

# コンクリートを充てんした鋼製橋脚の耐荷性 に関する実験的研究\*

## EXPERIMENTAL STUDY ON STRENGTH OF CONCRETE-FILLED STEEL PIER

中井 博\*\*・吉川 紀\*\*\*

By Hiroshi NAKAI and Osamu YOSHIKAWA

This paper presents the experimental researches on the static and dynamic behaviors of concrete filled steel columns. It is clarified from a series of model tests that the concrete filled steel columns have not only sufficient strength, rigidity and ductility against static forces, but also various merits such as the simplified structural details of stiffening ribs at the base plate and the corrosion treatments without painting at the inner surface of steel column. Through the field tests of a bridge pier made of concrete filled steel column, it is, moreover, confirmed that the normal and shearing stresses due to the shear by phenomena at the corner parts of column and beam of pier as well as the anchor part of column to the foundation can significantly decrease after composited. The dynamic properties such as natural frequency and damping coefficient of the concrete filled steel pier can also remarkably reduce to greater than those of non-composited-column.

### 1. ま え が き

コンクリートを鋼管柱に充てんした構造（以下、合成柱という）の研究レポートは古くから数多く発表されており、文献<sup>1)</sup>で詳しく調べられ報告されている。一方、合成柱に関する設計基準としては英国の BS 5400<sup>2)</sup>、ドイツの DIN 18806<sup>3)</sup> やわが国の主として建築構造物を対象とした鋼管コンクリート構造計算規準・解説<sup>4)</sup>等としてまとめられている。

わが国の合成柱に関するこれまでの研究は、既製の鋼管を利用した構造物についてのものが多かった。しかし、橋脚に適用する場合は、断面が大型化するためローラー曲げ法による鋼管、あるいは溶接集成の角形断面のもので製作される。したがって、これを用いた合成柱では鋼管内に残留応力が存在し、初期たわみも有するので、軸方向圧縮力のほか曲げモーメントやせん断力、ねじりモーメントを受ける際の耐荷力をどのように合理的に評

価するのが、重要な課題である。また、鋼管の局部座屈の防止法、スタッドジベルによる剛性の増大法、さらに合成柱を橋脚の一部に組み入れたときの動的挙動の解明、柱基部ならびに隅角部の詳細設計法など問題点が山積しているのが現状である。その端緒を開く研究としては、金井・大塩らによる一連の短柱の耐荷力実験<sup>5)~8)</sup>がある。また、吉川・袴田らによる偏心圧縮柱の耐荷力実験<sup>9)</sup>や合成柱基部の破壊実験の報告<sup>10)</sup>もある。

合成柱は引張に対してじん性に富んだ鋼材と圧縮に対して有利なコンクリートを一体とした構造物であり、耐荷力と剛性に富み、また耐震上も優れた構造物であると考えられる。さらに、柱基部や柱とはり隅角部の構造細部の簡素化が可能となるほか、防錆上も有利な構造形式であり、今後、鋼製橋脚の柱に合成柱が採用されていくことは論をまたない。

しかしながら、反面、その力学的特性を十分熟知し、合理的で経済的な設計が行えるよう心がけることが重要である。そこで、合成柱の合理的設計法を模索するために必要な資料を蓄積するという目的のもとに、軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける模型実験（実験A）および軸方向圧縮力、曲げモーメントと水平力を受ける柱基部の模型実験（実験B）を行った。また、わが国の高速道路橋で初めて使用された合成柱を有するT形橋脚の建

\* この報告は第37回年次学術講演会（V-189, 昭和58年度土木学会関西支部年次学術講演会（I-51））で発表した主旨にそってまとめ直したものである。

\*\* 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 工修 阪神高速道路公団大阪管理部保全第1課係  
全役 (〒542 大阪府南区渡谷西之町 6)

表-1 模型実験概要

実験名	載荷方法	供試体	実験目的	備考
実験A 軸げの受ける軸方向受ける曲げ柱		図-1 参照	1. 軸方向力と曲げを受ける柱（長柱と短柱の中間的なもの）の耐荷力、剛性、じん性、付着の調査 2. 供試体数 (i) スタッドジベルなし4体（鋼管柱2体；合成柱2体） (ii) スタッドジベルあり2体（合成柱2体） 3. 初期たわみ量の測定 4. 残留応力の測定	合成柱の破壊実験後、鋼管をガスで切断し、窓をあけて、コンクリートの付着状況、充てんコンクリートのひびわれ状況の調査
実験B 柱基部の			1. 軸方向力、曲げ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 2. 供試体数 実験Aに同じ	

P：軸方向圧縮力，S：せん断力

設を機会に、コンクリート充てん前後における静的ならびに動的載荷実験を現地で行った。

本文は、合成柱特有の各種の力学的挙動を以上の実験によって調べ、また若干の解析を通じて明らかにできた事項を報告するものである。

### 2. 合成柱の耐荷性に関する模型実験

模型実験の概要を表-1に示す。

#### (1) 供試体

実験A、Bの供試体寸法は鋼製橋脚の実績調査結果<sup>11)</sup>を用いて、パラメトリック解析し、実物橋脚の寸法比にできるだけ合致するようにした。なお、合成柱の挙動と比較するために、コンクリートを充てんしない中空鋼管柱のみの実験も併せて行った。ただし、充てんコンクリートの強度については文献2)等によると、ある一定値以上（強度20N/mm<sup>2</sup>）あればよいことが示されているので、ここではパラメーターとしては扱わないことにした。さらに、合成柱の断面形状としては、形状による耐荷性の差異を調べるため、円形と角形の2種類を採用し

供試体断面形状		実験の種別	供試体個数
スタッド ジベルなし		鋼管 合成柱	実 験 A ○:1体 □:1体 ○:1体 □:1体
		鋼管 合成柱	実 験 B ○:1体 □:1体 ○:1体 □:1体
スタッド ジベルあり		合 成 柱	実 験 A ○:1体 □:1体
		合 成 柱	実 験 B ○:1体 □:1体

図-1 供試体断面形状

た(図-1)。

実験Aでは、文献11)に示されているようにラメ

表-2 供試体の寸法・強度等

供試体	外形 D・B (mm)	板厚 t (mm)	断面 積 A* (cm <sup>2</sup> )	断モ 面1 2メ 次 I* (cm <sup>4</sup> )	断半 面 2 次 径 r(cm)	有効 臨 屈 長 l(cm)	$\frac{r}{D} \cdot \frac{r}{B}$	細 長 比 $\lambda$ (l/r)	細長比パラ メーター $\lambda$ $(\frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E_s}})$	降 伏 力 点 度 $\sigma_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	応 力 度 $\sigma_{ck}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )		
												降 伏 力 点 度 $\sigma_y$ (MPa)	圧 縮 強 度 $\sigma_{ck}$ (MPa)
実 験 A	円 形	A	198.4	3.2	19.6	935	360	0.348	52.10	0.729	3670	380	
		B	199.6		67.7	2073							5.53
		C	199.0		67.4	2051							5.52
	角 形	A	177.3	3.2	27.4	1240	360	0.380	53.49	0.749	3670	380	
		B	176.8		74.0	2361							5.65
		C	176.4		73.9	2343							5.63
実 験 B	円形	B	397.7	5.6	246.7	29851	11.00	0.277	28.18	0.395	4050	390	
	角形	C	351.5	5.7	254.2	34745	11.69	0.333	26.52	0.374	(397.17 MPa)	(38.25 MPa)	

A：鋼管柱，B：合成柱（スタッドなし），C：合成柱（スタッドあり），

\* 鋼とコンクリートの弾性係数比  $\frac{E_s}{E_c}$  を  $n=6.1$ （実験A）， $n=6.6$ （実験B）として計算したもの。

ン橋脚の実績調査結果によると、柱の座屈パラメーター  $\bar{\lambda}=1/\pi \times \sqrt{\sigma_y/E} \times l/r$  (ただし、 $\sigma_y$ : 降伏点、 $E$ : ヤング係数、 $l$ : 有効座屈長、 $r$ : 断面2次半径) が面内、面外ともに 0.2~0.4 程度の値になるものが多かったが、ここでは既往の研究成果の比較的少ない中間的な柱(長柱と短柱の中間的な柱)を対象として、鋼管柱で  $\bar{\lambda}=0.73$ 、合成柱で  $\bar{\lambda}=0.90$  とした。断面寸法は製作性を考え、図-1と表-2に示すとおりとした。これらはいずれも実橋の 1/10 程度の縮尺となる。また、円形と角形の供試体の断面寸法は、座屈パラメーターがほぼ等しくなるように決めた。

実験Bでは、同じく文献<sup>11)</sup>によると、ラーメンの形式は1層1径間、高さは12m程度、外径は2m、そして断面形状は円形が多かったので、断面寸法は座屈パラメーターを実績の多い  $\bar{\lambda}=0.37$  程度とした。さらに、複雑な柱基部を再現するために、断面寸法を図-1と表-2のとおりとした。これらは実橋の 1/5 程度の縮尺となる。なお、スタッドジベルの有無に関係なしに、柱基部内部の補剛材はすべて省略した。

両実験の充てんコンクリートは早強ポルトランドセメントを使用し、設計基準強度は  $\sigma_{ck}=300 \text{ kgf/cm}^2$  (29.4 MPa)、スランプ7~10cm、最大骨材寸法20mm、空気量3~5%とした。管中養生コンクリートは水中養生コンクリートに比べて、圧縮強度で9%程度、ヤング係数で9%程度低い値を示した。ポアソン比は管中、水中養生ともほぼ同じであった。表-3は標準供試体による管中・水中養生各6体の材料試験結果の平均値を示す。

表-3 コンクリートの材料試験結果

養生条件	材令日	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (×10 <sup>3</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比
管中	28	377~387 (36.97~37.95 MPa)	3.09~3.12 (0.30~0.31 MPa)	0.20
水中	28	412~425 (40.40~41.68 MPa)	3.49 (0.34 MPa)	0.21

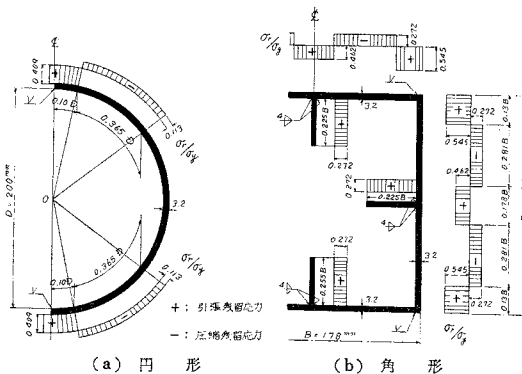


図-2 鋼管の残留応力分布 ( $\sigma_x/\sigma_y$ )

これらによる柱の座屈パラメーターおよび強度等も表-2に示した。

残留応力の測定は一軸ひずみゲージ(ゲージ長2mm)を鋼管の表裏に貼付け、切断法により行った。切断幅は15~25mmとし、長さは50mmとした。円形の場合は溶接部から離れるに従って平均軸方向応力は0に近づき、溶接部付近で大きな軸方向引張応力約2000 kgf/cm<sup>2</sup> (196.1 MPa)が生じている。角形の場合は板パネル部分の補剛材間で軸方向圧縮応力がほぼ台形に分布し、4隅の溶接部付近で大きな軸方向引張応力約2600 kgf/cm<sup>2</sup> (255.0 MPa)が生じている。これらの残留応力分布は複雑であったので、理論解析に用いるためにモデル化すると、図-2のような分布となった。

初期たわみ量の測定にはトランシットを用いて供試体の軸に沿って測定した。円形のスタッドジベルありで最大0.6mm、なしで最大0.8mm、角形のスタッドジベルありで最大1.2mm、なしで最大0.5mmであった。これらはいずれも文献13)の表15.3.13の部材長Lの1/1000以下におさまっていた。

(2) 載荷荷重

実験Aにおいて中空鋼管柱、合成柱の軸方向圧縮力  $P_0$  と曲げモーメント  $M_0$  の比率は、弾性範囲内の応力比が下記のようになるように設定した。

弾性実験:  $\sigma_c/\sigma_{ca} : \sigma_{bc}/\sigma_{ba0} = 0.7 : 0.3$

破壊実験:  $\sigma_c/\sigma_{ca} : \sigma_{bc}/\sigma_{ba0} = 0.2 : 0.8$

ここに、 $\sigma_c = P_0/A$ : 軸方向圧縮力による鋼管の圧縮応力

$\sigma_{ca}$ : 許容軸方向圧縮応力度(道路橋示方書による)

$\sigma_{bc} = M_0/W$ : 曲げモーメントによる鋼管の曲げ圧縮応力

$\sigma_{ba0}$ : 許容曲げ圧縮応力度の上限値(道路橋示方書による)

A: 柱の断面積, W: 柱の断面係数

破壊実験の際の軸方向圧縮力と曲げモーメントの比率は、文献11)9章に基づき使用実績の多い値とした(図-3)。

実験Bにおいても弾性実験は実験Aと同じにし、破壊実験は  $\sigma_c/\sigma_{ca} : \sigma_{bc}/\sigma_{ba0} = 0.13 : 0.87$  となるようにした。これは文献11)11章から曲げモーメントの占める割合が軸方向圧縮力によるものより圧倒的に大きいという実績によるものである。実験装置については

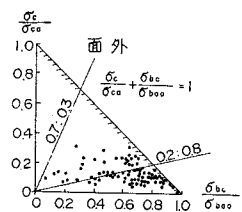
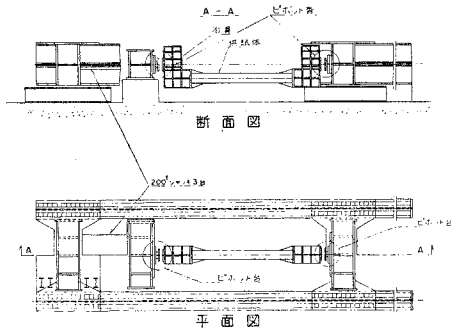
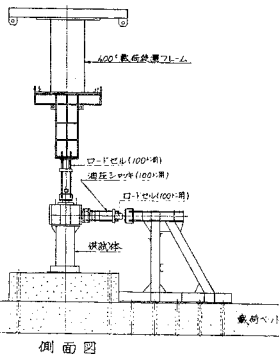


図-3 軸方向応力と面外曲げモーメント応力の相関<sup>11)</sup>



(a) 実験 A



(b) 実験 B

図-4 実験装置と供試体配置状況

文献 14), 19), 20) によった (図-4)。

実験 A では、荷重を 5 tf (49.0 kN) ずつ増大し、鋼材またはコンクリートの応力が許容応力度に達するまで弾性実験を行った。また、その後、荷重を 1 tf (9.8 kN) ずつ漸増し破壊実験を行った。実験 B においては、荷重を 2 tf (19.6 kN) ずつ増大し、鋼材およびコンクリートの応力、あるいはコンクリート台座の垂直ひずみが許容応力度に達するまで弾性実験を行い、引き続き荷重を 1 tf (9.8 kN) ずつ漸増させて破壊に至らせしめた。

(3) 耐荷力の解析

a) 解析方法

鋼とコンクリートを合成した合成柱の耐荷力に対しては、鋼はり-柱の解析法をそのまま適用することは困難である。そこで、柱-たわみ曲線法 (Column Deflection Curves, CDC 法) を用いて解析を行った<sup>15), 17)</sup>。軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける合成柱の耐荷力については、軸方向圧縮力と曲げモーメントとの簡単な相関関係式から求めることもできるが、誤差が大きくなる。CDC 法は、材料の応力-ひずみ曲線をもとにし軸方向圧縮力、曲げモーメントから曲率を求め、スパン方向のいくつかの分割点の断面でつり合い条件  $M_{外力} = M_{内力}$  を満足させることを前提とし、作用荷重に対するたわみ曲線を数値積分法によって求め、はり-柱の耐荷力を把握

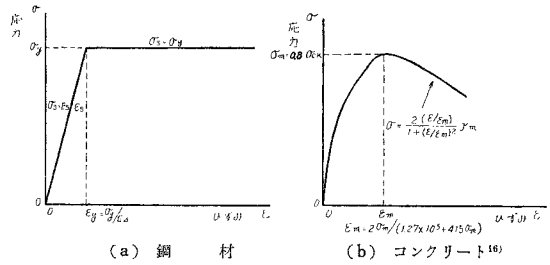


図-5 鋼とコンクリートの応力-ひずみ曲線

するものである。この考え方は文献 15)~17) をはじめ、広く用いられており、鋼とコンクリートの応力-ひずみ曲線がわかれば、合成柱にも適用可能である。

解析上の仮定は、次のとおりである。

- ① 応力-ひずみ曲線は鋼管、コンクリートともに 1 軸応力状態のものを用いる (図-5<sup>16)</sup>)。
- ② コンクリートの引張応力は無視する。
- ③ 鋼とコンクリートは完全に変位の適合条件を満足し、平面保持の法則に従うものとする。
- ④ 鋼管の局部座屈、コンクリートのせん断破壊は生じないものとする。

b) 解析手順

CDC 法を使用する場合のインプット・データとしては、① 寸法 (断面寸法、板厚、スパン等)、② 材料 (ヤング係数、降伏点、設計基準強度等)、③ 荷重 (端モーメント  $M_0$ 、支点反力  $R_0$ 、分布荷重  $q$ 、軸方向圧縮力  $P_0$  の初期値と増分値等)、④ 分割法 (距離  $x$ 、セグメント数、断面分割数)、⑤ 端部条件 (端部のたわみ  $w$ 、たわみ角  $\theta$  等)、⑥ 残留応力  $\sigma_r$ 、および ⑦ 初期たわみ量  $w_0$ 、である。図-6 に CDC 法による解析を行う際に必要な断面力、変位量の定義を示す。

(4) 実験結果と考察

a) 耐荷力

① 実験 A の耐荷力

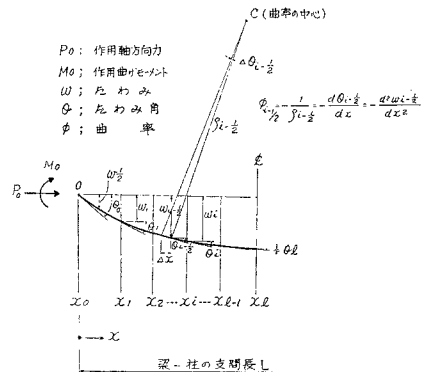


図-6 CDC 法解析に使用する断面力、変位量

表-4 耐 荷 力 [単位: 1tf (=9.8 kN)]

実験	供 試 体		実 測 値		CDC 法による 計 算 値		備考	
			許容値 <sup>①</sup>	最大値 <sup>②</sup>	許容値 <sup>③</sup>	最大値 <sup>④</sup>		
実験 A	円形	鋼管柱	6.3	13.6	—	14.5	—	σ <sub>c/σ<sub>ca</sub></sub> = 0.2~0.8 σ <sub>c/σ<sub>ca</sub></sub> = 0.13~0.87
		シベルなし	9.9	19.0	9.1	19.9	1.08	
		シベルあり	9.5	19.0	9.1	19.9	1.04	
	角形	鋼管柱	9.1	18.4	—	17.7	—	
		シベルなし	13.2	23.5	11.5	23.5	1.14	
		シベルあり	12.3	24.0	11.5	23.5	1.07	
実験 B	円形	鋼管柱	—	46	—	50	—	
		シベルなし	39.5	85	24.7	68	1.60	
		シベルあり	36.0	85	24.7	68	1.46	
	角形	鋼管柱	—	63	—	67	—	
		シベルなし	61.2	98	34.8	88	1.76	
		シベルあり	64.8	100	34.8	88	1.86	

\*印は鋼管縁ひずみが 1000 μ に達したときの ゲージの読みから求めた 許容耐荷力である。

過去の多くの実験は、軸方向圧縮力が卓越しているものが多い。本実験のように軸方向圧縮力による応力に比較して曲げ圧縮応力が卓越した状態での実験においても、鋼管とコンクリートの合成効果および鋼管によるコンクリートの拘束効果ならびにコンクリートによる鋼管

の局部座屈防止効果等により、円形、角形両断面の合成柱とも実験値と理論値との比較を通じ、単なる中空鋼管柱よりも 1.3~1.4 倍大きな耐荷力を有していることが判明した(表-4)。これは充てんコンクリートの一部が軸方向圧縮力、および曲げモーメントを分担していることを意味している。

中空円形鋼管柱では鋼材が降伏するまでにすでに目視できない局部座屈が発生し、荷重-ひずみ曲線が直線性を失っているが、合成柱では鋼管が降伏するまで急激なひずみの増加はみられない(図-7)。これは充てんコンクリートにより鋼板の座屈が外側にしか発生し得ないため、局部座屈強度が上昇するものと考えられる。

このことから、ほぼ鋼管と充てんコンクリート間のひずみの適合性が満足されていると考えられる。

図-8 にフープ方向ひずみの発生状況を示す。スタッドジベルのあり、なしとも鋼管にフープ応力が生じて3軸応力のもとでの耐荷力の増大が期待できることが判明した。ただし、実験によるとフープ応力は中空角形、円形とも 0.4σ<sub>y</sub>、合成柱で 0.2~0.3σ<sub>y</sub> ぐらいと推定され、この応力は鋼管を設計する際考慮する必要がある。

最大耐荷力とスタッドジベルの有無に関しては表-4 から円形、角形断面ともスタッドジベルの有無による有意差は認められない。これは、この実験ではせん断力が作用していないこと、部材両端部が鋼板で拘束されていること、自然付着もかなり期待できることなどの理由が考えられる。

② 実験Bの耐荷力

鋼管柱では鋼材が降伏するまでに局部座屈を起こし、荷重-ひずみ曲線の直線性が失われるのに対して、合成柱は鋼材の降伏ひずみ付近まで直線性を保っており、鋼管とコンクリート間のひずみの適合条件が満たされているものと考えられる(図-9)。

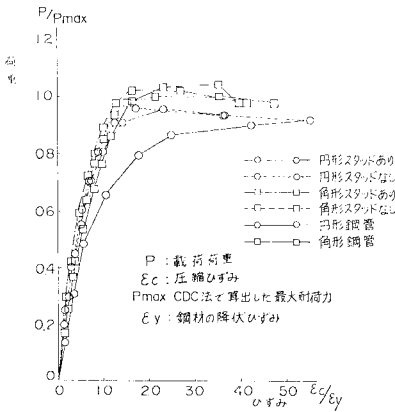


図-7 荷重-ひずみ曲線(実験A)

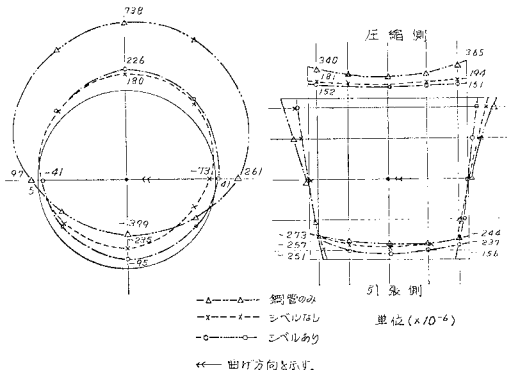


図-8 フープ方向ひずみ分布(荷重 P=10 tf (98 kN))

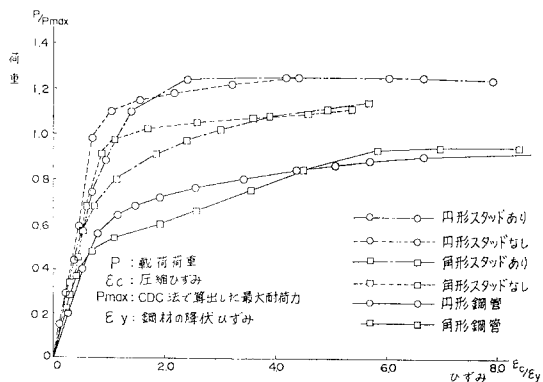


図-9 荷重-ひずみ曲線(実験B)

表-5 諸外国の設計指針と実験値との比較

[単位: 1 tf (=9.8 kN)]

設計指針	供試体	実験 A		実験 B		備考
		円形柱	角形柱	円形柱	角形柱	
最大耐荷力 (弾性状態)	DIN 18806 <sup>3)</sup>	20.9	28.8	76.2	107.3	幾何学および構造的 不完全性の影響を考慮
	BS 5400 <sup>2)</sup>	20.3	25.6	68.3	87.5	
	CDC による計算値	19.9	23.5	68.0	88.0	
	実験値 {スタッドなし	19.0	23.5	85.0	98.0	
	実験値 {スタッドあり	19.0	24.0	85.0	100.0	
許容耐荷力 (弾性状態)	鋼管コンクリート構造 計算規準 <sup>4)</sup>	8.9	12.5	26.9	41.2	$\sigma_{sa} = 1900 \text{ kgf/cm}^2$
	CDC による計算値	9.1	11.5	24.7	34.8	$\sigma_{ca} = \frac{\sigma_{ck}}{3}$
	実験値 {スタッドなし	11.5	14.2	39.5	61.2	$\sigma_{ck} = 380 \text{ kgf/cm}^2$ (実験A)
	実験値 {スタッドあり	10.9	16.6	36.0	64.8	$\sigma_{ck} = 390 \text{ kgf/cm}^2$ (実験B)

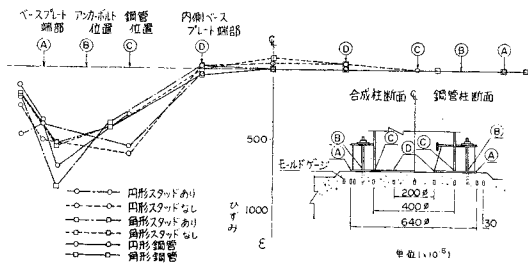


図-10 コンクリート台座のひずみ分布

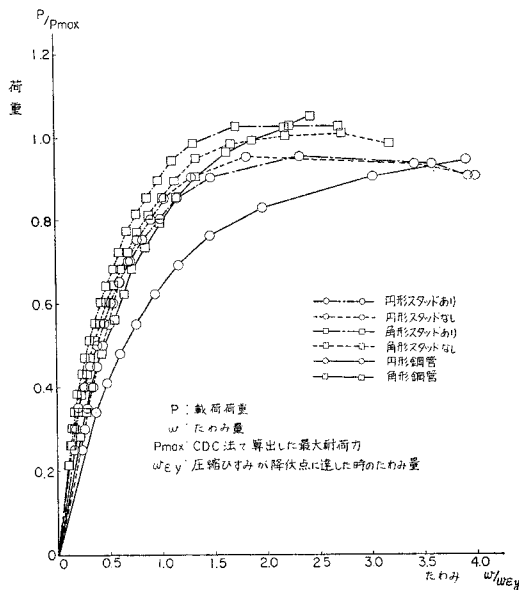


図-11 荷重-たわみ曲線 (実験A)

合成柱の最大耐荷力は、中空鋼管柱に比し 1.6~1.8 倍の耐荷力を有している (表-4)。この実験では、せん断力が作用しているにもかかわらず、ジベルの有無は最大耐荷力には影響を及ぼしていないことがわかる (表-4)。さらに、文献 10) で示されているように、繰り返し応力を受ける場合もジベルの有無はあまり影響してい

ない。しかし、文献 3) では荷重を導入する領域に、ずれ止めを配置することを規定しているので、さらにこの点に関する研究が必要であろう。

合成柱の柱基部のひずみは中空鋼管柱がすでに座屈状態にあるにもかかわらず合成柱の場合はひずみが低い値を示しており、柱基部内部の補剛材を省略しても充てんコンクリートが荷重を分担しているものと考えられる。また、円形、角形供試体それぞれ 2 本ずつという数少ない実験結果からではある

が、図-10 のコンクリート台座のひずみ分布からも柱基部内部の補剛材を省略して簡素で、しかも経済的な設計が可能であると推察される。

③ 諸外国の設計指針と実験値との比較

実験結果と CDC 法、ならびに文献 2)~4) より求めた耐荷力とを比較したものを表-5 に示す。最大耐荷力を求めることを主眼とした CDC 法による解析値は、応力分布状態が複雑でない実験 A の場合、実験結果と良好な一致を示している。一方、応力分布状態が複雑な実験 B においては、耐荷力の解析値と実験値に多少の差が生じたが、CDC 法は残留応力や初期たわみ量も考慮できて、合成柱の最大耐荷力を求める方法として実用的な解析方法と考えられる。

b) 剛性

① 実験 A の剛性

弾性範囲内におけるたわみの測定結果を表-6 に示す。合成柱の曲げ剛度は中空鋼管柱の 1.4~1.6 倍であった。一方、合成柱のスタッドジベルの有無によるたわみ性状を図-11、表-6 から比較すると、角形、円形断面とも有意差は認められなかった。鋼とコンクリートのヤング係数比  $n = E_s/E_c$  は充てんコンクリートのひずみを今回は計測していないので、たわみ量から以下のように求めた。すなわち、図-4 (a) の模型桁を両端に曲げモーメントが作用する単純ばりに置換し、ヤング係数比を  $n = I_c/(I_s \cdot K - I_s)$  より求めた。ここに、 $I_s, I_c$  はそれぞれ合成柱の鋼管部および充てんコンクリート断面の断

表-6 実験 A における供試体中央断面のたわみ量  
 $P = 10 \text{ tf} (=98 \text{ kN})$

供試体	たわみ量 (mm)	鋼管柱 合成柱	ジベルなし ジベルあり	
円形	鋼管柱	16.0	—	
	合成柱	ジベルなし	10.9	1.12
		ジベルあり	9.8	
角形	鋼管柱	10.1	—	
	合成柱	ジベルなし	7.3	1.06
		ジベルあり	6.9	

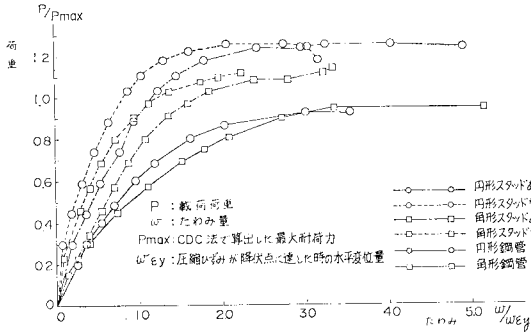


図-12 荷重-たわみ曲線(実験B)

面2次モーメントである。また  $K = \delta_s / \delta_{sc}$  で、 $\delta_s, \delta_{sc}$  はそれぞれ鋼管柱および合成柱のスパン中央の実測たわみ値である。このような方法によると、合成柱の鋼とコンクリートのヤング係数比  $n$  はスタッドジベルなしで  $n = 15$  程度、ありで  $n = 12$  程度となり、剛性の増加に対するスタッドジベルの効果が認められる。

② 実験Bの剛性

合成柱は中空鋼管柱より 1.3~1.7 倍の剛性を有している(図-12)。一方、鋼とコンクリートのヤング係数比  $n$  を同様にたわみから計算すると、スタッドジベルなしで  $n = 15$  程度、スタッドジベルありで  $n = 10$  程度であった。

c) 破壊実験後のコンクリートの状況

実験 A, B の破壊実験後、供試体にガスで観察用の窓を開けて目視による調査を実施した結果、以下のことを確認した。

- ① 鋼管とコンクリートとの肌すきはみられなかった。
- ② スタッドジベルはコンクリートと鋼管を十分に付着させる効果をもっていた。
- ③ 鋼板、鋼管の局部座屈はみられなかった。
- ④ 柱基部の引張側のコンクリートに幅 0.2 mm~0.5 mm のクラックが生じていた。

3. 合成柱を有する橋脚の静的、動的現場実験

(1) 橋脚概要

実験橋脚は阪神高速道路大阪池田線内の非常駐車帯用に計画され、わが国で初めて合成柱を利用して建設された。この橋脚は図-13に示すように、柱高約 9 m、はり長 23.0 m の T 形のラーメン橋脚で、最大板厚は柱基部で 25 mm (SM 41)、隅角部で 36 mm (SM 41) が使用された。上部工は支間 40 m の鋼単純合成 I 桁で、荷重は橋脚のはりの両端約 3 m の部分にしか作用しない構造になっている。今後の設計への参考資料を提供するため、コンクリート充てん前後における橋脚各部の応

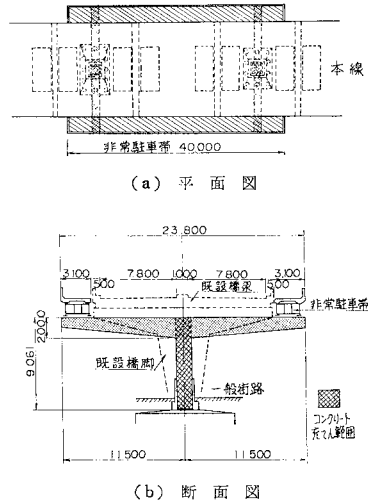


図-13 T形橋脚一般図

力測定、片持部先端のたわみ測定、さらに振動特性を調査するための一連の現場実験を実施した。充てんコンクリートは、普通ポルトランドセメントが使用され、設計基準強度は  $\sigma_{ck} = 180 \text{ kgf/cm}^2$  (17.7 MPa)、スランプ 8 cm、最大骨材寸法 40 mm、空気量 4% で、はり上部からトレミー管を通じて徐々に打設された。

(2) 荷荷方法

静的載荷は自重 37.2 tf (364.8 kN) のトラック・クレーンをはり先端より 1.55 m の位置に吊り下げるといった方法によった。すなわち、橋脚とトラック・クレーンにワイヤーをまわし、ロードセルを介して両者を結んだ。そして、トラック・クレーンのアウトリガーを昇降させることにより、橋脚に所要の鉛直荷重を作用させた<sup>22)</sup>。この種の測定では、荷重と測定量との直線性の有無が問題となる。図-14には隅角部の荷重-ひずみ曲線を例示するが、かなり良好な直線性が認められた。

動的載荷も同じくトラック・クレーンを用いた。すなわち、内蔵のワイヤーを橋脚にまわし、これを引き込んで、一定の荷重として作用させておき、その荷重を瞬時に解放させて衝撃を与え、橋脚に自由振動を起こさせることにした<sup>22)</sup>。

なお、測定方法の概略は次のとおりである。まず、

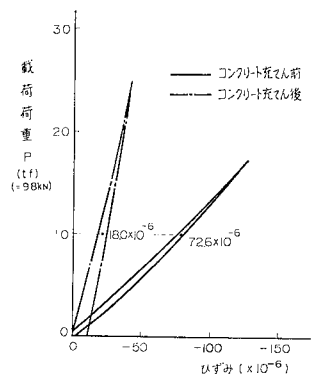


図-14 はり隅角部の荷重-ひずみ曲線

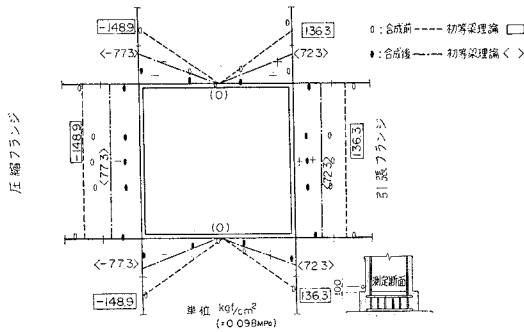


図-15 柱基部直上断面の垂直応力分布

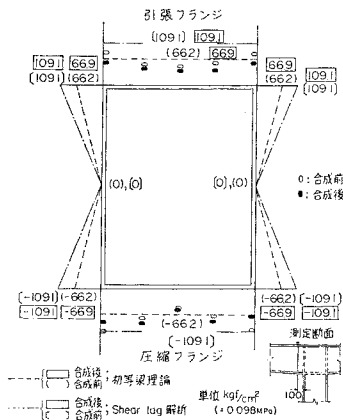


図-16 隅角部はり断面の垂直応力分布

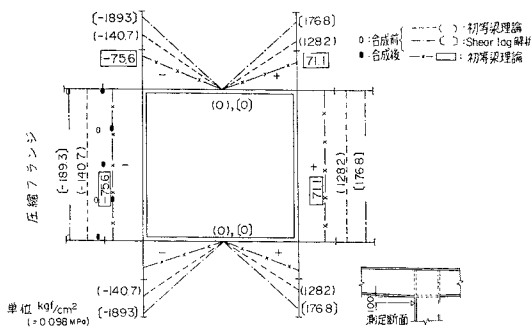


図-17 隅角部柱断面の垂直応力分布

静的ひずみ、たわみおよび作用荷重はストレイン・ゲージ形のピックアップを用い、デジタル・ストレインメーターにより測定した。次に、動的測定はストレイン・ゲージをT形橋脚のはり先端に取り付け、動的ひずみ計を通じて増幅し、それをデータ・レコーダーに記録した。

(3) 静的実験結果と考察

a) 応力分布

コンクリート充てん前後における橋脚各部の応力分布、特に柱基部、隅角部に発生する Shear lag に伴う応

力測定結果を図-15~17に示す。図-15から柱基部直上に、図-16, 17から隅角部のはり、柱のフランジにおいて、合成前では著しい Shear lag 現象が現われている。これらは奥村ら<sup>23)</sup>による解析結果とよい一致を示している。また、図-15に示すように等曲げモーメントを受けるはずの柱基部においても Shear lag が生じているという事実も明らかになった。

しかしながら、コンクリート充てん後、これらの断面においては充てんコンクリートによるせん断変形が防止され、フランジ内の応力分布は、図-15~17に示すように、ほぼ均一な応力分布を呈し、全断面有効とみなせるようである。そして、隅角部柱断面の圧縮フランジでは最大 47%、柱基部断面では最大 75% の垂直応力の低下、隅角部腹板では最大 60% のせん断応力の低下が認められた。さらに、片持ばり部には全くコンクリートが充てんされなかったにもかかわらず、30% の垂直応力の低下が認められた。以上のことから、コンクリートによる Shear lag 現象の低減効果が大きく、合成柱とすることにより隅角部等の細部設計も簡略化できると推察される。

b) たわみ

片持ばり先端部のたわみは合成後、約 60% 小さくなっており、橋脚の柱部材の剛性が相当に上昇することが判明した(図-18)。このことにより、たわみ制限の厳しい鋼製橋脚に合成柱を活用すれば、著しい改善が行い得ることを示唆している。

(4) 動の実験結果と考察

a) 橋脚の曲げ自由振動

図-11に示すように、実験橋脚上に非常駐車帯が乗っており、この質量を考慮して片持ばりとしての曲げ自由振動解析を行った。ただし、合成前後で非常駐車帯の質量が異なる(合成前には上部工の床版が打設されていなかった)ので、コンクリート充てんによる合成効果が

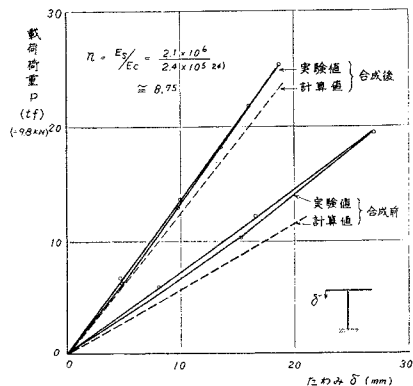


図-18 コンクリート充てん前後の荷重-たわみ曲線



考察できるような解析を行った。

**b) 上部工のねじり自由振動**

橋脚が曲げ振動を起こすと、その上の上のっている上部工はねじり振動を起こすので、上部工のねじり振動数を求めた。

**c) 連成自由振動**

実際の橋脚の自由振動は **a)**, **b)** で述べたような橋脚の曲げ自由振動と上部工のねじり自由振動の連成振動として評価することができる。

工学上はこのような振動における最低次の固有振動数が重要となるので、これについて Dunkerley の方法<sup>21)</sup>を適用すると、上部工を含めた橋脚の最低次の固有振動数  $f$  が求められる。表-7 にこの方法による解析値を示す。

**d) 合成前後の振動記録**

代表的な合成前後の振動記録を 図-19 に示す。

**e) 固有振動数**

図-19 に示すたわみ振動記録をスペクトル・アナライザーにかけパワースペクトル密度(図-20)を求めると、ピーク値は合成前後においてそれぞれ2個現われて

表-7 固有振動数  $f$  の実験値と解析値との比較

項目	実験値 $f_{Exp}$ (Hz)	解析値 $f_{AN}$ (Hz)	$\frac{f_{Exp}}{f_{AN}} \times 100$ (%)
合成前	1.96	1.99	98.5
合成後	1.54	1.35	114.0

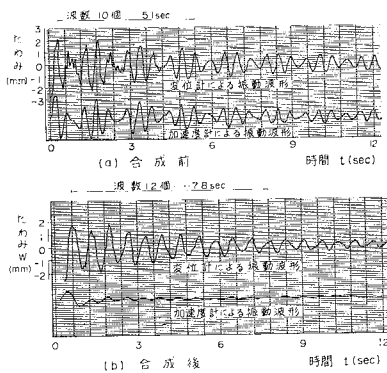


図-19 はり先端部における自由振動波形

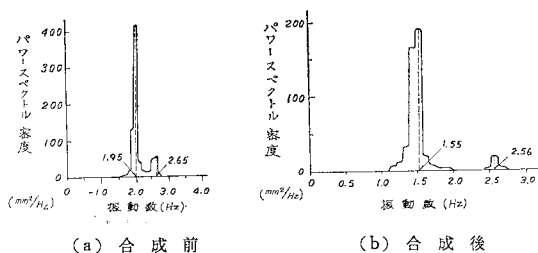


図-20 振動波形のパワースペクトル密度

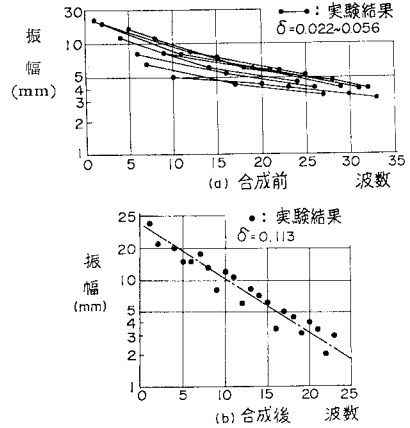


図-21 対数減衰率

いたが、どちらも最低次のもののパワーが卓越していた。合成前後における最低次の固有振動数の実験値は、表-7 に示すように、それぞれ 1.96 Hz, 1.54 Hz であり、解析値とほぼ一致していた。

コンクリートを充てんすることによる固有振動数は約 40% 上昇していたが、合成後の固有振動数の実測値と解析値とに若干の差異が認められる。このことより合成柱の剛度 ( $n$  値のとり方) の評価にはなお研究の必要がある。

**f) 対数減衰率**

図-19 の振動記録から、合成前後における振幅から対数減衰率  $\delta$  を求めた。合成前後における波数と振幅の関係を図-21 に示す。図-21 (b) 中に示す直線は実験値を最小二乗法を用いて処理したものである。対数減衰率  $\delta$  の値は 図-21 中に示すとおりであり、合成後の  $\delta$  は合成前の約 2~5 倍となっている。このようにコンクリート充てんによる減衰効果の増大が大きいので、合成柱を採用することにより、橋脚の動的特性が著しく改善されるものと思われる。

**4. 結 言**

まず、模型実験から以下の結果を得た。

(1) 曲げ応力度の占める比率が高い場合でも合成柱としての耐荷力を十分に有し、しかもスタッドジベルの有無にはあまり関係していない。荷重-ひずみ曲線は降伏点付近までほぼ直線性を保持していることから、ほぼ鋼管と充てんコンクリート間とのひずみの適合性は満たされていると推察される。

(2) たわみに対する合成柱の剛性は、鋼管柱に比べて 1.4~1.6 倍となっていた。合成柱の剛度とスタッドジベルの有無とはあまり関係していない。

(3) たわみから逆算した鋼とコンクリートのヤング

係数比  $n$  は、 $n=10\sim 15$  程度であった。本実験では曲げモーメントが軸方向圧縮力より卓越しているため、合成柱の挙動が鉄筋コンクリート部材と類似したためと思われる。

(4) 合成柱の柱基部各部に発生するひずみは、中空鋼管柱の場合よりも約 20% 減少していた。

(5) 合成柱の柱基部内部の補剛材を省略した場合でも、ベースプレート下面のコンクリートのひずみ分布に大きな変化はみられなかった。このことから内部の補剛材を省略して簡素で経済的な設計が可能であろうと推察される。

(6) 乾燥収縮による鋼管とコンクリートとの肌すきは認められなかった。

(7) フープ方向の応力が生じて 3 軸応力のもとでの耐荷力の増大が期待できる。しかし、鋼管内のこのフープ応力を設計の際には配慮する必要がある。

次に、現場実験から以下の結果を得た。

(8) 合成前においては隅角部はり断面、柱断面、および柱部材の下端断面には顕著な Shear lag 現象が認められた。しかし、合成後では、隅角部、柱基部には Shear lag 現象はほとんど認められず、隅角部柱断面、柱基部断面の垂直応力はともに減少し、隅角部腹板ではせん断応力の減少もみられた。このことから、今後、隅角部や柱基部の細部設計を行うにあたっては一考が必要であろう。一方、片持ばり部にはコンクリートを充てんしなかったにもかかわらず、隅角部はり断面の応力が減少することも認められた。

(9) 合成後におけるはり先端のたわみは約 60% も減少しており、著しく橋脚の剛性が増大しているため、橋脚のたわみ制限の厳しい鋼製橋脚には合成柱は有利な構造形式であると推察される。

(10) 合成構造とすることによって、橋脚の固有振動数、すなわち動的剛性が著しく上昇する。

(11) 合成柱とすることによって、対数減衰率が大きくなる。すなわち、減衰効果が増大し、動的特性が著しく改善されることを示している。

謝 辞：実験 A, B を実施するにあたって、大阪市立大学の大型実験室を使用し、東京 エンジニアリング(株)の田中忠夫氏らのご協力のもとに実験を行った。また、現場実験は、大阪市立大学助手酒造敏廣氏、ならびに橋梁工学研究室の学生諸君の協力を得て行ったものであることを付記する。その際、種々ご協力を得た阪神高速道路公団大阪管理部保全第 1 課の富田 穰、瀬川章彦両氏、および、(株)片山鉄工所の関係各位に厚く感謝する。

## 参 考 文 献

- 1) 河井章好・吉川 紀・石崎 浩：合成柱(充てんコンクリート方式)を有する鋼製橋脚の諸問題(上, 下), 橋梁と基礎, 1983年2月, 3月。
- 2) British Standards Institution, BS 5400, Part 5, 1980年3月。
- 3) DIN 18806, Teil 1, Tragfähigkeit von Verbundstützen, Berechnung und Bemessung, 1981年9月。
- 4) 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版, 昭和55年2月。
- 5) 大塩俊雄・金井道夫：コンクリート充填鋼管の荷重実験, 土木学会年次学術講演会, 昭和56年10月。
- 6) 金井道夫・大塩俊雄：鋼-コンクリート合成鋼管について, 土木技術資料, 23-9, 1981年9月。
- 7) 佐伯彰一・金井道夫：コンクリートを充填した鋼製脚, 道路, 1982年12月。
- 8) 建設省土木研究所：コンクリート充填鋼管の耐荷力(その1), 土木研究所資料, 第1728号, 昭和56年8月。
- 9) 中井 博・吉川 紀・富田 穰・由井洋三：軸力と曲げを受ける合成柱(充てん方式)の静的挙動に関する実験的研究, 第38回年次学術講演会, (I-245), 1983年9月。
- 10) 吉川 紀・富田 穰・瀬川章彦・木島信雄：合成柱(充てんコンクリート方式)を有する柱基部のくり返し荷重実験について, 第29回構造工学シンポジウム, 1983年2月。
- 11) 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, 1982年6月, 7月。
- 12) 阪神高速道路公団：構造物設計基準, 第2部, 昭和55年4月。
- 13) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説(I 共通編, II 鋼橋編), 昭和55年2月。
- 14) Nakai, H., Kitada, T., Miki, T.: A Compression Testing Machine with Capacity 600 tons for Experimental Researches on Large-Sized Members in Bridge Structures, Memoirs of the Faculty of Engineering, Osaka City University, Vol. 23, Dec. 1982
- 15) Chen, W.F. and Atsuta, T.: Theory of Beam-Columns, Vol. 1, In-Plane Behavior and Design, McGraw-Hill Book Company, 1976
- 16) Neogi, P.K. and Sen, H.K.: Concrete-Filled Tubular Steel Columns under Eccentric Loading, The Structural Engineer, Vol. 47, May 1969.
- 17) 福本啓士・西野文雄 共訳：鋼構造部材と骨組—強度と設計—, 丸善, 昭和45年10月。
- 18) Desayi, P. and Krishnan, S.: Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete, Journal of ACI. Proc., Vol. 61, No. 3, March 1964.
- 19) 阪神高速道路公団：中埋コンクリート柱の特性に関する調査業務, 昭和58年1月。
- 20) 阪神高速道路公団：鋼製橋脚柱基部の補剛設計法に関する調査研究業務(その1), 昭和57年3月。
- 21) 中井 博：土木構造物の振動解析, 森北出版, 1983年。
- 22) 阪神高速道路公団, (財)災害科学研究所：合成柱の剛性に関する実験的研究, 昭和58年3月。
- 23) 奥村敏恵・石沢成夫：薄板構造 ラーメン隅角部の応力計算について, 土木学会論文集, 第153号, 昭和43年5月。
- 24) 土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法試案, コンクリート・ライブラリー, 第48号, 昭和56年4月。

(1983.6.27・受付)