

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	実大振動台実験を用いたエネルギーの釣合に基づく構造減衰の評価
Title	
著者(和文)	大内隼人, 佐藤大樹, 長江拓也, 北村春幸
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol. B-2, , pp. 441-442
Citation(English)	, Vol. B-2, , pp. 441-442
発行日 / Pub. date	2011, 8
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: http://ci.nii.ac.jp/naid/110009518834

実大振動台実験結果を用いたエネルギーの釣合に基づく構造減衰の評価

正会員○大内隼人^{*1} 同 佐藤大樹^{*1} 同 長江拓也^{*2} 同 北村春幸^{*1}キーワード 振動台実験 エネルギー 構造減衰
超高層建物 長周期地震動

1. はじめに

巨大海溝型地震に伴う長周期地震動の発生を想定して、長周期地震動を受ける既存鋼構造超高層建物の振動台実験が(独)防災科学技術研究所(E-ディフェンス)にて行われた。実験では、試験体の吸収エネルギーの80~90%が梁端の塑性化によるものであり、残りが構造減衰やコンクリート床スラブのひび割れによるものであった¹⁾。エネルギーの釣合に基づけば²⁾、架構が弾性の時、入力されたエネルギーは全て減衰で吸収されるため、試験体の構造減衰を評価することができる。しかし、架構が塑性化した場合には、架構全体で吸収したエネルギーから塑性化により吸収したエネルギーを除いて、構造減衰を評価しなければならない。本報では、エネルギーの釣合に基づき既存超高層建物実験から架構が塑性化した場合の構造減衰の評価を試みる。

2. 実験概要

試験体は、下層4層を実架構とし(以下、実架構部分)、上層部分は、5層分の重量を持たせたコンクリート錘を3層積層し、間に5層分の非線形特性を表現するように、単体積層ゴム6基、積層ゴムと鋼製U型ダンパーを直列に結合した塑性化装置1基を配している(以下、縮約層)。図1に試験体の軸組図および梁伏図を示す。

実験では、計測をサンプリング周波数200Hzで行った。ここではエネルギー算出に必要な計測項目について述べる。図1に示す位置に、加速時計、変位センサを設置して各層床加速度、層間変位を計測している。また、G1梁の全梁端部において、歪みゲージを用いてモーメントを、変位計をもちいて回転角を算出している¹⁾。本報で対象としている入力地震動は、名古屋三の丸波(SAN)である。

3. 弾性領域での構造減衰の評価

高次モードの影響を考慮するため、本報ではせん断型の減衰マトリクス[C]を次式のようにRayleigh減衰で表現する。

$$[C] = \beta_M [M] + \beta_K [K] \quad (1)$$

$$\beta_M = \frac{2\omega_s \omega_r (h_s \omega_r - h_r \omega_s)}{(\omega_r^2 - \omega_s^2)}, \quad \beta_K = \frac{2(h_r \omega_r - h_s \omega_s)}{(\omega_r^2 - \omega_s^2)} \quad (2a, b)$$

ここで、 ω : 固有円振動数、 h : 減衰定数であり、添え字の s, r は次数を意味する(ただし、 $s < r$)。

各層の質量を図面より積算し、その値から質量マトリクス[M]を作成した。 $[K]$ および β_M, β_K は、試験体の応答が弾性範囲に留まった加振実験での、1FLと各階の加速度波形より求めた伝達関数から決定する。

図2に、TOK 60%入力加振でのRFLと4FLで計測された加速度より求めた伝達関数の結果を示す。また、図2には伝達関数の理論値

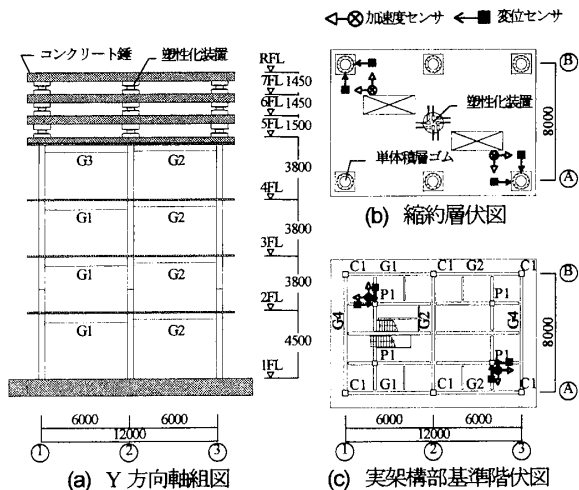


図1 試験体図 (単位: mm)

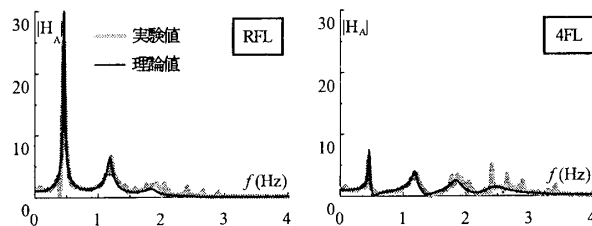


図2 伝達関数の比較

も合わせて示している。また、 i 層の層剛性 k_i は加速度と質量から求めたせん断力 $Q_i(t)$ と層間変形 $\delta_i(t)$ の履歴から最小二乗法(式(3))を用いて算出し、その値を用いてせん断型の剛性マトリクス[K]を作成した。

$$k_i = \frac{n \sum \delta_i \cdot Q_i - \sum \delta_i \sum Q_i}{n \sum \delta_i^2 - (\sum \delta_i)^2} \quad (3)$$

ここに、 Σ は総和記号で、履歴の n 個の δ_i, Q_i を対象とする。伝達関数の実験値と理論値が一致するように式(1)の β_M, β_K を同定し、減衰マトリクス[C]を作成した。図2より実験と理論値の伝達関数が何れの階においても高次までよく一致していることから、[M], [K]およびRayleigh減衰とした[C]が十分に妥当であることが判断できる。以上の手法を用いて算出した応答が、弾性範囲に留まった加振での1次固有振動数 f_1 および減衰定数 h_1 を図3(a), (b)に示す。横軸は頂部加速度の標準偏差であり、SANでの値も併記している。図3(a)より、試験体が弾性領域に留まる場合には、1次固有振動数 f_1 つまり剛性マトリクス[K]は、頂部加速度の標準偏差に対して安定した値であるのに対し、図3(b)の1次減衰定数 h_1 は、概ね1~4%の範囲でばらついていることが確認できる。そのため、試験体の[M], [K]

は一つに定まるが、 $[C]$ を1つに決定することが困難である。さらに、 $[C]$ は、建物が弾性状態にある場合の振動減衰を、数学的に表現したものと解釈されている²⁾。そのため、架構が塑性化し非線形となるSANの場合でも同じ $[C]$ である保障はない。

そこで本論文では、 h_1 を1~4%まで変化させた $[C]$ を用いた検討を行い、それらの結果から総合的に $W_{p,i}(t)$ を評価していく。

4. 弾塑性領域での構造減衰の評価

架構が塑性化した場合、加速度より算出した層の吸収エネルギー W_i は累積塑性歪みエネルギー $W_{p,i}$ および減衰エネルギー $W_{h,i}$ が含まれる。本報では $[C]$ マトリクスを用いてエネルギーの釣合から減衰によって吸収されるエネルギー $W_{h,i}$ を求める。

累積塑性歪みエネルギー $W_{p,i}$ は次式で求められる。

$$W_{p,i}(t) = \int_0^{\delta_i(t)} F_i(t) d\delta_i, \quad F_i(t) = Q_i(t) - F_{h,i}(t) \quad (4a, b)$$

ここで $F_{h,i}(t)$ は層に作用する減衰力であり、式(2)の β_M , β_K を用いて次式の如く表すことができる。

$$F_{h,i}(t) = \beta_M \sum_{j=1}^N m_j \dot{x}_j(t) + \beta_K k_i (\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i-1}(t)) \quad (5)$$

i 層において、減衰により吸収されるエネルギー $W_{h,i}(t)$ は吸収エネルギー $W_i(t)$ から $W_{p,i}(t)$ を引くことで求められる。

$$W_{h,i}(t) = W_i(t) - W_{p,i}(t) \quad (6)$$

以上のように算出した $W_{h,i}$ から構造減衰を評価する。まず、3章の結果より、 $h_1=1, 2, 3, 4\%$ とした場合のSAN加振終了時 t_0 における塑性歪みエネルギー $W_{p,i}(t_0)$ の高さ方向の分布を図4(a)に示す。その際の2次減衰定数 h_2 (式(2b))は、図2の結果を参考に $h_2=1.72 h_1$ とした。図4(a)の $h_1=4\%$ とした場合を見ると、上層で $W_{p,i}(t_0)$ が負の値となっていることが確認できる。これは、式(4b)において減衰力 $F_{h,i}(t)$ がせん断力 $Q_i(t)$ より大きいことを意味するため、実現象とは整合しない。よって、本試験体の1次減衰定数 h_1 は3%未満であると判断できる。

次に、1次減衰定数 h_1 を固定し、2次減衰定数 h_2 を変化させて、高次振動が累積歪みエネルギーに及ぼす影響について考察する。図4(b)は、 $h_1=2\%$ とし、 $h_2=0.5 h_1, 1.0 h_1, 2.0 h_1, 3.0 h_1$ とした際の $W_{p,i}$ の高さ方向分布であり、比較のため、 $h_1=2\%$ とした剛性比例減衰での場合も併記している。図4(b)より、高次減衰が $W_{p,i}(t_0)$ に与える影響は小さく、建物全体での $W_p(t_0)$ で、 $h_2=0.5 h_1$ と $3.0 h_1$ を比較しても1割以内の違いであった。

本試験体の実架構部分のような梁降伏型架構では、塑性歪みエネルギーの殆どが梁端の曲げ降伏により吸収されると考えることができるため、上述の手法より求めた $W_{p,i}$ とG1, G2梁での吸収エネルギー $_{G1}W_{p,i}, _{G2}W_{p,i}$ を比較することで、塑性歪みエネルギーを相対的に評価する。以降、 $W_{p,i}$ の総和を ΣW_p , $_{G1}W_{p,i}$ と $_{G2}W_{p,i}$ の総和を $\Sigma_G W_p$ と標記する。

図5に $h_1=1, 2, 3\%$ ($h_2=1.72 h_1$)とした場合のSAN加振における、実架構部の塑性歪みエネルギー ΣW_p ($h=1, 2, 3\%$)の時刻歴および、梁端による吸収エネルギー $\Sigma_G W_p$ の時刻歴を示す。図5より、加振

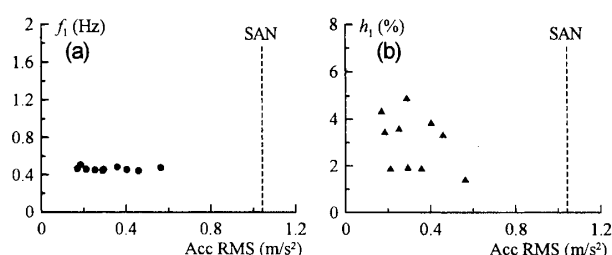


図3 同定結果: (a)固有振動数, (b)減衰定数

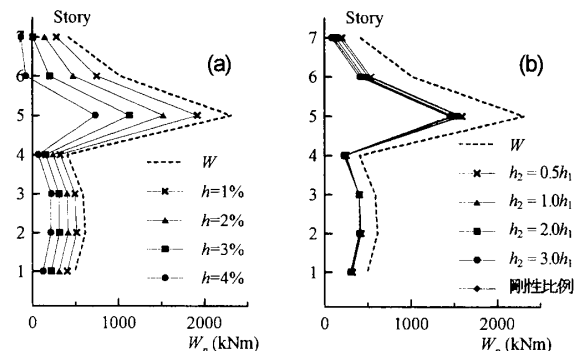


図4 W_p の評価: (a) h_1 の影響, (b) h_2 の影響

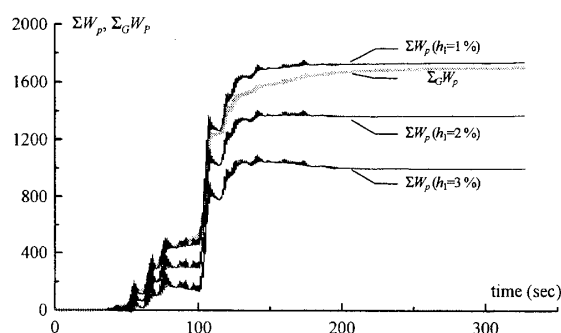


図5 ΣW_p と $\Sigma_G W_p$ の比較

終了時 t_0 での ΣW_p ($h_1=3\%$)を見ると、 $\Sigma_G W_p$ に対して明らかに小さい値となっており $h_1=3\%$ は構造減衰を過大に評価していることが分かる。一方、 ΣW_p ($h_1=2\%$)は $\Sigma_G W_p$ より若干低く、 ΣW_p ($h_1=1\%$)は $\Sigma_G W_p$ より約1.2倍大きい値となっている。以上より、本試験体の1次減衰定数は、 $h_1=1\sim2\%$ の間にあると推測できる。

5. まとめ

吸収エネルギーから、減衰によるエネルギーを分離する手法を示した。梁端の塑性歪みエネルギーと層応答から評価した塑性歪みエネルギーで相対的な評価を行い、妥当と思われる減衰定数の範囲を検討した。その結果、本試験体の1次減衰定数は、 $h_1=1\sim2\%$ の間にあると推測される。

謝辞

本研究は文部科学省が推進する「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」の一環として実施されました。

参考文献

- 1) 佐藤大樹ほか: 長周期地震動を受ける鋼構造超高層建物のエネルギー吸収と分担率 一部分切り出し架構に対する E-ディフェンス振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 第653号, pp.1217-1226, 2010.7
- 2) 秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1999.11

*1 東京理科大学

*2 防災科学技術研究所