免震構造に関する実物実験

（その１）振動実験と地震観測

福岡大学　高山峯夫　　東京建築研究所　酒井　章
福岡大学　多田英之　　東京工業大学　和田　章

１．序　　我々は昭和５４年以来免震構造に関して振動台を用いた模型実験並びに数値解析によるシュミレイションを重ねて我国特有の長周期成分が含まれる地震波に対しても効果的に作用するシステムの開発研究を行なってきた。一方で、実施構造物を対象とした実大Isolatorの製作に取掛り、昭和５６年一応満足すべき製品を得た。

建築構造の動的挙動に関する実験研究は縮小模型による検証では甚だ不十分であり、実大実験が是非必要である。この様な考えから実物の住宅建築を特別認可を得て建設し併せて必要な工学的データを採取する目的で実験を実行に移したのである。したがって本実験は地震観測による確認を最重要項目として、比較的地震発生の多い千葉県八千代市に敷地を求め実験住宅を建設したものであり、主要検討項目は、下記の４点である。

(1) 建物の振動特性（常時微動、強制振動、自由振動）
(2) 具体的施工による問題点の抽出と建設におけるノウハウの取得
(3) 強震計によるやや長期にわたる地震観測
(4) 居住性試験（強風その他の影響及び安定装置の必要性及びその定量化）

上記(1) 及び(2) については特別認可を得た昭和５７年１１月より昭和５８年１月末にかけて、居住性試験は昭和５８年８月から昭和６０年３月までの期間実行した。現在は (3) の地震観測を継続中である。本報告は、(1) の振動実験と現在までに観測された地震動波形に関するものである。

２．建物概要　　本建物は実生活を行なえる様な仕様で全く普通の住宅としての機能を完備しており、付加的に基礎と上部構造との間にIsolatorを挿入し建物の固有周期を大きくするとともに、振動減衰装置を設置し地震時に建物に作用する地震力を小さくし、上部構造の安全性の向上を計ると伴に強震時に起こりがちな２次災害を防ぐことを目的として設計されたものである。建物はＲＣ造２階建の住宅であるため、一応柱、大梁を有するラーメン構造であるが、壁量が多く上部構造そのものは免震装置が働くかなくても十分な耐震性を有している。Fig.1 に建物概要を示す。使用したIsolatorは直径30cm、高さ8.2 cmでステンレス鋼とゴムを高温高圧下で加流接着したものである。振動減衰装置は、その性能の具体的適合性を検討する目的で下記の４種類について実験を行なった。

(1) 弾塑性型：上部構造に固定した片持梁形式の鋼棒を利用する.
(2) 砂型　　：上部構造に固定した鋼製ロッドと砂の摩擦抵抗を利用する.
(3) 摩擦型　：鋼製ロッドと受圧板（鋼板）との間に働く摩擦力を利用する.
(4) ＰＣ板型：ドライエリア遮蔽用PC板と側壁天端との間に働く摩擦力を利用する.

３．振動実験

１）常時微動観測　　計測には高感度常時微動計を使用し、計測波形は積分器を通してデータレコーダに記録した。計測波形の解析より、見掛け上の１次固有周期は1.37秒、スペクトル比（屋上／地表面）から求めた建物の固有周期は1.33秒であった。又、ロッキング測定の結果より、見掛け上の固有周期は0.13秒、スペクトル比による周期は0.12秒を示しており、地盤の影響が建物の周期にあまり関与していないことが認められた。

２）強制振動実験　　実験は建研型起振機（BCS-B-75型、最大起振力10tonf）２台を屋上に設置し、２台連動で加振を行なった。加振周波数は主に0.3 ～2.0 Hzとした。加振ケースは全４ケースであり、試験結果と伴にTable-1 に示す。ここで減衰装置を取り付けた

時の加振は、ＰＣ板ダンパーに対して行なったものであり、スウェイ比及びロッキング比は屋上と１階床の最大加速度比から求めたものである。減衰定数は共振曲線から$1/\sqrt{2}$法により算出した。ねじれ加振と並振加振から得られる共振点はかなり近接しており、並振加振の共振点における平面振動モード形にねじれをかなり含んだもとなり、並振モードとねじれモードとを完全に分離できない。このため、この建物の振動性状を考える上でねじれを考慮することは重要である。スウェイ比は短辺方向加振で９６％、長辺方向で９８％であり、ロッキングは両加振とも無視し得る量であった。減衰装置を付けた時の共振点は1.55Hzであった。これは減衰装置が減衰効果だけでなく剛性の付加効果をもたらし、全体の振動特性が数mmの振幅範囲で変化したことを意味している。

３）自由振動実験　　強制変位発生にはオイルジャッキを使用し、予定変位で切断するよう、中間部に予めノッチを入れた鋼棒を装着、破断させて自由振動を観測した。実験はダンパーなしの場合と４種類のダンパーを用いた場合の計５ケースについて行なった。観測された基礎と１階床の相対水平変位の波形から求めた対数減衰定数及び周期と変位振幅との関係をFig.2 に示す。減衰定数の変化の傾向は、変位振幅の減少に伴い増大する摩擦型、ＰＣ板型と、逆に減少する弾塑性型及び変位に無関係にほぼ一定である砂ダンパーとダンパーなしの場合に分類できる。周期はダンパーの種類に拘らず、変位の減少に伴って短くなっている。本報告には掲載していないが、各種のダンパーによる履歴曲線を比較すれば、曲線で囲まれた面積の大きさは摩擦型、ＰＣ板型によるものが最も顕著であった。

Fig.1(a) Elevation

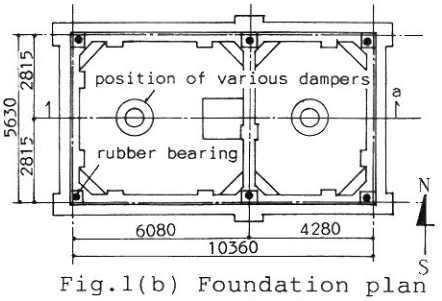

Fig.1(b) Foundation plan

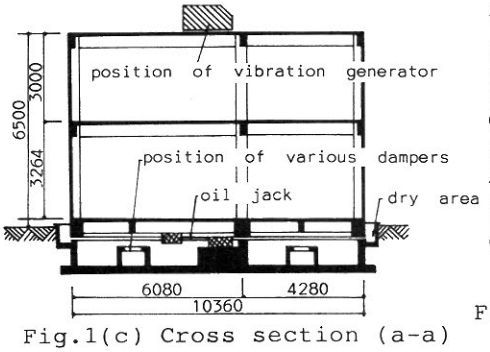

Fig.1(c) Cross section (a-a)

Table-1 Results of the forced vibration

case	frequency		damping factor	sway ratio	rocking ratio
	1st	2nd			
N-S	0.675Hz	0.905Hz	0.026	96%	4%
E-W	0.7Hz	—	0.033	98%	6%
torsion	0.686Hz	0.885Hz	—	—	—
E-W*	1.55Hz	—	—	—	—

* with damper

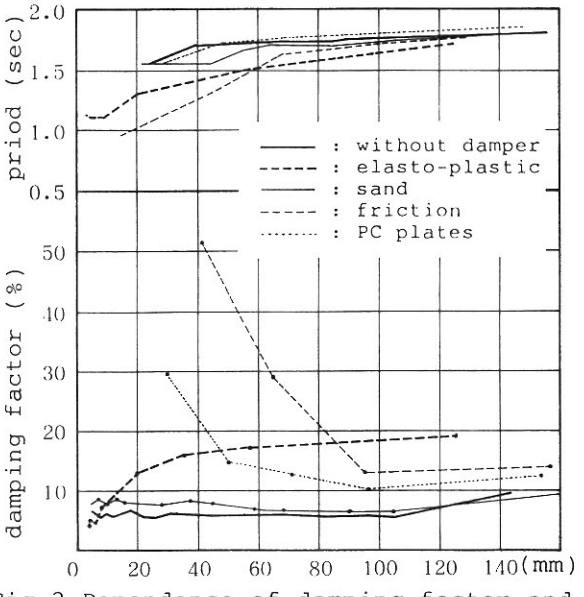

Fig.2 Dependence of damping factor and period on displacement

４．地震動観測

１）観測概要　　強震計による地震観測は昭和５８年４月に３台の加速度型強震計（リオン製、SM-10A型１台、 SM-10型２台）を同時連動系として基礎、１階床、屋上に設置した。更に昭和５９年３月に４台の速度型強震計（村松式、東京測振製VS-335型３台、VS-235型１台）を増設して地震観測を行なっている。これは加速度及び速度計測値の互換性を検証し、変位挙動の把握に資する目的である。尚、速度計には遅延装置（５秒間）が装備されている。振動実験終了後、振動減衰装置としてＰＣ板ダンパーを用いていたが、昭和５８年６月から昭和５９年１１月の期間、ＰＣ板からベニヤ板への取り替えを行なった。これは、ＰＣ板とドライエリア側壁天端との間に働く摩擦力を除去し、小規模地震においても免震システムの挙動を把握する目的で行なった処置である。

２）観測地震波　　現在までに、１７回の中小規模地震によるデータが採取されている。Fig.3 に気象庁地震津波監視課発行の「地震・火山概況」にもとずいて作成した観測地震の震源地を示す。現地に近い千葉市での震度は、４が３回、３が５回、２以下が９回である。観測された１７種類の地震の内、震源が海洋深発性で比較的大きな地震（マグニチュ

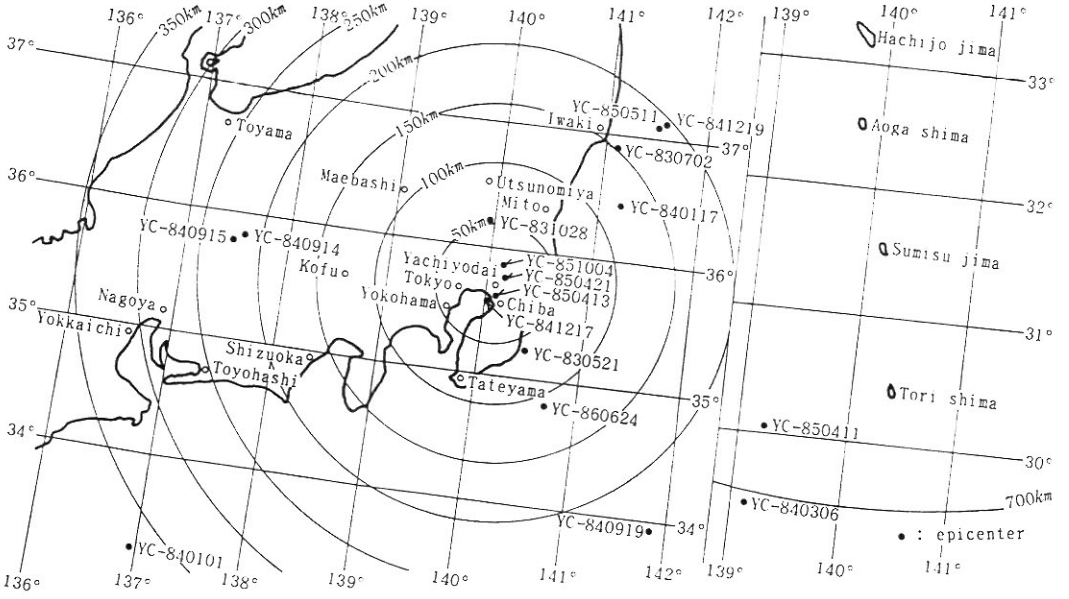

Fig.3 Distribution of the epicenter

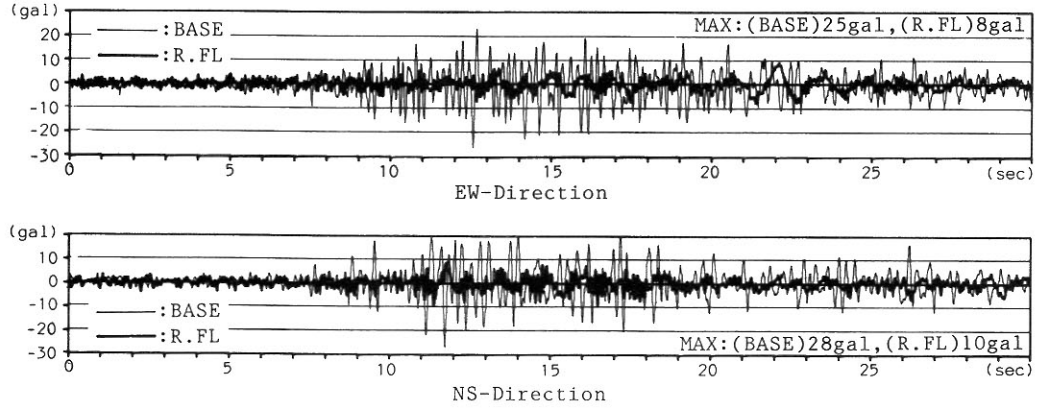

Fig.4 Observed earthquake records (YC-840101)

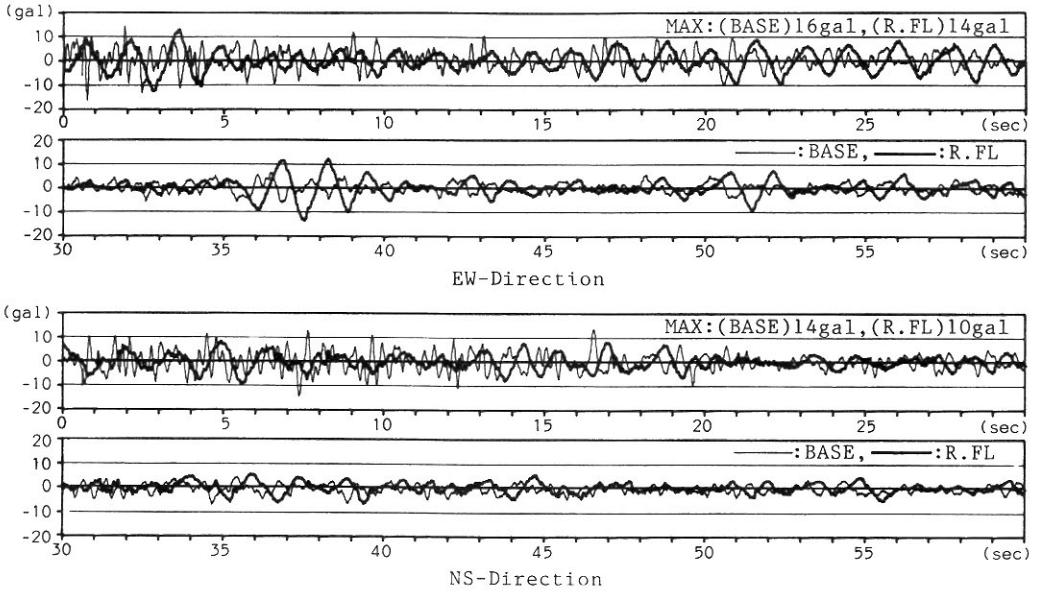

Fig.5 Observed earthquake records (YC-840306)

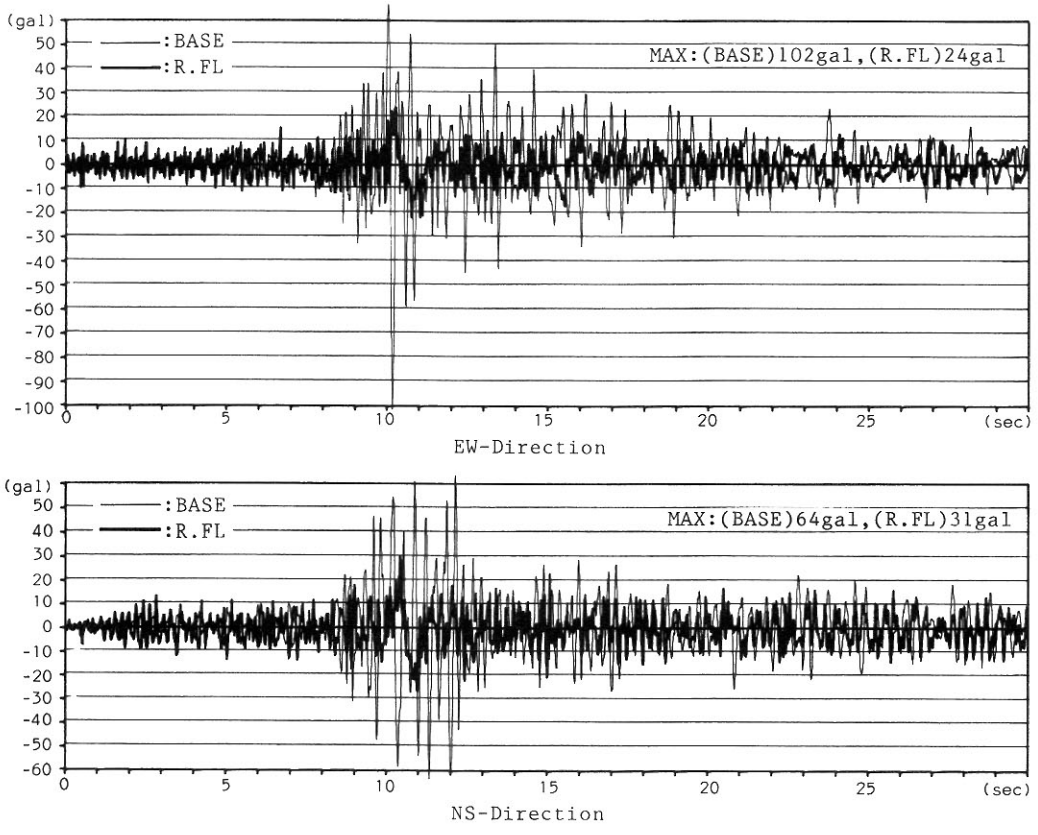

Fig.6 Observed earthquake records (YC-851004)

ード７以上）は、YC-840101 とYC-840914 である。YC-840914 は長野県西部地震の記録であるが、千葉の震度は２でさほど大きくなかった。YC-851004 は茨城千葉県境で発生した地震である。八千代市は震央から非常に近い距離に位置し、直下型地震の記録である。Fig.4,5,6 に、YC-840101,YC-840306 及びYC-851004 の観測加速度波形を示す。

４）観測結果　Fig.7 には観測された全地震の最大加速度値を棒グラフにして示す。この図から、基礎での最大加速度が２０gal 以上の地震動記録においては、上部構造の応答値が減少している事がわかる。その中でも東京の震度が５であったYC-851004 は加速度応答倍率（１階床／基礎）が１／３～１／５程度に低減している。又、この場合上部構造の増幅も少なく、免震効果が顕著に捉えられた。この加速度波形をフーリエ積分（バンドパスフィルター　Ts=0.02sec、Tl=10sec）することにより求められる最大相対変位は12.5㎜であった。

５．結　語　建築工事躯体完了時（昭和５８年１月）に行なわれた各種振動実験を総合して下記の知見を得た。

1)減衰装置の有無に拘らず、変位振幅が減少するにつれて固有周期も減少する事が認められる。Isolatorのみの場合、大変形域から常時微動域へと周期は 1.8秒から1.37秒へと変化している。

2)減衰装置の有無に拘らず、最大約１６cmの変位に対してIsolatorの載荷能力及び復元力に関して何等異常は認められなかった。

3)減衰装置付き実験に於いて、減衰定数は弾塑性ダンパーで２０～５％、砂ダンパーで７～８％、摩擦ダンパーで１０～５０％、ＰＣ板ダンパーで１０～３０％となり、いずれもIsolatorのみの場合の５．５％と比べてそれぞれの有効性を示した。又、何れ場合も変位振幅の低減及び振動収束時間の短縮といった点でその有効性が示された。

又、現在までの地震観測では未だ大規模な地震には遭遇しておらず観測データの評価は必ずしも高くないが、中小規模地震における免震構造システムの挙動を考察する上では有効な資料が得られたものと考える。

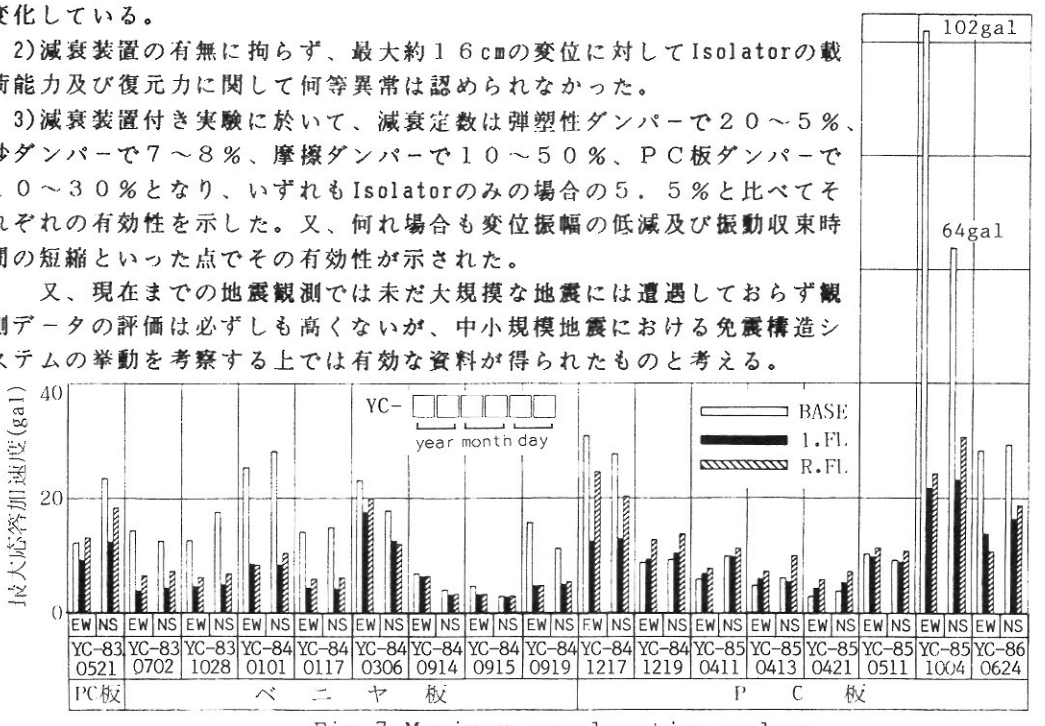

Fig.7 Maximum acceleration values

謝　辞　常時微動の観測及び解析に関しては東京大学地震研究所　長田甲斐男氏に、強制振動実験の実施及び解析に関しては建設省建築研究所北川良和氏にご協力を頂った。また、本免震建築はユニチカ（株）の所有であり地震観測データを提供していただいた。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

1)多田他「免震構造に関する実物実験」　昭和58年日本建築学会大会梗概集
2)多田、高山「免震構造に関する実践的研究」福岡大学総合研究所報第70号　昭和59年
3)多田、酒井「免震構造に関する実践的研究　その２」　カラム　Ｎｏ．99

A RESEARCH OF BASE ISOLATION SYSTEM BY THE ENFORCEMENT CONSTRUCTION

BY

M.TAKAYAMA[1] , A.WADA[2] , A.SAKAI[3] and H.TADA[4]

ABSTRACT

A base isolated building emphasizing seismometry was constructed at CHIBA Prefecture YACHIYO City in order to confirm the actual behavior of a base isolation system during an earthquake. The building is a 2-story reinforced concrete structure and has six rubber bearings between the base mat and first floor. The rubber bearing is 30cm in diameter, 8.2cm in height and is made up of laminated rubber(5mm thick) and stainless steel plates(2mm thick) bonded by curing adhesion. The damping mechanism is a friction type and employs the frictional force generated between the precast concrete plates which cover the dry area and the top of the side wall of the dry area.

In this paper, (1)vibration test and (2)seismometry on this building is described.

(1)vibration test

The purpose of this test was to grasp the fundamental properties of the vibration characteristics of this building. This experiment consisted of the measurement of microtremors, a forced vibration test using vibration generators, and a free vibration test. In the free vibration test, initial forced deformation of rubber bearings was a maximum 16cm.

As a result of these tests, it was possible to understand the dynamic characteristics of the base isolation system over the area from microdeformation to large deformation.

(2)seismometry

In April 1983, a strong motion seismograph was installed on the base mat, first floor and roof of this building and seismometry was begun. Up until now, seismic oscillation was observed 17 times. According to the seismic scale in CHIBA City near the site, these same earthquake records are classified as follows:earthquake tremors of the 5th degree on the seismic scale occured 3 times, the 4th degree occured 5 times and below the 2nd degree occured 9 times.

When the maximum acceleration of an earthquake at the base mat was more than 20gal, maximum acceleration response of superstructure was reduced. Especially in case of the earthquake of 4 October 1985 with a tremor of the 5th degree on the seismic scale at TOKYO, acceleration response ratio of base to first floor was from 0.2 to 0.33 and base isolation system had a remarkable effect.

Up to the present, a very strong earthquake has't been observed yet, but in the case of behavior examination during medium class earthquakes, it was possible to obtain effective data.

---

1) Assistant, Fukuoka University.
2) Associate Professor, Tokyo Institute of Technology.
3) Engineer, Tokyo Kenchiku Structural Engineers.
4) Professor, Fukuoka University.