

中国道，吹田インター チェンジ 4,5 号橋（名神道路 アンダーパス構造）の設計・施工・試験について

品川正幸*・河島良秀**

1. ま え が き

中国高速道路，吹田インターチェンジ（以下吹田 IC という）工事は，日本万国博覧会会場の表玄関として，昭和 45 年 3 月 15 日の万博開催日までに使用開始ができるように工事が進められている。本橋は，営業中の名神高速道路を開削して架設する特殊橋梁で，下部工が鉄筋コンクリート構造で，上部工が PC 構造物の門型ラーメン構造になっているが，以下この橋梁の計画，設計，施工および諸問題点に対する試験工事等について記述するものである。

写真-1 4号橋の完成

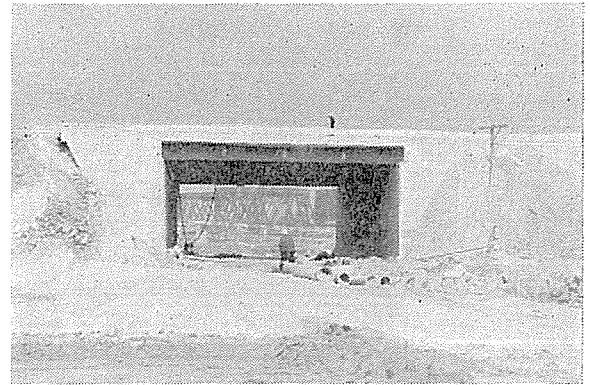
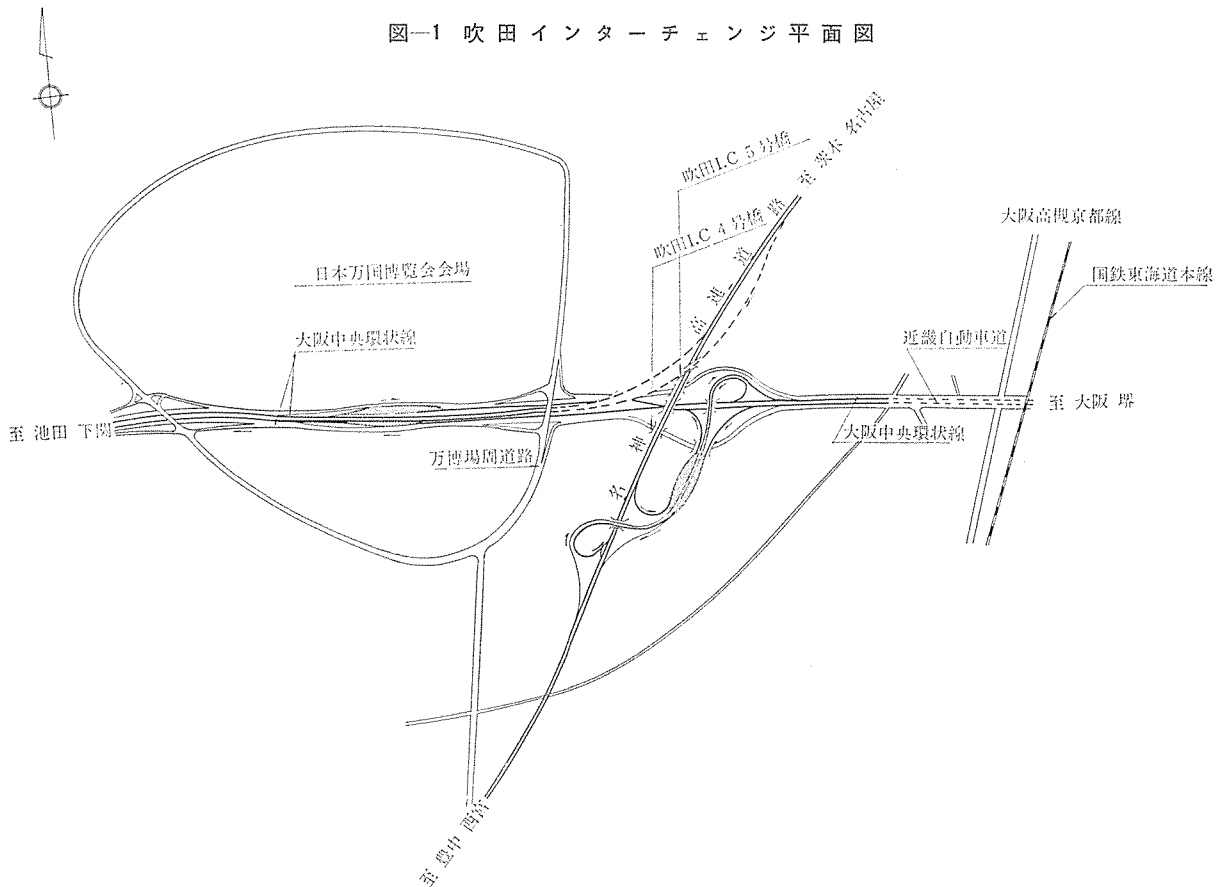


図-1 吹田インターチェンジ平面図



* 日本道路公団大阪支社豊中工事事務所

** ピー・エス・コンクリート株式会社大阪支店

2. 基本計画

(1) 概 要

吹田1Cは、名神高速道路、中国高速道路、および近畿高速道路の3高速道路と府道中央環状線とを相互に連結する重要施設であって、その総面積は2145m²、総事業費60億円の規模を誇る、わが国最大のインターチェンジである。吹田IC工事は、万博関連工事として、昭和43年2月14日に着工され、現在舗装、および施設、工事等の最後の仕上げを急いでいるところである。4、5号橋とも中央環状線が、名神高速道路(盛土部)をアンダーパスする構造物である。

(2) 計 画

吹田IC4号橋および5号橋は、営業中の名神高速道路の盛土および切土部の路体を掘削して架設するものであるから、交通対策に重点を置いて設計および工事計画をたてなければならない。本橋の設計および工事施工にあたって特に考慮しなければならぬ条件を列挙すれば、次のとおりである。

1) 名神高速道路の交通に対して障害とならぬこと：名神高速道路の豊中ICと茨木ICとの間の交通量は、約45000台/日であり、特に昼間の混雑時には50台/分と、交通容量の限界まで達しているため、車線幅員を3.25mに縮めても4車線を確保し速度50km/hで走行できるようにしなければならない。

2) 工期をできるだけ短縮すること：名神高速道路の交通に好ましくならぬ制約を与えること、また本橋梁完了後も跨高速道路橋の架設および既設の斜材付きπ型跨道橋の撤去等の、交通規制を必要とする工事が後続することの理由から、工事期間を可能な限り短縮することが要望される。

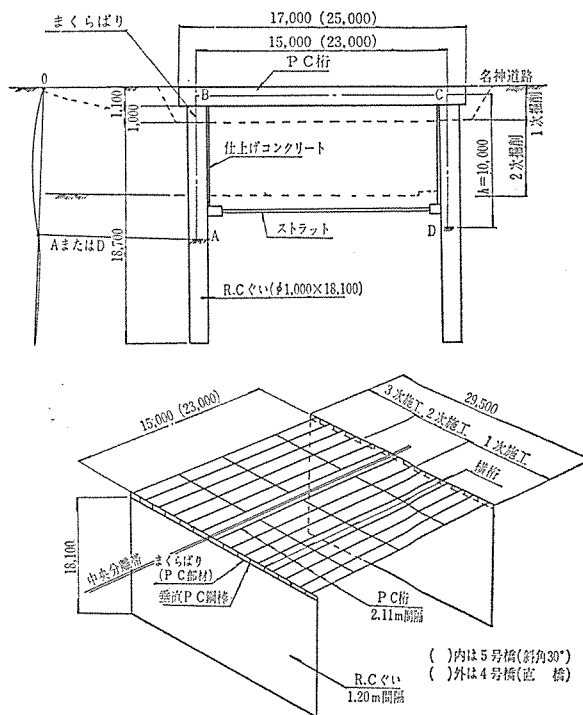
3) 事故防止に万全であること：高速道路では、ちょっとした不注意があっても大きな惨事になることは明らかである。工事現場付近で自動車運転手に不必要な不安感を与えないため、作業現場の目隠し、道路標識および道路照明等の適切な設備を行なわなければならない。

4) 作業現場の防護が十分であること：走行路に隣接する作業現場はきわめて大きな危険にさらされている。万一現場付近で事故が発生しても、現場労務者その他工事関係者に死傷を与えないだけの十分な防護が行なわれなければならない。

以上の1)~4)の条件を基本として種々検討の結果、名神高速道路の中央分離帯を完全に撤去させ、全幅員24.40mを舗装し、その1/3ずつを作業区域とし、逐次工事を進める工法を採用した。橋梁形式は、格子床版を使用する鋼橋梁案、ボックスカルバート案、およびポー

タル(門型)カルバート案等を比較検討の結果、施工の安全性、経済性、および工期短縮の点から、下部工として現場打鉄筋コンクリート杭を1.20m間隔に打ち、その上にまくらばりを作り、T型PC桁をならべ、交点横桁とまくらばりとの位置でPC鋼棒で上部と下部とを一体とする門型ラーメン橋とした(図-2)。

図-2 吹田IC4号橋構造一般図



3. 設 計

(1) 構造物の形式

プレキャストのPC桁を上ばりとし、現場打鉄筋コンクリート杭を柱とするラーメン構造である。柱(杭)はアンダーパスの路面までは壁の働きをして、背面に土圧の作用を受け、それ以下は地中に埋め込まれており、したがって、ラーメン構造の支持点については境界条件が明確でない。これに類似した杭の設計方法については、日本道路公団試験所 基礎構造研究室長 佐藤氏の研究がある。なお本橋では、設計を簡単にするために仮定支持点A、DをもうけてA、B、C、Dから成りたつ門型ラーメンとみなした。このA、D点を仮定するには杭頭に回転角のみを生ぜしめたときの地中杭の変形において、その第1不動点をとって、柱の高さを10mとした。ここでラーメンの上ばりに載荷したとき杭の挙動に影響するのは、第1不動点以内の高さ(*l*)では背面土だけで杭の前面土の有無には関係ないものとした。

(2) 部材の構成

上部構造：プレキャストPC部材を主桁とし、横桁を現場施工して格子構造とする。

下部構造：直径 1.00 m の現場打鉄筋コンクリート杭を中心間隔 1.20 m で壁状に配置する。

上下部の連結：上部構造の支点横桁と下部構造の杭頭部杭ばりをとを垂直の P C 鋼棒を用いて剛結する。

(3) 上・下部の剛結部の力の伝達

P C 主桁の支点曲げモーメント M_{ba} は、支点横桁にはねじりモーメント T_{bc} として、さらに R C 杭には M_{cd} として伝達してゆく。 M_{ba} により P C 桁支点断面を、 T_{bc} により支点横桁と杭ばりを、 M_{cd} により上下部の剛結部の断面をそれぞれ決定した。またプレキャスト桁と現場施工の支点横桁との接面に作用する T_{bc} については、支点横桁と杭ばりのはり軸方向にプレストレスを与えてねじりによるせん断応力度を許容値以下におさえるようにした。

図-3 上、下部連結構造

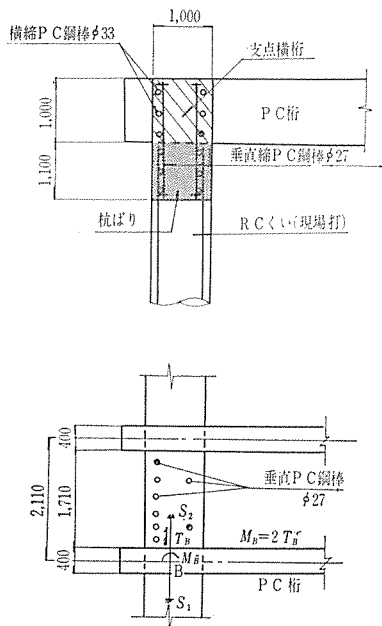
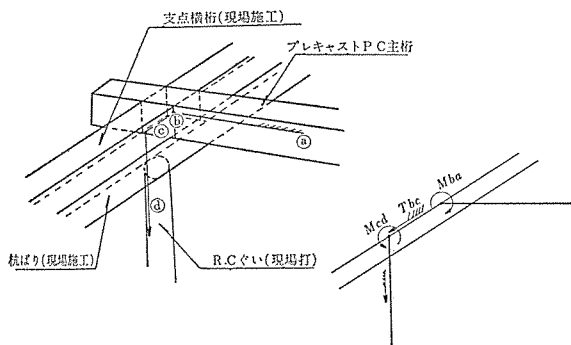


図-4 連結部の力の伝達

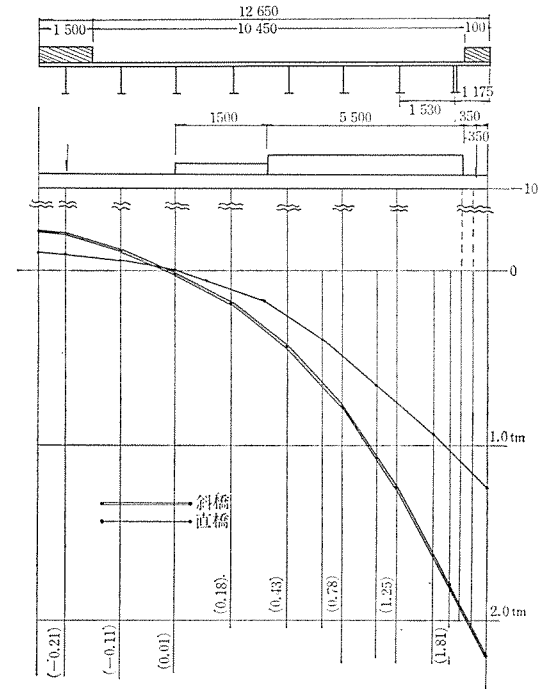


(4) 荷重の横方向分配について

a) 4号橋(直橋)について Guyon-Massonet の方法を両端固定の格子桁について修正して用いた。

b) 5号橋(斜橋)について 斜橋の影響線は立体ラーメンとして「変形法」によってコンピューターで算出した。図-5 に示すように斜橋の鈍角部においては直橋の約 80% 増の支点曲げモーメントが生ずることになる。その他にせん断力、ねじりによるせん断応力、および斜め立体ラーメンの壁に土圧が作用する場合などの検討にも斜角を考慮した。

図-5 鈍角部の橋軸方向支点曲げモーメントの影響線



4. 施 工

(1) 工事数量

吹田 I C 4 号橋工事数量は 表-1, 5 号橋工事数量は 表-2 に示す。

(2) 名神高速道路路線の切換えについて

名神高速道路の交通対策は、現在の交通量を許容しな

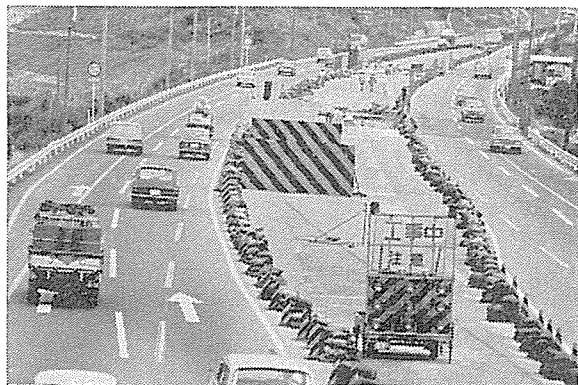
表-1 吹田 I C 4 号橋数量表

材 料 名	形 状	数 量	摘 要
プレキャスト P C 桁	H=1 100, L=17 000	14 本	
ベ ッ ト 杭	φ 1 000×18 100	48 本	
コンクリート		424 m ³	
型 わ く 鉄 筋		1 330 m ² 20 620 kg	
P C 鋼 棒	φ 24	594 kg	中 間 横 桁 へ ッ ド ビ ッ ム 垂 直 締 め 支 点 横 桁
	φ 27	1 968 kg	
	φ 33	4 513 kg	
工 費		約 43 300 000 円	

表-2 吹田 I C 5 号橋数量表

材 料 名	形 状	数 量	摘 要
プレキャスト P C 桁	H=1 150 L=24 000~27 000	16 本	
ベ ッ ト 杭	{ φ 1 000×15 200 φ 1 000×	56 本 32 本	
コンクリート		568 m ³	
型 わ く 鉄 筋		1 800 m ² 30 840 kg	
P C 鋼 線	φ 7	5 325 kg	
P C 鋼 棒	φ 24	533 kg	支 点 横 桁 へ ッ ド ビ ッ ム 中 間 横 桁 垂 直 締 め
	φ 33	3 600 kg	
工 費		約 60 900 000 円	

写真-2 名神高速道路の車線の切換え
(第2次施工中)



がら工事を進めなければならないため、一車線の幅員を 3.25 m とする 4 車線および走行速度 50 km/h の確保を工事中の常態とした。施工方法としては、名神高速道路全幅員 24.40 m を 図-2 のように 3 等分を行ない、その 3 等分の 1 区間ずつを施工した。走行路と作業区域には土俵およびラバーコーンを 2 m 間隔に配置し、工事現場付近では縞鋼板で目かくし塀を設けた。また、工事現場には臨時の水銀灯を 45 m 間隔で設備し夜間の安全をはかった。

(3) 施工順序

- ① 最初の施工区分(第1次施工区分)を設ける(車線の切換え、防護工の設置など)。
- ② 鉄筋コンクリート杭(現場打ベノト杭)を打設する。
- ③ 表面掘削(第1次掘削)をする。
- ④ 各杭の杭頭をはりで連結する(杭ばりの施工)。
- ⑤ 杭ばり上にプレキャストPC桁を配置する。
- ⑥ PC桁間の床板および横桁を現場施工して横組をする。
- ⑦ 端部(支点)横桁に配置した垂直鋼棒で上部と下部とを剛結してラーメン構造にする(これで橋面を舗装して名神高速道路の交通が可能となる)。
- ⑧ 施工区分の切換えをする(第2次施工に移る)。
- ⑨ 以下第2次、3次の施工区分についても同じように施工してゆく。
- ⑩ 第3次施工が終了すれば、名神高速道路の交通を正常に復元できる。そのあとアンダーパス部分の掘削(第2次掘削)をし、ストラットを設置する。

5. 試 験

(1) 試験の目的

この構造物の特殊な設計内容については、いままでに説明したとおりであるが、その他の内容も含めて種々な仮定のもとで設計したものが多い。そのうちでとくに次

写真-3 杭ばり上にプレキャストのPC桁を配置したところ(第3次施工中)



のような内容に問題がありそうなので、実橋試験を行なって実際の傾向を調べることにした。

① 支点横桁と杭ばりには、部材の軸方向にプレストレスを与えた。しかしこの部材にはプレストレスによる変形を阻止しようとする拘束が種々ある。そこで、プレストレスが、実際にはどの程度導入されているかを調べる。

② 上部と下部との剛結が完全であるかどうか、所定のラーメン構造として、主桁の支点曲げモーメント(固定曲げモーメント)が計算どおりに発生するかどうか、また、この支点曲げモーメントが下部の杭頭までにはどのように伝達するかを調べる。

③ 杭頭に伝達した曲げモーメントは杭の長さに沿ってどのように変化してゆくか、地中杭がラーメンの柱として、どのように作用するかを調べる。

④ 斜めの立体ラーメンとして、とくに平面鈍角部に発生する曲げモーメントは、どのような値になるか。

(2) 試験の種類

前述した目的にたいして、次のような種類の試験を実施する。

a) プレストレス導入試験(課題①に対して) 支点横桁および杭ばりのはり軸方向のプレストレスの分布を調べる。

b) 載荷試験(課題②,③,④に対して) 載荷試験における測定の種類は次のようなものである。

1) 応力ひずみ量の測定

Ⓐ PC主桁のスパン方向のひずみ値の分布を調べる。

Ⓑ 支点横桁、杭ばり、杭のひずみ値の分布を調べる……ラーメンの平面(図-2 A-B-C-D面)方向について

Ⓒ 中間横桁のひずみ値を測定する……5号橋(斜橋)について。

2) たわみ量の測定

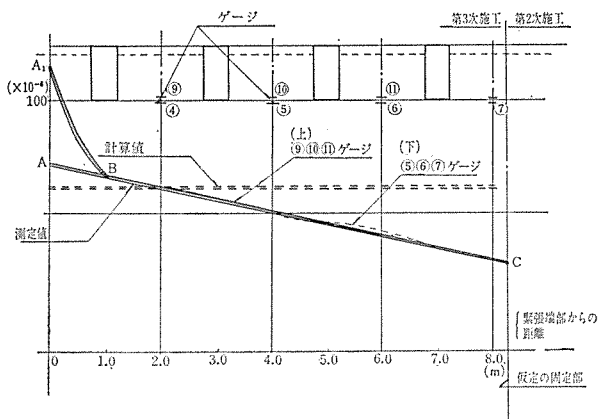
- ⑧ スパン中央部についての横方向のたわみ形状を調べる。
- ⑨ 試験桁について、スパン方向についてのたわみ形状を調べる。

3) 傾斜角の測定：上部構造の桁の固定部(支点横桁)において、プレキャスト桁の上と支点横桁の現場打部の上に傾斜計をセットして傾斜角を測定するとともに、相互間の値の差を調べる。

(3) 測定値のまとめと解析

a) プレストレス導入試験について (はり軸方向)

図-6 支点横桁、杭ばりのプレストレスの分布



測定値表から、はりの図心近におけるプレストレスによるひずみ値の分布をグラフにすると図-6に示すようになる。PC鋼棒の固定端(第2次施工区分とのジョイント部)におけるひずみ値は、緊張端(ジャッキを作用する側)のひずみ値の60%程度にしかならない。すなわち、プレストレスによるはりの弾性変形を阻止しようとする拘束力が、かなり大きなものであることを示している。いま図-7のように拘束力を杭頭を固定した地中の単杭の水平変位(δ)を生じさせる水平力(H)とみなせば次のように表わすことができる。

$$\delta = \frac{\beta \cdot H}{K \cdot D}, \quad H = \frac{\delta \cdot K \cdot D}{\beta}$$

δ : 杭の水平変位量 (……プレストレスによるはりの変形量)

E : 杭に作用する水平力 (……PC鋼棒の緊張力)

K : 横方向地盤反力係数

D : 杭の直径

E : 杭コンクリートのヤング係数

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K \cdot D}{4EI}}$$

I : 杭の断面2次モーメント

図-7のように、各杭が単独杭として拘束するものとすれば、全杭による拘束力 R は次のようになる。

$$R = \sum H_n = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i \cdot K \cdot D}{\beta}$$

実際の場合について諸数値を与えるとはりの緊張端側の変位 δ_0 は

$$\delta_0 = \int_0^l \frac{P}{A_c \cdot E} dx = \frac{P_m \cdot l}{A_c \cdot E}$$

$$P = 12 \times 50\,000 = 600\,000 \text{ kg}$$

$$P_m = 0.8 P = 0.8 \times 600\,000 = 480\,000 \text{ kg} = 4.8 \times 10^5 \text{ kg}$$

$$A_c = 100 \times 110 + 100 \times 100 = 21\,000 \text{ cm}^2 = 2.1 \times 10^4 \text{ cm}^2$$

$$\delta = \frac{4.8 \times 10^5 \times 8.0 \times 10^2}{2.1 \times 10^4 \times 3.0 \times 10^5} = 6.1 \times 10^{-2} \text{ cm}$$

図-8

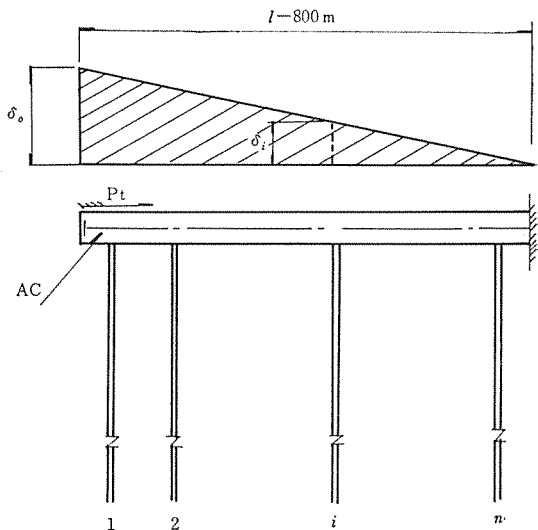


図-8のように、変位量 δ が直線変化すると仮定すれば、固定端についての拘束力 R は次のようになる。

$$R = \frac{\delta \cdot K \cdot D \cdot N}{2 \cdot \beta} = \frac{0.06 \times 20 \times 10^5}{2 \times 4.3} \times 7 = 100\,000 \text{ kg}$$

ここで

$$K = 20 \text{ kg/cm}^3 \text{ (実測値*)} \quad D = 100 \text{ cm}$$

$$B = \sqrt{\frac{2.0 \times 100}{4 \times 3.0 \times 10^5 \times 4.9 \times 10^5}} = 4.3 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^2$$

これは、全緊張力の20%程度で、実測値の損失率40%に比べると大差がある。実際には杭間がきわめて小さい配置なので単独杭としての取扱いは無理であるが、もし試験値に相当する拘束力 ($480\,000 \times 0.40 = 200\,000 \text{ kg}$) を生じしめるような横方向の反力係数を求めると $K =$

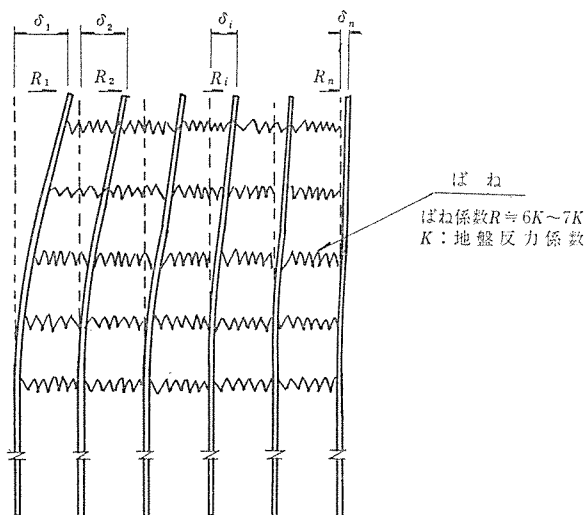
50 kg/cm³ ぐらいになる。

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{50 \times 100}{4 \times 3.0 \times 10^3 \times 4.9 \times 10^6}} = 5.4 \times 10^{-3}$$

$$R = \frac{0.061 \times 50 \times 100 \times 10^3}{2 \times 5.4} \times 7 \doteq 200\,000 \text{ kg}$$

図-9 に示すように、杭間にはばねがある群杭壁を想定して、変位 δ_i を生じさせる R_i を算出すればよいわけだが、このときのばね係数 (K) として地盤の反力係数 K 値の 2~3 倍をとればよい。ただしこの場合の K 値は、測定データからわかるように変位量によって K 値がいちじるしく異なるので、実際の変位量に対応する K 値を用いなければならない。今後、この種の部材にプレストレスを導入するには、いままで述べたようにして概略の損失量 (杭の拘束力) を知る必要があるが、その量があまりに大きいので、次のように処理することも考えられる。

図-9



① 施工条件を考慮したうえで、できる限り各段階での緊張区間を短くする。

② すべての PC 鋼材を緊張したあと、さらに数回の緊張をくり返してみる (ただし再緊張の可能な工法の場合…… PC 鋼棒, BBRV 工法など)。なおいままでは、単純なプレストレス ($\sigma = P/A$) の分布を主題に考察したので、実測値の分布を図-6 のように A-B-C と仮定したが、実際には、緊張端の定着部近くでは、大きな集中応力が生じている (A-B-C の分布)。

b) 荷重試験について

1) たわみ量の測定:

① 横方向の荷重分配について (4 号橋); いま個々の桁についての「たわみ」をすべての桁 (6 本) の総たわみの割合として表わすと 図-10 に示すようになる。このように表わした分布形状を Guyon-Massonnet の方法による荷重の横方向分布の形状と直接比較することがで

図-10 横方向のたわみ分布と荷重分配形状



きる。

1.2……6 桁のたわみ…… $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_6$

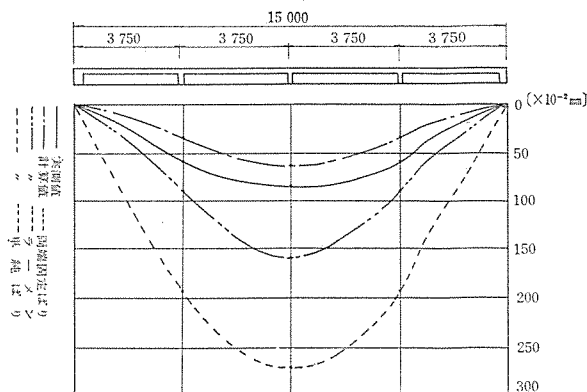
1.2……6 桁の荷重分担率…… K_1, K_2, \dots, K_6 とすれば

$$K_1 = \frac{6 \delta_1}{\sum \delta_n}, \quad K_2 = \frac{6 \delta_2}{\sum \delta_n}, \quad K_6 = \frac{6 \delta_6}{\sum \delta_n} \text{ となる。}$$

図-10 は 計算値と測定値の分布形状を比較したものであるが、ほぼ一致しているので、以後、試験荷重による計算値を求める際の荷重分配としては、本設計と同じものを用いることにする。

② 縦方向 (スパン方向) の分布形状について; たわみの測定値のスパン方向についての分布は 図-11 に示すようになる。同図に示すように、両端固定ばりとラーメンとの中間の形状を示す。

図-11 スパン方向のたわみ分布



2) 応力ひずみ:

① 上部構造 PC 主桁におけるひずみ分布; ひずみの測定値を整理してグラフにすると 図-12 に示すようになる。径間中央部においては、計算値と大差はなく、両端固定ばりとラーメン構造との中間にあるが、支点部近くにおいては両端固定ばりよりも大きな値を示した。このように、支点部近傍で過大になる原因として次のようなことが考えられる。

○ ラーメン隅角部においては、特異な応力分布を示す。

○ 両端を固定した格子桁で、固定部における荷重分配

図-12 スパン方向のひずみ分布 (4号橋)

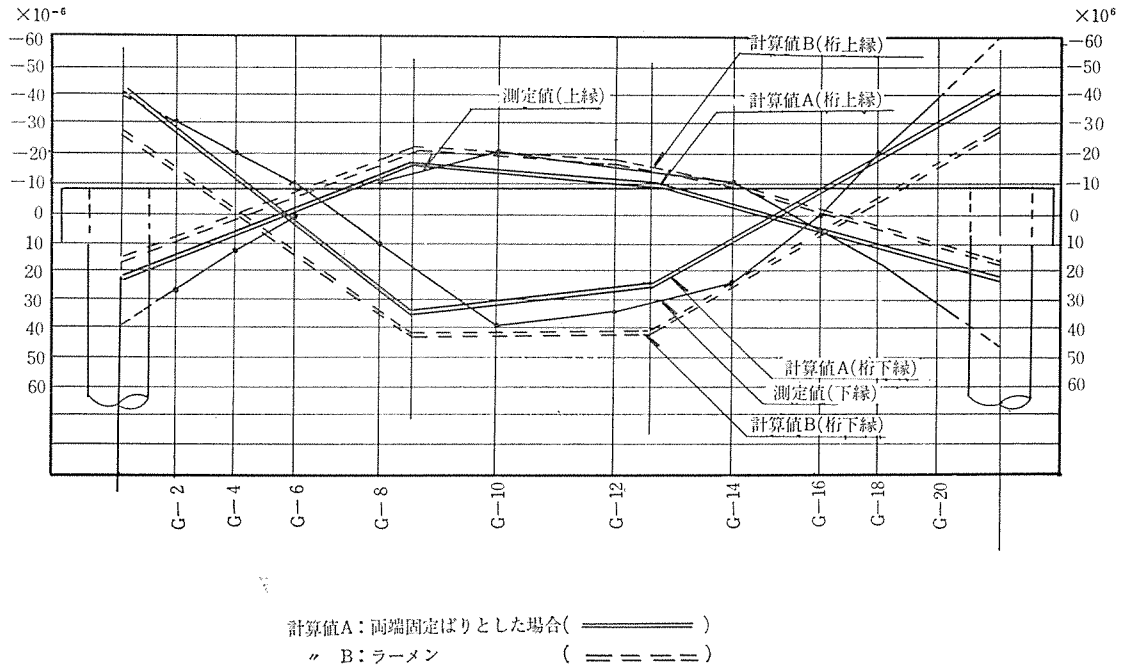
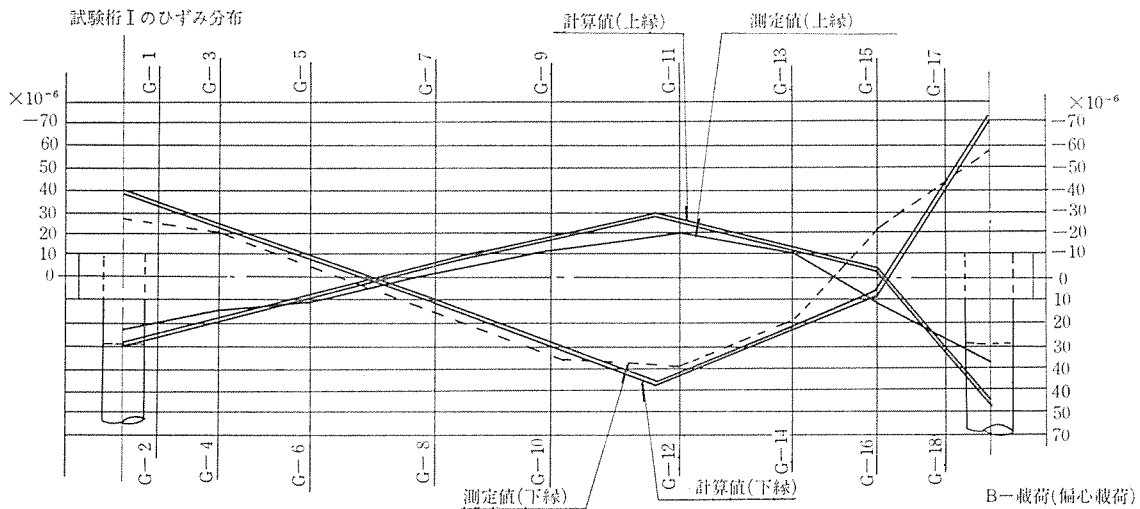


図-13 スパン方向のひずみ分布 (5号橋側桁)



は径間中央部における荷重分配 (Guyon-Massonnetの方法による) よりも、分配効果が悪くなって、載荷重に近い桁 (この場合試験桁) の負担率が大きくなるのではないかと。このことは 図-13 に示すように 5号橋において任意格子桁として、コンピューターによって算出した結果では、固定部についても、実測値と、ほとんど一致していることから推察できる。

以上の結果から、今後の設計では、径間中央部の断面については、ラーメン構造とみなして検討しておけば十分であるが、支点部断面については多少の余裕を与えておく方が好ましい。

③ 支点横桁・杭ばり・杭におけるひずみ分布; 測定結果からは、測定値が過少で整理することはできない。

試験荷重による曲げモーメントの分布は、上部構造 (格子桁) については、前述したように Guyon-Massonnetの方法により求めた計算値のとおりであるが、支点横桁・杭ばり・杭における測定値がこのような小さくなることから、これらの部材に伝達する過程では分布は極度によくなり、橋体の横方向に均等比するので曲げモーメント値が小さく生ずるものと推察できる。これは、支点横桁と、杭ばりの断面のねじり剛性が相当に大きなことと、杭ばりに結合している地中杭が壁として作用しているので、曲げ抵抗が大きく、さらに背土が作用して変形を拘束するからである。

3) 傾斜角の測定: 測定値をピックアップすると、表-3 に示すようになる。

図-14 に示すように、A, Bの傾斜計の動きは同一で

図-14 傾斜角の移向

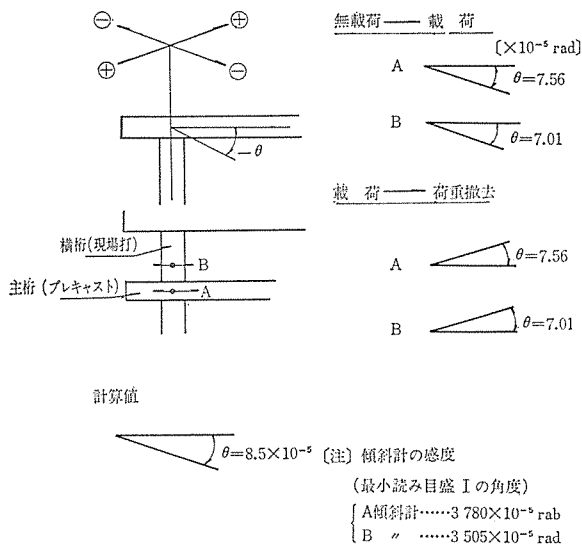


表-3

載荷	撤去	第2回載荷	撤去	第3回載荷	〃
時間	—	10分後	—	—	60
A	+3.78	-3.78	+3.78	-3.78	-3.78
B	-7.02	-14.03	-7.02	-14.04	-14.04

あり、主桁の曲げモーメントは横桁にはねじりモーメントとなって、完全に伝達していることがわかる。

c) 試験結果のまとめ

① 支点横桁・杭ばりにおけるプレストレス導入試験については、はりの弾性変形を阻止しようとする拘束力は地中杭の水平抵抗力がほとんどであるが、今後は計算で杭の抵抗力を求めるときは、単独杭とみなして横方向地盤反力係数をはりの変位量に相当する K 値の実測値の 2~3 倍の大きさにとればよい。

② 設計では先に述べたような門型の立体ラーメンの構造とみなしたが、実際にはどのような性状の構造になっているかを調べるために載荷試験を行なった。とくに地中に埋め込まれた部分について究明することが目的であった。しかし実際に使用できる試験荷重の大きさに限度があったことと、また曲げモーメントが上部構造から

下部構造へ伝達する過程で分散しすぎたことのために、下部の杭に生じたひずみ値があまりにも小さくなってひずみ分布を調べ得なかったのは残念である。しかし、上部構造については多少の性状を明らかにすることはできた。

- 上ばりについては、たわみと応力ひずみの分布から設計で仮定した門型ラーメンと両端が完全固定ばりとの中間の性状を示している（はりの両端の固定度はラーメンと完全固定ばりの中間になる）。
- 斜角を有する 5 号橋では、橋面の鈍角部に設計どおりの大きな力が集中して生ずる。
- 上・下部の結合部については、たわみと応力ひずみの分布と、傾斜角の測定から、完全に剛結しているとみなしてよい。
- 上部構造における荷重の分配は径間中央においては設計計算どおりであるが、支点部については、径間中央部よりも分配効果が悪くなる傾向がある。ところが、下部構造に移行すると、荷重の分配はきわめてよくなって均等化する。この下部構造への荷重分配の理論（または数値）解析は今後の興味ある課題であり、設計するうえでも十分に考慮しなければならない。

6. あとがき

在来の道路をアンダーパスする道路あるいは水路などを設置するには種々のタイプの構造がある。本工事の場合、工費、工期、あるいは名神高速道路の交通に対する安全性などを検討した結果、いままでに述べたような構造を最良として選んだ。工事施工の結果はベント杭を確実に打設すること、重量級の PC 桁を短時間で幾本も架設することなど困難な工事の内容もあったが、総括して満足できる状態で工事を完了した。おわりに、試験工事にあたり、御指導、御協力をいただいた、京都大学 岡田教授および同研究室の方々、吹田 IC 共同企業体の諸氏に対し謝意を表します。

1970.2.2・受付