

超高層免震集合住宅の地震観測による小地震時挙動と鉛ダンパー降伏耐力の検討

Earthquake Observation on a High-rise Base Isolated Apartment Building and the Examination of the Behavior and Yielding Load of a Lead Damper under Weak Earthquakes

木本幸一郎¹, 境 茂樹², 加藤貴司²

Koichoro KIMOTO¹, Shigeki SAKAI² and Takashi KATO³

¹(株)エス・エー・アイ構造設計事務所, SAI Structural Design Co., Ltd.

²ハザマ 技術研究所, Hazama Corporation, Technical Research Institute

SUMMARY: Earthquake observation is carried out for a high-rise base isolated building with rubber bearings, steel dampers and lead dampers. The parameters of vibration are estimated with the observed data. In horizontal directions, the natural frequency is higher than the value of seismic design under weak earthquake, but it becomes closer according to increasing the displacement of base isolation. The damping factor shows the same tendency, and it needs special mention that the damping is shown in the range of linear in the seismic design. It seems because of the yielding of lead dampers in the slight displacement. To clarify the yielding load of the damper, seismic simulations are carried out. Result of the examinations, the yielding load of lead damper estimated approximately 30kN against the value of 90kN applied for seismic design.

1 はじめに

筆者らは21階建て超高層免震集合住宅において、その振動特性の把握と設計の妥当性検証を目的とし地震観測を行っている。この建物は、評定取得時点で初めての住居系超高層免震建築物であり、免震構造設計指針[1]に設計例2(S集合住宅)として掲載されている。

本報告では、観測記録から免震効果の検証・振動パラメータの推定を行った。その結果、小地震時にはU180型鉛ダンパーが減衰を発揮しているとみられ、鉛ダンパー降伏耐力 Q_l が耐震設計時設計値90kNよりも低い可能性を示したため、観測記録から小変形時 Q_l を定量的に検討した。

2 建物概要・地震観測概要

本建物は21階建て軒高64.05mのRCラーメン造で、1階床下に、天然ゴム系積層ゴム支承(MRB)・鉛ダンパー(LD)U180型40台・鋼棒ダンパー(SD)φ90R325型10台から成る免震層を配している。敷地地盤は第2種地盤で $T_g=0.28$ 秒である。Fig.1に軸組図・基準階平面図を、地震計センサー配置と共に示す。地震観測装置はサーボ型加速度センサーで免震下基礎(記号BF)・1階床下(1F)・21階床下(RF)の3カ所設置され、各3成分(X,Y,Z)の計9成分を計測している。センサーは梁の局部振動の影響を受けないよう柱脇に設置されている。

2001年11月~2004年9月に121個の地震記録が得られた。基礎位置での最大加速度は $0.4\sim 103\text{cm/s}^2$ で、本建物および周辺建物に被害を生じた地震はなかった。

3 地震観測結果

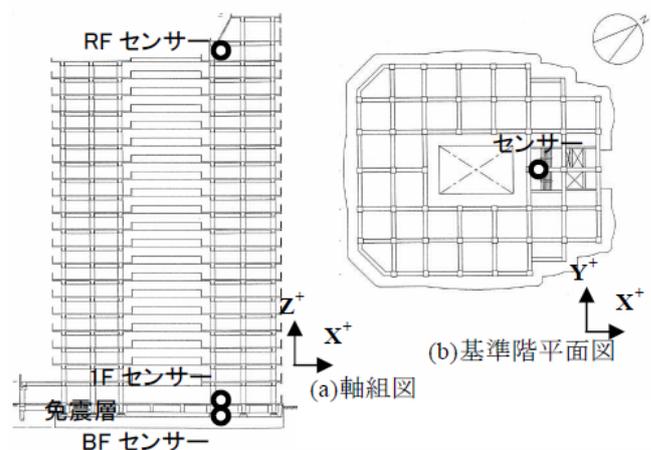


Fig.1 Section and Plan of the Building with Seismic Sensors

3.1 最大値と最大加速度応答倍率

Fig.2に免震基礎下最大加速度と加速度応答倍率の関係を示す。同図のX, Y方向には設計時の入力Level1,2時の応答も示している。X, Y方向では、免震基礎下加速度(以下、入力)が数 cm/s^2 程度ではRFの応答倍率で最大3.5~4倍程度、1Fで最大2倍程度であるが、入力が大きくなるにつれて応答倍率は低下し、 40cm/s^2 程度以上の入力では応答倍率は1以下となり、またRFと1Fとの差も小さくなっている。入力が大きくなると免震効果がよく現れているといえ、設計値に漸近していくものと推測される。

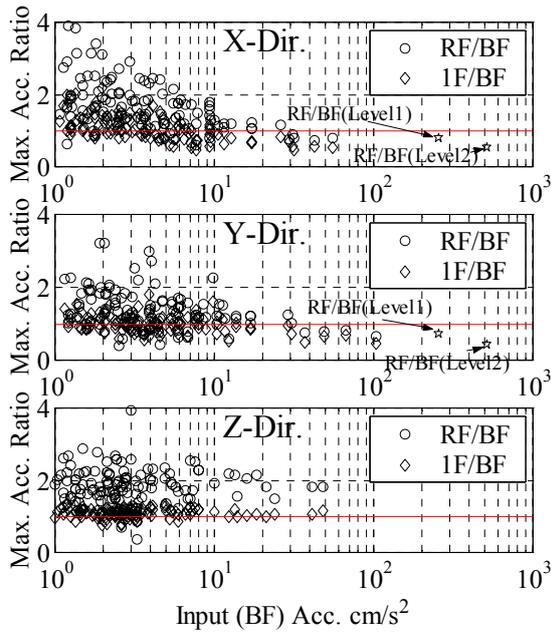


Fig.2 Maximum Acceleration Ratio

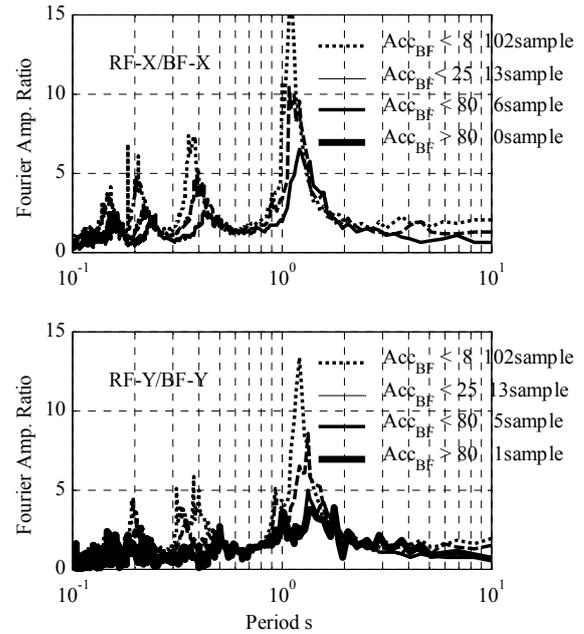


Fig.3 Fourier Spectral Ratio

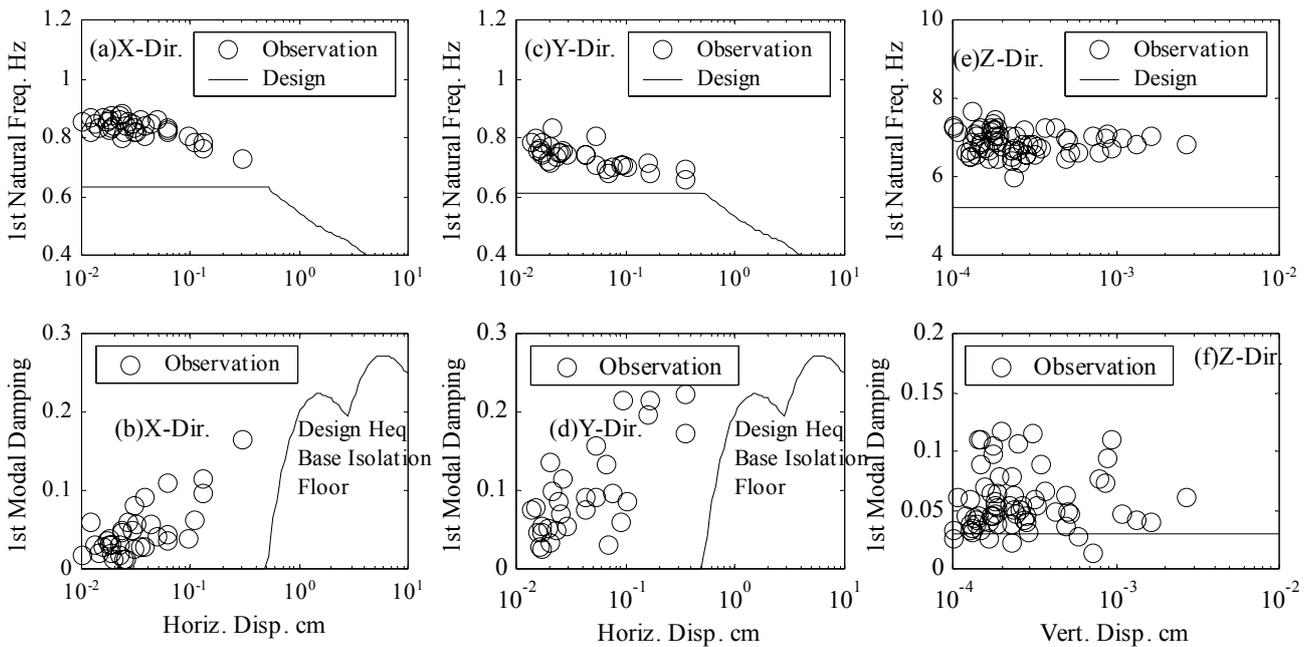


Fig.4 Displacement of Isolation Floor V.S. 1st Natural Frequency, 1st Modal Damping

Z方向では、入力にかかわらず1Fの応答倍率はほぼ1であり、免震下基礎とほとんど同じ挙動をしているようである。RFをみると数 cm/s^2 の入力では2~3倍程度の応答倍率が、入力 20cm/s^2 以上ではほぼ2倍になっている。上下動に関しては非免震の建物と同様の挙動をしていると考えられる。

3.2 フーリエ振幅比

Fig.3にBFに対するRFのフーリエ振幅比を、BFの加速度区分ごとに示す。X方向の結果を見ると振幅比はBFの入力加速度が増すにつれ、1次周期のピークが長周期側に伸びており、また 8cm/s^2 以下の入力では15倍程度のピークの値であるが、入力の増大につれ6倍程度に下がって行くことが見て取れる。高次のピークについても同様のことがいえる。Y方向もX方向と同様の傾向である。これらから入力が大きくなると周期が伸び、かつ減衰が増加していることが考えられる。

4 カーブフィット手法による振動パラメータの推定

得られたすべての地震記録に対して線形カーブフィット手法による振動パラメータの推定[2]を行った。各地震のフーリエスペクトル比を観測による伝達関数とし、1F, RF おおのの理論伝達関数と観測による伝達関数との振幅の差の絶対値和を目的関数とし、これを極小にする1, 2次の(固有振動数, 減衰定数, 刺激関数)の組を, 準ニュートン法を用いて直接求めた。以上をカーブフィット手法と称する。

カーブフィットの結果を用いて, 振動パラメータの振幅依存性について検討する。免震層の変位は1, 2次モードが支配的と考え, 免震層の1, 2次固有振動数時の応答変位を Nigam 法[3]によりおのおの計算し, それらの自乗和平方根により免震層最大応答変位を算定した

Fig.4(a)~(d)に水平方向の1次固有振動数・減衰定数を示す。免震層変位の増大につれ, 固有振動数は下がり耐震設計値に近づいてゆく。減衰定数も変位の増大につれて大きくなり, 変位 0.1cm 以上では 10%以上の値になるという結果が得られた。この変位依存性の大きな要因として, 鉛ダンパーの微小振幅での塑性化が考えられる。このことは, 天然ゴム系積層ゴム支承と鋼棒ダンパーのみで構成された免震構造の, 地震の後揺れの減衰が小さいこと[4]から推測される。

上下方向についても水平方向と同様の手順にて, 免震層の最大変位を計算した。Fig.4(e),(f)に推定結果を示す。1次固有振動数, 減衰定数いずれも明確な変位依存性はみられず, 平均値はおおのの 6.90Hz, 0.055 であった。これは耐震設計値 5.21Hz, 減衰 0.03 を上回っており, 上下動についても耐震設計の妥当性が確認されたと考える。

5 地震応答解析による鉛ダンパー降伏耐力の検討

ねじれ振動の影響が小さいX方向について検討を行う。

5.1 微小地震時の上部構造・免震層剛性の推定

観測地震動のうち免震層変形が非常に小さい 48 記録 (0.001~0.005cm) を用いて, 鉛ダンパーが降伏していないと思われる場合の上部構造層剛性 k_u と免震層線形剛性 k_b を, Fig.5 に示す推定モードパラメータ (上記 48 記録の平均値) に最も良く適合するように定めた。 k_u は耐震設計時初期剛性 k_{ud} と同分布 (一律 α_{ku} 倍) とし, 層質量 m は耐震設計値を用いた。結果を Fig.6 に示す。

5.2 小地震時の鉛ダンパー降伏耐力の推定方法

地震応答解析を行い 1F 観測値に良く適合する鉛ダンパーの降伏耐力 Q_l を求める。検討に用いる地震動を Table 1 に, 地震応答解析で用いたパラメータを Table 2 に示す。

地震応答解析は 4次精度 Runge-Kutta 法[3]を用い, 積分時間間隔は 0.01 秒とした。系の減衰は, 1次固有振動数に対し初期剛性比例型減衰 $h=0.023$ (微小地震時モードパラメータ推定値) を与えた。

観測結果と解析結果の加速度差 (時刻歴加速度 1 サンプルあたり) の算定に際しては, 観測結果と解析結果の双

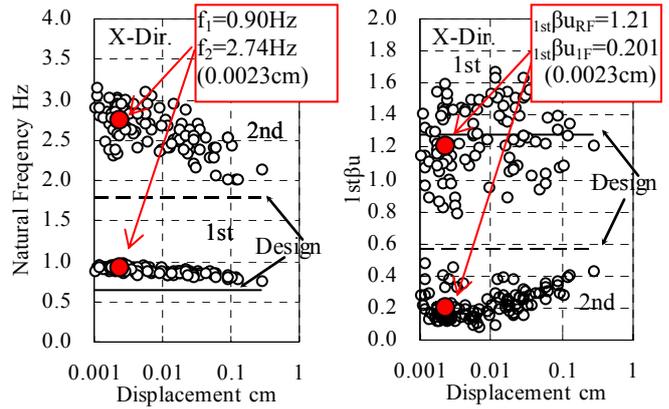


Fig.5 Estimated Modal Parameters in slight earthquakes

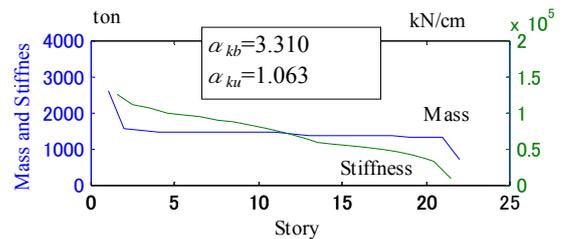


Fig.6 Mass and Estimated Stiffness of Each Story

Table 1 Earthquake for Simulations

観測日時	基礎最大加速度	推定免震層変位
2003/05/26 18:25	26.20 cm/s ²	0.292 cm

加速度時刻歴は Fig. 8 (a) 参照

Table 2 Parameters

部材	剛性・耐力	備考
MRB	剛性 719.9kN/cm	線形, 設計値に同じ
SD	剛性 124.6kN/cm × 10 台	線形, 設計値に同じ
LD × 40 台	降伏耐力 Q_l 4.91~88.3kN/台 初期剛性 $k_{lead}=331.5kN/cm$ $k_{lead} \times 1.0, 1.2, 1.5, 0.8, 0.5$ 倍	完全弾塑性 Q_l : 14 ケース k_{lead} : 5 ケース 設計値 $Q_l=88.3kN$ $k_{lead}=157kN/cm$

方にバンドパスフィルター (4次 ButterWorth 型, カットオフ振動数 0.5~1.5Hz) を通過させ, 系の 1次卓越振動数付近の成分を取り出した。解析時間・加速度差評価時間は 100 秒間である。

5.3 鉛ダンパー降伏耐力の推定結果

鉛ダンパーの降伏耐力 Q_l と加速度差の関係を Fig.7 に示す。 k_{lead} が 1.0 倍の結果をみると, $Q_l=88.3kN$ では 1.4 cm/s² の加速度差に対し, $Q_l=29.4kN$ では 0.6 cm/s² となった。初期剛性 k_{lead} によらず, おおむね $Q_l \approx 30kN$ で加速度差が最も小さくなっている。このときの $k_{lead} 1.0$ 倍時の免

震層変位は $\delta = 0.532\text{cm}$ と算定された。観測と解析の加速度時刻歴を Fig.8 に示す。時刻歴の形状も $Q_1 = 29.4\text{kN}$ の方が 88.4kN よりも明らかに良く観測に適合している。

検討結果は設計指針[1]の第IV編設計資料編・図 2.10 に示される推定値 (変形 0.532cm 時に 2.23tonf) と調和的であると考えられる (Fig.9)。

吸収エネルギーの時刻歴を Fig.10 に示す。最終のエネルギー比は履歴エネルギーが全体の 64% にすぎず、解析上の粘性減衰の与え方による検討の精度に注意したい。

6 まとめ

減衰部材に鉛ダンパーと鋼棒ダンパーを用いた超高層免震集合住宅の地震観測結果から、水平方向の振動特性は小地震から変位依存性を有し、変位増大につれ耐震設計値に近づくことを示した。微小振幅でも鉛ダンパーによるものと思われる減衰を有している。

鉛ダンパーの降伏耐力を推定した結果、本検討の範囲では、小地震時の U180 型鉛ダンパー降伏耐力はおよそ 30kN と、大地震時耐震設計値 90kN よりもかなり小さい値が推定された。暴風・強風時を含め小外乱時の免震構造の挙動について詳細な検討を行う場合には注意が必要になると思われる。また現在主流の U2426 型鉛ダンパーについても同様の検討が望まれる。今後は地震観測を継続すると共に、小外乱時の鉛ダンパー特性を良く表現できる力学モデルを構築したい。

参考文献

- [1] (社) 日本建築学会「免震構造設計指針 2001 年」
- [2] Koichiro Kimoto et. al, "IDENTIFICATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS AND SIMULATION ANALYSIS FOR A BASE ISOLATED BUILDING IN COLD SITE", International Symposium on Network and Center-Based Research For Smart Structures Technologies and Earthquake Engineering (SE04 Osaka), 2004, July, p.p.181-186,
- [3] 柴田明徳, 「最新耐震構造解析」
- [4] (財) 日本建築センター, 「免震構造建築物 Part1 その技術開発と地震観測結果」

謝辞

本研究にあたり、2005 年 11 月に逝去された、伊藤嘉朗・工学博士にご尽力頂きました。ここに感謝し、ご冥福をお祈りいたします。

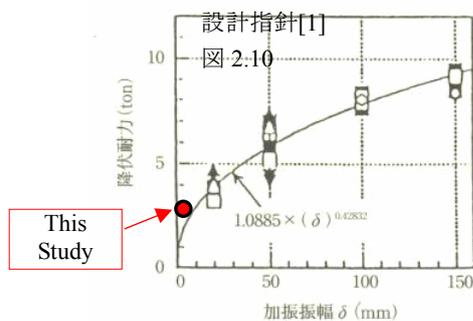


Fig.9 Yielding Load of Lead Damper

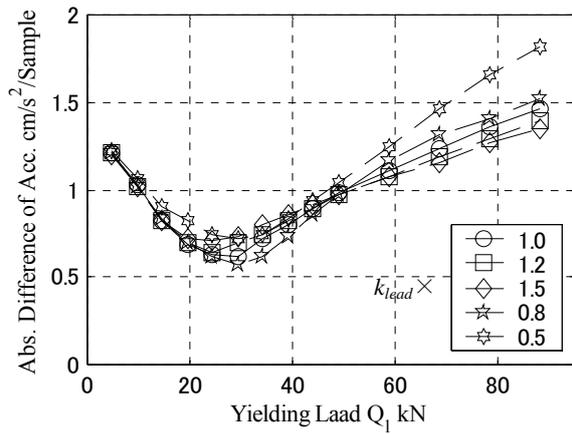


Fig.7 Difference of Acceleration by Yielding Load of Lead

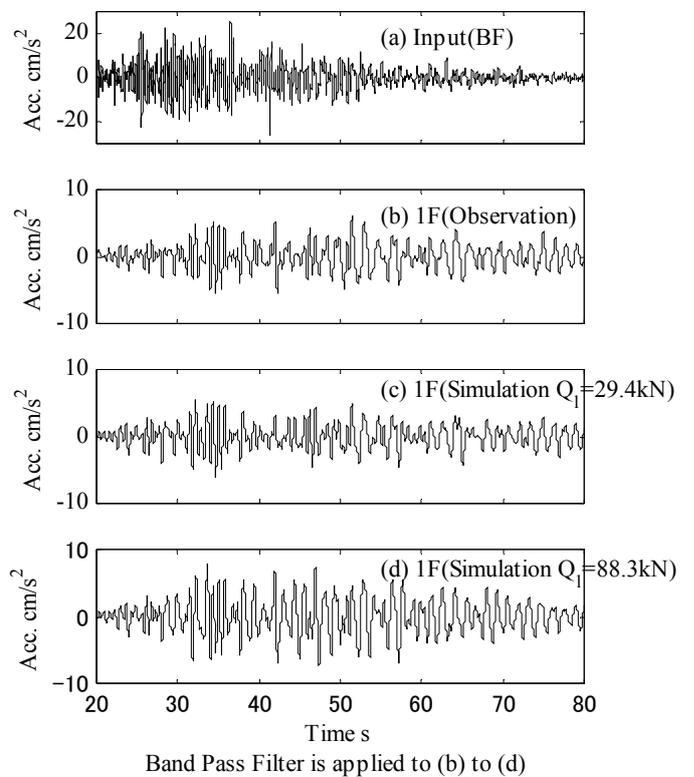


Fig.8 Time Histories of Accelerations

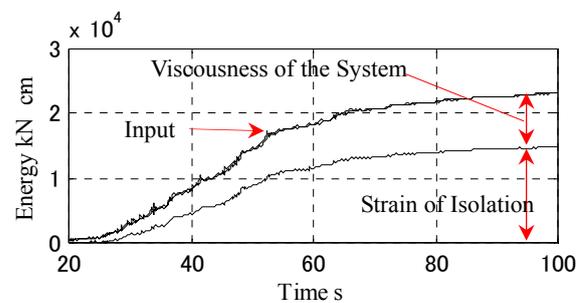


Fig.10 Time Histories of Energies