

コンクリートを充填した長方形合成柱を有する 鋼製橋脚の一設計・施工法

A DESIGN AND FABRICATION METHOD OF STEEL BRIDGE PIERS WITH CONCRETE FILLED SQUARE COMPOSITE COLUMNS

中井 博*・江見 晋**・吉川 紀***・北沢正彦****
By Hiroshi NAKAI, Susumu EMI, Osamu YOSHIKAWA
and Masahiko KITAZAWA

This paper introduces an interim design code for the concrete filled steel piers with rectangular cross-section proposed by a series of experimental and theoretical studies of which contents are composed of; scope, factor of safety and load factor corresponding to the load combinations, material properties, design method, structural details and fabrications as well as erections. The applicability of this interim design code is confirmed through the trial design calculations.

Keywords : composite structure, design code, bridge pier (sub-structure), details and fabrications of columns

1. ま え が き

市街地の高速道路の橋脚は、用地的な制約を受けると同時に、最近では美観上、断面寸法をできるだけ小さくしたいという要望から、鋼製橋脚が多く採用されている。今後とも、柱断面寸法が小さく、はりのスパンが長いスレンダーな鋼製橋脚が建設されていくであろう。しかし、より高い耐荷力や耐震性が要求される都市高速道路の高架橋におけるこの種の構造形式は、断面が比較的小さくてすむが、耐震性を高めようとする、全体座屈および局部座屈に対する安全性を確保するため、板厚を厚くせざるを得ない場合が多く、かえって不経済となることもあり得る。

さらに、最近では維持・管理の容易なもの、また工事の省力化できる構造物が要請されてきている。このような観点から鋼製橋脚を見直した場合、柱断面が小さく、はりのスパンが長い鋼製橋脚は、作業スペースが狭く、

維持・管理が困難である。また、スレンダーな橋脚の場合には、活荷重によるはりの先端の変位が道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編およびⅡ鋼橋編（以下、道示Ⅰ、Ⅱという）の許容値を超過して振幅の大きい振動も誘発しやすく、これが原因で支承等に有害な損傷を誘起しているとの報告もある。さらに、合成Ⅰ桁橋の荷重分配横桁と主桁との接合部や対傾構の接合部に疲労亀裂を発生させている橋梁は、鋼製橋脚やPCはりを有する橋脚のように、下部構造の剛性の小さいものに多く発生する傾向にある。

そこで、このような現象を解決するためには、スレンダーな鋼製橋脚の柱にコンクリートを充填し、鋼管とコンクリートとを一体化したいわゆる合成柱が考えられる。この構造形式を採用すると、剛度が高まり、鋼板の局部座屈が防止され、さらに全体耐荷力も高めることが可能である。

ところが、合成柱に関する設計指針としては諸外国ですでに英国の BS 5400 Part 5¹⁾ およびドイツの DIN 18806 Teil 1²⁾ があるものの、わが国では建築学会³⁾ および送電線建設技術研究会⁴⁾ で規準化されているに過ぎない。しかも、これらの設計基準は、既製の鋼管を利用した構造物についてのものが主であり、土木構造物のように溶接集成された大型断面で、残留応力や初期たわみ

* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科
(〒558/大阪市住吉区杉本 3-3-138)

** 正会員 阪神高速道路公団工務部設計課長
(〒541/大阪市東区北久太郎町 4-68)

*** 正会員 工修 阪神高速道路公団大阪第一建設部設計課長
(〒559/大阪市住之江区北加賀屋 2-11-8)

**** 正会員 阪神高速道路公団工務部設計課設計係長
(〒541/大阪市東区北久太郎町 4-68)

が存在し、しかも断面寸法・断面構成や作用荷重が建築や送電鉄塔と大幅に相異なる場合、それをそのまま適用できないように思われる。

そこで、長方形断面の合成柱について行ってきた数々の実験的・理論的研究を基礎とし^{9)~11)}、今回、合成柱を設計・施工するために必要な基本事項をとりまとめた「合成柱(充填方式)を有する鋼製橋脚の設計・施工指針(案)¹²⁾」の作成を試みてみた。

この設計・施工指針(案)では、充填コンクリートが硬化する以前の状態を鋼部材と考え、道示Ⅱと同じ考え方で設計するものとしている。充填コンクリート硬化後、合成柱が SRC や RC 部材と類似した非弾性的な挙動を呈するならば、道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編(以下、道示Ⅲという)に示される諸規定に準ずる方が合理的であろう。しかしながら、本指針(案)では、鋼部材と同様の挙動をすると考えられる範囲内で諸基準を整備してみたものである。しかも、合成柱の1つの大きな特徴である優れた耐荷性も有効に利用するため、「鋼橋および鋼部材の非弾性挙動と設計基準に関する研究¹³⁾」を参考にし、限界状態設計法による書式を採用してみた。なぜならば、現時点では本設計・施工指針によって設計した場合、実質的には現行の道示Ⅰ、Ⅱとほぼ同じになる必要がある。そこで、この主旨で考えると、文献¹³⁾が道路橋に対しての静的な破壊に対する限界状態設計手法を系統だてて示しているの、それに準拠することにした。

本文は、合成柱に関して今まで行ってきた研究を紹介し、設計・施工指針(案)の特徴となる諸点を述べ、さらにこの指針(案)に基づく試算設計の結果の概要について示すものである。

2. 長方形断面を有する合成柱に関する調査研究の紹介

いままでは、長方形断面の合成柱を対象として実施してきた種々の実験・解析を簡単に紹介すると、次の研究が挙げられる。

(1) 模型実験

a) 軸方向圧縮力を受ける柱の実験⁹⁾

長方形断面の合成柱についての圧縮試験を行い、弾塑性領域における合成作用を調査・研究。

b) 曲げモーメントを受ける柱の実験⁹⁾

長方形断面合成柱の両端を密閉するか、または、スタッドジベルを設ければ、鋼とコンクリートの相対ずれが拘束され、これが合成柱全体としての挙動にどのような影響を及ぼすかを調査・研究。また、フランジプレートとの局部屈曲の発生が耐荷力に及ぼす影響を調査・研究。

c) 軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける柱の実験⁹⁾

長柱と短柱の中間的な長方形断面合成柱の耐荷力、剛性、じん性および付着の調査・研究。

d) 柱基部の実験^{9),14)}

軸方向圧縮力、曲げモーメントならびに水平力を受ける柱基部の内側補剛リブの簡素化の可能性の調査・研究。

e) 付着の実験¹⁵⁾

鋼とコンクリートとの境界における結合状態が全体耐荷力に及ぼす影響を調べるための押抜き試験を行い、付着特性、スタッドジベルの耐力および終局強度を調査・研究。

f) 隅角部の実験¹⁶⁾

隅角部のせん断遅れ現象、耐荷力に与える鋼板の補剛効果、コンクリートの充填効果、および、ジベルの取付効果について調査・研究。

g) 純ねじりの実験¹⁷⁾

純ねじりが作用した場合の補剛材の寄与や合成作用が降伏ねじりモーメントに与える影響について調査・研究。

h) 充填コンクリートの施工性実験^{11),17)}

良好な合成柱を作るためのコンクリートの配合、施工法、ならびに、施工面からみた合成柱構造詳細の改善点について調査・研究。

(2) 現場載荷実験^{9),18)}

コンクリート充填による鋼製橋脚の合成効果をコンクリート充填前・後について調査するため、図-1に示す実際に建設されたT形橋脚で静的・動的荷重を載荷し、

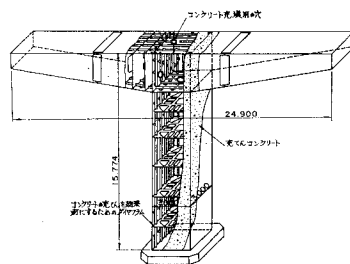


図-1 コンクリートを充填したT形橋脚(実橋)

ラーメン隅角部近傍と橋脚柱基部近傍との応力分布および固有振動数と減衰率とを計測。

(3) 数値解析

a) 合成柱を包む外側鋼板の弾塑性有限変位解析⁹⁾

充填コンクリートの拘束効果が鋼板要素の終局強度に及ぼす影響を明らかにするとともに、合成柱の外側の無補剛鋼板および補剛鋼板の一設計法を提案。

b) CDC 法による合成柱の耐荷力解析^{7),9)}

軸方向圧縮力と曲げモーメントが同時に作用する合成柱の耐荷力を軸方向圧縮力による2次曲げの影響を考慮

した柱-たわみ曲線法 (CDC 法) を用い、残留応力や初期たわみも取り入れて解析し、実用的な耐荷力相関曲線を提案した。

3. 合成柱の設計・施工指針 (案)¹²⁾ の概要

以上の成果を踏まえて、今回、合成柱を設計・施工するための指針 (案) を作成してみた。この指針 (案) は、次の 7 章から成り立っている。

1 章総則、2 章材料、3 章荷重・強度および荷重の組合せ、安全率、荷重係数、4 章設計照査、5 章部材に関する一般事項、6 章構造各部の設計、7 章施工。

以下では、これらのうち本指針 (案) で特徴のある点を抜き出し、解説を加えることにする。

(1) 総 則

本設計・施工指針 (案) は、両端が強固な隔板で拘束された長方形断面の鋼管柱内にコンクリートを充填した合成柱を有する鋼製橋脚を対象としており、鋼管の荷重分担係数 δ 、すなわち、

$$\delta = \frac{P_{ss}}{P_{ss} + P_{cs}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

$$P_{ss} = \sigma_{cu0} A_s \dots\dots\dots (2)$$

: 鋼材の圧壊荷重 (kgf/cm² or MPa)

$$P_{cs} = 0.85 \sigma_{ck} A_c \dots\dots\dots (3)$$

: コンクリートの圧壊荷重 (kgf/cm² or MPa)

σ_{cu0} : 局部座屈を考慮しない軸方向圧縮強度 (kgf/cm² or MPa)

A_s : 鋼材の断面積 (cm²)

σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度 (kgf/cm² or MPa)

A_c : 充填コンクリートの断面積 (cm²)

が、

$$0.2 \leq \delta \leq 0.8 \dots\dots\dots (4)$$

の範囲内にある合成柱を対象としている。

一般に、 δ が小さすぎると、コンクリートの荷重分担が大きくなり、合成柱は鉄筋コンクリートの挙動を呈する。また、 δ が大きすぎると、鋼の荷重分担が大きくなり、鋼部材としての特性が卓越することになる。

そこで、本指針 (案) では、文献²⁾ および⁹⁾ の研究に基づき、式 (4) のように合成柱の適用範囲を荷重分担係数 δ によって限定している。

本指針 (案) に示されていない事項は、それぞれ道示 I ~ III および阪神高速道路公団・設計基準 (以下、阪公基準という) 第 2 部によるものとした。

(2) 材 料

a) 鋼 材

使用する鋼材の規格および設計計算に用いる物理定数

は、道示 I、3.1.3 によるものとしている。また、鋼材の強度は、1. まえがきで述べたように限界状態設計法によることにしたため、道示 II、2.2.1 の表 2.2.1 ~ 2.2.3 の許容応力度をそれぞれの基準降伏点 (kgf/cm² or MPa) に置き換えて使用することとしている¹³⁾。

b) コンクリート

充填用コンクリートには普通コンクリートを使用するものとし、その設計基準強度 σ_{ck} (kgf/cm² or MPa) は、 $\sigma_{ck} = 240$ kgf/cm² (23.5 MPa) としている。

c) 設計計算に用いる物理定数

鋼材の物理定数は、道示 I、3.3 によるものとしている。合成柱を有する鋼製橋脚の弾性変形および不静定力の計算に用いる鋼材と充填コンクリートとのヤング係数比 n は、合成柱を有する橋脚の現場載荷実験結果¹⁶⁾ から、 $n = 10$ にとるものとしている。一方、応力度の計算に用いるヤング係数比 n は、道示 III と同様な考えに基づき、 $n = 15$ に取ることにしている。

(3) 荷重、強度および荷重の組合せ、安全率、荷重係数

a) 充填コンクリートの強度

圧縮強度は、道示 III、2.4.4 に準じて $0.85 \sigma_{ck}$ (kgf/cm² or MPa) としている。

b) 充填コンクリートの単位重量

充填コンクリートは、経済性や現場における打設作業の容易さを考えて無筋コンクリートとし、単位重量 r_c は道示 I、2.1.2 に従い、 $r_c = 2350$ kgf/m³ (23.08 kN/m³) としている。

c) まだ固まらないコンクリートの側圧

充填コンクリートがまだ固まらない間は、鋼管に側圧を与える。この側圧分布は、実験結果¹⁷⁾ によると、土木学会でまとめられた文献¹⁹⁾ の方法で求めた分布に近いことが明らかになったので、それに従うこととした。

d) 充填コンクリートのクリープ

合成柱に持続荷重が作用する場合には、充填コンクリートのクリープの影響を考慮する必要がある。その場合、応力の計算は、次式の換算弾性係数比 $n(\phi)$ を用いることにしている²⁰⁾。

$$n(\phi) = \frac{n \{ e^{\alpha \phi} + (\alpha + 1) \}}{\alpha} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

n : 3.(2)c) で述べた弾性変形を計算するための鋼と充填コンクリートとのヤング係数比

$$\alpha = A_s I_s / A_c I_c \dots\dots\dots (6)$$

A_s, I_s : それぞれ鋼管の断面積 (cm²) および断面二次モーメント (cm⁴)

A_c, I_c : それぞれ、3.(2)c) に示す弾性変形を計算するためのヤング係数比 n を用いて鋼に換算し

た合成柱の断面積 (cm²) および 断面二次モーメント (cm⁴)

φ: 道示Ⅲ, 2.2.2 によるクリープ係数

e) 充填コンクリートの乾燥収縮

合成柱の場合には, 充填コンクリートが鋼管で密閉された状態で硬化するので, 充填コンクリートの乾燥収縮は無視することとしている。

f) 耐荷力を照査する場合の荷重の組合せ, 安全率および荷重係数

耐荷力等の照査にあたって考慮すべき荷重の組合せ, 安全率および荷重係数については種々な議論もあるが, 設計に際して考慮する限界状態によってどの荷重を組み合わせて用いるかということ, および, そのときの安全率のとり方は異なる。しかし, いずれの場合でも設計の基本は主荷重であり, 静的な破壊に対する荷重の組合せと安全率についてとりあえず文献¹³⁾ に示されている表-1 の値を用いることとした。ここに, 照査に用いる荷重は, 荷重の設計用値である。

表-1 荷重の組合せ, 安全率および荷重係数

荷重の組合せ	安全率															
	D	L	PS	CR	SM	E	U	WT	EQ	SD	WP	CF	IK	ER	CC	PA
P+P	1.0	1.0														
P+P+T	1.40	1.0														
P+P+W	1.35	1.0														
P+P+T+W	1.25	1.0														
P+P+CC (鋼)	1.0	1.0														1.0
φ (コンクリート)	1.1	1.5														
W	1.40															
EQ	1.40															
P(except L+T)+EQ+T	1.00	1.0						1.0	1.0	1.0						
P(except L+T)+EQ	1.15	1.0						1.0	1.0	1.0						
EQ	1.35															1.0

また, 荷重の記号は, 道示Ⅰに従うものとしている。

g) たわみを照査する場合の安全率および荷重係数

たわみの照査にあたって考慮すべき荷重の種類はL荷重(衝撃を除く)とし, それに対する安全率ならびに荷重係数は, それぞれ1.0を用いるものとしている。ここに, 照査に用いる荷重としては, 設計用値としている。

(4) 設計計算

a) 設計の基本

合成柱の設計にあたっては, 鋼とコンクリートとを効果的に使用し, 高い剛度と大きな耐荷力, 応力の平滑化効果ならびに高いじん性を活かすようにする。充填されたコンクリートを鋼製脚柱の両端部の強固な板によって拘束することにより, 鋼とコンクリートとは合成させるものとする。

b) 合成前後の設計計算

合成柱は, 合成前においては施工段階に応じた荷重を鋼部材のみで受け持たせる必要があり, 完成後においては合成部材で荷重を受け持つ必要がある。したがって, 橋脚の各部材は, 原則として充填コンクリート硬化前および硬化後に作用する荷重に対し, 耐荷力, および, たわみに対する安全性がいずれも確保されているか否かを照査し, 設計するものとしている。合成柱部材断面の設計に用いる断面力は, 原則として弾性理論によって算出

するものとしている。なお, 合成柱部材断面の応力度は, 道示Ⅲ, 2.4.3 の鉄筋コンクリート部材の応力度算出法に準じるものとしている。

c) 耐荷力の照査

i) 鋼部材の耐荷力

鋼部材の耐荷力の照査については, 道示Ⅱ, 3.2, 8.2.1~8.2.5 の諸規定を断面力で表現した形に書き改めている。

ii) 合成柱における圧縮鋼板の局部座屈強度⁶⁾

充填コンクリート硬化前の圧縮鋼板の局部座屈強度は, 道示Ⅱの表 3.2.2, 3.2.3 および 3.2.5 に相当する許容応力度を基準降伏点に置き換えて使用することとしている。

充填コンクリート硬化後の無補剛鋼板では, 座屈変形が鋼部材の外側のみ生じるものとし, 周辺が固定支持された圧縮鋼板として基本強度が求められている。

有限要素法を用いた弾塑性有限変位解析によると, 無補剛鋼板の局部座屈強度 σ_{cul} は, 次式で与えられる⁹⁾。

$$\sigma_{cul}/\sigma_{cuo} = 1.0 \quad (R_f \leq 0.5)$$

$$= 0.433 (R_f - 0.5)^2 + 0.831$$

$$(R_f - 0.5) + 1.0 \quad (0.5 < R_f \leq 1.0)$$

.....(7a, b)

ここに,

$$R_f = 0.323 \sqrt{\frac{\sigma_{cuo}}{E_s}} \left(\frac{b}{t} \right) \quad \text{.....(8)}$$

b: 長方形板の板幅 (cm)

t: 長方形板の板厚 (cm)

E_s : 鋼材のヤング係数 (kgf/cm² or MPa)

σ_{cuo} : 3.(2)a) に示す鋼材の強度の上限値 (kgf/cm² or MPa)

一方, 充填コンクリート硬化後の補剛鋼板の局部座屈強度 σ_{cul} は, 鋼板と縦補剛材とで構成される図-2 に示すT形断面の柱が, 図-3 に示す横補剛

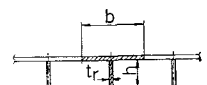


図-2 T形断面柱

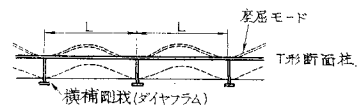


図-3 T形断面柱の支持条件と座屈モード

材あるいはダイヤモンドで固定支持されるものとみなし, 図示のような座屈モードを呈するものとして座屈強度が算出されている。

その結果は, 次式のようにまとめられる。

$$\sigma_{cul} = \kappa \sigma_{cuo} \quad \text{.....(9)}$$

$$\kappa = \beta - \sqrt{\beta^2 - 1/\lambda^2} \quad \text{.....(10)}$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1 + \alpha \sqrt{\lambda(\lambda - 0.2)}}{\lambda^2} + 1 \right\} \quad \text{.....(11)}$$

$\alpha=0.412$, (ECCS の耐荷力曲線“c”に相当)……(12)

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{cu0}}{E_s}} \left(\frac{L_e}{r} \right) \dots\dots\dots(13)$$

$$L_e = L/2 \dots\dots\dots(14)$$

L : 横補剛材またはダイヤフラム間隔 (cm)

r : 図-2 の T 形断面の断面二次半径 (cm)

iii) 合成柱部材の耐荷力

① 鋼板の局部座屈の照査

合成柱鋼板の局部座屈に対する照査は、次式によって行うものとしている。

$$\nu(\sigma_{cysz}/\sigma_{cul}) \leq 1.0 \dots\dots\dots(15)$$

ここに、

ν : 表-1 に示す安全率

σ_{cysz} : 充填コンクリートの硬化前および硬化後断面に作用する軸方向力, y 軸まわりの曲げモーメント, および, z 軸まわりの曲げモーメントによって生ずる鋼板の圧縮応力度 (kgf/cm² or MPa)

σ_{cul} : 局部座屈強度 (kgf/cm² or MPa)

ただし, y 軸および z 軸まわりの作用曲げモーメント M_y (kgf·cm or N·cm) および M_z (kgf·cm or N·cm) には付加曲げモーメントの影響も考慮して, それぞれ次式により算出した値を用いるものとしている。

$$M_y = M_{y0} \frac{1}{1 - P/P_{cry}}, \quad M_z = M_{z0} \frac{1}{1 - P/P_{crz}} \dots\dots\dots(16a, b)$$

② 軸方向圧縮力を受ける合成柱

軸方向圧縮力のみが作用すると考えられる範囲は, $M/M_p \leq 0.1$ としている。そして, 軸方向圧縮力のみを受ける柱は, 次式により照査するものとしている。

$$\nu(P/P_u) \leq 1.0 \dots\dots\dots(17)$$

ここに、

P : 軸方向圧縮力 (kgf or N)

$$P_u = \kappa P_{cq} \dots\dots\dots(18)$$

: 柱断面の耐荷力 (kgf or N)

$$P_{cq} = \sigma_{cu0}^* A_s + 0.85 \sigma_{ck} A_c \dots\dots\dots(19)$$

: 合成柱断面の圧縮荷重 (kgf or N)

$$\sigma_{cu0}^* = \sigma_{cul} - 0.1 \sigma_{cu0} - \sigma_e \dots\dots\dots(20)$$

σ_{cul} : 局部座屈強度 (kgf/cm² or MPa)

σ_{cu0} : 鋼材の強度の上限値 (kgf/cm² or MPa)

σ_e : 充填コンクリート硬化前の応力度のうち, 構造物完成後まで残留する応力度。ただし, 充填コンクリートの側圧によって生ずる応力度を除く (kgf/cm² or MPa)

$$\kappa = \eta - \sqrt{\eta^2 - 1/\bar{\lambda}^2} \dots\dots\dots(21)$$

$$\eta = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\bar{\lambda}^2} (1 + \alpha \sqrt{\bar{\lambda}(\bar{\lambda} - 0.2) + 1}) \right\} \dots\dots\dots(22)$$

$\alpha=0.314$ (ECCS の耐荷力曲線“b”に相当)……(23)

$$\bar{\lambda} = \sqrt{P_p/P_{cr}} \dots\dots\dots(24)$$

$$P_{cr} = \pi^2 E_s I_v / l^2 \dots\dots\dots(25)$$

: 柱の弾性座屈強度 (kgf or N)

l : 柱部材の有効座屈長 (cm)

$$r = \sqrt{I_v/A_v} \dots\dots\dots(26)$$

: 部材の断面二次半径

M : 断面に作用する曲げモーメント (kgf·cm or N·cm)

M_p : 断面の全塑性モーメント (kgf·cm or N·cm)

③ 軸方向圧縮力と一軸曲げモーメントを受ける合成柱

柱の全体座屈が起こらない合成柱の $P/P_p \sim M/M_p$ 相関曲線は, 次式で表わされる。

$$\alpha \left(\frac{P}{P_p} \right)^2 - \beta \left(\frac{P}{P_p} \right) + \frac{M}{M_p} \leq 1.0 \dots\dots\dots(27)$$

しかしながら, 長柱の場合, 耐荷力 P_u は一般に $P_u \leq P_p$ であり, また鋼板の局部座屈が卓越する場合には, 実験によると, 圧縮側の鋼板の局部座屈に支配され, 終局モーメントは $M_u < M_p$ になり, 文献 9) に示したように $M_u = 0.9M_p$ としてもよいが, 式 (20) の局部座屈応力度 σ_{cu0}^* を用いて近似できることが数値計算結果明らかとなった。すなわち,

$$M_u = \sigma_{cu0}^* \{ d_{itw}(d_i - d_N) + bt_f(d_i + t_f) \} \dots\dots(28)$$

: 終局モーメント

ここに, 図-5 を参照して,

$$d_N = \frac{2 d_{itw}}{4 t_w + b_i \frac{0.85 \sigma_{ck}}{\sigma_{cu0}^*}} \dots\dots\dots(29)$$

$$b_i = b - 2 t_w \dots\dots\dots(30)$$

$$d_i = d - 2 t_f \dots\dots\dots(31)$$

σ_{cu0}^* : 式 (20) による。

以上のことから, 長柱の全体座屈およびはりの局部座屈について, これらの安全側な設計になるように, 式 (27) の相関曲線において P_p の代わりに P_u を用い, M_p の代わりに M_u を用いて耐荷力を安全側に評価すると, 式 (27) は次のように表わされる。

$$\alpha \left(\frac{P}{P_u} \right)^2 - \beta \left(\frac{P}{P_u} \right) + \frac{M}{M_u} \leq 1.0 \dots\dots\dots(32)$$

上式中のパラメーター α および β は, 分担率 δ および断面形状のパラメーター $\phi (=H/B)$ の関数として与えられる⁹⁾。いま, 式 (32) において, $M=0$ かつ $P=P_u$ なる限界状態を与えれば, $\alpha - \beta = 1.0$ となる。

したがって, 式 (32) は, 次のように書ける。

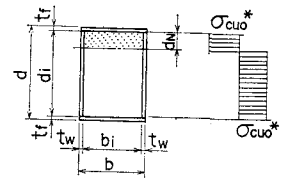


図-5 終局抵抗モーメント M_u を求めるための基本断面と応力分布

$$(1+\beta)\left(\frac{P}{P_u}\right)^2 - \beta\left(\frac{P}{P_u}\right) + \frac{M}{M_u} \leq 1.0 \dots\dots\dots (33)$$

パラメーター β はパラメトリック解析の結果⁹⁾,

$$\beta = 9.17 \delta^2 - 13.75 \delta + 4.63 \dots\dots\dots (34)$$

で表わされる。そこで、式 (33) に安全率 ν を考え、曲げモーメントのみで表示すれば、

$$\nu(M/M_u) \leq \psi \dots\dots\dots (35)$$

となる。

ここに、

$$\psi = 1.0 - \nu^2(1+\beta)\left(\frac{P}{P_u}\right)^2 + \nu\beta\left(\frac{P}{P_u}\right) \dots\dots\dots (36)$$

ただし、

$$M = M_0 \frac{1}{1 - P/P_{cr}} \dots\dots\dots (37)$$

④ 軸方向圧縮力と二軸曲げモーメントを受ける合成柱

上記の③項を二軸曲げモーメントを受ける場合に拡張すると、次式のようなになる。

$$\nu(M_y/M_{uy}) + \nu(M_z/M_{uz}) \leq \psi \dots\dots\dots (38)$$

ここに、

$$M_y = M_{y0} \frac{1}{1 - P/P_{cry}}, M_z = M_{z0} \frac{1}{1 - P/P_{crz}} \dots\dots\dots (39a, b)$$

⑤ せん断を受ける場合

合成柱にせん断力が卓越して作用する場合の強度に関する実験的研究が少なく、鋼とコンクリートとの共同作用について不明な点が多い。したがって、安全側の考え方にに基づき、せん断力は、鋼材のみで負担するものとしている。

$$\nu(S/S_{us}) \leq 1.0 \dots\dots\dots (40)$$

ここに、

$$S_{us} = A_g \tau_{us} \text{ (kgf or N)} \dots\dots\dots (41)$$

ν : 表—I に示す安全率

S : 断面に作用するせん断力 (kgf or N)

S_{us} : 鋼断面のせん断耐荷力 (kgf or N)

A_g : 鋼断面において、せん断力を負担すると考えられる有効断面積 (cm²)

τ_{us} : 鋼材のせん断強度 (kgf/cm² or MPa)

⑥ ねじりモーメントを受ける合成柱

ねじりモーメント M_T (kgf·cm or N·cm) が作用する場合、鋼板と充填コンクリートの共同作用について数少ない実験的研究では鋼とコンクリートとはかなり共同作用をしていることが判明しているが、まだ不明な点が多いので、安全側を考えてねじりは鋼断面のみで受け持つものとし、次式で照査するものとしている。

$$\nu(M_T/M_{Tus}) \leq 1.0 \dots\dots\dots (42)$$

ここに、

M_T : 断面に作用するねじりモーメント (kgf·cm

or N·cm)

$$M_{Tus} = K_T \tau_{us} \dots\dots\dots (43)$$

: 鋼断面の降伏純ねじりモーメント (kgf·cm or N·cm)

$$K_T = 2 A_c t \dots\dots\dots (44)$$

: ねじりモーメントによる鋼断面のせん断応力度に関する係数 (cm³)

τ_{us} : 鋼材のせん断強度 (kgf/cm² or MPa)

t : 鋼板の板厚 (cm)

A_c : 鋼板厚中心線の囲む面積 (cm²)

また、せん断力と同時にねじりモーメントが作用する場合、⑤と同様に安全側に考えて、ねじりモーメントは、鋼板のみで負担することとして、次式で照査するものとしている。

$$\nu(S/S_{us}) + \nu(M_T/M_{Tus}) \leq 1.0 \dots\dots\dots (45)$$

ここに、

S : 作用せん断力 (kgf or N)

S_{us} : 鋼断面のせん断力 (kgf or N)

⑦ 合成応力度の照査

鋼断面に作用する垂直応力度 σ (kgf/cm² or MPa) とせん断応力度 τ (kgf/cm² or MPa) との合成応力度を考慮する場合は、次式で照査するものとしている。

$$\nu(\sigma/\sigma_{tu})^2 + \nu(\tau/\tau_u)^2 \leq 1.0 \dots\dots\dots (46)$$

ここに、

ν : 表—I に示す安全率

σ : 鋼断面に作用する垂直応力度 (kgf/cm² or MPa)

σ_{tu} : 鋼材の軸方向引張強度 (kgf/cm² or MPa)

τ : 鋼断面に作用するせん断応力度 (kgf/cm² or MPa)

τ_u : 鋼材のせん断強度 (kgf/cm² or MPa)

ねじりモーメントを考慮する場合は、式 (46) のせん断応力度 τ にねじりモーメントによるせん断応力度を加算して照査するものとしている。

⑧ たわみの照査

道示Ⅱの規定を文献 13) の限界状態設計法に従って表示すると、はりおよび柱頭部の変位は、次式によって照査できるものとしている。

$$\nu(d/\Delta u) \leq 1.0 \dots\dots\dots (47)$$

ここに、

d : 荷重によって生じるたわみ (cm)

Δu : 道示Ⅱによるたわみ制限 (cm)

⑨ 側圧による応力度およびたわみの照査

まだ固まらない充填コンクリートの側圧によって生じる圧縮板の応力度は、その断面内でつり合い状態にあり、柱の耐荷力には影響を与えないので、残留応力と同様に取り扱える。そこで、まだ固まらない充填コンクリ

一トの側圧によって生じる圧縮板の圧縮応力度は、次式により照査するものとしている。

$$\sigma_{cc} < 0.1 \sigma_{cu0} \dots\dots\dots(48)$$

ここに、

σ_{cc} ：まだ固まらない充填コンクリートの側圧によって生じる圧縮板の圧縮応力度 (kgf/cm² or MPa)

σ_{cu0} ：局部座屈を考慮しない軸方向圧縮強度の上限値 (kgf/cm² or MPa)

一方、まだ固まらない充填コンクリートの側圧によって生じる圧縮板の変位は、次式により照査するものとしている。

$$\nu_c (dc/du) \leq 1.0 \dots\dots\dots(49)$$

ここに、

ν_c ：側圧によるたわみの照査に用いる安全率で 1.0 とする。

dc ：まだ固まらない充填コンクリートの側圧によって生じる圧縮板のたわみ (cm)

du ：たわみの限界値 (cm) で、横補剛材またはダイヤフラム間に対して $du=L/2000$ ，また無補剛鋼板の場合の腹板間，補剛鋼板の場合の縦リブ間に対して $du=b/600$

L ：横補剛材またはダイヤフラム間隔

b ：長方形板の幅

3.(4)c ii) で述べた合成柱における圧縮板の局部座屈強度は、圧縮残留応力として $\sigma_r = -0.4 \sigma_y$ ，初期たわみとして、ダイヤフラム間に対して $L/1000$ ，腹板間，あるいは、縦リブ間に対して $b/150$ として仮定して求めたものである。したがって、鋼板の板厚が薄い場合でも過度の局部座屈強度の低下や部材製作精度の向上を避けるために、側圧によって生じる鋼板の圧縮応力度，および、たわみには制限を設けている。

(5) 部材に関する一般事項

ここでは、鋼材の最小板厚，部材の最大細長比，および、圧縮力を受ける板の板厚につき、実績調査²¹⁾やその他種々な検討結果から、道示Ⅱによることにしている。

(6) 構造各部の設計

a) 隅角部

充填コンクリート硬化前で架設荷重作用時のラーメン隅角部の応力は、阪公基準，第2部，第2編，10.2によって算出し，隅角部を設計することとしている。

充填コンクリート硬化後に作用する荷重に対しては、図-6に示す範囲内にコンクリートを充填した実験結果によると^{5)，18)}，せん断遅れがほとんど起こらないことが明らかにされたので，合成後のラーメン隅角部ではせん断遅れの影響は考慮しなくてもよいことにしている。しかしながら，実験によると¹⁸⁾，コンクリート充填を打ち

止めた境界部近傍の鋼管に応力の乱れが生じているので，この区域の補剛材等の配置には，十分な配慮が望まれるとしている。

b) ダイヤフラム

合成柱の両端部には，充填コンクリートの抜け出しを防止し，合成柱としての機能を確保するため，強固なダイヤフラムを設けなければならないものとしている。端ダイヤフラムの剛度が合成柱の挙動に及ぼす効果はまだ十分に明確にはされていないが，合成柱を鋼製橋脚の柱に使用する場合，柱の上側のダイヤフラムには図-7に示すように，はりの隅角部のフランジ厚さ程度，また下側のダイヤフラムにはベースプレートの厚程度の板厚をもたせるのがよいとしている。

一方，充填コンクリートが硬化する以前に，鋼管に大きな断面力が作用したり，製作・架設上の理由から中間ダイヤフラムが必要な場合には，その構造を充填コンクリートのまわりがよい構造にすることとしている。

c) 柱基部

合成柱の柱基部のアンカーボルト，ベースプレートおよび外側リブプレートは阪公基準，第2部，第2編，10.3.1によって設計するものとしている。実験結果によると⁵⁾，図-8に示す柱基部には破壊が起こらず，一般部から崩壊に至っている。そこで，柱基部内面の補強プレートは省略しても，柱基部周辺の鋼管の応力分布ならびにコンクリートの支圧応力分布にはほとんど影響が現われないことが判明している。しかし，合成柱端部における充填コンクリートの拘束効果が減少するような孔をベースプレートに設けることは極力避け，孔の寸法を最小限に留めることにしている。

d) ずれ止め

断面力の作用方向が急変する柱とはりとの隅角部あるいは断面力が集中する柱基部には，ずれ止めを必ず設けて鋼板と充填コンクリートの一体化を計らねばならないものとしている。ずれ止めには，スタッドジベルあるいはスラグクランプを用いるものとし，その最大ピッチは道示Ⅱに準じて 60 cm としている。ただし，合成柱の一般部には，ずれ止めは設けなくてもよいものとしている。

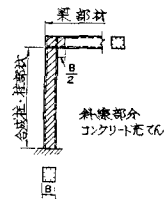


図-6 はり部材へのコンクリートの充填方法

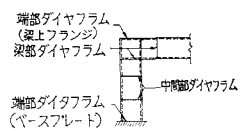


図-7 ダイヤフラム配置方法

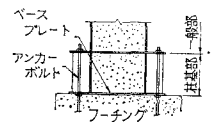


図-8 柱基部の詳細

e) 柱の現場継手

合成柱部材ではボルトの取替えが不可能であること、また高力ボルトを使用すると、コンクリート打設時にコンクリート汁が外面にしみ出さないように、添接板に目ばりが必要となり、施工上からも煩雑となることから、現場溶接によることを原則としている。

(7) 施工

a) 充填コンクリートのスランプ^{11),17)}

スランプ値については、施工性実験^{11),17)} から、8 cm では施工がしづらく、10 cm 程度が望ましいことが確認されたので、スランプは 10 cm 程度を目標としている。

b) 充填コンクリートの打設方法^{11),17)}

充填コンクリートの打設作業は、はり天端等から行うことになるので、骨材とセメントペーストとの分離が生じないように、トレミー管あるいはパイプを使い、パイプレーター等で十分振動を与えながら、橋脚の下面から徐々に充填コンクリートを上方に向かって打設しなければならない。

なお、コンクリートの側圧が 3.(3)e) に示した程度となるための適切な充填コンクリートの打設速度は、3.0~4.0 m/h 以下であることが実験¹⁷⁾ によって確認されている。

c) 充填コンクリートの締固め

計算上鋼板とコンクリートとの付着は無視するとしているが、充填コンクリートを隔々までゆきわたらせ、付着強度をできるだけ高めるため、充填コンクリートを十分締め固めることが必要である。

合成柱天端の上面のマンホール付近には、肌すきが生じやすいので、マンホールを溶接にて密閉する前に、無収縮モルタルを注入することとしている。

d) 空気抜き孔^{11),17)}

コンクリート打設時に、中間ダイヤフラムやはり上フランジプレートの下面に、気泡が閉じ込められやすいことが実験によって確認されている¹⁷⁾。このため、中間ダイヤフラムやはり上フランジプレートには、空気抜き孔を設け、コンクリートが隔々まで空隙なく充填されるように工夫することが示されている。空気抜き孔のあけ方については文献 11), 17), 18) が現在のところ最も良好な結果を与えるものと考えている。

e) 上部工の架設時期

上部工の架設時期は、原則として充填コンクリートが所定の強度に達した後とする。工程の関係で、上部工を早期に架設しなければならなくなった場合には、局部座屈の照査を慎重に行わなければならないとしている。

f) 部材の製作精度

合成柱の場合には、充填コンクリートとの合成効果により初期不整の耐荷力に及ぼす影響は小さいことが明ら

かにされているので⁹⁾、道示の部材製作精度を多少とも緩和してよいと思われる。しかしながら、本設計・施工指針(案)では、道示Ⅱ, 15.3.4 によるものとしている。

g) 合成柱のかど溶接

フランジプレートと腹板との溶接はすみ肉溶接でなく、少なくとも部分とけ込み溶接あるいはグループ溶接とする必要があるとしている²³⁾。

4. 試算設計の結果

図-9 にコンクリートを充填しない鋼製橋脚を示す。図-9 の橋脚の設計条件と同じくして、上述の設計・施工指針(案)でコンクリートを充填した合成柱を有する橋脚の試算設計を行った。図-9 の断面構成で板厚を固定して合成柱とすることにより外径寸法をどれだけ小さくできるか(ケースA)、次に、外径寸法を固定すると板厚がどれだけ薄くできるか(ケースB)について検討した結果を図-10 に示す。この断面構について、3.(4)c) の耐荷力の照査、たわみ、ならびに、鋼重の変化状況等について検討した結果を図-11~13 と表-2 に示す。まず、軸方向圧縮力と一軸曲げが作用する場合、図-11 から次のことがわかる。板厚を一定にして外径寸法を変化させると外径寸法を約 16% 減少させることが可能となる。一方、外径寸法を一定にして板厚を変化させると、板厚を約 30% 減少させることが可能となる。両

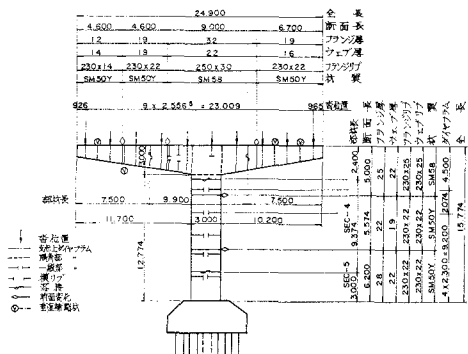


図-9 試算設計の対象とした橋脚の断面構成 (コンクリート非充填)

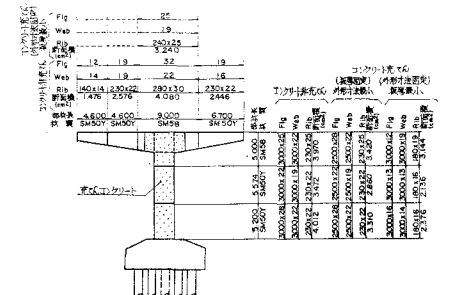


図-10 コンクリート充填、非充填とした場合の断面構成の比較

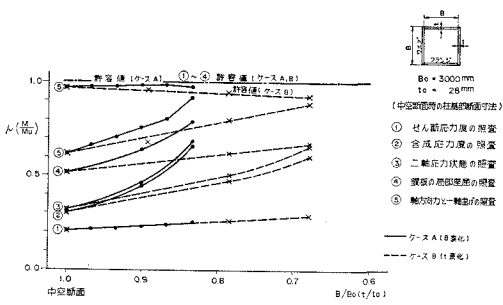


図-11 B/B₀ ならびに t/t₀ の変化によるおのおのの耐荷力の変動状況

ケースとも断面決定の要因となっている。上記以外の照査について、各項目とも許容値に対して十分な余裕を有しており、断面決定要素とならないが、外径寸法を変化させる場合の方が板厚を変化させるよりも断面決定の要素となりやすい傾向にある。

図-12 のたわみの変動をみると、ケース B の方がケース A よりたわみは小さい。これは充填コンクリートの剛度 I_c の増大が鋼板の剛度 I_s の増大より大きいためである。このことより、たわみに対しては、断面寸法の大きい方が有利になる。しかしながら、ケース A でも許容値内におさめることができるので、用地的な制約、美観上の要望等から外径寸法を小さくする必要がある場合は採用可能であろう。

鋼重に関しては、図-13 からケース A、B とも約 2 割柱部材の鋼重が減少し、総鋼重が約 1 割減少していることがわかる。ラーメン橋脚の場合は、合成柱部材の比率が大きくなることから、さらに鋼重減少となると思われる。一方、表-2 から側圧によるたわみは、部材軸方向、直角方向とも許容値の半分以下であった。また、側圧による残留応力については、部材軸方向で許容値の約

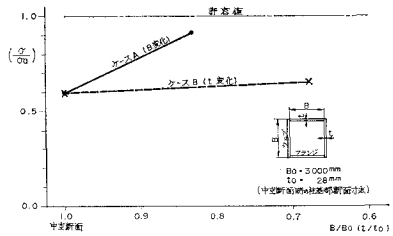


図-12 たわみの変化状況

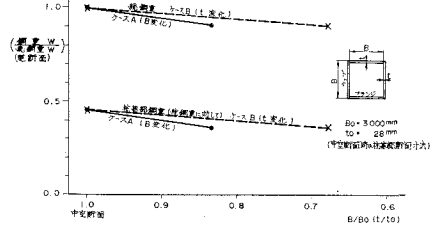


図-13 鋼重の変化状況

表-2 柱基部、柱一般部における耐荷力照査結果一覧

照査項目	柱基部			柱一般部			許容値
	1	2	3	1	2	3	
側圧によるたわみ	0.146	0.146	0.266	0.146	0.146	0.300	1/2 (1.0)
軸直角方向	0.078	0.078	0.203	0.121	0.121	0.379	
側圧による残応力	-1.08	-1.08	-1.67	-1.16	-1.16	-2.04	0.108 (0.360)
残応力・軸直角	-1.93	-1.93	-3.65	-2.59	-2.59	-5.52	1.0
軸直角方向	0.422	0.921	0.896	0.813	0.760	0.890	
軸縮力と曲げ	0.210	0.252	0.289	0.224	0.268	0.327	1.0
せん断及び曲げ	0.296	0.655	0.595	0.205	0.452	0.521	
合成応力	0.315	0.683	0.655	0.231	0.490	0.652	1.0
二軸応力状態	0.515	0.782	0.662	0.422	0.644	0.582	

注) 1. 中空断面 2. 外径寸法固定 (合成柱) 3. 板厚固定 (合成柱)

6 割程度で十分許容値以内である。部材軸直角方向は二軸応力状態で照査した結果、許容値の約 7 割であった。

5. まとめ

鋼管の中にコンクリートを充填することにより鋼製橋脚の耐荷力が大きくなり、柱部材の断面寸法も小さくでき、狭い空間にも適用できるほか、剛性が著しく大きくなることから、橋脚の振動特性が著しく改善され、沿道住民の環境問題あるいは支承を含めた上部構造本体への影響についても合成柱は有利な構造形式であることが本文で明らかにされた。

このような長所を具体的に生かすため、合成柱に関する数々の解析・実験あるいは充填コンクリートを有する橋脚の試験施工を重ねて、今回、設計・施工指針(案)の作成を試みたので、その概要をここに報告した。細部については種々なご批判もあろうが、本設計・施工指針(案)の基本精神をくみ取っていただき、今後、合成柱の大いなる活用を期待する次第である。

謝 辞：本指針を作成するにあたり、阪神高速道路公団・技術審議会・鋼構造分科会主査 小松定夫 大阪大学名誉教授 および 同・コンクリート分科会主査 岡田清京都大学名誉教授には種々ご指導を賜った。また、同・合成柱設計・施工指針作成ワーキンググループの藤井学神戸大学助教授、小林和夫京都大学助教授、渡辺英一京都大学助教授、および、北田俊行大阪市立大学助教授ならびにその他関係各位には種々の貴重なご助言をいただいたこと、ここに深謝の意を表する。

参考文献

- 1) British Standards Institution : BS 5400 Part 5, Code of practice for design composite bridges, March 1980.
- 2) DIN 18806 Teil 1 : Tragfähigkeit von Verbundstützen, Brechung und Bemessung, Sept. 1981.
- 3) 日本建築学会：鋼管コンクリート構造計算規準・同解説，第 2 報，昭和 55 年 2 月。
- 4) 送電線建設技術研究会：コンクリート充填鋼管鉄塔 施工研究報告書 (改訂版)，電気書院，1973 年 6 月。
- 5) 中井 博・吉川 紀：コンクリートを充填した鋼製橋脚の耐荷性に関する実験的研究，土木学会論文集，第 344 号/I-1, pp. 195~204, 1984 年 4 月。
- 6) 中井 博・北田俊行・吉川 紀：コンクリートを充填した鋼製角形柱の鋼要素の一設計法，土木学会論文集，第 356 号/I-3, pp. 405~413, 1985 年 4 月。

- 7) Nakai, H. and Yoshikawa, O. : A Study on Ultimate Strength of Concrete Filled Steel Beam Column by CDC Method, Memoirs of the Faculty of Engineering, Osaka City University, Vol. 24, pp. 255~269, Dec. 1983.
- 8) Nakai, H., Yoshikawa, O. and Terada, H. : An Experimental Study on Ultimate Strength of Composite Columns for Compression or Bending, 土木学会論文集, 第374号/I-6, pp. 67~77, 1986年10月.
- 9) 中井 博・吉川 紀・古田秀博: 軸方向圧縮力と曲げを受ける長方形断面合成柱の一耐荷力解析, 土木学会論文集, 第374号/I-6, pp. 447~456, 1986年10月.
- 10) 中井 博・江見 晋・北沢正彦・吉川 紀: 合成柱(充填方式)を有する鋼製橋脚の設計法, 合成構造の活用に関するシンポジウム, 土木学会, pp. 29~38, 1986年9月.
- 11) 藤井 学・吉川 紀・山内幸裕・小野紘一: 充填方式による合成柱の施工性実験, 合成構造の活用に関するシンポジウム, 土木学会, pp. 165~170, 1986年9月.
- 12) 阪神高速道路公団: 合成柱(充填方式)を有する鋼製橋脚の設計・施工指針(案), 1986年3月.
- 13) 西野文雄: 鋼橋および鋼部材の非弾性不安定挙動と設計基準に関する研究, 昭和57~58年科学研究費補助金総合研究(A)研究成果報告書, 昭和59年3月.
- 14) 吉川 紀・富田 稜・瀬川章彦・木島 信雄: 合成柱(充填コンクリート方式)を有する柱基部のくり返し載荷実験, 第29回構造工学シンポジウム, 土木学会, pp. 153~159, 昭和58年2月.
- 15) 中井 博・吉川 紀・中村一平・袴田文雄・寺田博昌: 合成柱(充填方式)の圧縮・曲げ耐荷力および付着に関する基礎実験, 橋梁と基礎, Vol. 19, pp. 19~27, 1985年6月.
- 16) 中井 博・吉川 紀・村本和之: コンクリートを充填した鋼製橋脚隅角部の耐荷力に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 33A, 土木学会, 1987年3月.
- 17) 阪神高速道路公団・(財)建設工学研究所: コンクリートを充填した鋼製橋脚の施工法等に関する理論的実験的研究, 昭和61年3月.
- 18) 中井 博・吉田 茂・吉川 紀・山内幸裕・田中実雄: 合成柱(コンクリート充填方式)を有する鋼製橋脚の現場載荷実験, 土木学会第41回年次学術講演会, I-233, pp. 465~466, 昭和61年11月.
- 19) 土木学会: コンクリート標準示方書・解説, 18章型わくおよび支保工, pp. 165~166, 昭和49年度版.
- 20) 中井 博: 橋梁工学入門(その7), サスペンションエンジニア, pp. 43~65, 昭和51年4月.
- 21) 中井 博・河井章好・吉川 紀・北田俊行・酒造敏廣: 鋼製ラーメン橋脚の実績調査(上,下), 橋梁と基礎, pp. 35~40, pp. 43~49, Vol. 16, 1982年6月, 7月.
- 22) Kitada, T., Yoshikawa, O. and Nakai, H. : A Design Method for Steel Plate Elements in Concrete Encased Square Steel Tubular Columns, The First East Asian Conference on Structural Engineering and Construction, Bangkok, Thailand, Vol. 2, pp. 1142~1152, Jan. 1986.

(1986.10.6・受付)

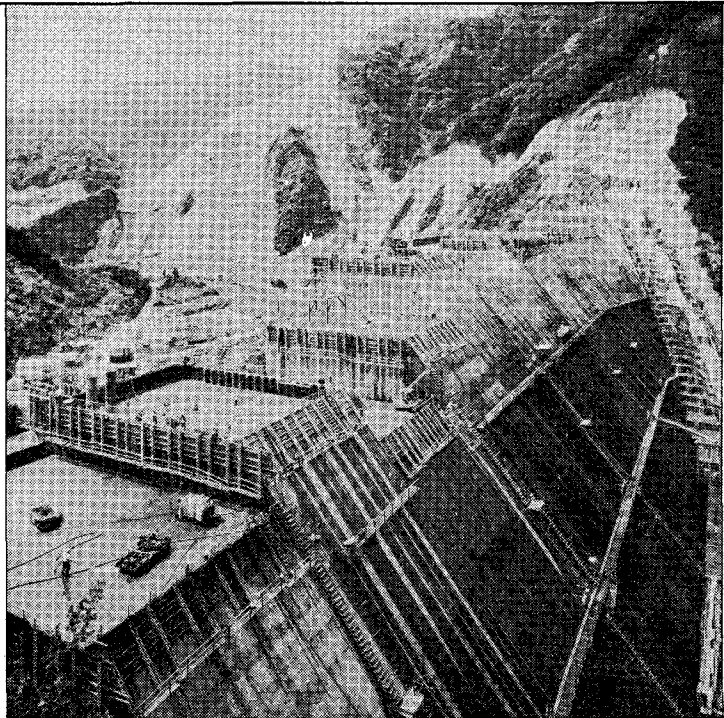
技術は
社会へ還る

OH BAYASHI

東京本社
〒101 東京都千代田区神田司町2-3
☎03-292-1111

本店
〒540 大阪市東区京橋3-37
☎06-943-1131

大林組



地球は文化の生命体