箱型鋼板コンクリート構造物の振動実験*

宮田 弘 市^{*1}, 落合 兼 寛^{*2}
横山 丘 直^{*4}, 前田 耕 一^{*3}Vibration Test for Frame Structure
of Concrete-Filled Square Steel Tubular ColumnKooichi MIYATA, Kanehiro OCHIAI,
Takanao YOKOYAMA, and Kooichi MAEDA

This paper presents the results of experimental research on the dynamic behavior of a frame structure consisting of a concrete-filled square tubular steel column. It is said that the concrete-filled square column, the so-called composite column, possesses good strength and ideal ductility. However, its characteristic of vibration under strong earthquakes is not clear enough at present. We conducted experiments to compare the effect of the composite frame with that of the noncomposite frame using a shaking table. In these experiments the following were observed. The composite structure was superior to the noncomposite one in terms of stiffness. The damping ratio increased remarkably outside of the elastic domain.

Key Words: Vibration, Frame Structure, Concrete, Damping, Composite Column

1. 緒 言

大型回転機器の支持架台は、主に耐震設計の理由から、ほとんどが鉄筋コンクリート製の柱・はり構造で設計されているが(図1)、プラント設計をよりいっそう合理化するため、建設性並びに経済性の高い支持架台の開発が必要となっている。本研究は、上記を背景として、架台の柱・はり部材を鋼板コンクリート製とした合理的支持架台の開発を目的とした。

鋼管にコンクリートを充てんした合成柱は、強度と剛性とが単なる鋼管柱よりも大きく、さらに地震時におけるダクティリティーの大きい構造物を建設することが可能である。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⁽¹⁾⁽²⁾。その中で、特に、耐震設計に重要な合成柱の構造物の振動特性(固有振動数、減衰比)は、ほとんど検討されていない。箱型鋼板コンクリート製の門形フレーム構造物を試験体として、振動台による加振実験を

行い、弾塑性域に至る振動特性の変化について検討した。

2. 試 験 体

2.1 相似則 模型の実機に対する縮尺は、寸法、密度および時間で表すことが多いが⁽³⁾、構造物が塑性域に入るとか、破損状況を把握するためには、実機と模型に生ずる応力を合わせる必要がある。また、実験設備である振動台の最大積載重量、振動数、および加振力によって制限される。スケールファクタを表1に

図1 大型回転機器の支持架台

* 平成元年11月10日 機械力学講演会において講演。原稿受付 平成元年4月20日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所機械研究所(〒300 土浦市神立町502)。

^{*2} 正員、(株)日立製作所日立工場。

^{*3} (株)日立建設設計。

^{*4} (株)日立製作所日立工場。

示す。

(1) 重量制限 模型の重量を振動台の最大積載重量以下にするには、

$$\lambda_p \leq \frac{W_m}{W_p \cdot \lambda_L^3} \quad (1)$$

となる。ここに W_m : 模型重量 W_p : 実機重量

(2) 振動数の制限 模型の1次固有振動数を振動台許容最大振動数以下とする。模型(門形フレーム)における固有振動数 f は、

$$f \propto \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{EI}{L^3} \cdot \frac{1}{\rho L^3}} \quad (2)$$

ここに、

k : ばね剛性, m : 質量

E : 弾性係数, L : 長さ

I : 断面二次モーメント

ρ : 密度

となる。また、柱の高さと柱の幅厚の比として次式を導入して、

$$q = \frac{D_m / H_m}{D_p / H_p} \quad (3)$$

ここに D : 柱の幅, H : 柱の高さ

式(3)と式(2)より振動数比 λ_f は、

$$\lambda_f \geq \frac{q^2}{\lambda_L} \sqrt{\frac{\lambda_E}{\lambda_\rho}} \quad (4)$$

となる。

(3) 応答応力の一致 柱脚部の応力 σ は、

$$\sigma \propto E \frac{u}{L} \quad (5)$$

u : 応答変位

より、

$$\lambda_\sigma = \lambda_E \cdot \frac{\lambda_u}{\lambda_L} \quad (6)$$

ところで、応答変位は、1自由度系の応答より、

$$\lambda_u = \frac{\lambda_y}{\lambda_f^2} \quad (7)$$

の関係が得られる。

式(4)、(6)、(7)より

$$\lambda_\sigma \leq \frac{\lambda_y \cdot \lambda_L \cdot \lambda_\rho}{q^4} \quad (8)$$

応答応力を一致させる条件

$$\lambda_\sigma = 1.0 \quad (9)$$

の関係から、

$$\lambda_\rho \geq \frac{q^4}{\lambda_y \lambda_L} \quad (10)$$

を得る。

式(1)、(4)、(10)の条件を満足する領域内で試験体の縮尺を考える。今回の模型としては、

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_\rho = 2.0 \\ q = 0.5 \\ \lambda_y = 3.0 \\ \lambda_L = 0.1 \end{array} \right\} \quad (11)$$

を用いる。

2.2 試験体の概要

構造は、二層ラーメンで、試験体は、2体製作する。試験体Aは、柱・はり部材すべて鋼板製(以下S造)であり、試験体Bは、柱・はり部材が鋼板中にコンクリートを充てんした鋼板コンクリート製(以下SC造)である。図2に試験体概要を示す。高さ2.2m、幅1.2mのフレーム上部におもり約2000kgを積載した構造である。表2に部材の断面形状を示す。柱部材の断面は、140mmの正方形断面で一辺に一つのL形リブを設けて、コンクリートとの付着を考えている。中間はりは、130×160mmの長方形断面で長辺が鉛直方向の向きで柱と結合している。上部はりは、試験体A、Bとも鋼製であり、中間はりと比較して十分剛となっている。柱脚部は、基礎部に根巻きにより固定している。

表3に、用いた鋼板の特性を、表4にコンクリート仕様を示す。また表5にコンクリートの特性を示す。

表1 スケールファクタ

SYMBOL	CONTENTS	
λ_L	L_m / L_p	LENGTH
λ_ρ	ρ_m / ρ_p	DENSITY
λ_f	f_m / f_p	FREQUENCY
λ_E	E_m / E_p	STIFFNESS
λ_σ	σ_m / σ_p	STRESS
λ_u	u_m / u_p	RESPONSE DISP.
λ_y	$\ddot{y}_m / \ddot{y}_p$	INPUT ACC.

Subscript m: Model p: Prototype

図2 試験体概要

3. 実験方法

3.1 実験の内容 実験は、振動特性実験と地震波加振実験からなる。振動特性実験では、低レベルでの正弦波掃引加振を行い、試験体の固有振動数と減衰比を求める。地震波加振では、加振レベルを段階的に上げてゆき、振動応答変化を確認しながら弾性域から塑性域に至るまでを定性的、定量的に振動特性変化を把握する。コンクリートを含む構造系は、荷重履歴により剛性が変化するため、実験は次の手順により行う。

(1) 振動特性実験を行う。最初に正弦波掃引加振により、初期振動特性を把握する。

(2) 弾性域から塑性域に入る加振レベルまでは、順次、入力加速度レベルを上げて、地震波加振を行う。

(3) 塑性域に入ったら、再び振動特性実験を行い、振動特性変化を把握する。

表 2 部材断面形状

BEAM (UPPER)	BEAM (LOWER)	COLUMN

表 3 鋼板の特性(SS 41, 板厚 1.6 mm)

Yield stress	$2.37 \cdot 10^2$ MPa
Ultimate tensile strength	$3.44 \cdot 10^2$ MPa
Modulus of elasticity	$2.00 \cdot 10^5$ MPa
Elongation	32.9 Percent

表 4 コンクリート仕様

Ultimate compressive strength	$1.76 \cdot 10^3$ MPa
Air content	4 Percent
Slump	180 mm
Cement	Normal

表 5 コンクリート特性

	Modulus of elasticity
100 Age	$2.29 \cdot 10^4$ MPa
40 Age	$2.01 \cdot 10^4$ MPa

(4) 構造強度の余裕度を求めるため、許容最大加振レベルまで地震波加振を行う。

(5) 最後に、振動特性試験を行い、剛性低下等を求める。

表 6 に加振条件を示す。

3.2 入力地震波 地震波加振に用いた波は、耐震設計用人工地震波で 6~11 Hz に若干のピークを有するが、ほぼ様なスペクトルを有する波である。図 3 に時刻歴波形と加速度応答スペクトルを示す。

3.3 測定点 各柱・はり部の鋼板表面には、ひずみゲージをはり、応力の測定を行う。各階のはり部には、加速度ピックアップを取付け、応答加速度を測定する。図 4 に測定点の位置を示す。

表 6 加振条件

SIN SWEEP	Frequency	1~11 Hz
	Max Acc.	20 cm/s ²
Artificial wave	Max Acc.	50~1500 cm/s ²

図 3 入力地震波

図 4 測定点の位置

4. 実験結果

4.1 振動特性 図5に振動特性実験より得られたSC造の伝達関数を示す。地震波入力前の初期特性と、最終状態における相違は、ピーク高さおよびピークの振動数に表れ、剛性の低下および減衰比の増加がわかる。

地震波加振における振動特性把握として、AR法⁽⁴⁾⁽⁵⁾を用い推定した。図6に固有振動数の変化を図7に減衰比の変化を示す。

鋼板コンクリート造(SC造)は、入力加速度が増大するにつれ、固有振動数は低下し、鋼板製(S造)に比べて、その低下率は大きい。SC造は、応答変位 u が

図5 SC造の伝達関数

図6 固有振動数の変化

1.5 cm に達すると、固有振動数が初期に比べ85 %に低下するのに対し、S造は、95 %程度である。一方、S造を基準に考えるとSC造は、S造に比べ1.38倍の固有振動数を持ち、応答変位2.3 cmでもS造の初期の固有振動数より高い結果を得た。SC造は、応答変位が、1.0 cm(柱脚部の鋼板応力が弾性限度)すなわち入力加速度0.5 Gまでは、固有振動数の減少率は小さいが、それ以上の応答変位になると低下率は大きくなる。原因としては、コンクリートのひびわれや鋼板とコンクリートの付着力の減少などが考えられる。

減衰比は、SC造のほうが、S造より若干大きな値を示した。この供試体は、前述のごとく固有振動数を低下させるため実機に比して多大の重りを積載しており運動エネルギー分の補正を要するが、減衰比の実測値は、弾性範囲内では、SC造で、1.0~1.5 %、S造で

図7 減衰比の変化

図8 地震波加振最大応答加速度

図 9 復元力特性

図 10 減衰力

0.8~1.2%が得られており、塑性化が進むにつれ、減衰比は、急激に大きくなっている。また、正弦波掃引試験より求めた値と、AR法により推定した値は、良い一致を示した。減衰比は、応答変位に対し、U字形を示すが、変位が小さい範囲では、接合部等の摩擦の影響により大きな値を示したと考えられる。

4.2 応答特性 図8に地震波加振における上部重り部の最大応答加速度を示す。SC造は 700 cm/s^2 、S造は 500 cm/s^2 より応答値が低下し、ばらつきは始めている。これらの加速度レベルは、鋼板の弾性限界を超えたレベルである。

4.3 復元力特性 慣性力と相対変位よりリサーチ図形を求め、復元力特性および減衰特性について検討する。図9にせん断力と変位関係を示す。ただし、ここでのせん断力は、

$$Q = cu + ku = m(\ddot{u} + \ddot{y}) \dots \dots \dots (12)$$

ここに

Q : せん断力

c : 減衰定数

k : ばね定数

m : 質量

u : 応答変位

$\ddot{y}$: 入力加速度

であり、減衰力が重畳している。せん断力は、加振レベルが上がると、傾きはゆるくなり、剛性が低下していくことがわかる。

せん断力 Q のうち、減衰力分を分離し、粘性減衰系を仮定し、粘性抵抗力と速度の関係を図10に示す。弾性

域では、速度と粘性抵抗力は線形関係を示すが、それ以上になると、みだれ、抵抗力が増大傾向を示す。すなわち、弾性範囲内では、粘性減衰と評価できる。

5. 結 言

鋼板コンクリート造フレーム構造物の振動台加振実験を行い、振動特性について、以下のことが明らかとなった。

- (1) SC造の構造は、コンクリートの充てんにより、剛性がS造より高くなる。
- (2) 減衰比は、SC造のほうが大きな値を示し、弾性限を超えると急激に大きくなる。
- (3) 弾性範囲内での減衰比は、SC造で1.0~1.5%、S造で0.8~1.2%であったが、弾性限度を2倍程度超えると3~4%に増大する。
- (4) 減衰力は、弾性限までは、速度と線形関係を示し、粘性減衰力として評価できる。

最後に、本研究に対し、ご指導下さった東京大学生産技術研究所、柴田碧教授に深く感謝する。

文 献

- (1) 富井・ほか1名、コンクリート工学、13-2(1975)、26。
- (2) C. Matsui, ECCS-IABSE Symp., (1985)、269。
- (3) 石丸・ほか4名、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)、(1986-8)。
- (4) 鈴木・ほか1名、機論、48-433, C(1982)、1389。
- (5) 鈴木・ほか1名、機論、50-458, C(1984)、2013。