

# 縞鋼管合成柱の耐荷特性と打診による付着の診断

## THE EFFECT OF PROJECTIONS ON INNER SURFACE OF COMPOSITE COLUMNS AND EVALUATION OF ADHESION BY IMPACT ELASTIC WAVE

川口昌宏\*・鈴木英実\*\*・嶋津外志彦\*\*\*

By Masahiro KAWAGUCHI, Hidemi SUZUKI and Toshihiko SHIMAZU

It is said that the concrete filled steel column, so called the composite column, possesses good strength and ideal ductility. However, its behavior under load is not clear enough at present. We made experiments to compare the effect of shear connectors with that of projections on steel plate for the simplest column under the axial load. During the axial loading, the authors gave impact on the specimens and measured induced elastic wave. Spectrum analysis of the elastic wave gave the information about composite action between concrete and steel. By these experiments the following were observed. The column with shear connectors had the highest rigidity, the one with projections the second and the one of flat steel the lowest. The strength was almost the same to the column with shear connectors and the one with projections. As for the ductility, the steel with projections was better than the one with shear connectors.

*Keywords: composite column, ductility, connector, impact elastic wave, spectrum analysis*

### 1. 緒 言

鋼管の中にコンクリートを充填させた、いわゆる合成柱は小さな断面で大きな耐荷力とじん性をもつ構造とされており、今後、種々の構造物に用いられることと思われる。しかし、合成柱の力学的な挙動については必ずしも十分理解されていないのが現状である<sup>1)</sup>。そのような中で、建設省土木研究所により行われた合成柱の載荷実験によれば、単に平鋼管内へコンクリートを充填させた合成柱よりも、鋼管内にスタッド等を設置した鋼管にコンクリートを充填させた合成柱の方が、その一体性は良好とされている<sup>2)</sup>。

しかし、鋼管柱の内部にスタッドを溶植することは作業上困難な場合がある。これに替わって、表面に縞をつけた鋼板より製作した縞鋼管が提案されている。

本実験では、スタッドと鋼板上の縞の効果を比較するために、最も単純な軸圧縮合成柱について土木研究所で行われた実験と同様の規模の大型供試体を用い、また鋼管とコンクリートとの合成作用のメカニズムを理解する

ためにいわゆる打診を行い、荷重の増大とともに鋼管と内部のコンクリートがどのように付着もしくは接触しているのかを検討した。

### 2. 供試体の概要

#### (1) 供試体の寸法および分類

本実験では5種類の供試体を各2本ずつ、合計10本の供試体について載荷を行った。供試体高さ2800mm、鋼管外径700mm、鋼管厚9mmとし、平鋼管に普通コンクリートを充填した柱(以下、CFNと略)、縞鋼管に普通コンクリートを充填した柱(以下、CCNと略)、コンクリートの乾燥収縮によりコンクリートが鋼管からはく離するのを防ぐために縞鋼管に膨張コンクリートを充填した柱(以下、CCEと略)、鋼管の円周を16等分、柱軸方向に140mm間隔にスタッドを配し、普通コンクリートを充填した柱(以下CSN-1と略)円周を8等分、同220mm間隔にスタッドを配し、普通コンクリートを充填した柱(以下CSN-2と略)の5種類とした。

これらをTable 1にまとめておく。また、Fig. 1に供試体の略図を示した。

#### (2) 使用材料

合成鋼管内に打設したコンクリートは生コンクリートを使用し、その配合をTable 2に、材令28日と189日

\* 正会員 工博 日本大学教授 理工学部交通土木工学科  
(〒274 船橋市習志野台7-24-1)

\*\* 正会員 工修 日本大学副手 (現・神奈川県)

\*\*\* 学生会員 日本大学大学院生

Table 1 Description of specimens.

Series		CFN	CCN	CCE	CSN-1	CSN-2
Number		2	2	2	2	2
Concrete	Normal	○	○		○	○
	Expansive			○		
Steel	Flat	○				
	Checkered		○	○		
Column	No. of stud connectors round circumference	16			○	
		8				○

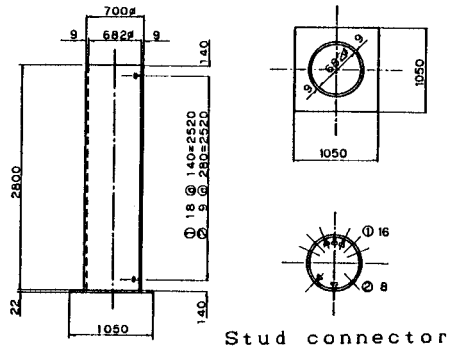


Fig. 1 Dimension of specimens.

Table 2 Mix proportion of concrete.

* Maximum size (mm)	Slump (cm)	Air content (%)	Water cement ratio W/C (%)	Sand percentage S/a (%)	Quantity of material per unit volume of concrete (kg/m <sup>3</sup> )						
					Water W	Cement C	Fine aggregate S	Coarse aggregate		admixture	
								mm-10	mm-20	Air-entraining agent	Expansive agent
N	25	12	50	42.4	168	336	767	533	540	0.840	—
E	25	12	50	42.4	168	321	767	533	540	0.840	30

N, B) N: normal concrete  
E: expansive concrete (used admixture is 『DENKA#20』)

Table 3 Strength of concrete.

Ages (Weeks)	—	Normal concrete	Expansive concrete
4	$\sigma_c$ (MPa)	40.70	39.62
	$E_c$ ( $\times 10^5$ MPa)	0.31	0.33
27	$\sigma_c$ (MPa)	44.23	45.50
	$E_c$ ( $\times 10^5$ MPa)	0.32	0.36

Table 4 Strength of steel.

Column	$\sigma_{sy}$ (MPa)	$\sigma_{ult}$ (MPa)
Flat	402.07	500.14
Checkered	362.85	509.95

のコンクリートの力学的性質および応力ひずみ曲線については、Table 3, Fig. 2にそれぞれ示した。また鋼材の力学的性質をTable 4とFig. 3に、縞鋼板突起部の形状をFig. 4にそれぞれ示す。また、スタッドは $\phi 13$  mm、高さ80 mmのものを使用した。

### 3. 荷重方法および計測方法

#### (1) 荷重装置

試験は、日本大学理工学部大型構造物試験棟内に設置してある3000 t大型構造物試験機を用いて行った。なお、北・西・南・東の各面をライン1・ライン2・ライン3・ライン4とし、変位・ひずみもこれに準じた。

荷重支持条件は下端部は平版支持、上端部はライン1-3方向を1300 mm、ライン2-4方向は974 mmの曲率半径をもつローラーを使用した。

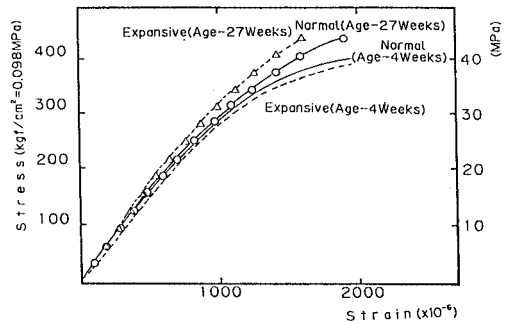


Fig. 2 Stress-strain curve for concrete.

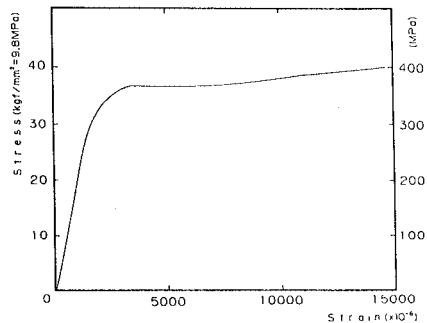


Fig. 3 Stress-strain curve for steel.

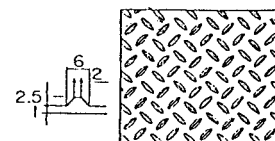


Fig. 4 Shape of checkered surface.

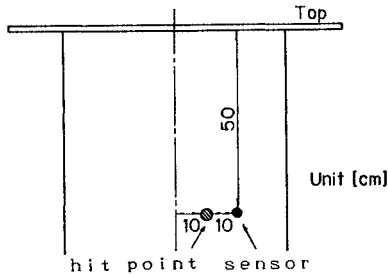


Fig.5 Schematic diagram of hit point and sensor.

(2) 計測方法

測定項目は載荷荷重ごとに供試体の軸方向および水平方向の変位、鋼管内のコンクリートひずみ、鋼管表面の軸方向・円周方向ひずみとした。

各変位量の計測は 200 t ごとに行い、最大耐荷力以降は変位量約 2.5 mm ごとに行った。ただし、実験の都合上、あらかじめ 200 t まで載荷を行った。

また、打診により診断する方法は加速度ピックアップを Fig.5 に示した位置にグリースで附着させ、中空金属パイプで鋼管表面上の打点をたたいた。解析方法は、ピックアップ（小野測器 NP-501 S, 40 kHz）によって加速度を検出し、シグナルアナライザ（岩崎通信機社, SM-2100 A）によって振動波形のオートパワースペクトラムを求め、荷重載荷中の卓越振動数の変化を調べた。

4. 測定結果および考察

(1) 載荷後の供試体の変形

Photo 1 から 3 に、載荷試験後に解体された合成柱の様子を示した。Photo 1 は、合成柱最上部に設けられたスタッドジベルを円周方向に 2 本切出したもので、その変形と鋼管の座屈を示している。Photo 2 には CFN における鋼管の座屈と内部コンクリートの様子を示した。鋼管表面のゼブラ（写真右側中央部）は鋼管の座屈位置を示している。このように CFN では鋼管表面の座屈位置と、コンクリートがくさび形に破壊し、その先端が一致していた。CCE と CCN ではこのような現象はみられなかった。またスタッドのある合成柱の場合、全体の解体が不可能であったため、内部コンクリートの様子は不明である。Photo 3 に縞鋼管の縞とコンクリートの附着状況を示した。鋼管とコンクリートがよく附着していることがわかる。

Fig.6 に載荷後の合成柱における面外変形を示した。図中の数字は変位量を示し、その単位は mm である。

(2) 最大耐荷力

i) 鋼管の鋼材降伏点より算出した鋼管の最大耐荷力を  $S_y$  とする。

$$S_y = A_s \times \sigma_y \dots \dots \dots (1)$$

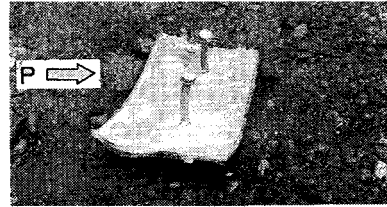


Photo 1 Deformed stud connector.

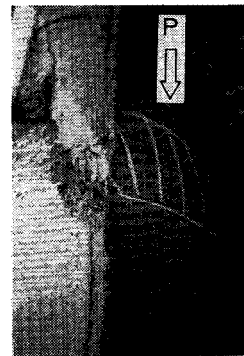


Photo 2 Buckled steel column and concrete.

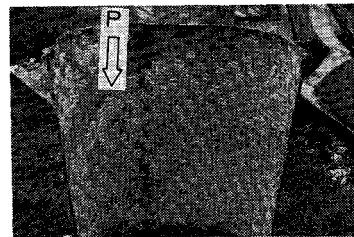


Photo 3 Attached concrete to checkered steel column.

ここに、 $A_s$ : 鋼管の断面積、 $\sigma_y$ : 鋼管の降伏応力。

ii) 鋼管の降伏点と局部座屈を考慮した鋼管の最大耐荷力を  $S_b$  とする。ここでは鋼管の残留応力や初期変形を考慮して、次式で定義される Donnell-Wan の式を用いて算出する<sup>2)</sup>。この式を充填管に適用することには疑問があるが、目安として安全側である。

$$\sigma_{cr} = \sigma_y (N - \sqrt{N^2 - \sigma_{ct} / \sigma_y}) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $\sigma_{cr}$ : 初期変形、残留応力を考慮した鋼管の局部座屈応力度、 $\sigma_y$ : 鋼管鋼材の降伏応力度、 $\sigma_{ct}$ : 弾性座屈理論による鋼管の局部座屈応力度で次式で算出する。

$$\sigma_{ct} = \frac{E}{3(1-\nu^2)} \cdot \frac{t}{R} \dots \dots \dots (3)$$

$E, \nu$ : 鋼材のヤング率、ポアソン比  
 $R, t$ : 鋼管の半径、板厚

$$N = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\sigma_{ct}}{\sigma_y} + \frac{U \cdot E}{2 \sigma_y} \right) \dots \dots \dots (4)$$

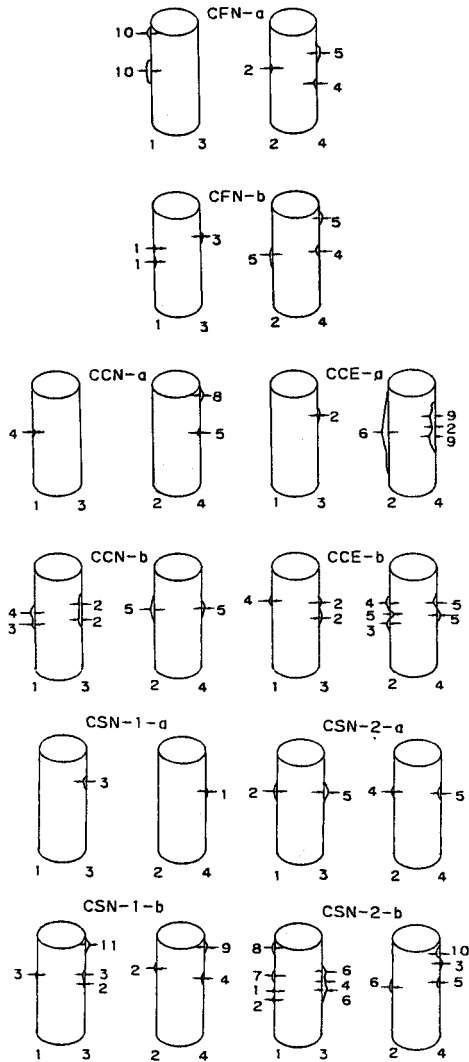


Fig. 6 Residual deformation. (mm)

N, B) Numerals under figure of the specimen describe the line number.

$U$  : 初期不整の程度を表わす定数で道路橋示方書にならって、ここでは、 $U=0.001$  とする<sup>3)</sup>。

本実験では、 $E=2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\nu=0.3$ ,  $R=35 \text{ cm}$ ,  $t=0.9 \text{ cm}$  である。

以上より最大耐荷力の計算値は

$$S_b = \sigma_{cr} \times A_s \dots \dots \dots (5)$$

となる。

iii) コンクリートの最大耐荷力の計算値 コンクリートのシリンダー試験結果により算出するコンクリート部分の最大耐荷力を  $C_s$  とする。

$$C_s = \sigma_c \times A_c \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 $\sigma_c$  : シリンダー試験の圧縮強度

$A_c$  : コンクリートの断面積

Fig. 7 に合成柱の柱軸方向中央位置での水平変位を示した。CFN-a には偏心圧縮等の原因により曲げ作用がかかっていることがわかる。このために Table 5 に示した最大耐荷力が理論値を下回ったものと推察される。しかし同程度の曲げ作用を受けている合成柱 (Fig. 8, CCE) では、最大耐荷力に大きな影響を受けていない。これは、コンクリートと鋼管が一体となって外力に抵抗しているためであり、実験誤差程度に生ずる曲げ作用に対してでもスタッドや縞等物理的な付着力を増大させる機構が必要であると思われる。

(3) 柱軸方向の変形

Fig. 9 に荷重と変位の関係を示した。変位は各供試体の4つの柱軸方向変位計による全縮み量の平均値である。荷重たわみ曲線の立ち上がりを柱の剛性とするならば、縞鋼管を用いた合成柱は中間的な値を示している。

さらに、鋼管が降伏したあとの各合成柱の挙動を比較すれば、平鋼管を用いた合成柱は、大きな耐力低下を示している。ところが縞鋼管を用いたものは、明瞭な極値をもたず、最大耐荷点で、荷重はほぼ横ばいとなっている。またスタッドを用いた合成柱では、最大耐荷点を示

Table 5 Tested results and calculated values.

Specimens	Test results (KN)	Averaged results (KN)	$C_s = \sigma_c \times A_c$ (KN)	$S_v = \sigma_v \times A_s$ (KN)	$S_b = \sigma_{cr} \times A_s$ (KN)	I $C_s + S_v$ (KN)	II $C_s + S_b$ (KN)	Test / I	Test / II
CFN-a	22.47	23.58	16.15	7.86	7.58	24.01	23.73	0.94	0.95
CFN-b	24.08		16.15	7.86	7.58	24.01	23.73	1.00	1.01
CCN-a	24.06	23.83	16.15	7.09	6.85	23.24	23.00	1.04	1.05
CCN-b	23.60		16.15	7.09	6.85	23.24	23.00	1.02	1.03
CCE-a	24.50	24.92	16.61	7.09	6.85	23.70	23.46	1.03	1.04
CCE-b	25.33		16.61	7.09	6.85	23.70	23.46	1.07	1.08
CSN-1-a	25.13	24.88	16.15	7.86	7.58	24.01	23.73	1.05	1.06
CSN-1-b	24.62		16.15	7.86	7.58	24.01	23.73	1.03	1.04
CSN-2-a	24.26	24.13	16.15	7.86	7.58	24.01	23.73	1.01	1.02
CSN-2-b	24.00		16.15	7.86	7.58	24.01	23.73	1.00	1.01

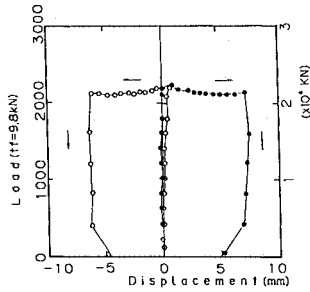


Fig. 7 Compressive load and horizontal displacement at the center of the column (CFN-a).

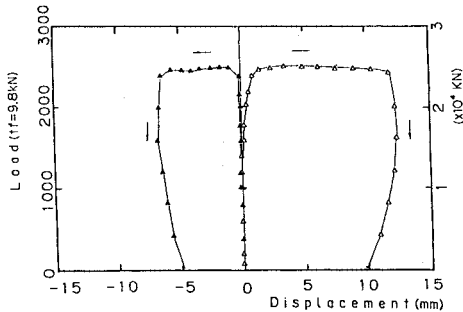


Fig. 8 Compressive load and horizontal displacement at the center of the column (CCN-a).

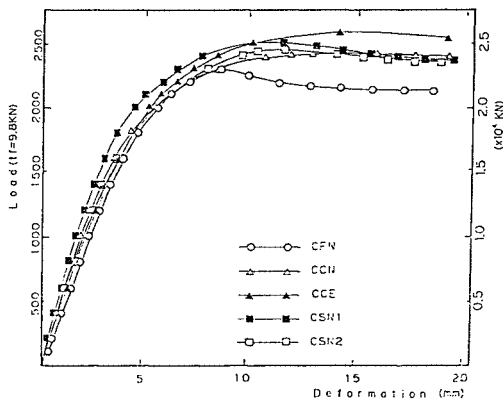


Fig. 9 Compressive load and axial deformation.

した後、編鋼管を用いたものに比べて、荷重は低下の傾向を示している。これらは、合成柱の急激な耐力低下を防ぐには、スタッドや縞のような物理的にコンクリートと鋼管をかみ合わせる機構が必要なることを示している。また物理的にかみ合わせをもつ機構でも、スタッドを用いた合成柱では、スタッドとコンクリートの接点で応力集中が生じ、局部的にコンクリートが破壊されたために荷重が下がったのではないかと考えられる。

(4) 軸方向および円周方向ひずみ

Fig. 10 から Fig. 12 に鋼管の面外変形が最も大きいも

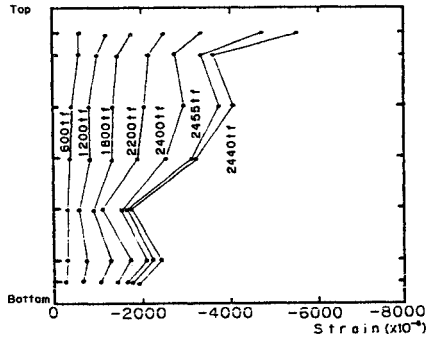


Fig. 10 Load and axial strain on the column (CFN-b).

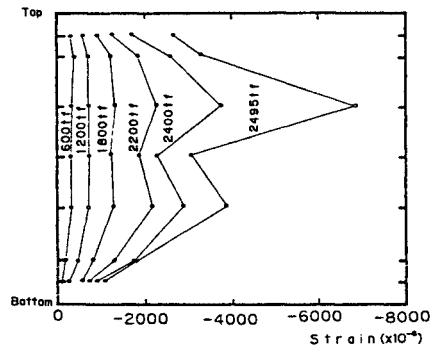


Fig. 11 Load and axial strain on the column (CCE-a).

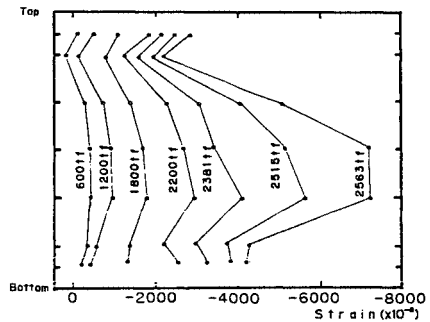


Fig. 12 Load and axial strain on the column (CSN-a).

のを、それぞれの供試体につき1本、1つのラインについて示す。Fig. 6 のスケッチと、Fig. 10 から Fig. 12 より特にCFNの上部に座屈がみられる。これは鋼管とコンクリートの付着がないためであると思われる。CCN, CCE, CSN-1, CSN-2の座屈に関しては、鋼とコンクリートの付着機構の相違による差はみられなかった。

コンクリート充填鋼管は、鋼管とコンクリートのポアソン比の差により、弾性域ではコンクリートと鋼管が互いに離れようとする挙動を示す。

コンクリート充填鋼管において、内部のコンクリートの付着力が作用した場合、弾性域において、 $n = E_s/E_c = 7$ ,  $\nu_s = 0.3$ ,  $\nu_c = 1/6$  として、鋼管の円周方向のひず

み  $\epsilon_{hs}$  は<sup>1)</sup>

$$\epsilon_{hs} = - \left( 0.3 - \frac{2}{15[1+5.83(t/R)]} \right) \epsilon_x \dots \dots \dots (7)$$

$t/R=9/350$  に対して、どの鋼管も 0.184 となる。  
ここに、 $R$ ：鋼管の半径、 $t$ ：鋼管の板厚、 $\epsilon_x$ ：軸方向ひずみ

見掛けのポアソン比は、鋼材のポアソン比 0.3 に比べて、4 割低下することになる。実際に観察された鋼管柱の中央における円周方向の荷重-ひずみ曲線を Fig. 13 から Fig. 15 に示す。図中の点線は、実際に観察された軸方向の荷重-ひずみ曲線の弾性挙動部の傾きを最小二乗法により求め、その傾きに、見掛けのポアソン比 0.184

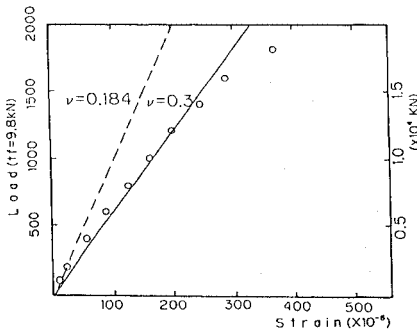


Fig. 13 Load and hoop strain (CFN-b).

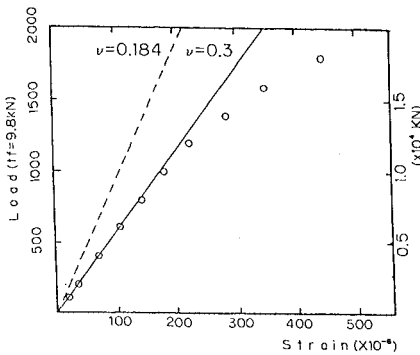


Fig. 14 Load and hoop strain (CSN-1-b).

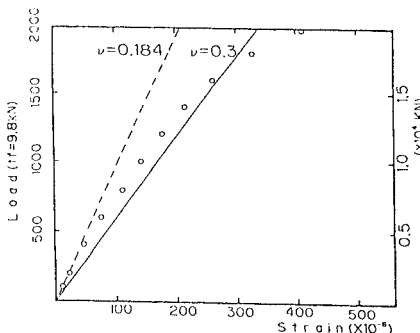


Fig. 15 Load and hoop strain (CCE-b).

を乗じてプロットしたものである。同様に、実線は鋼管のポアソン比を乗じてプロットしたものである。

これらの図から、CFN と CSN は荷重がかなり小さくても  $\nu=0.3$  の実線に近く、鋼管とコンクリートがそれぞれ独立に挙動していることがうかがわれる。また CCE においてはある程度の荷重まで  $\nu=0.184$  に近く、縞鋼管と膨張コンクリートにより、鋼管とコンクリートが一体となって挙動していると考えられる。

### 5. 打診による鋼管とコンクリート間のはく離診断

Fig. 16, Fig. 17 に CSN における振動加速度波形のオートパワースペクトラムを示した。ここで、各荷重に

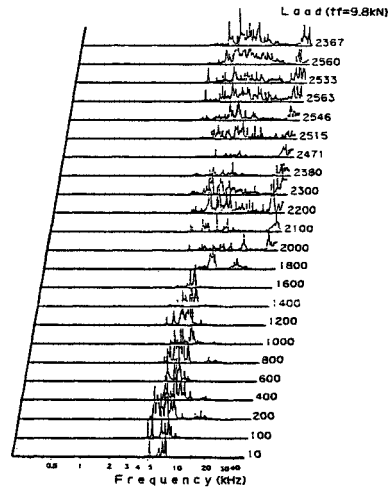


Fig. 16 Auto power spectrum of impact wave (CSN-1-a).

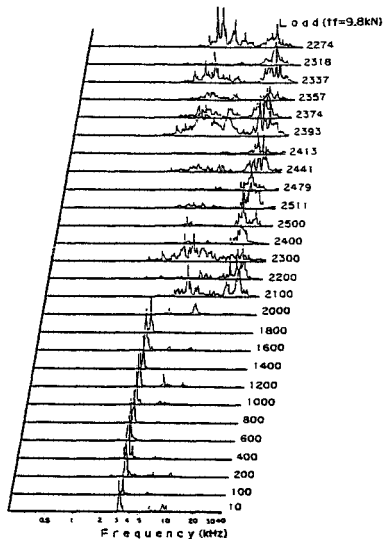


Fig. 17 Auto power spectrum of impact wave (CSN-1-b).

おける波形は大きく2つに大別される。第一の波形は荷重レベルが比較的低い段階で生じている卓越周波数2~5 kHz程度でかつ周波数分布も比較的狭い波形である。第二の波形は卓越周波数が20 kHz付近と前者に比較してかなり高い位置にあり、さらに3 kHzから40 kHz程度までと広範囲にわたっているものである。

合成柱は、低い荷重段階では鋼管のポアソン比はコンクリートのそれより大きいため、鋼管はコンクリートから離れようとする。このときにコンクリートと鋼管の付着強度が十分でなければ両者は離れてしまう。しかし荷重レベルが大きくなるにつれてコンクリートのポアソン比が増大するために、荷重が低い場合とは逆にコンクリートが鋼管を中側から押すことになる。これらの挙動はすでに述べたとおりである。

コンクリートと鋼管が離れているときに生ずる振動波形は、卓越周波数が低く、周波数分布の狭い波形になると推測した。その理由は次の2つである。

① 鋼管がコンクリートからはく離している状態では、板厚の薄い鋼管のみが振動するために、狭い範囲の周波数が観測されると推測される。

② 鋼管とコンクリートがはく離していると思われる荷重段階で、推定したとおりの波形が観測されている。

またコンクリートと鋼管が付着しているときに生ずる振動波形を、卓越周波数が高く、周波数の拡がりの大きい波形と推定した。それは以下の理由による。

① コンクリートと鋼管が付着していれば、両者が一体となって振動するために、合成柱全体がマスとして三次元的に振動して複雑な振動となり、広範囲の周波数が観測されると思われる。

② 載荷後に行った供試体の解体により、コンクリートと鋼管の付着が確認され (Photo 3), その柱の最終段階での振動波形の周波数特性が、「両者が付着している」と推定した波形と一致していた (Fig. 19)。

③ 鋼管とコンクリートが付着していると思われる荷重段階で、推定したとおりの波形が観測されている。

Fig. 18, 19にCCE, Fig. 20, 21にCCNの荷重と波形のオートパワースペクトラムをそれぞれ示した。これらによれば、CCNでは比較的低い荷重段階でコンクリートと鋼管のはく離を示す波形が観察されたが、充填コンクリートに膨張コンクリートを用いたCCEでは各荷重段階でもはく離を示す波形は観察されなかった。

次に波形のオートパワースペクトラムの面積を一定の周波数で分割し (ここでは、5 kHz), 分割された両者の面積比 (低周波/高周波) と各荷重の関係を図. 22に示した。

ここで、各合成柱とも、最大耐荷力を越え、コンクリートと鋼管が接着していると思われる状態では、面積

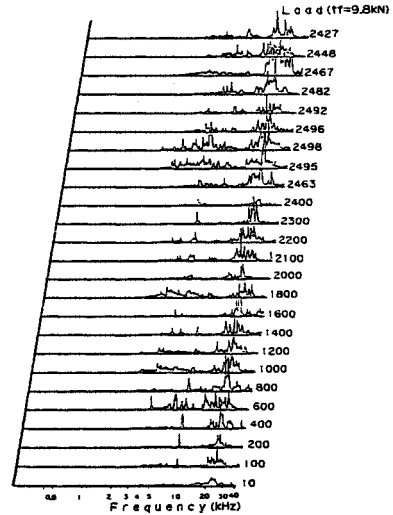


Fig. 18 Auto power spectrum of impact wave (CCE-a).

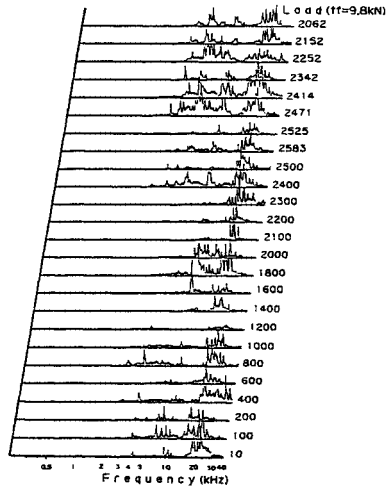


Fig. 19 Auto power spectrum of impact wave (CCE-b).

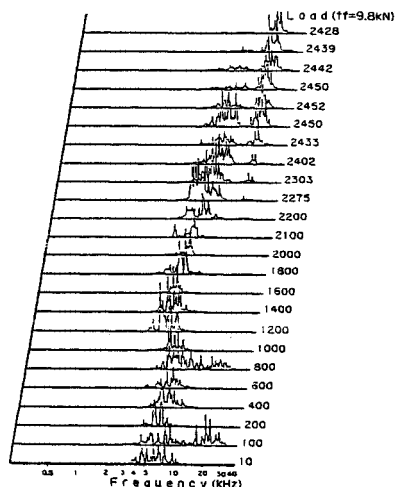


Fig. 20 Auto power spectrum of impact wave (CCN-a).

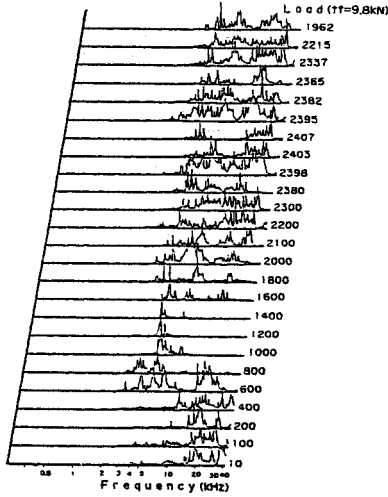


Fig.21 Auto power spectrum of impact wave (CCN-b).

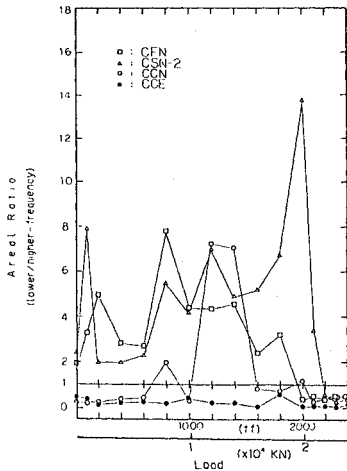


Fig.22 Relation between load and areal ratio of higher frequency in auto power spectrum.

比が1以下となっている。このような見方を行ったとき、CCEのみ各荷重段階でコンクリートと鋼管は附着していることがわかった。局所的な見方をすれば、合成柱においてスタッドを用いた合成柱よりも縞鋼管と膨張コンクリートを組み合わせた合成柱の方が、一体化されていると思われる。

この報告では鋼管面とコンクリートが単に機械的に密着している状態と、両者が附着した状態とを区別していない。振動特性が上記の二種の接触条件でどのように異

なるかは検討していない。

### 6. 結 論

本実験を実施し、以下の結論が得られた。

(1) 縞鋼管を用いた合成柱の剛性は、平鋼管にスタッドを配した合成柱と、平鋼管のみを用いた合成柱の中間的な値を示した。

(2) 純圧縮荷重を受けた場合の最大耐荷力は、スタッドや縞の有無により著しい相違はみられなかった。しかし、実験上に生ずる誤差程度の偏心圧縮に対しても合成柱の耐荷力を維持させるには、コンクリートと鋼管を機械的にかみ合わせる機構が必要であり、縞鋼管は十分これに応えるものである。

(3) 縞鋼管に膨張コンクリートを充填させた合成柱では、平鋼管に普通コンクリートを充填させた合成柱にみられたコンクリートと鋼管のはく離現象は観察されず、実大寸法の荷重状態に近い場合でも、縞鋼管の附着に対する安全性が確かめられた。

(4) 合成柱に打撃を加えて発生する弾性波の周波数分析によって、鋼とコンクリートの局所的な附着状態を定性的に判定できると思われる。

謝 辞：最後に、本研究を進めるにあたり川崎製鉄(株)佐藤政勝氏、日本大学理工学研究所大型構造物実験棟の方々および同大学構造第Ⅰ研究室学生(昭和59年、芦川友広：伊勢原市役所、紫田守康：大啓建設、浅古勝久：建設省関東地方建設局、昭和60年、井口剛：植木組、落合慎二：奥村組、金井孝文：高崎市役所、嶋田学：市川工務店、米世光志：米世商店)の助言および協力に対し深く感謝いたします。また、川崎製鉄(株)には供試体の製作および実験にあたって援助をしていただき深く御礼申し上げます。

### 参 考 文 献

- 1) 河井章好・吉川 紀・石崎 浩：合成柱を有する鋼製橋脚の諸問題、橋梁と基礎、Vol.17, No.2, pp.42~50, 1983. Vol.17, No.3, pp.45~47, 1983.
- 2) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室：コンクリート充填鋼管の耐荷力、土木研究所資料、第1728号、p.2, 1981.8.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書、Ⅱ編、3章、組合せ圧縮部材.
- 4) 既出、2)、p.14.

(1985.6.24・受付)