

実大性能試験に基づく超高層免震建物用大型免震支承部材に関する研究

A Study on Performance of Large Size Isolators for Super High-rise Isolated Buildings through Full-scale Tests

嶺脇 重雄^{*1} 山本 雅史^{*1} 東野 雅彦^{*2} 濱口 弘樹^{*3} 米田 春美^{*4}

梗概

巨大地震に伴う長周期地震動に対する超高層免震建物の安全性・信頼性を説明するためのデータを取得することを目的として、大型免震支承部材を対象とした一連の実大性能試験を実施した。結果は巨大地震時に予測される厳しい荷重条件下における大型免震支承部材の頑強な荷重支持性能を示すとともに、特に高減衰特性を有する支承部材については、多数回繰り返し載荷や水平二軸載荷による性能評価が重要であることを示すものであった。

キーワード：超高層免震建物，長周期地震動，免震支承部材，実大試験

Summary

A series of tests of full sized laminated rubber bearings was carried out to acquire the data on the performance of isolated super high-rise buildings under the long period ground motion. The test results demonstrated stable bearing capabilities of isolators under severe conditions that are expected in a real building. The results also showed the importance of high cyclic loading tests and 3D loading tests, especially for isolators with high damping characteristics.

Keywords: super high-rise isolated buildings, long period ground motion, seismic Isolator, full-scale test

1 はじめに

M8クラスの海溝型巨大地震による長周期地震動を受けたとき、超高層免震建物に用いられる免震支承部材は、その設計において想定した大きさを超える応答量に至ることや、比較的大きな変位振幅が長時間続く応答状態におかれる可能性がある。また、水平変形に伴う面圧の変動や水平二方向変形が生じ得る。しかしながら、実大免震支承部材を対象として、それらを加力条件とした実験的検討が行われた例は少ない^{1)~6)}。超高層免震建物の過大入力に対する信頼性を説明するためには、上記応答状態を考慮した直接的な知見の集積が必要であるとの考えから、一連の試験を実施した。

試験計画における主要な関心事は、①水平変形に伴って面圧が変動する応答状態にある免震支承部材の水平復元特性、②比較的大きな変位振幅が長時間続く応答状態における免震支承部材各部の温度上昇、③準静的加力試験と実時刻による加力試験との対応、④三軸（鉛直＋水平二軸）応答状態にある免震支承部材の挙動、の諸点であった。本試験では、後述する巨大地震による長周期地震動に対する応答量の目安を考慮して、原則として免震材料認定における水平限界変位および限界圧縮強度の基準値（以下、性能限界と呼ぶ）付近において、上記諸点を実験的に確認した⁷⁾。

高減衰積層ゴム支承の水平二軸加力試験においては、既往の知見では説明できない性状が現れた。本研究では、これを支承が有する高減衰特性によるものとして説明し、復元力モデルを試験結果に基づき構築した⁸⁾。

*1 技術研究所 主任研究員 博士（工学） Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.
*2 技術研究所 部長 博士（工学） General Manager, Research & Development Institute, Dr. Eng.
*3 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute
*4 技術研究所 研究員 博士（工学） Research & Development Institute, Dr. Eng.

2 試験計画

2.1 試験体

Table 1に示す積層ゴム支承3種×2サイズ（φ1300，φ700），低摩擦弾性すべり支承φ900の合計7体を対象とした。積層ゴム支承の二次形状係数S2は5に統一した。φ700積層ゴム支承は，超高層免震建物における使用径の最小値として位置付けられ，かつ大せん断ひずみにおける特性確認のために実施したものである。高減衰積層ゴムは荷重履歴依存性の小さい改良タイプ⁹⁾を用いた。なお，以下では主として積層ゴム支承に関する結果について紹介する。

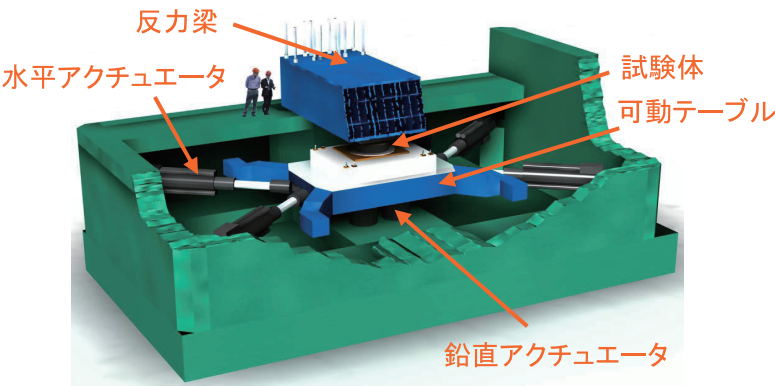
Table 1 試験体一覧
Specimens

種別	略称	試験体名	外径	内径	内部ゴム	ゴム種	内部鋼板	鋼種	総高さ	S2	S1
天然ゴム系積層ゴム	NRB	NRB700	700	15	4.7t×30	G0.40	3.1t×29	SS400	286.9	4.96	36.4
		NRB1300	1300	30	8.7t×30	G0.40	4.4t×29	SS400	468.6	4.98	36.5
鉛プラグ入り積層ゴム	LRB	LRB700	700	140	4.7t×30	G0.40	3.1t×29	SS400	286.9	4.96	29.8
		LRB1300	1300	260	8.7t×30	G0.40	4.4t×29	SS400	468.6	4.98	29.9
高減衰積層ゴム	HDR	HDR700	700	15	4.7t×30	X0.6	3.1t×29	SS400	286.9	4.96	36.4
		HDR1300	1300	30	8.7t×30	X0.6	4.4t×29	SS400	468.6	4.98	36.5
低摩擦すべり支承	SSB	SSB900	900	—	7.0t×5	ER4080	3.2t×4	SS400	127.8	25.7	32.1
			すべり子：FL3045 2.0t			すべり板：SUS304#1 6.0t（コーティング：SP7001）					

寸法はmm，tは厚さ，積層ゴムはブリヂストン社規格，すべり支承はNTN社規格

2.2 試験装置

米国カリフォルニア大学サンディエゴ校（UCSD）の大規模実験装置を用いた。装置概念図および公称スペックをFig.1に示す。試験体取付けに当っては，試験体両フランジの直上直下（すべり支承の場合にはすべり板取付け鋼板（PL-32）の直下）に断熱板t=12.7（熱伝導率0.274J/s/m/℃）を配した。



鉛直荷重	53400kN
水平荷重*	8900kN
水平変位*	1200mm
水平速度*	1800mm/s

*長軸(X)方向の値。短軸(Y)方向の値はそれぞれ 1/2

Fig.1 UCSD大規模試験装置
The testing system of UCSD and its specifications

2.3 加力条件の設定

日本建築学会の長周期地震動に関する一連の検討^{10), 11)} で用いられた速度応答スペクトル（減衰定数5%）をFig.2に示す。超高層免震建物の固有周期領域（4～6秒）における包絡値は140cm/s程度となる。1996年から2005年の間に当社が設計した9件の超高層免震建物を参照すると，上記の速度応答スペクトル値は，設計に用いられた検討用地震波の1.1～1.5倍程度の大きさである。この値を応答値の割増率として考慮し，かつ性能限界を著しく超えないように加力条件を決定した。なお，積層ゴム支承の引張側については，一律に－1.0MPa（マイナス符号は引張りを示す）までを加力条件とした。積層ゴム支承の加力条件を性能限界曲線と関連づけてFig.3に示す。

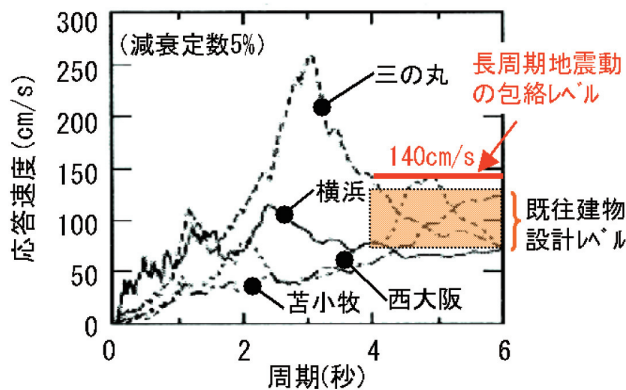


Fig.2 長周期地震動の速度応答スペクトル^{10), 11)}
Velocity response spectra for long period ground motion

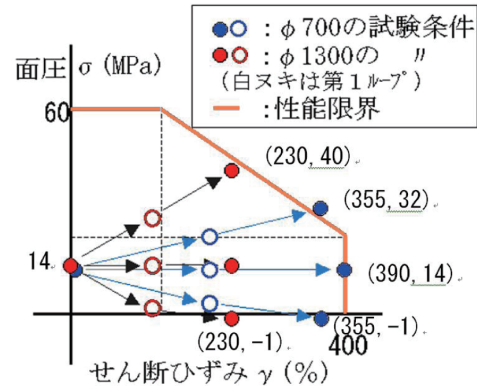


Fig.3 性能限界曲線と加力条件
Loading conditions and the performance curve of the bearing

2.4 試験項目

試験項目として、前述の主要な関心事に相当する、大変形面圧変動試験、多サイクル繰返し試験、実速度試験、水平二軸変位試験を実施した。試験体毎の対応表をTable 2に示す。表中数字は後述する面圧変動パターン番号である。また、本論では触れないが一部試験体を対象として、地震応答波試験、性能限界を超える試験をオプションとして実施した。

Table 2 試験体毎の試験項目
Testing list

試験体\試験項目	大変形面圧変動試験	多サイクル繰返し試験	水平二軸変位試験	実速度試験
NRB700	1,2,3,4		2	1
NRB1300	1,2,3	1	2	1
LRB700	1,2,3,4	1	2	1
LRB1300	1,2	1	2	1
HDR700	1,2,3	1	1	1
HDR1300	1,2,4	1	1,2	1
SSB900	1,2	1	2	1

太字は参考試験として実施したもの

2.5 加力パターン

2.5.1 水平変位

φ1300積層ゴム用の水平変位パターンを例としてFig.4に示す。Fig.4a)の横軸は実速度試験における経過時刻である。主要な変位方向であるX方向については、3波の正弦波のうち、第2、第3波の振幅を目標最大変位とし、第1波の振幅をそれらのほぼ1/2とした。水平二軸変位試験においてはFig.4 (a)中のY方向変位と組合せ、Fig.4 (b)

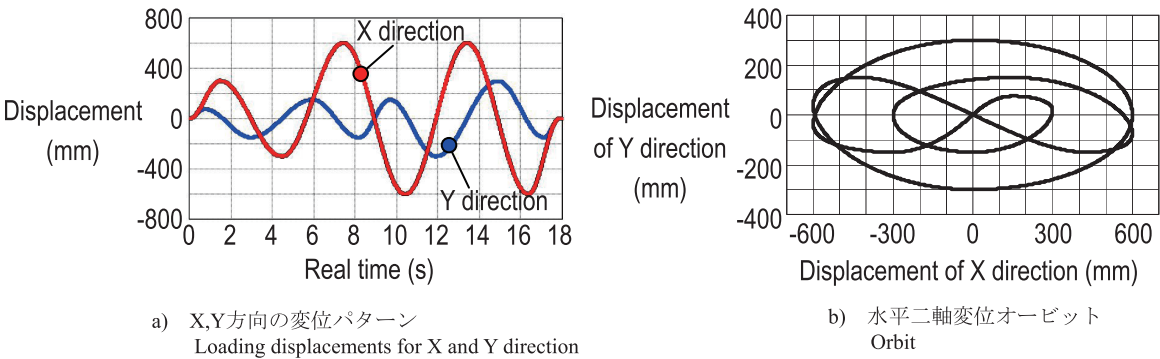


Fig.4 φ1300積層ゴム用水平変位パターン
Loading displacement for φ1300 specimens

に示す形状のオービットを描かせた。Y方向の振幅はX方向のほぼ1/2である。試験体種別による試験振幅をTable 3に示す。

2.5.2 鉛直荷重

Fig.5に示す面圧変動パターンを水平変位パターンと組み合わせ、試験を実施した。パターン1は基準面圧一定としたもの、パターン2は面圧変動の要因がすべて転倒モーメントによるとしたもの、パターン3は鉛直動による影響を模擬したもの、パターン4は高面圧状態で一定としたものである。Fig.5中のNo.3aはパターン3のX方向変位第1波に、No.3bは同第2、第3波に対応する。

Table 3 水平変位パターンの振幅
Amplitude of loading displacement

試験体種別		振幅 (mm)	
		X方向	Y方向
φ 1300積層ゴム, φ 900すべり支承		300,600	150,300
φ 700積層ゴム	軸力一定	280,550	140,280
	軸力変動	280,500	

振幅欄の数値は、カンマの前が第1波、後が第2、第3波の振幅

2.5.3 多サイクル繰返し変位

長周期地震動による多サイクル繰返し変位を模擬するため、固有周期6秒、減衰定数30%の構造体に対する入力エネルギー等価速度が3m/sとなる継続時間300秒の長周期地震動を想定し、そのエネルギー入力時刻歴が概ね模擬されるように、5段階の変位振幅を有する正弦波を組み合わせ変位パターンを作成した。累積変位量は約35mである。この変位パターンを中断なく与えるためには試験機速度を供給油量で決まる制約内とする必要があるため、ここでは各振幅での最大速度を制限値に近接した一様な値とした。結果的に継続時間は4200秒程度となる。Fig.6に変位時刻歴を示す。

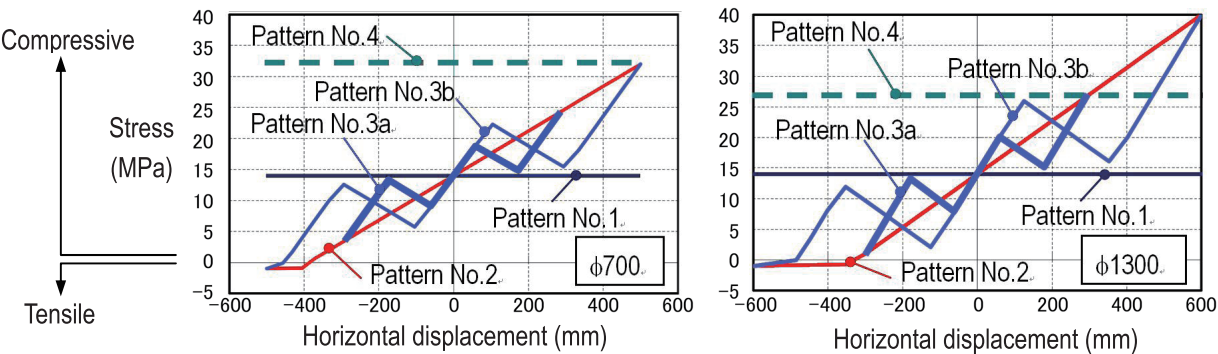


Fig.5 面圧変動パターン
Loading patterns for average vertical stress

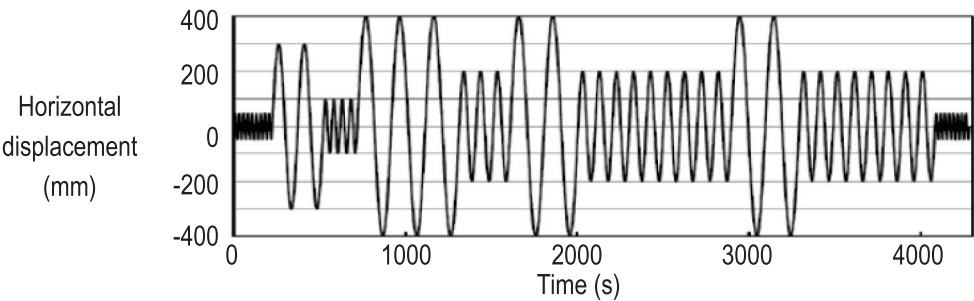


Fig.6 多サイクル繰返し変位時刻歴
Time history of loading displacement for multi-cyclic loading test

3 試験結果

3.1 大変形面圧変動試験

Fig.4 (a) に示すX方向変位パターンとFig.5に示す面圧変動パターンを連動させ、大変形領域における鉛直荷重変動の影響を把握した。加力速度は準静的で、Fig.4 (a) の変位パターンをおよそ900秒かけて与えた。面圧変動範囲は $\phi 1300$ 積層ゴムで $-1 \sim 40$ MPa、 $\phi 700$ 積層ゴムで $-1 \sim 32$ MPaである。試験結果の水平方向荷重変形関係をFig.7に示す。スペースの都合で試験毎に荷重軸をずらして表示した。図中の数字はFig.5のパターン番号に対応する。

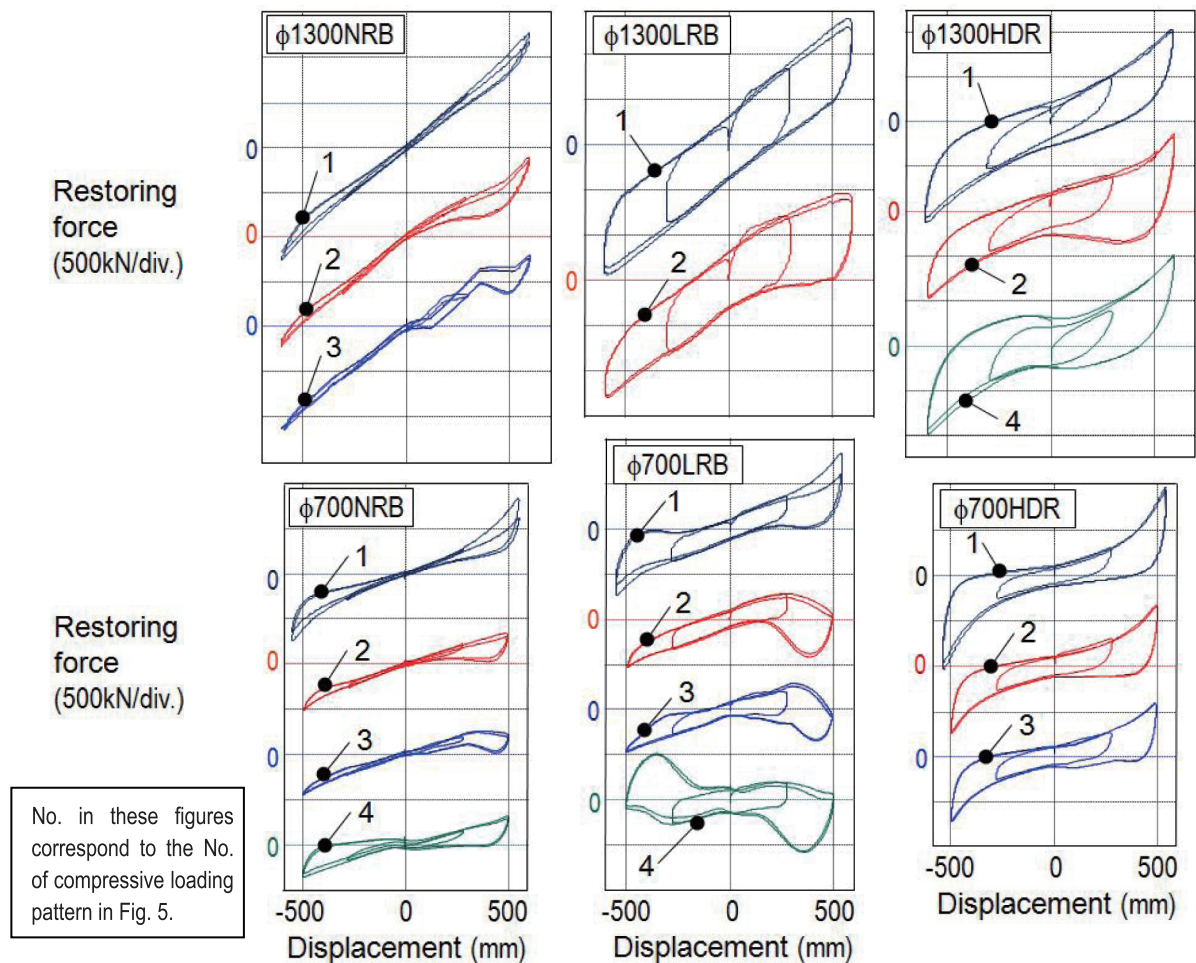


Fig.7 大変形面圧変動試験による水平方向荷重変形関係
Force-displacement relationship under variation of the vertical load

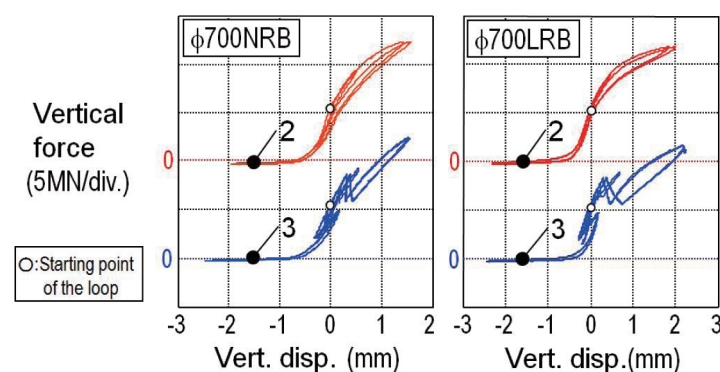


Fig.8 鉛直方向荷重変形関係
Force-displacement relationship in the vertical direction

各試験体とも、軸力を変動させたパターン2、3の正載荷（鉛直荷重増加）側で接線剛性が低下する現象が現れている。せん断ひずみの大きい $\phi 700$ のLRB, NRB試験体では試験ケースにより負勾配を呈することもある。このときの鉛直荷重変形関係をFig.8に示す。いずれのケースも鉛直荷重が大きい領域で、鉛直剛性は正值を保っており、水平負勾配の発生が鉛直荷重支持性能の喪失を意味しないことを示している。

除荷領域においては、高軸力条件でループの膨らみが拡大する現象が、特にLRBで顕著に現れる。

軸力変動による水平剛性への影響度合いはLRB, NRB, HDRの順で大きい。この原因として、ゴム材料のせん断弾性率の違い（HDR:0.59MPa, LRB, NRB:0.39MPa）のほか、高山ら¹²⁾が指摘する中間鋼板孔径の影響も考えられる。

3.2 多サイクル試験

$\phi 1300$ LRB試験体と $\phi 1300$ HDR試験体にFig.6に示す変位時刻歴を与え、多サイクル繰り返しによる性状の変化を観察した。面圧は14MPa一定とした。温度センサーを試験体に埋め込むことにより加力に伴う試験体内部の温度上昇を計測した。雰囲気温度は24ないし28℃であった。

変位時刻歴は地震動の実継続時間である300秒をおよそ4200秒に拡張したものであり、結果として得られる温度上昇は実際とは異なる。そこで、試験結果を説明できる熱伝導解析モデルを得ることで実際の温度上昇を推定した。

試験における荷重変形関係から得られる各時刻の吸収エネルギーを、LRBでは鉛プラグ部が、HDRではゴム部が均等に発熱するものとして解析モデルに与えた。ゴム高さ中央における解析結果を計測値と比較してFig.9に示す。解析値の温度上昇は計測値と概ね一致し、このモデルによってゴム内部の温度上昇を概ね模擬できるといえる。

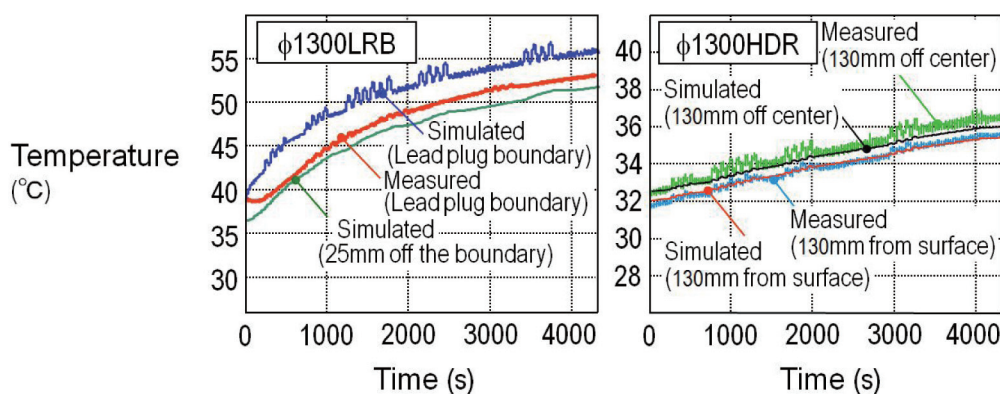


Fig.9 熱伝導解析と計測値との比較
Comparison of the analytical result with measured temperature

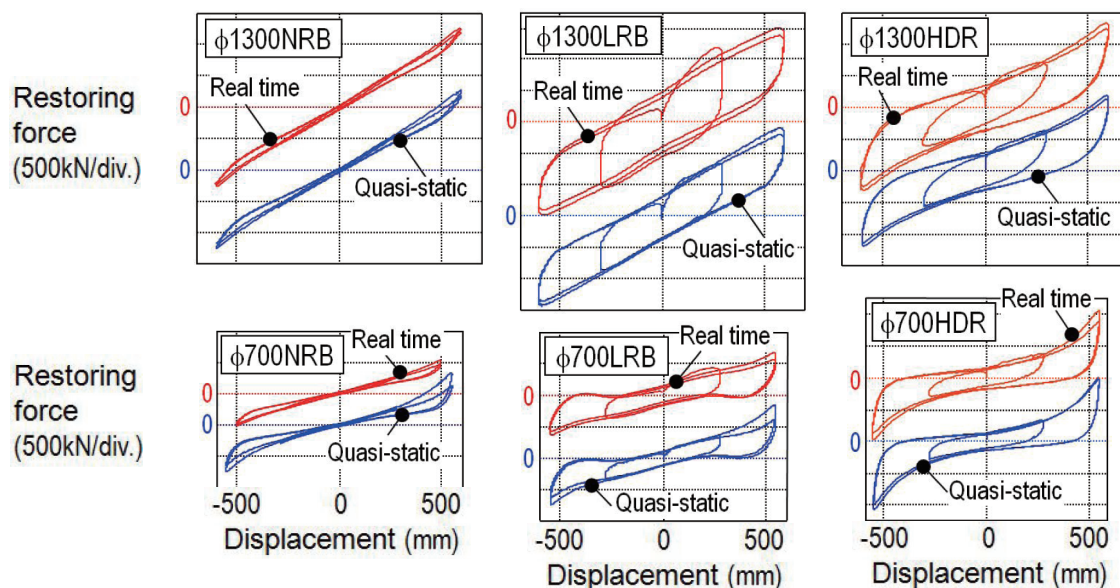


Fig.10 実速度試験と準静的試験の水平方向荷重変形関係の比較
Comparison of force-displacement relationship between the real speed test and in the quasi-static test

同一の解析モデルを用いて、想定地震波による $\phi 1300$ LRB一基あたりの入力エネルギー時刻歴（総計13000kJ）を実時間軸で与えた解析を行うと、初期温度20℃に対し、鉛プラグの中心では鉛の融点327.5℃に相当する値まで温度が上昇する結果となる。この解析モデルでは融点近傍における熱特性の変動までは考慮していないため、温度上昇を過大に評価している可能性はあるが、鉛プラグの軟化による復元力変動が相当程度生じることが充分に考えられる結果となった。

温度上昇に伴う復元力変動の定量的な評価については、別途、実験的検討を蓄積する必要がある。

3.3 実速度試験

Fig.4 (a) に示すX方向基本変位パターンを実時間18秒で与え（実速度試験）、時間長およそ900秒で与えた試験（準静的試験）と比較することで加力速度による性状の違いを把握した。面圧は14MPa一定である。Fig.10に実速度試験と準静的試験の水平方向荷重変形関係を比較して示す。

$\phi 1300$ NRBの荷重変形関係は実速度試験と準静的試験でよく一致する。 $\phi 700$ NRBでは準静的加力で顕著なハードニングが生じたために一見異なる荷重変形関係を示すが、両試験の変位振幅が異なることや同一試験体で準静的加力グ発生が顕著であったことを考えれば、有意な差とは認められない。LRBの降伏荷重は、実速度試験による第1, 2ループの値が相対的に大きい。降伏後剛性に差は見られない。HDRでは、等価剛性、ループ面積ともに、実速度試験で準静的試験に比べ増大する。

3.4 水平二軸変位試験

Fig.4に示した変位オービットを描かせることにより水平二軸変位特性を把握した。NRB, LRBについては面圧変動パターン2, HDRについてはパターン1を用いた。試験結果を面圧変動パターンが同一である水平一軸変位試験結果と併せてFig.11に示す。

NRB, LRBにおいては、水平二軸試験におけるX方向の荷重変形関係には、水平一軸試験との顕著な相違は見

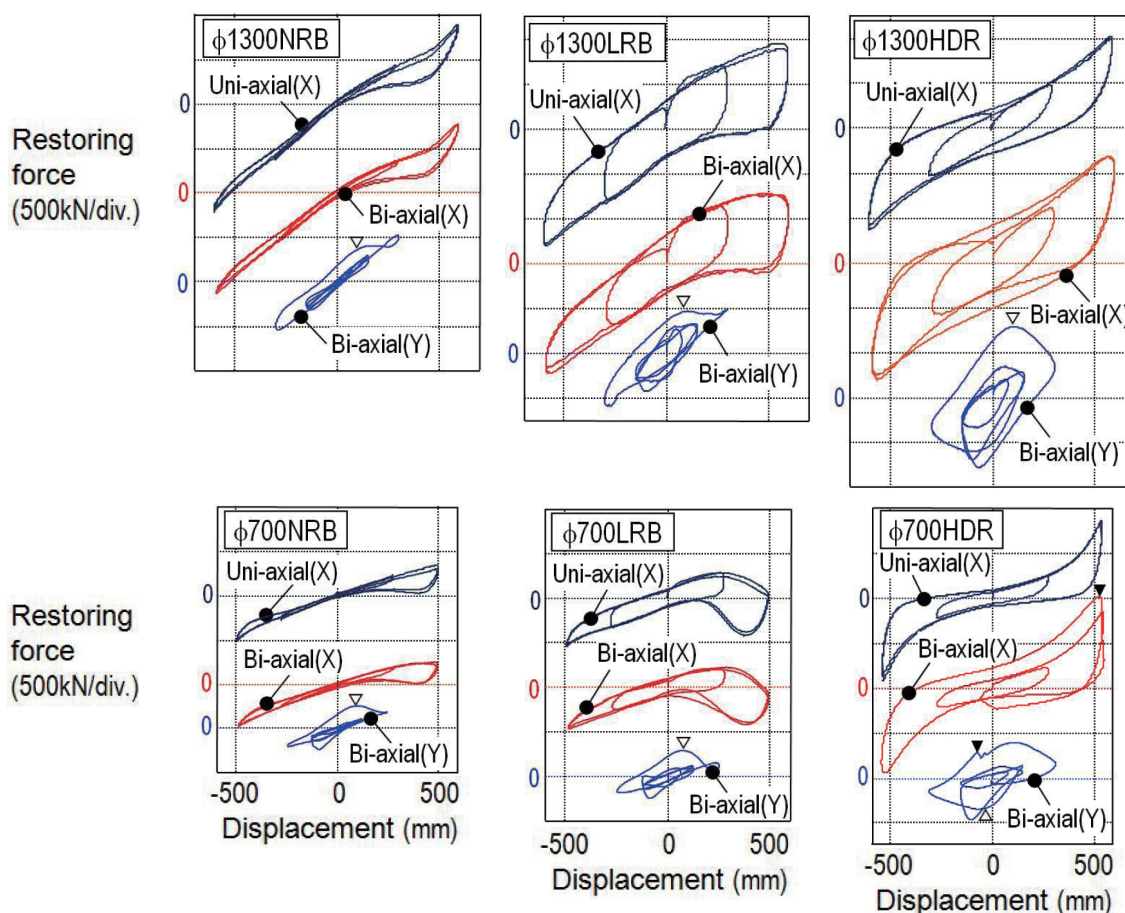


Fig.11 水平二軸変位試験の荷重変形関係
Force-displacement relationship under horizontal biaxial loading

られない。Y方向の荷重変形関係には、▽印で示す変位0付近でループが膨らみを帯びる傾向があり、その程度はNRBよりもLRBにおいて顕著である。

HDRにおいては、X方向の荷重変形関係が水平二軸試験において水平一軸試験よりも大きな膨らみを帯びる。変位極大値付近でループが丸みをもつ傾向も明瞭である。Y方向については、荷重極大値が変位0付近で生じる（▽印）など、奇異ともいえる復元力形状を呈している。

また、 $\phi 700$ HDRの水平二軸試験においては図中に▼で示す時点で、両フランジから数えて2層目のゴム層で破断が生じた。最大せん断ひずみ394%を正負各1回経験した後のせん断ひずみ380%に相当する変形での破断であった。破断状況は、積層ゴム横断面のうち引張域となっていたと考えられる部分が剥離開口し、圧縮力を負担していたと考えられる約27%は残存した。破断後においても鉛直荷重、鉛直変位にほぼ変化は無く、水平復元力もX方向51%、Y方向71%が残存し、その後の荷重履歴においても不安定さを示すことは無かった。X、Y方向の復元力から、積層ゴムには相当量のねじれモーメントが生じていたと判断され、その結果として積層ゴム内部にねじれ変形が発生し局部的なせん断ひずみが増加したことが破断発生メカニズムとして推測される。

この積層ゴム製品の限界水平変形の基準値は、二軸（鉛直荷重+水平一軸）試験による知見に基づきせん断ひずみ400%に相当する値として定められている¹³⁾が、水平二軸変形の繰返しにより基準値以下の変形でも破断が生じる可能性を示す結果となった。

4 低摩擦弾性すべり支承を対象とした試験

低摩擦弾性すべり支承についても、積層ゴム支承を対象とした試験と同様の項目について試験を実施した。代表的な試験結果として、多サイクル試験による荷重変形関係および温度時刻歴をFig.12に、水平二軸試験による荷重変形関係をFig.13に示す。水平二軸試験における面圧パターンはNo.2を用いた。いずれの荷重変形関係にも既往設

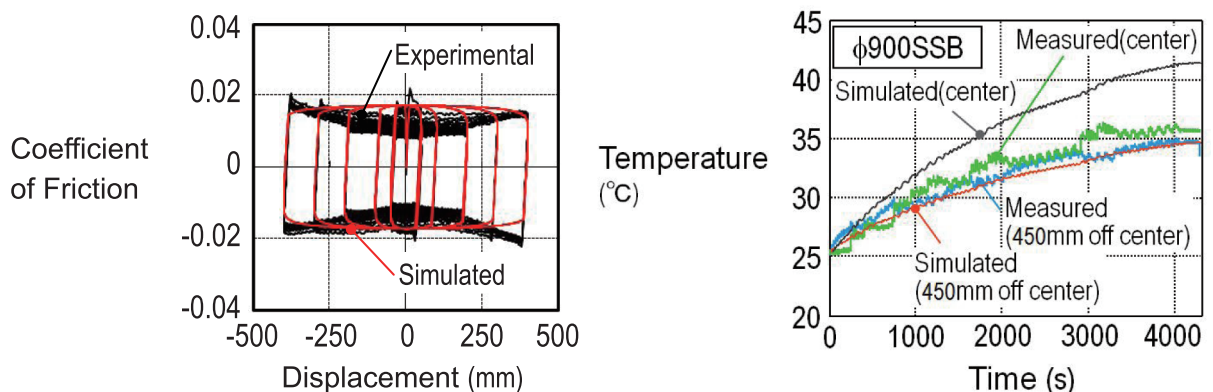


Fig.12 低摩擦弾性すべり支承の多サイクル試験結果
Multi-cyclic loading test for the sliding bearing

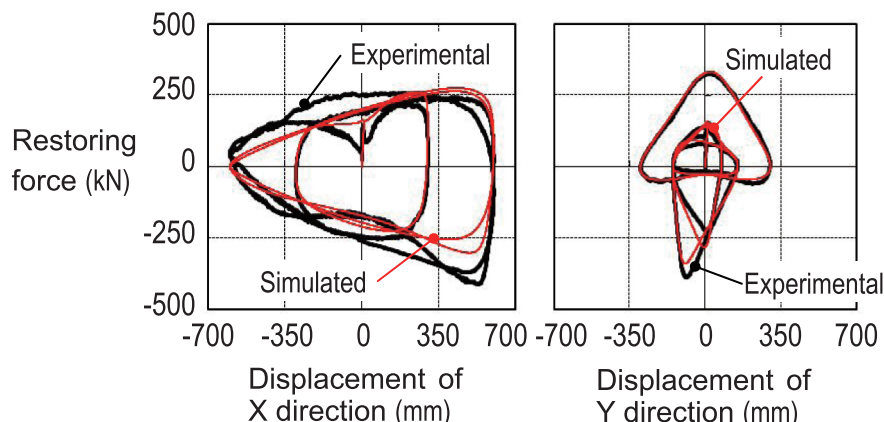


Fig.13 低摩擦弾性すべり支承の水平二軸試験結果
Horizontal biaxial loading test for the sliding bearing

計式に基づき降伏曲面の移動を考慮した解析¹⁴⁾による同定結果を併せて示した。これらの試験結果から、①多数回の繰返し変位に伴い摩擦係数の低下が見られるが、想定地震応答時の温度上昇は限定的であると考えられ、すべり支承は免震支承としての健全性を維持する。②面圧、摺動速度依存性を考慮した既往設計式と、降伏曲面の移動を考慮した解析により実験結果を精度良く同定できる。などが確認された。

5 高減衰積層ゴム支承の水平二方向力学モデルの提案

3.4節に述べたようにHDR試験体の水平二軸変位試験では、奇異とも思われる復元力特性が観察された。本研究では、この現象を材料の高減衰特性に基づくものとして説明する水平二方向力学モデルを提案した。

加力中時々刻々の復元力は、Fig.14に示すように必ずしも原点に向かわない。この復元力は原点に向かう力と略進行方向逆方向に向かう力に分離することができる。これらはそれぞれ弾性復元力と減衰力に相当するものである。本論では、Fig.15に示すように、一定の変位増分に伴って位置を更新する移動原点に向かう成分として略進行方向逆向きの成分を定義した。分離後の弾性復元力と減衰力を応力度で表現し、Fig.16に示すように、それぞれせん断

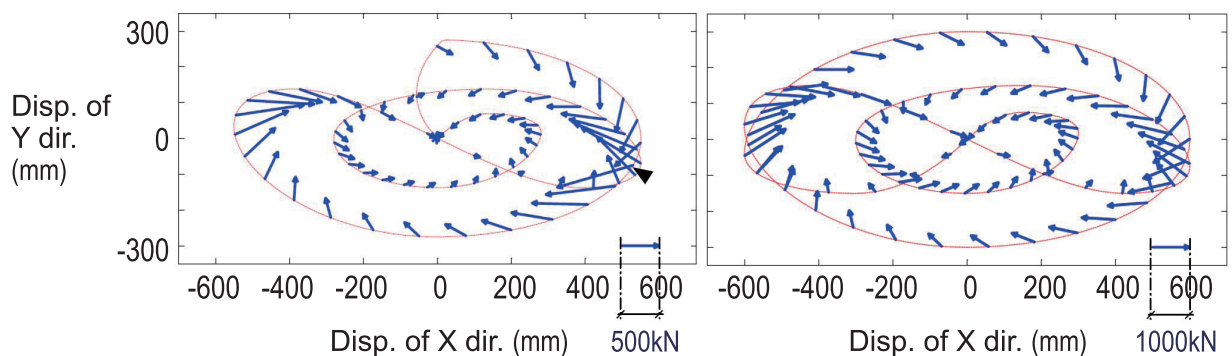


Fig.14 HDR試験体水平二軸変位試験における復元力の向き
Direction of restoring force in the horizontal biaxial loading test for HDR specimens

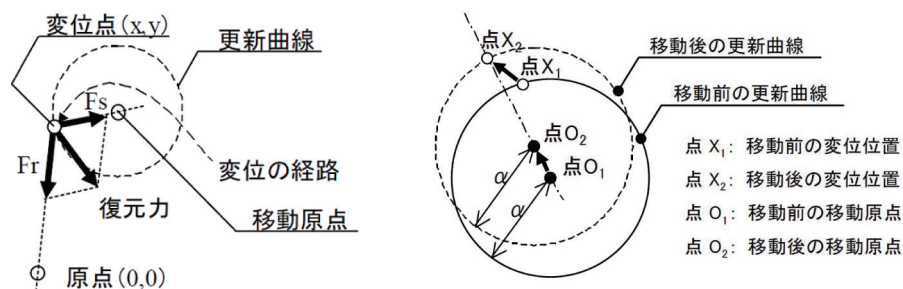


Fig.15 二軸モデル構築における復元力の分離
Concept of separating restoring force

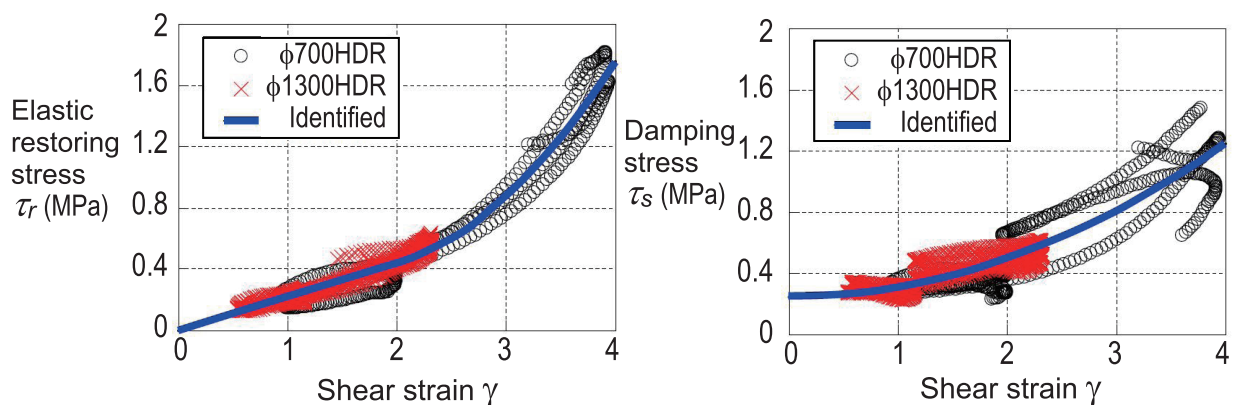


Fig.16 応力度-せん断ひずみ関係の同定
Identification of the separated stress

ひずみの関数として同定することで復元力モデルを得た。弾性復元応力度は (1) 式, 減衰応力度は (2) 式で同定される。

$$\left. \begin{array}{ll} \gamma < 2.0 \text{ のとき} & \tau_r = 0.22 \gamma \\ \gamma \geq 2.0 \text{ のとき} & \tau_r = 0.22 \gamma + 0.22 \times (\gamma - 2.0)^2 \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$\tau_r = 0.25 \times (1 + 0.25 \times \gamma^2) \quad (2)$$

Fig.17に示すように, 提案したモデルは試験結果の荷重変形関係を, 良好に模擬する。水平一軸変位試験についても一定の適用性を有している。

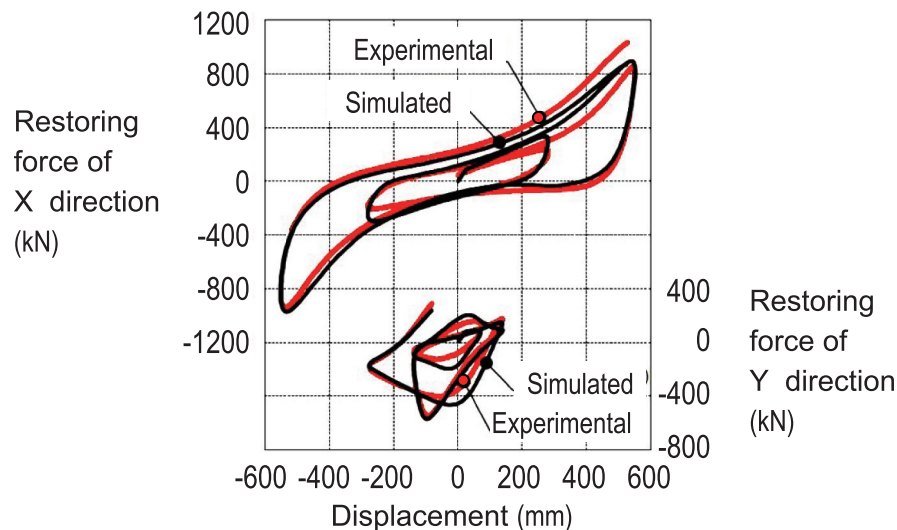


Fig.17 提案モデルによる水平二軸荷重変形関係の評価
Evaluation by the proposed analytical modeling

6 まとめ

長周期地震動に対する超高層免震建物の性能検証への取組みとして, 大型免震支承部材を対象とした一連の実大性能試験を実施した。積層ゴム支承については, 次の知見が得られた。①せん断ひずみの増加に伴い軸力を増加させる加力条件においては水平方向の接線剛性が低下し小径試験体では負勾配を呈することがある。しかし, 高面圧かつ大変形の試験条件に対しいずれの試験体も鉛直荷重支持性能を喪失しない。②多サイクル繰返しにおける積層ゴム内部の温度上昇は熱伝導解析により概ね模擬できる。③加力速度は, 鉛プラグ入り積層ゴムの降伏荷重や高減衰積層ゴムの等価剛性, ループ面積に影響を与える。④水平二軸変位試験においては, 主要な加力方向に直交する荷重変形関係に変位0付近の荷重が大きくなる復元力性状が現れる。特に, 高減衰積層ゴムにおいてその程度が甚だしく, 結果として, 水平一軸試験に基づき評価される性能限界よりも早期に破断が発生する可能性がある。本研究では, その復元力特性を高減衰特性に起因するものとして説明するモデルを提案した。すべり支承については, 既往の設計式が大変形領域においても適用可能であることを確認した。

謝辞

試験実施と一連の研究については, 東京工業大学和田章教授の監修を受けた。試験実施に当たっては, 米国カリフォルニア大学サンディエゴ校SRMD実験棟スタッフ, SIE社, (株)ブリヂストンの協力を得た。久家英夫研究員, 曾根孝行研究員の寄与するところも大きい。茲に, 関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 坂口達, 高山峯夫ほか2名: 天然ゴム系積層ゴムの限界性能に関する研究, 日本建築学会技術報告集第19号, pp.85-90, 2004.6
- 2) 坂口達, 高山峯夫: 天然ゴム系積層ゴムの限界性能に関する研究 その2 高面圧領域における追加試験, 日

- 本建築学会技術報告集第22号, pp.93-97, 2005.12
- 3) 村松佳孝, 北村春幸ほか8名: 建築免震用積層ゴムの限界性能試験結果, 日本建築学会技術報告集第20号, pp.67-70, 2004.12
 - 4) 竹中康雄, 高岡栄治ほか11名: 大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究(その1~6), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2分冊, pp.867-878, 2007.8
 - 5) 杉山公一, 関松太郎: 高減衰積層ゴムの準動的せん断加力試験(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2分冊, pp.547-548, 1998.9
 - 6) 岩田秀治, 家村浩和ほか3名: 大規模自由通路橋の2方向免震支承のハイブリッド地震応答載荷試験, 第10回地震工学シンポジウム, pp.207~212, 1998
 - 7) 嶺脇重雄, 山本雅史, 東野雅彦, 和田章ほか4名: 超高層免震建物の地震応答を想定した実大免震支承部材の性能確認試験, 構造工学論文集Vol.55B, pp.469-477, 2009.3
 - 8) 山本雅史, 嶺脇重雄, 米田春美, 東野雅彦, 和田章: 高減衰積層ゴム支承の水平2方向変形時の力学特性に関する実大実験およびモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第638号, pp.639-645, 2009.4
 - 9) 室田伸夫, 菊地隆志ほか4名: 荷重履歴依存性を改良した新高減衰積層ゴムの開発(その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2分冊, pp.879-882, 2007.8
 - 10) 日本建築学会: 長周期地震動と建築物の耐震性, 2007.12
 - 11) 日本建築学会東海地震等巨大災害への対応特別調査委員会地震動小委員会: 各種波形予測手法に基づいた海溝型巨大地震の予測強震動波形収集資料, 2007.12
 - 12) 高山峯夫, 多田英之, 森田慶子: 積層ゴムアイソレータ中間鋼板の設計 その4 中心孔を有する場合, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B分冊, pp.775-776, 1994
 - 13) 国土交通省: プリヂストン高減衰積層ゴム支承(X0.6タイプ) 建築材料認定書(MVBR-0341) 別表, 2007.4
 - 14) 浜口弘樹, 東野雅彦: すべり支承の軸力変動を考慮した高層免震建物の地震応答, 日本建築学会大会学術講演梗概集B2分冊, pp.455-456, 2003