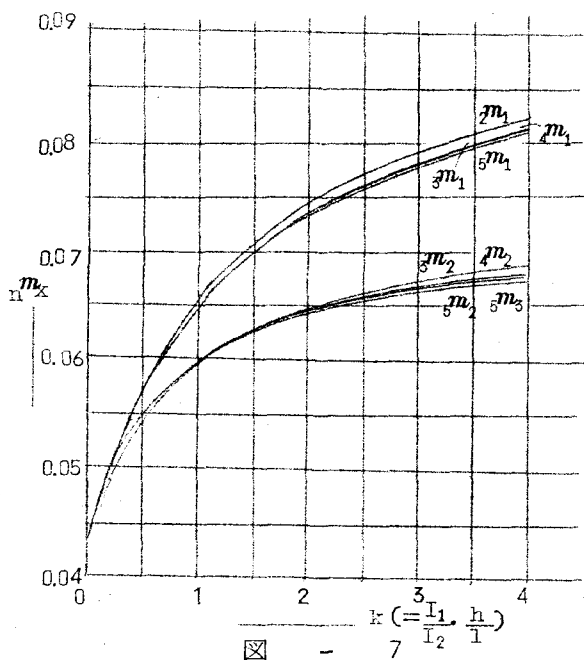


図-7より、n等スパンラーメンにおこる最大スパンモーメントは、第1スパンにおこることを知ることができる。従つて、高架橋を、はり断面が一様で等スパンラーメンとして設計すれば、内部スパンのはりには応力的に相当の余裕があることとなる。それで、内部スパンのスパンを第1スパンより大きくとり、各スパンにおこるスパンモーメントが等しくなるようなスパン割にすれば、高架橋はより軽量化されるものと考えられる。

## (2) 持出し ばり の長さ

ラーメン構造の高架橋は、その区劃ごとの間に単純ばりを入れたり、端柱を突合せたり、持出しばりをつけたり、している（図-8参照）。最近では持出しばりのはり長さを長くして、第1スパンのスパン モーメントの減少を図つたり、フーチングにおける偏心量を少なくして、コンクリート体積の減少化を考えて設計をしている。しかし、持出しばりを余り長くするとタワミが大きくなり、軌道に不陸をおこすおそれがあるので、高架橋において普通採用されているようなはり断面を対象とすると、持出しばりの長さは、運転保守上、2.0m程度とするのが安全であると考えられている。

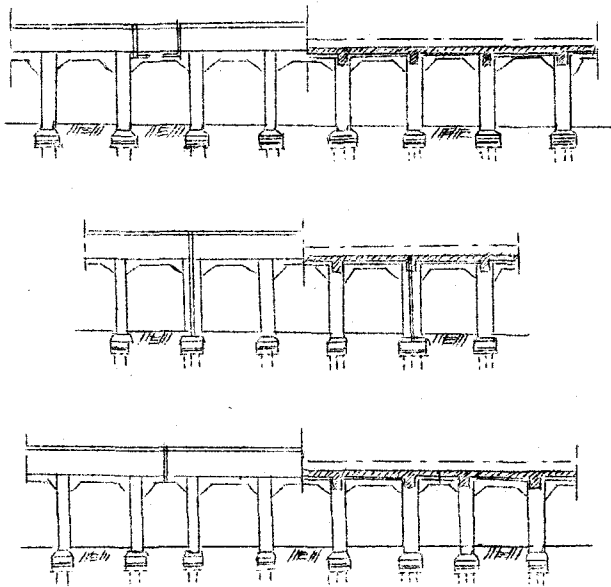


図 - 8

## (3) 剛比および断面の選定

ラーメン構造の高架橋において、剛比を適当にとらなければならないことは知られているが、どの程度にとつてよいかは明らかにされていない。これがため、剛比は設計者の勘感によつて選定されている場合が多い。筆者の経験によれば高架橋の剛比

( $= \frac{\text{はりの断面二次モーメント} \times \text{柱の高さ}}{\text{柱の断面二次モーメント} \times \text{はりのスパン}}$ ) は、荷重によつてその傾向を異にするけれども、2.0以下とするのが適当であると考えている。この剛比選定に当たり、はり

断面二次モーメントの増減の比が一定の場合には、剛比の値には変化は見られない。従つて高架橋を軽量化するためには、部材断面が最小となるように設計しなければならない。たとえば、3スパン ラーメン高架橋のはり断面として図-9(a) (b) (c) の三つの場合を対象に、高さ6m、スパン6m、柱断面90cm×90cm として、剛比 $k$ およびKS-18 によつて第1スパンにおこるスパン モーメントを求めると、つぎのような結果が得られる。

(a) の場合  $k = 1.165$   $M = 63.5 \text{ ton}$

(b) の場合  $k = 2.098$   $M = 70.1 \text{ ton}$

(c) の場合  $k = 0.786$   $M = 57.1 \text{ ton}$

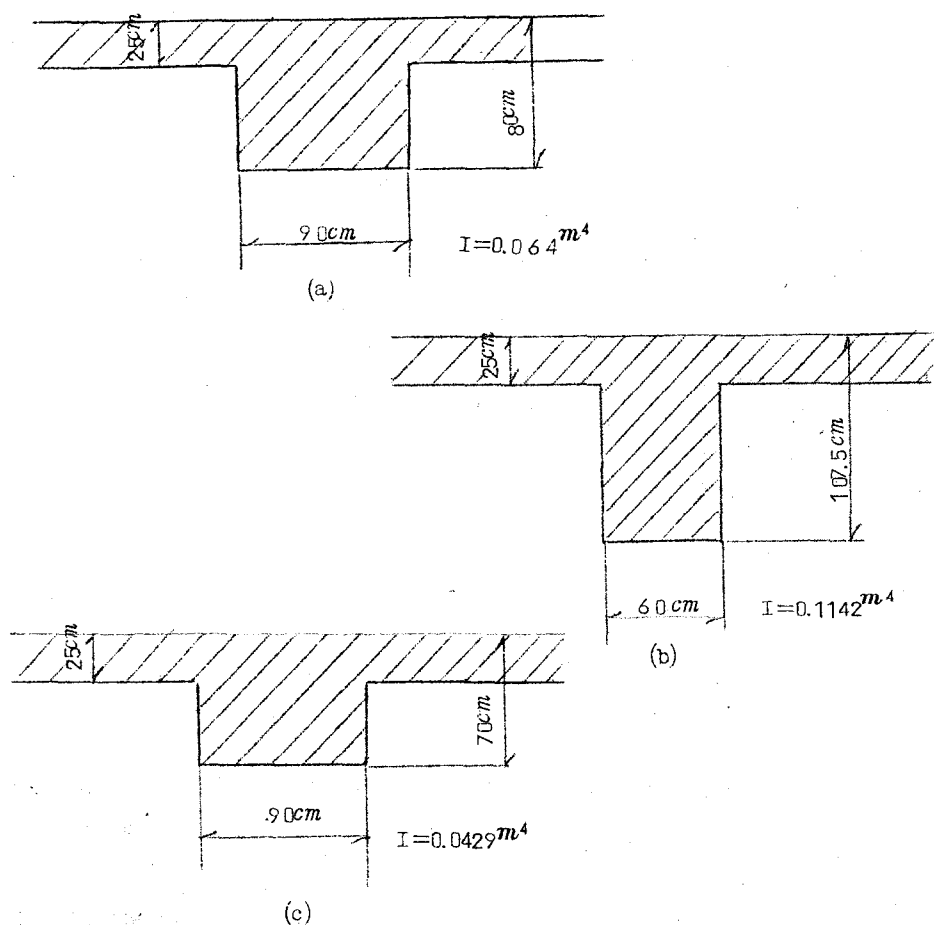


図 - 9

(c)のように、断面二次モーメントが小さくなるように、断面を選定し、剛比を小さくすれば、高架橋の軽量化にたいして有効であると考えられる。しかし、はり断面を小さく選定することが、水平荷重、温度変化およびコンクリートの乾燥収縮の影響にたいし、効果的であるか、どうかは別に検討しなければならない。

n等スパン ラーメンの高架橋において、1スパン当り水平荷重Pをうけると、はり断面が小さくて剛比が小さいほど、

端柱上部におこる材端モーメントは小さくなることを図-10は示している。

また、n等スパン ラーメンが、温度変化およびコンクリートの乾燥収縮の影響によつて端柱上部におこる材端モーメント  $nM_{0.0}'$  の係数  $m_{0.0}'$  は、剛比が小さいほど、スパン数が多いほど、値が大きくなることを図-11は示しているが、スパン数を多くしないようにするか、つぎに示す  $nM_{0.0}'$  を求める一般式 
$$nM_{0.0}' = nM_{0.0}' \frac{EI_1 \epsilon t}{h}$$
 において、はりの断面二次モーメント  $I_1$  を小さく選ぶようにするか、すれば  $nM_{0.0}'$  を小さくすることができるので、はりの断面二次モーメントを小さく選ぶことは高架橋の軽量化にたいして有効であると考えられる。

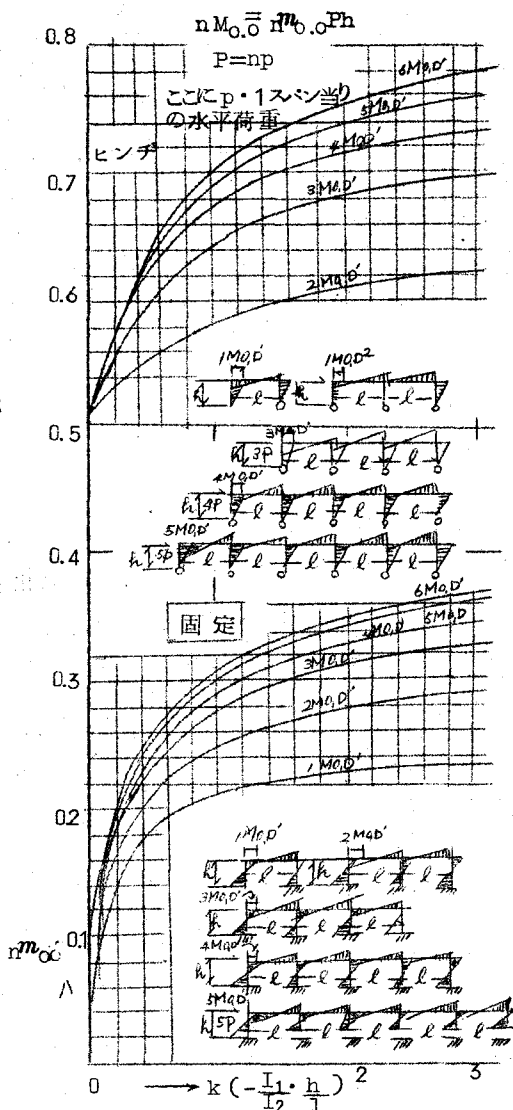


図 - 10

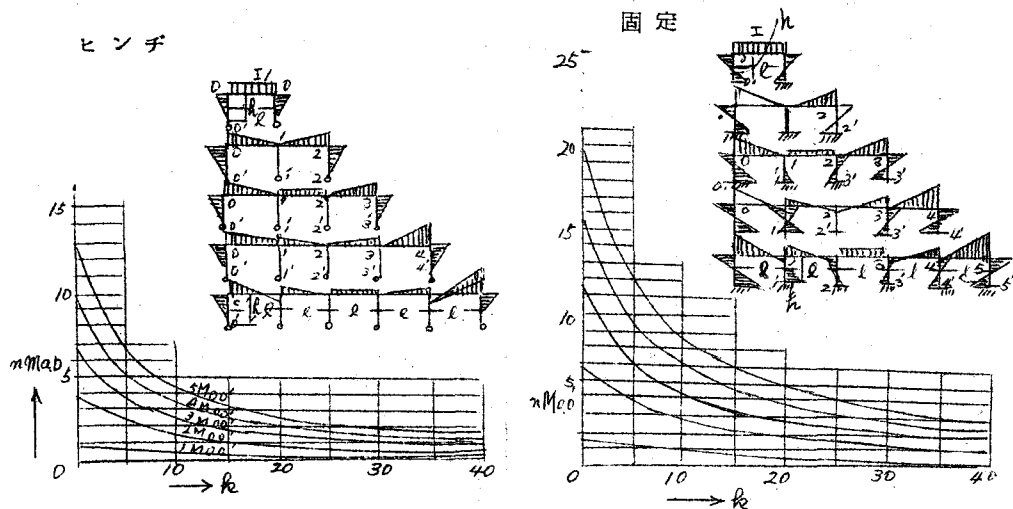
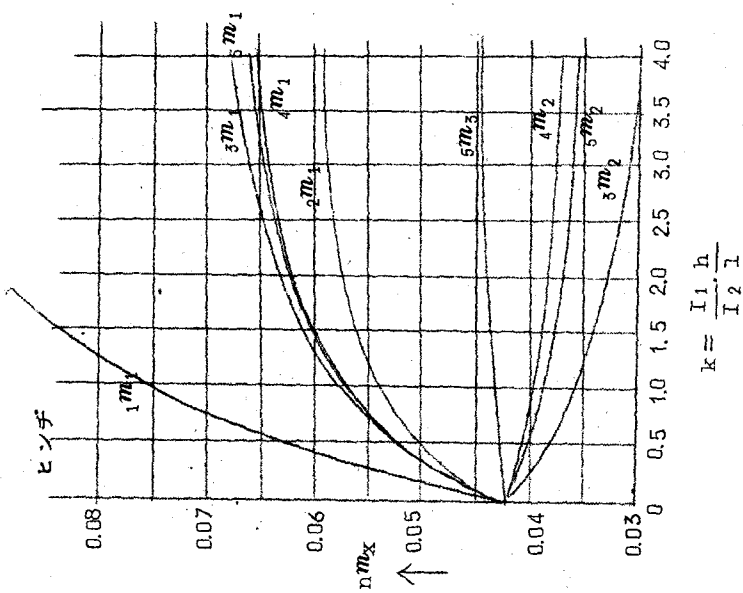
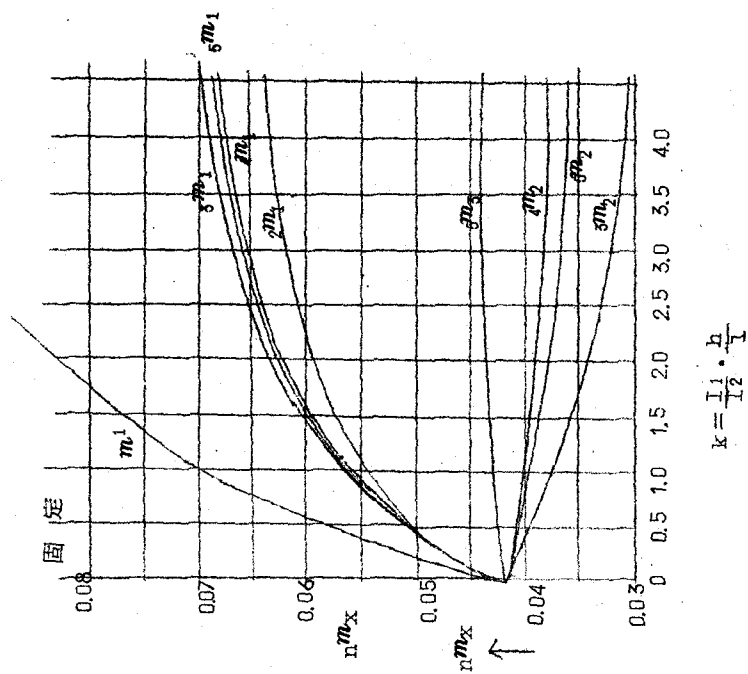
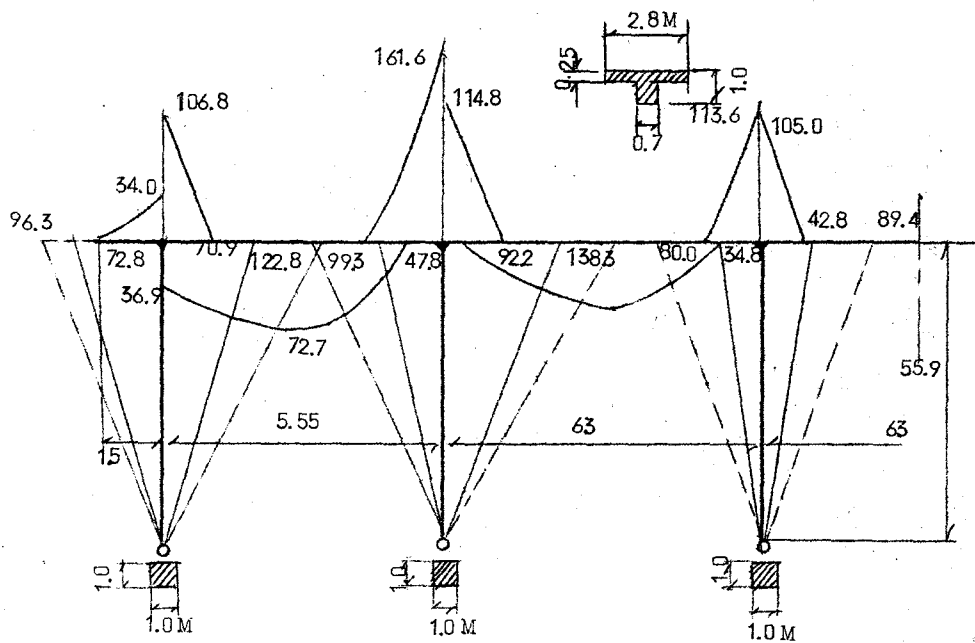


図 - 11

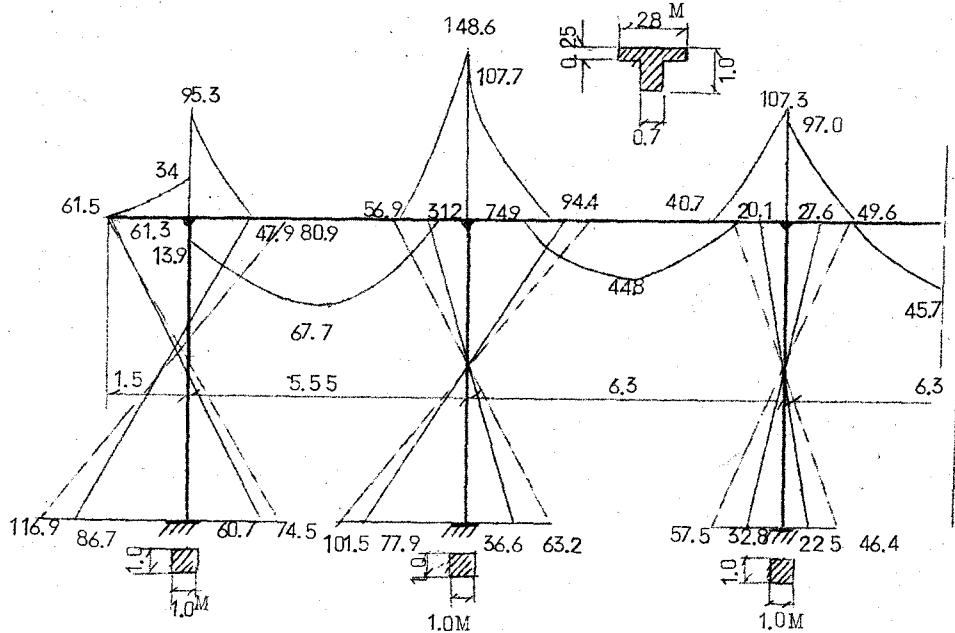
#### (4) 支 承 構 造

$n$ 等スパン ラーメンにおいて、等分布荷重が満載する場合のスパン モーメントは図-12が示すように、ヒンチ支承と固定支承の間にはほとんど差異は見られないが、水平荷重にたいしては、図-10が示すように固定支承とするのが有利であり、温度変化やコンクリートの乾燥収縮にたいしては、図-11が示すようにヒンチ支承とするのが有利である。ここに筆者は、両支承構造の長所を生かして、両端柱をヒンチ支承、内部柱を固定支承とすることを提唱する者である。図-13は、5スパン ラーメンについて、等スパン ヒンチ支承、等スパン固定支承、等スパン両端ヒンチ内部固定支承、両端スパンを小さく柱断面を異にした両端ヒンチ内部固定支承、の四つの場合の最大曲げモーメントを比較したものである。





(a)



(b)

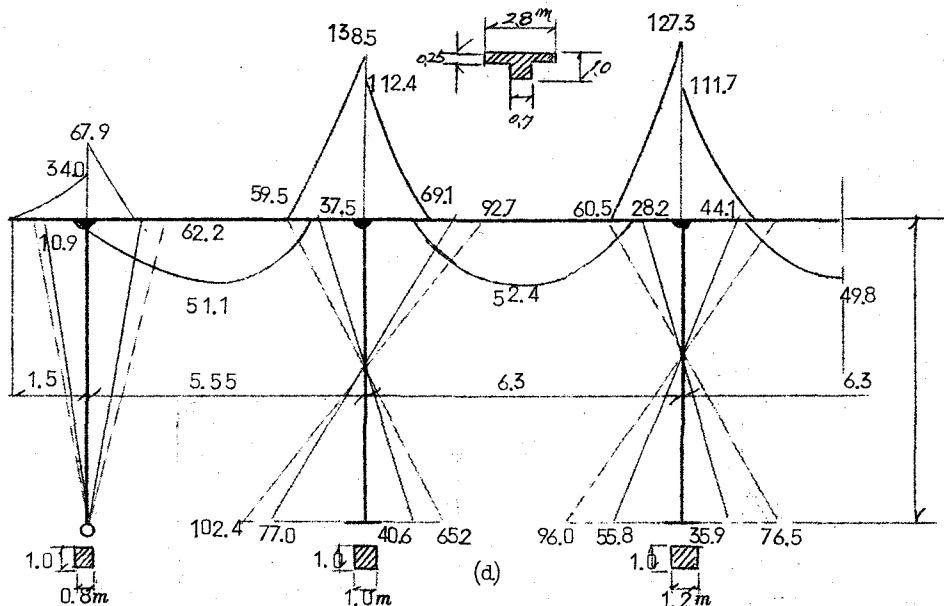
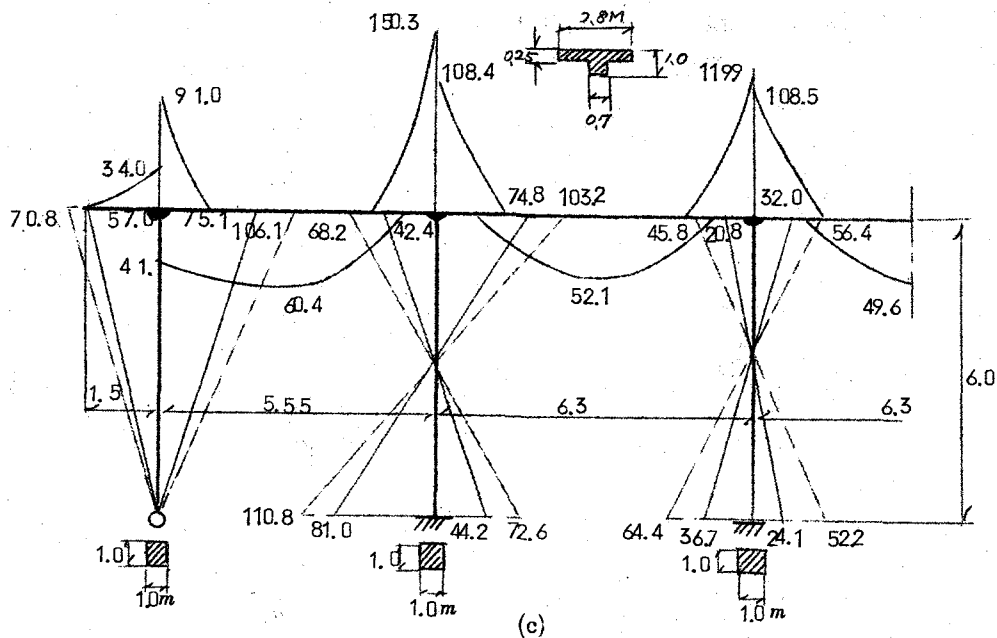


図-1 14は、上記の検討の結果を参照して設計した高架橋の最大曲げモーメント図であり、図-1 15は、1区劃長を等しくして従来のように等スパン ラーメンとして設計した場合の最大曲げモーメント図である。図-1 14および15の複線1m当りのコンクリート体積は、 $6.0 \text{ m}^3/\text{m}$ および $8.9 \text{ m}^3/\text{m}$ となつた。すなわち、図-1 15のように設計することによつて、

昭和6、7年頃のラーメン構造高架橋に比較して、コンクリート体積を50%程度に軽量化することが可能となつた。図-16は、このように設計した高架橋の概略図であるが、これを図-4、5、6と比較するとき、相当軽量化されていることを知ることができる。

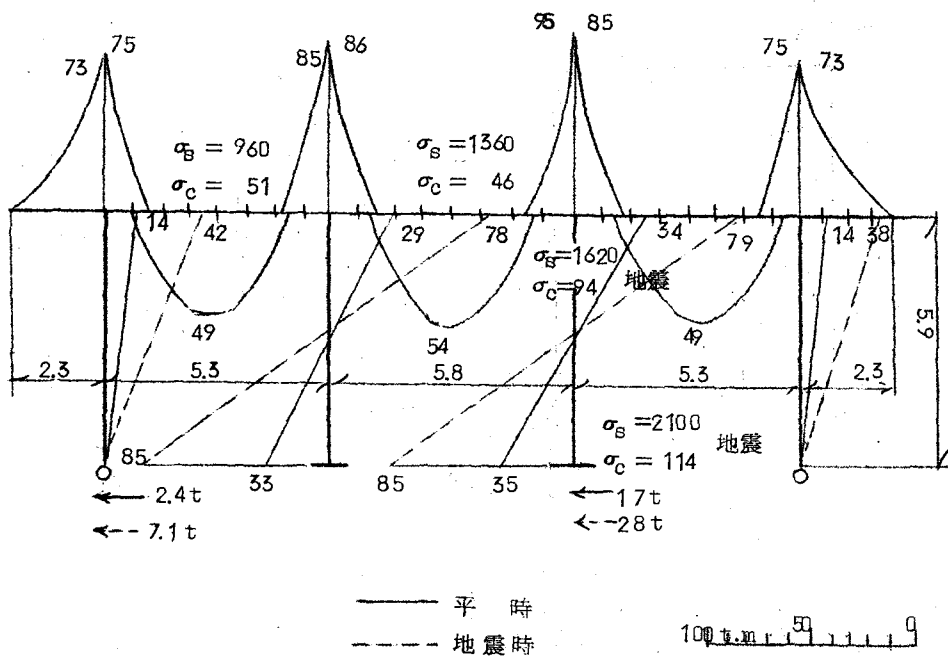
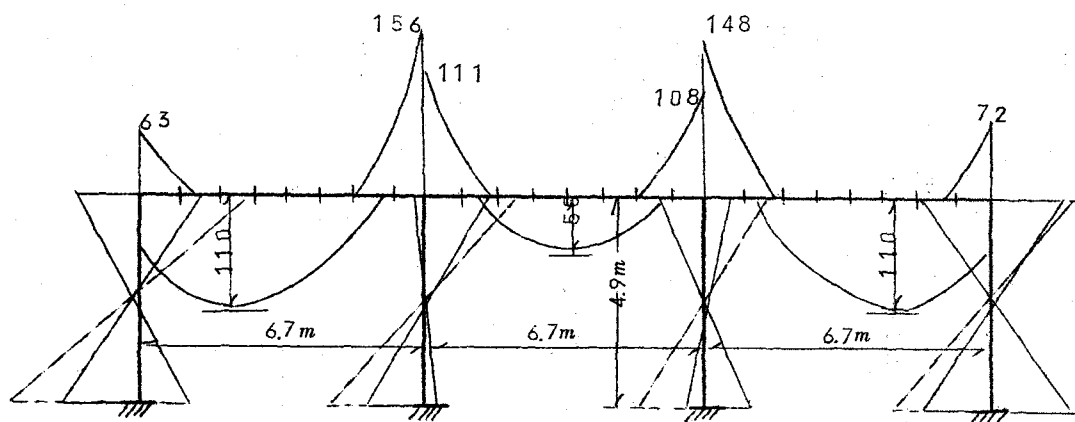
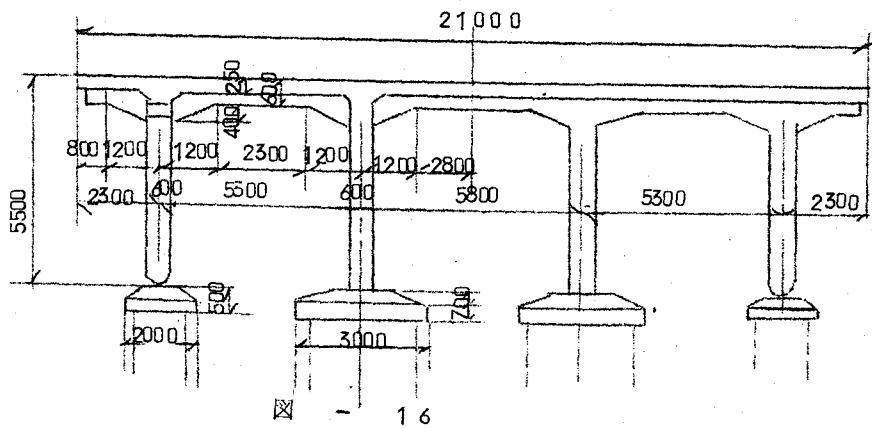


図 - 14



最大曲げモーメント図

図 - 15



## 6 結 論

ラーメン構造高架橋の軽量化を、総合して結論づければ、つぎのように考えられる。

- i 剛比一定の等スパン ラーメンとして設計すべきではなく、持出しばりを有し、各スパンの最大スパン モーメントが等しくなるようなスパン割とすべきである。
- ii 許容応力度の高い鉄筋およびコンクリートを用い、スラブは特に薄く設計すべきである。
- iii はりの断面二次モーメントはなるべく小さくなるように選定しなければならない。
- iv 剛比は、2.0以下とするのが適当と考えられる。
- v 多スパンラーメンの支承は、両端をヒンジ支承、内部を固定支承とすることが望ましい。