

地震応答低減機能を有する床構造を適用した1層鋼構造骨組の振動台実験

その1 実験方法および試験体の振動特性

正会員 ○松本 圭太^{*1} 同 矢野 康^{*2} 同 聲高 裕治^{*3} 同 吹田 啓一郎^{*3}

2. 構造 -2. 振動

床スラブ 粘弾性体 地震応答 振動台実験 時刻歴応答解析

1. はじめに

本研究は図1に示すように、粘弾性体を2枚の鋼板に接着したものを梁と床スラブの間に挿入し、粘弾性体のエネルギー吸収により骨組の地震応答を低減することができる床構造を開発する一環である。

文献1)では、対象骨組(図2(b)参照)の床組の面内剛性が十分に大きく、床組の面内変形が生じないと仮定することで、対象骨組を床スラブと骨組に分解した2自由度系モデル(図2(a)参照)を構築し、時刻歴応答解析を行った結果、以下の[A]に示す知見が得られている。他方で、本床構造を適用した骨組は剛床仮定が成立しないため、各構面が負担する質量の分布と各構面の層せん断剛性の分布が異なる場合に、床組に面内変形が生じると考えられる。文献2)では、床組の面内変形を考慮できる6自由度系解析モデル(図2(c)参照)を構築し、本床構造を適用した場合の地震応答に及ぼす床組の面内変形の影響を時刻歴応答解析を行い確認することで以下の[B]

に示す知見が得られている。

[A] 粘弾性体のエネルギー消費によって骨組の最大ベースシア係数を低減できる。

[B] 各構面の層せん断剛性の差が大きくなるに伴って、層せん断剛性の大きい構面における最大層間変位が減少し、粘弾性体の最大せん断変形は増加する。

本報では、図1の床構造を適用した1層鋼構造骨組の振動台実験を通じて、既往の解析的検討で得られた知見の妥当性を確認する。その1では、振動台実験の方法を概説し、試験体の振動特性(層せん断剛性、減衰定数、および粘弾性体の物性値)の同定結果を示す。

2. 実験方法

2.1 試験体

試験体は本床構造を適用した1層1×2スパンの鋼構造骨組の1/5程度の小型模型骨組(図3参照)である。偏心の影響を避けるために試験体の各構面が負担する質量、各構面の層せん断剛性、各構面の粘弾性体の形状係数 S/d (S :粘弾性体の貼付面積、 d :粘弾性体の厚さ)は内側構面に関して対称としている。

大梁と基礎梁の間に骨組の鉛直荷重を支持するための柱をピン接合し、骨組に層せん断剛性 K^F を付与するための板バネ(材質:アルミ合金(A7075))を山

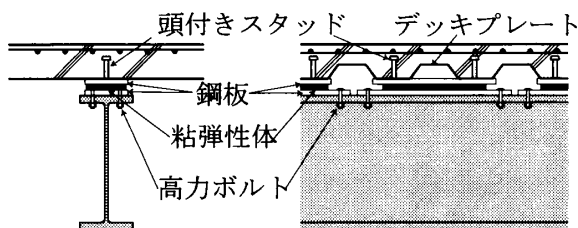
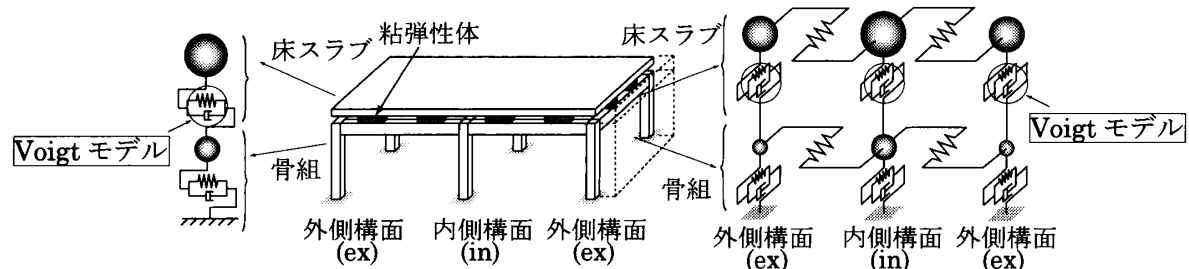


図1 地震応答低減機能を有する床構造



(a) 2自由度系解析モデル

(b) 対象骨組

(c) 6自由度系解析モデル

図2 解析モデル

Shaking table test of single-story steel structure with isorated floor system

Part1 Testing method and identification of structural paramater

MATSUMOTO Keita, YANO Yasushi, KOETAKA Yuji and SUIA Keiichiro

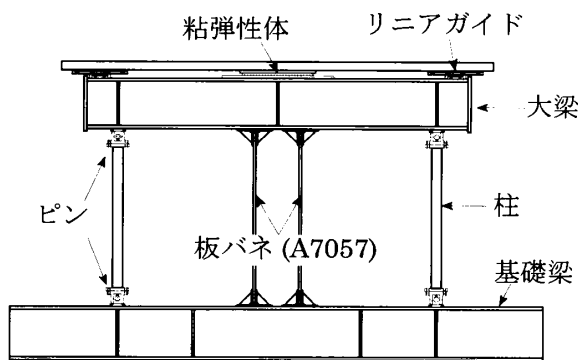
形鋼を介して高力ボルト摩擦接合する。床スラブは1枚の鋼板とし、粘弾性体とリニアガイドを介して大梁に取り付けられる。粘弾性体にはアクリル系粘弾性体を用い、厚さは10mmとする。リニアガイドは床鋼板の重量を支え、粘弾性体の変形を構面方向のみに許容する役目を担っている。

2.2 実験パラメータ

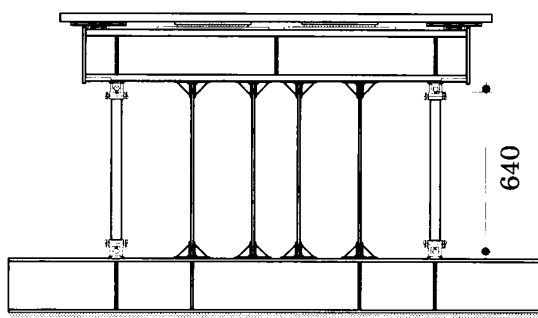
表1に実験パラメータを示す。骨組全体が有する粘弾性体の形状係数 S/d 、内側構面の層せん断剛性 ${}_{in}K^F$ と外側構面の層せん断剛性 ${}_{ex}K^F$ の比 ${}_{in}K^F/{}_{ex}K^F$ 、内側構面の粘弾性体の貼付面積 ${}_{in}S$ と外側構面の粘弾性体の貼付面積 ${}_{ex}S$ の比 ${}_{in}S/{}_{ex}S$ 、水平ブレースの有無を実験パラメータとして採用する。ただし、各変数の左下添字 in は図3(c)における内側構面の諸量

表1 実験パラメータ

粘弾性体の 形状係数 $S/d(m)$	粘弾性体の 貼付面積比 ${}_{in}S/{}_{ex}S$	層せん断剛性比 ${}_{in}K^F/{}_{ex}K^F$			水平 ブレース
		2	2/3	0	
1, 5, 20, ∞	2	A	—	—	有
5	2	B			無
	1				
	0				



(a) 軸組図 (外側構面)



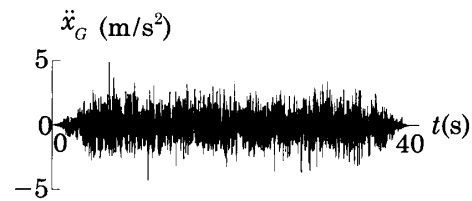
(b) 軸組図 (内側構面)

(単位: mm)

図3 試験体概略図

を, ex は外側構面の諸量を表している。実験パラメータのうち ${}_{in}K^F/{}_{ex}K^F$ については、板バネの総数を8として、表1中の値となるように各構面の板バネの設置枚数を決定している。また、水平ブレースの着脱により床組を剛または柔とする。

表1中のケースAは粘弾性体の形状係数 S/d を1, 5, 20m, ∞ (床スラブと大梁の相対変位を拘束した場合) と変化させる試験体であり、前述した[A]の解析的知見を、同表中のケースBは形状係数 S/d が5mの試験体であり、[B]の解析的知見の妥当性を確

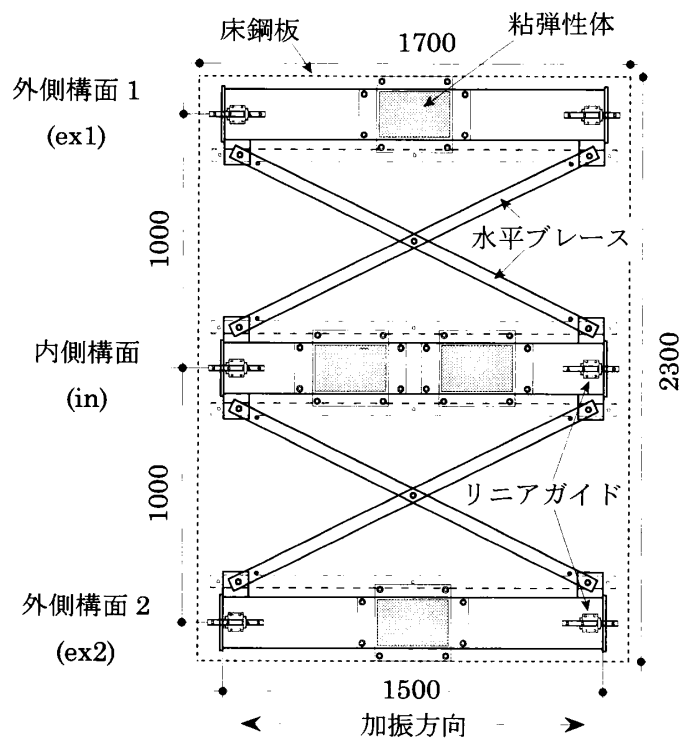


(a) ホワイトノイズ (最大加速度 4.90m/s²)



(b) BCJ L2(最大加速度 1.78m/s²)

図4 加振入力波



(c) 梁伏図

認するものである。

2.3 加振方法

振動台実験には京都大学防災研究所の強震応答実験装置(最大加速度 1.0G)を使用する。加振方向は骨組の構面方向(図3参照)としている。入力地震動は図4に示すホワイトノイズ(最大加速度 4.90m/s²)と BCJ L2(最大加速度 1.78m/s²)の2波とし、骨組の層間変位が 1/10rad 以下、粘弾性体のせん断歪が 300% 以下になるように最大加速度を調整した。

3. 骨組の振動特性の同定

3.1 骨組の振動特性

粘弾性体の形状係数 S/d が ∞ の場合、ホワイトノイズ(最大加速度 4.90m/s²)を入力した実験結果に基づいて、骨組の振動特性を同定する。

3.2 骨組の層せん断剛性

各構面の層間変位の時刻歴データを高速フーリエ変換(FFT)し、フーリエ振幅スペクトルを求める。ただし、FFTによって求めたフーリエ振幅スペクトルにはノイズが含まれているため、Parzen のスペクトル・ウィンドウ(バンド幅 0.15Hz)³⁾を用いてフーリエ振幅スペクトルを平滑化している。図5に一例として、ex1 構面のフーリエ振幅スペクトルを示す。図中の T^F は固有周期の同定結果である。

以上のように同定した骨組の固有周期 T^F を用いて骨組の重量 W^F (表2参照)より、各構面の層せん断剛性 K^F を算出する。ここで、骨組の層せん断剛性 K^F には $P\Delta$ 効果による幾何剛性が含まれているので、板バネ1枚当たりの弾性剛性 k^F を算出するために(1)式を用いる。ただし、 H^F は骨組の高さ(=0.64m)、 n は各構面の板バネの枚数である。

$$k^F = \frac{K^F + W^F / H^F}{n} \quad (1)$$

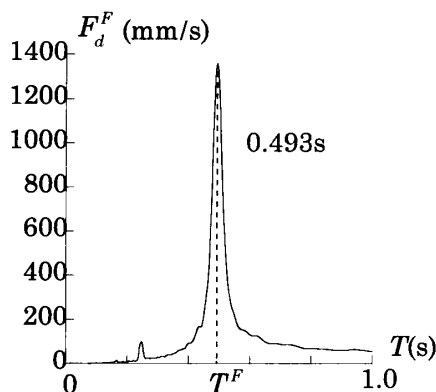


図5 骨組の層間変位のフーリエ振幅スペクトル

(1)式に基づいて板バネ1枚当たりの弾性剛性 k^F を算出した結果、 $k^F=33.80\text{kN/m}$ が得られた。

3.3 骨組の減衰定数

骨組の減衰定数の同定には、骨組および振動台の加速度の時刻歴データを高速フーリエ変換し、骨組の伝達関数から求めたフーリエ位相を用いる。伝達関数の位相は(2)式⁴⁾で表すことができる。

$$\theta(T) = \tan^{-1} \left(\frac{2h(T^F/T)^3}{1 - (1 - 4h^2)(T^F/T)^2} \right) \quad (2)$$

伝達関数のフーリエ位相と(2)式の位相に対して最小二乗法を適用することで骨組の減衰定数を同定する。フーリエ位相には固有周期近傍で急激に変化し、減衰定数が大きくなるに従い傾きが緩やかになるという特徴を有するため、最小二乗法は固有周期近傍で行う。減衰定数の同定結果は 0.013 となる。図6に一例として、ex1 構面(図5と同様)のフーリエ位相と近似曲線の比較を示す。

3.4 骨組の振動特性の評価

同定した骨組の振動特性を用いて時刻歴応答解析を行い、実験結果と比較することで同定した振動特性を評価する。時刻歴応答解析には、板バネ1枚当たりの弾性剛性 k^F に基づいて(1)式より $P\Delta$ 効果を考慮して求めた層せん断剛性 K^F を用いる。また、1質点系の解析モデルを適用し、入力波にはホワイトノイズ(最大加速度 4.90m/s²)、および BCJ L2(最大加速度 0.89m/s²) 加振中の振動台の加速度を用いる。

表2 層せん断剛性の同定結果

固有周期 T^F (s)	0.493
重量 W^F (kN)	14.92
板バネの枚数 n	8
弾性剛性 k^F (kN/m)	33.80

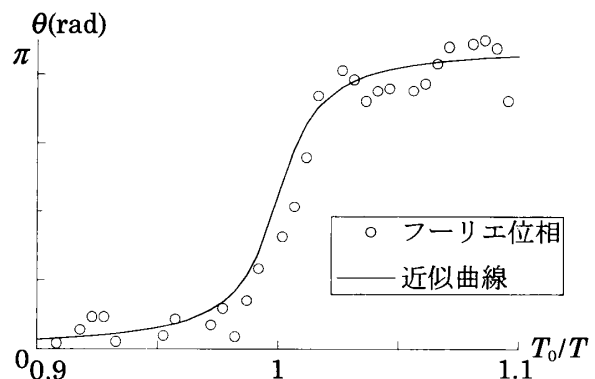


図6 骨組の伝達関数のフーリエ位相と近似曲線

表3に解析結果の最大値と実験結果の最大値の誤差を示し、図7に一例として、 S/d が ∞ の場合におけるex1構面の骨組の層間変位 δ^F の解析結果と実験結果を比較して示す。ただし、誤差の値が負であれば解析結果の最大値の方が小さいことを表す。表3および図7より、ホワイトノイズを入力した場合の層間変位の時刻歴波形は実験と解析でよく対応しているが、BCJ L2を入力した場合は波形の周期とピーク時の値ともに対応していないことがわかる。これは、BCJ L2を入力したときの骨組の振動特性を前述した方法で同定すると、 $T^F=0.485\text{s}$ 、 $h=0.009$ となり、ホワイトノイズを入力したときの同定結果と異なっていることが原因であると考えられる。

4. 粘弾性体の物性値の同定

4.1 粘弾性体の応力-歪関係

笠井ら⁵⁾は、アクリル系粘弾性体のせん断応力 τ とせん断歪 γ の関係を、次式で表すVoigtモデルで追跡できることを示している。

$$\tau = G'\gamma + \frac{G'\eta}{\omega} \dot{\gamma} \quad (3)$$

表3 時刻歴応答解析結果と実験結果の比較

構面	ex1	ex2	in
ホワイトノイズ誤差 (%)	-4.8	-7.2	-6.8
BCJL2 誤差 (%)	-14.1	-18.7	-17.2

— 解析結果 ---- 実験結果

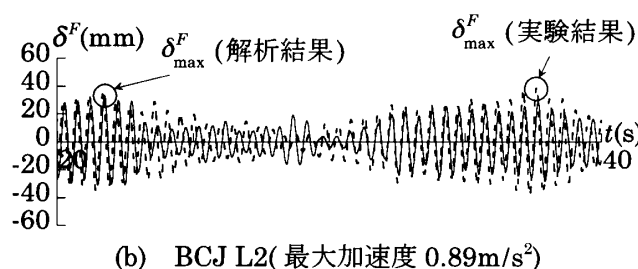
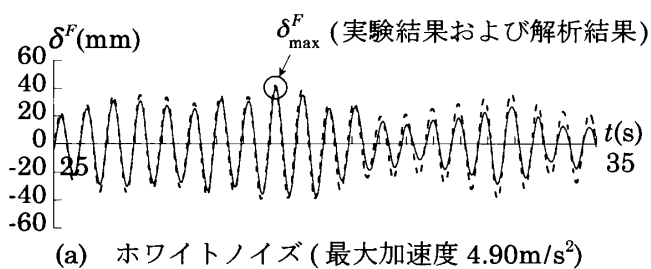


図7 解析結果と実験結果の比較

ここで、 G' は貯蔵せん断剛性、 η は損失係数であり、以下の提案式⁵⁾を用いる。

$$G' = G \frac{1 + ab\omega^{2\alpha} + (a+b)\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)}{1 + \alpha^2\omega^{2\alpha} + 2a\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{(-a+b)\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)}{1 + ab\omega^{2\alpha} + (a+b)\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (5)$$

(4)、(5)式中の a および b は温度依存性を表すパラメータであり、粘弾性体の物性値は α および G である。

4.2 粘弾性体の物性値

一定振幅動的載荷実験結果に基づき、粘弾性体の物性(α および G)を同定する。試験体は50mm×100mm×10mm厚のアクリル系粘弾性体である。試験条件は、粘弾性体の温度を30℃、入力した正弦波の振動数を2.0、4.0(Hz)、粘弾性体のせん断歪を50%とする。

材料試験より得られた粘弾性体のせん断歪 γ を用いて(3)式よりせん断応力 τ を算出した結果と実験結果の τ に対して最小二乗法を適用することで粘弾性体の物性値を同定する。粘弾性体の物性値の同定結果は $\alpha=0.560$ 、 $G=0.0364\text{N/mm}^2$ となる。

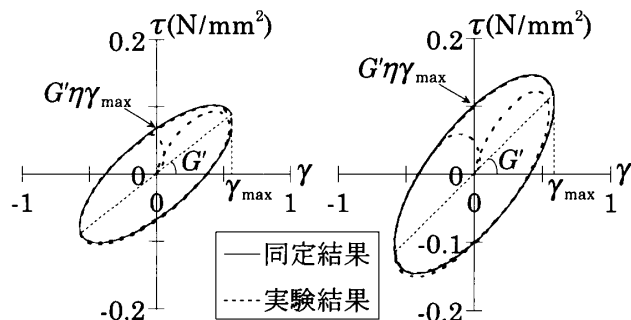
図8に、せん断応力 τ とせん断歪 γ の関係を同定結果と実験結果の比較を示す。同図より本論における同定結果は実験結果と概ね良い対応を示していることがわかる。

5. まとめ

本報その1では、地震応答低減機能を有する床構造を適用した1層鋼構造骨組の振動台実験の方法を示し、試験体の振動特性を同定した。

参考文献

その2にまとめて示す。



* 1 京都大学工学部建築学科

* 2 大阪工業大学大学院工学研究科建築学専攻

* 3 京都大学大学院工学研究科建築学専攻

Undergraduate School of Architecture, Kyoto Univ.

Major in Architecture, Osaka Institute of Technology.

Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ.