

フェイルセーフ機構付き積層ゴム免震装置の開発

濱口 弘樹¹・東野 雅彦¹・山本 雅史¹
長田 修一²・宮崎 充³・和氣 知貴²・小南 雄一郎³

¹株式会社竹中工務店 技術研究所 (〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1)

²オイレス工業(株) 免制震事業部 (〒326-0327 栃木県足利市羽刈町1000番地)

³オイレス工業(株) 免制震事業部 (〒108-0075 東京都港区港南1-6-34)

設計時の想定を上回る巨大地震に見舞われた場合でも、建物の安全性や機能性を損なうことのない免震装置および免震構造を提案する。本免震装置は、鉛プラグ入り積層ゴムLRBに直列に高摩擦すべり機構を配置した構成となっており、設計想定内の地震時にはすべり機構部が摩擦で固定され、通常のLRBと同等の免震装置として機能する。一方、巨大地震時にはすべり機構部がフェイルセーフ機能を発揮し、LRBの損傷・破断を防止する。本論では、本免震装置に適用するすべり摩擦材の選定、本免震装置の性能確認実験、すべり機構部の耐候性調査、および本免震装置を用いた免震建物の地震応答解析、について述べ、その有用性を示す。

キーワード 免震構造、巨大地震、積層ゴム支承、すべり支承、フェイルセーフ

1. はじめに

2003年十勝沖地震時の石油タンク火災や2007年新潟県中越沖地震の際に柏崎・刈羽原発において設計時の想定を超える最大加速度が記録された事例のように、近年想定外の巨大地震による建物・構造物の被害が顕在化している。これに伴って免震構造についても、上部建物の免震ピット擁壁への衝突時の挙動、積層ゴム破断時の免震層および上部建物の挙動、長周期地震動により繰り返し大変形を受ける免震装置の耐久性、などの研究が行われている。また既存免震建物の過大応答への対処法として、ダンパーの増設や擁壁への緩衝材の設置、ソフトラッキング手法なども検討されている。しかし、これらの研究は既存の免震装置や免震建物を対象としており、より高い安全性を持つ免震装置・免震構造の研究開発はさほど見られない。

本論では、設計時の想定を上回る巨大地震に見舞われた場合でも、建物の安全性や機能性を損なうことのない免震装置および免震構造を提案する¹⁾。図-1に示す通り、本免震装置は鉛プラグ入り積層ゴムLRBに直列に高摩擦すべり機構を配置した構成となっている。設計想定内の地震時にはすべり機構部が摩擦により固定されたままであり、通常のLRBと同等の機能を発揮する。一方、設計の想定を超える巨大地震時にはすべり機構部の摩擦が切

れて摺動し、LRBの損傷・破断を防ぐとともに上部建物に過度の地震力が伝わることを防ぎ、免震構造全体の安全性を確保する。以後、本免震装置をFSLRB（フェイルセーフ機構付き鉛プラグ入り積層ゴム）と呼称する。

一般に、LRBはゴムのせん断歪み（ゴム総厚さに対する水平変形量の比）が250%程度を超えるとゴムが急激に硬化し、400%～500%程度で破断する。本開発に当たり、まず始めにFSLRBが従来のLRBに比べて高い安全裕度を有することを実証するため、両免震装置の限界変形性能の比較実験を実施した。すべり機構部はPTFE（Poly Tetra Fluoro Ethylene）樹脂系摩擦材とSUS304ステンレス板の組み合わせを採用した。摩擦係数 μ は概ね0.1程度である。LRBおよび摩擦材の平面寸法は 414mm×414mm、ゴム総厚は56mmである。図-2に示す実験結果の通り、LRBであればゴム硬化～破断に至るような大変形を与えても、FSLRBは全く損傷することなく免震機能を維持できることが確認された。

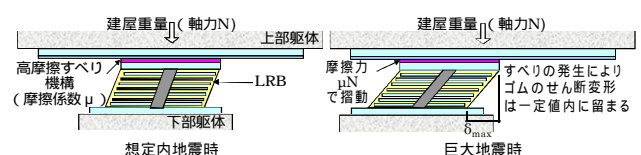


図-1 FSLRBの概要

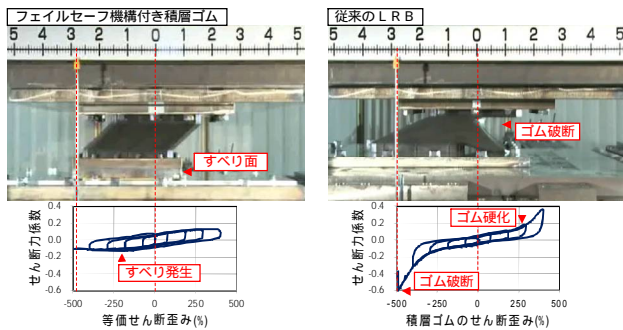


図-2 FSLRBと従来型LRBの限界性能比較

FSLRBはLRB部ゴムのせん断歪みが250%程度となりハードニングを生じる前にすべり始めることを狙いとする。この前提のもと、一般的なLRBの特性や使用条件を勘案すると、すべり機構部に必要な摩擦係数 μ は概ね0.1～0.15程度となる。

2. 摩擦材の選定

接触する個体間の摩擦係数 μ は、接触部の面圧を σ としてHertzの古典接触理論から

$$\mu = \alpha \sigma^{\beta} \quad (\alpha, \beta: \text{定数}) \quad (1)$$

と導くことができる。摩擦力 Q は μ と鉛直荷重 N の積、 N は接触面積 A と σ の積であることから

$$Q = \mu N = \alpha A \sigma^{1+\beta} \quad (2)$$

と表される。接触部が弾性変形する場合は $\beta=1/3$ となる。また、従来の免震用すべり支承に用いられるすべり機構では一般的に $\beta=1/3$ 程度である。ここで仮に $\beta=1$ なるすべり機構が存在するならば、(2)式より摩擦力は接触面の面圧によらず常に一定の値 αA となる。上下地震動や上部建物のロッキング応答により面圧 σ が時々刻々と変動しても Q が大きく変動せず安定した摩擦特性を保持するためには、従来の免震用すべり支承に用いられているものに代わり、なるべく β が大きなすべり機構の採用が望ましい。また、ゴムの硬化～破断や上部建物への過度の地震力伝達を防ぐためには、前節に述べた通り $\mu=0.1 \sim 0.15$ 程度でなければならない。

こうした条件に該当するすべり機構を選定するため、樹脂や金属など異なる12種類の摩擦材の基本特性を調査した。平面寸法は $-60\text{mm} \times 60\text{mm}$ （四隅C5面取り）で共通、厚さは摩擦材によって異なる。面接触するもう一方の材料は鏡面仕上げを施したSUS304板とした。寸法は $-300\text{mm} \times 150\text{mm} \times 6\text{mm}$ である。試験は2軸加振試験機を用いて一定面圧下で様々な速度の三角波による水平加振を行った。摩擦係数は水平変位-水平荷重関係において3加振目の正負荷重軸切片値の絶対値をその時々鉛直荷重で除し、それらの平均値で評価した。摩擦材の概要と調査結果を表-1および図-3に示す。ここで代表摩擦係数は $\sigma=10\text{N/mm}^2$ 、加振速度 $V=512\text{mm/s}$ における値、面圧依存式は $\sigma=5, 10, 15, 30\text{N/mm}^2$ 、 $V=512\text{mm/s}$ におけ

表-1 各摩擦材の概要と摩擦特性

系統	No.	名称	厚さt	代表 μ	判定
PTFE系	1	PTFE-A	8mm	0.160 0.40	0.42
	2	PTFE-B	8mm	0.030 0.11	0.58
	3	PTFE-C	8mm	0.167 0.45	0.44
	4	PTFE-D	10mm	0.192 0.44	0.39
複層樹脂系	5	LR-A	3mm	0.261 0.44	0.28
	6	LR-B	2mm	0.127 0.29	0.33
金属系	7	Metal-A	10mm	0.259 0.08	-0.48
	8	Metal-B	3mm	0.226 0.38	0.18
熱可塑性樹脂系	9	TPR-A	8mm	0.117 0.40	0.54
	10	TPR-B	3mm	0.139 0.25	0.26
	11	TPR-C	10mm	0.191 0.36	0.30
	12	TPR-D	8mm	0.177 0.50	0.52

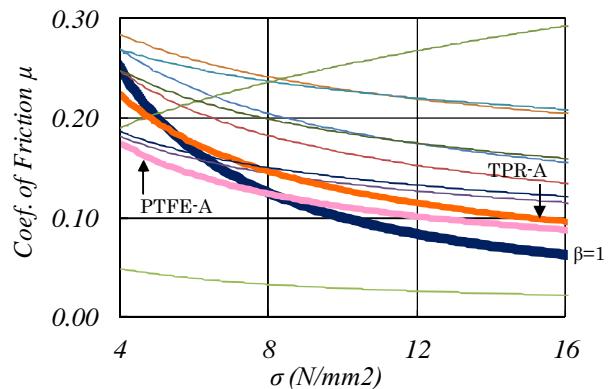


図-3 各摩擦材の摩擦係数の面圧依存性

る摩擦係数から最小自乗近似にて算出した。この結果、12種類の摩擦材の中で比較的目標に近い摩擦特性を有する摩擦材として、PTFE-AおよびTPR-Aを選定した。

3. FSLRBの基本特性

次に、選定した摩擦材 PTFE-A および TPR-A を用いた FSLRB の性能確認実験を実施した。試験体の LRB 部は実機として平面寸法 $-1,500\text{mm} \times 1,500\text{mm}$ を想定し、これを約 1/3.6 倍に縮小した。すべり機構部は $-414\text{mm} \times 414\text{mm}$ の PTFE-A を $-500\text{mm} \times 500\text{mm}$ 鋼材の中央切り欠き部に嵌め込んで接着したもの、または $-85\text{mm} \times 85\text{mm}$ の TPR-A を鋼材切り欠き部に縦横 5 枚ずつ敷き並べ、すべり面側からビス留め固定したもの、および $-1,525\text{mm} \times 900\text{mm} \times 6\text{mm}$ の SUS304 ステンレス板の組み合わせである。試験体の断面模式図を図-4 に示す。

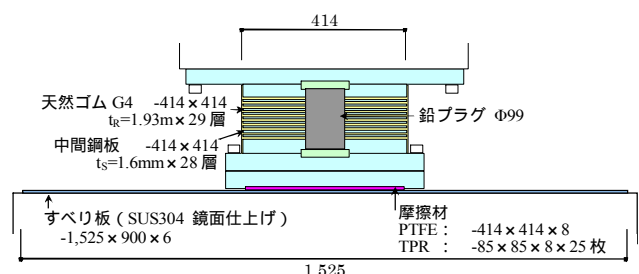


図-4 FSLRB縮小試験体の模式図

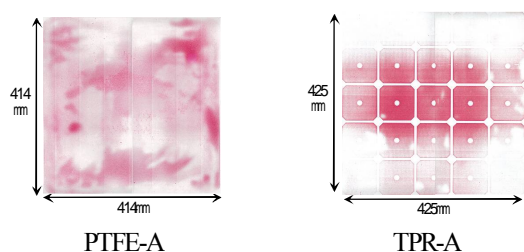


図-5 FSLRBすべり面の面圧分布

加振実験に先立ち、感圧紙を用いて面圧 10N/mm^2 におけるすべり面の面圧分布を測定した。結果を図-5 に示す。PTFE-A は比較的均等に面圧が分布しているが、TPR-A は鉛直荷重が中央部の摩擦材に集中している。

摩擦特性の面圧依存性を図-6 に示す。図中には前節で得られた -60mm 摩擦材の結果を併せて示す。PTFE-A の β は僅かに大きくなった。一方、 μ は若干小さくなったが、これは面圧分布が -60mm に比べて不均一で真の面圧が高いためと考えられる。TPR-A は図-5 に示した通り、鉛直荷重がすべり面に均等に作用しないため、特に低面圧時に -60mm 摩擦材と大きく異なる特性となり、 μ 、 β ともに大きく低下する結果となった。このように、摩擦材のスケール効果や LRB を直列に配置したためと考えられる面圧の偏在により、前節で述べた -60mm 摩擦材とは異なる結果となった。以上の検討により、2 種類の候補摩擦材のうち PTFE-A の方が面圧や速度などの変化によらず安定した摩擦特性を有し、本免震装置に用いる摩擦材として優れているものと判断した。

次に、PTFE-A を用いた実大 FSLRB の 2 軸載荷実験を行い、 -414mm 縮小試験体の実験結果との比較から、摩擦特性のスケール効果の有無を把握するとともに、摩擦係数の面圧依存性を定量評価した。LRB 部の平面寸法は $-900\text{mm} \times 900\text{mm}$ 、鉛プラグ $-100\text{mm} \times 4$ 本タイプである。試験体の断面模式図を図-7 に示す。

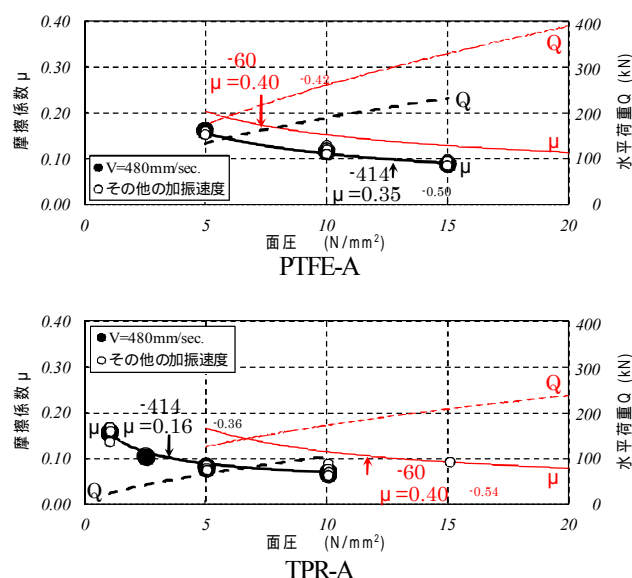


図-6 FSLRB縮小試験体の摩擦係数の面圧依存性

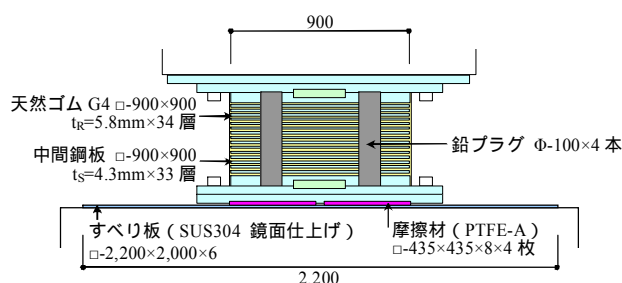


図-7 FSLRB実大試験体の模式図

2 軸静的試験機を用いて一定面圧下で加振速度 15mm/s の三角波による水平載荷を行い、摩擦材のみ取り替えて 3 体分のデータを取得した。摩擦係数はすべり機構部の履歴における 3 加振目の正負切片荷重絶対値をその時々鉛直荷重で除した値の平均で評価した。載荷面圧と摩擦係数の関係を図-8 に示す。摩擦係数のばらつきは面圧の増加とともに小さくなる傾向が見られる。これは PTFE-A が比較的柔らかい材料であり、面圧の増加とともに真のすべり面接触面積がみかけの接触面積に漸近していくためであると考えられる。摩擦係数の面圧依存式は、すべり面の浮き上がりを生じた面圧 20N/mm^2 以上のデータを除外して、最小自乗近似により求めた。縮小試験体の動的載荷実験から得られた面圧依存式と比較すると、 β はほぼ同等となったが、 α は約 $3/4$ に低下した。

摩擦係数が縮小試験体よりも大幅に低下した原因は、載荷速度の違いであると考えられる。一般に PTFE 系摩擦材とステンレス板で構成されるすべり機構では、摩擦係数は低速域で速度の増加とともに急激に大きくなり、高速域では速度によらずほぼ一定という傾向を有する。本実験で用いたものと類似の物性および摩擦特性を有するすべり機構について、摩擦係数の速度依存性が(3)式の通り評価されている。

$$\mu = 0.13 - 0.05 \cdot \exp(-0.019 \cdot v) \quad (3)$$

(面圧 $\sigma = 17\text{N/mm}^2$ 時、 v : 載荷速度[mm/s])

(3)式を本すべり機構に準用すると、 $v=480\text{mm/s}$ 時に対する $v=15\text{mm/s}$ 時の摩擦係数の変化率は 0.71 となり、実験で得られた結果と概ね対応している。この推測の妥当性については、今後の実験によって明らかにする予定である。また LRB 部の形状係数にもよるが、すべり面に浮き上がりを生じさせないためには、短期面圧を 15N/mm^2 程度以下に留めることが望ましいことを確認した。

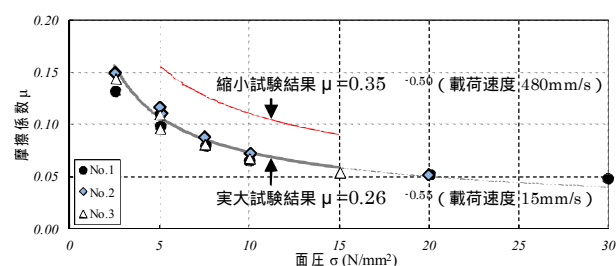


図-8 FSLRB 実大試験体の摩擦係数の面圧依存性

4. すべり機構部の耐候性

FSLRB は数十年に渡り半屋外の免震層に設置されることになるため、すべり面の汚れや摩擦材の劣化等を生じる恐れがある。特に海岸沿いの建物に適用した場合には、塩分を多量に含む空気に晒されることとなる。そこで、FSLRB のすべり機構に長期屋外暴露および塩水噴霧サイクル試験を施し、摩擦特性の耐候性を調査した。

屋外暴露試験の方法を図-9 に示す。屋外暴露時はコイルばねですべり機構を載荷し、摩擦係数の測定時にはコイルばねの荷重をアクチュエータに移設することで、すべり面の接触を一度も解除しないようにした。摩擦材 2 種類 (PTFE-A, TPR-A)、すべり板 2 種類 (SUS304, SUS316)、暴露環境 2 条件 (免震層内、完全屋外) の計 8 通りの組合せにつきそれぞれ 4 体、計 32 体の試験体を同条件の 2 体ずつ計 16 組のペアとし、堆積した粉塵、錆などの汚れは除去せずに、載荷 1 日後、70 日後、120 日後にそれぞれ摩擦係数を測定し、その変化率を調査した。摩擦係数測定時の試験体温度は気温の影響により各々約 15~18℃、6~8℃、9~12℃ と異なったため、別途測定した摩擦係数の温度依存特性を用い、全て 20℃ における値となるように補正を行った。

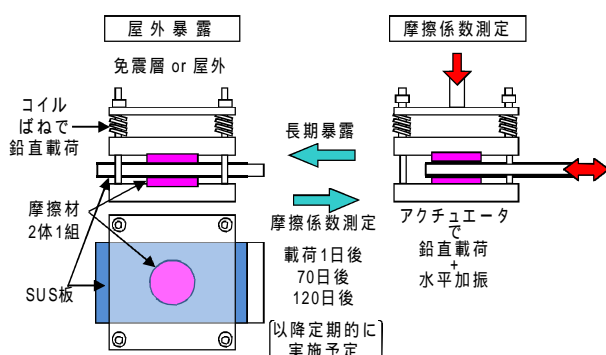


図-9 すべり機構の屋外暴露試験の概要

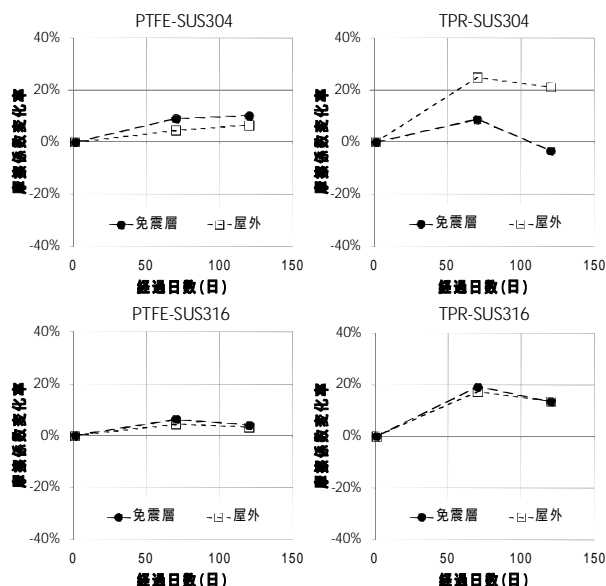


図-10 屋外暴露による摩擦係数の変化

経過日数と摩擦係数変化率との関係を図-10 に示す。PTFE-A は暴露環境の違いおよびすべり板の種類によらず安定した結果を示した。一方、TPR-A は 70 日後の摩擦係数変化率が 120 日後の変化率と比べて大きくなり、暴露日数との相関が明確に現れなかった。

塩水噴霧サイクル試験の方法を図-11 に示す。摩擦材 2 種類 (PTFE-A, TPR-A)、すべり板 2 種類 (SUS304, SUS316)、塩水噴霧サイクル数 2 種類 (120 回, 240 回) の計 8 通りの組合せにつきそれぞれ 4 体、計 32 体の試験体について、2 体 1 組を表裏に試験機に取り付けてアクチュエータにより鉛直載荷・水平加振を行い、計 16 体分の初期摩擦特性を測定した。次に、摩擦材とすべり板を重ねて治具で固定した全 32 体の試験体に JIS K 5600-7-9 サイクル D 塩水噴霧複合サイクル試験を施した。その後、初期特性測定時と同じ 2 体ずつ計 16 組の摩擦特性を測定した。摩擦特性測定時の試験体温度は初期値測定時 11~13℃、噴霧 120 サイクル後 5~8℃、噴霧 240 サイクル後 14~18℃ であり、全て 20℃ における値に補正した。

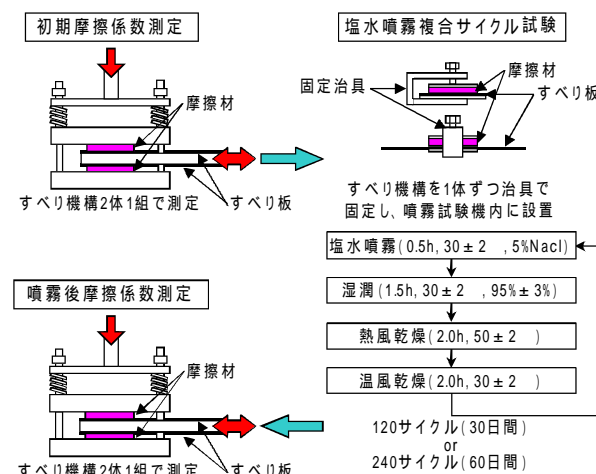


図-11 すべり機構の塩水噴霧サイクル試験の概要

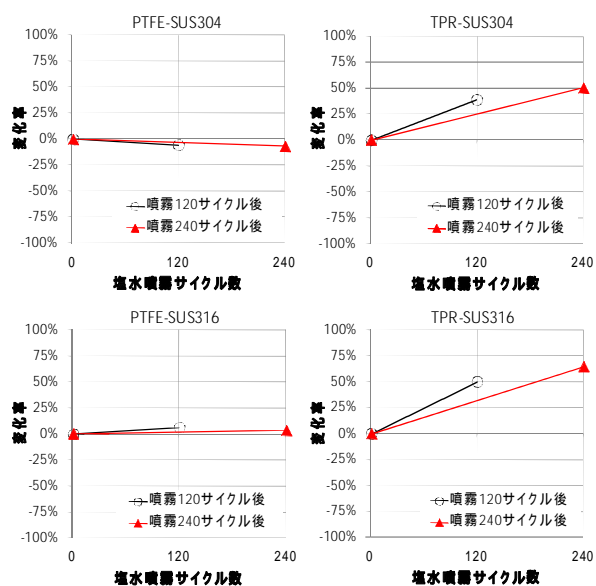


図-12 塩水サイクル噴霧試験による摩擦係数の変化

塩水噴霧後の摩擦係数の変化率を図-12 に示す．PTFE-A はすべり板と噴霧サイクル数の違いに関わらず塩水の影響がほとんど見られず，240 サイクル噴霧後でも変化率は $\pm 5\%$ 程度であった．一方，TPR-A は噴霧サイクル数の増加に伴って摩擦係数が増大し，240 サイクル後で $+50\%$ 程度となった．TPR-A は PTFE-A に比較して非常に硬い材料であるため，塩分の凝固や錆の付着などによるすべり面の平滑度低下が摩擦特性に顕著に影響を及ぼしたものと推測される．これらの結果より，FSLRB に適用する摩擦材として PTFE-A が最適と判断した．

5. FSLRBを用いた免震建物の地震応答解析

摩擦係数の時々刻々の変化を考慮したモデルを構築し，FSLRB を用いた免震建物の時刻歴地震応答解析を行った．建物モデルは既存原子力発電所の構造諸元を参考に，原子炉棟およびタービン棟をそれぞれ 10 質点系等価曲げせん断棒でモデル化し，共通基礎で一体免震構造としたものを用いた．免震層にはタービン棟 156 基，原子炉棟 100 基，計 256 基の FSLRB を平面配置した．全基とも水平特性を天然ゴム部，鉛プラグ部，すべり機構部に分離し，各々 4 本の Multi-Shear Spring でモデル化した．天然ゴム部は大変形時のハードニングを考慮した非線形弾性，鉛プラグ部は Normal Bi-Linear 型，すべり部は摩擦係数の面圧依存性を考慮した Normal Bi-Linear 型とした．上下方向は LRB 部とすべり部にそれぞれ非線形弾性の軸剛性を定義した．解析モデルの概要を図-13 に，摩擦係数の面圧依存性を図-14 にそれぞれ示す．

2003 年十勝沖地震時の苫小牧観測波を 3 倍に拡幅して入力したときの上部建物の応答結果を図-15 に示す．免

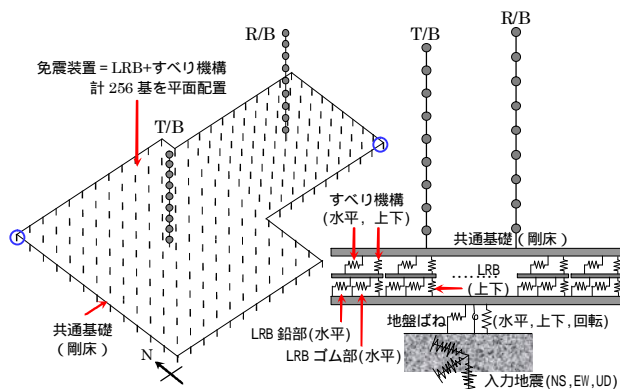


図-13 地震応答解析モデル

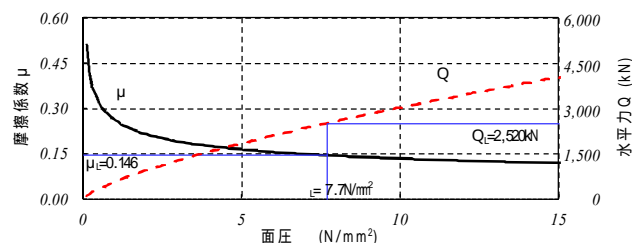


図-14 摩擦係数の面圧依存性モデル

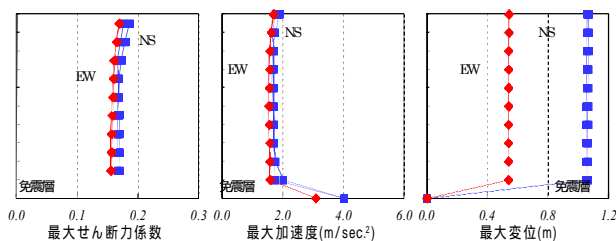


図-15 上部建物の最大応答結果

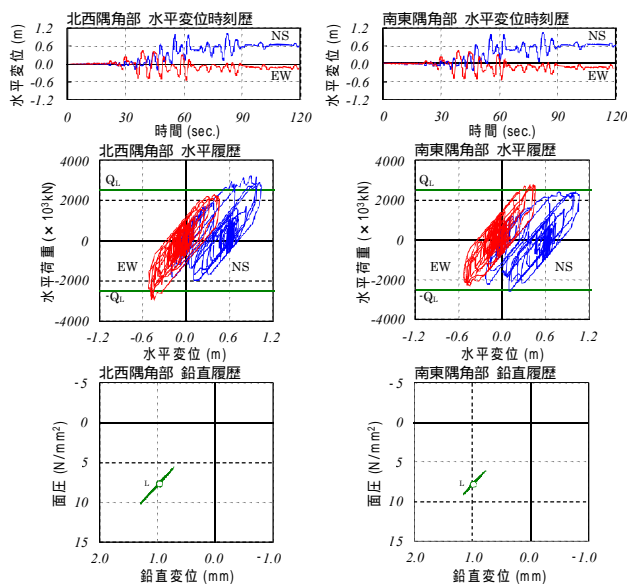


図-16 隅角部のFSLRBの応答

震層の最大変位が 1m を超える大入力に関わらず，上部建物の最大応答加速度は 2m/s^2 以下に収まり，すべり機構を採用した効果が明確に現れている．図-13 に○で示した隅角部 2 か所の FSLRB の水平変位時刻歴と履歴，および鉛直履歴を図-16 に示す．水平履歴には長期面圧時の摩擦力 Q_L を併せて示す．摩擦係数の面圧依存性をモデル化したことにより，常に一定の摩擦力 Q_L ですべるのではなく，摩擦力が時々刻々と変動する状況を解析的に再現することができている．鉛直方向の履歴より，この間の面圧は約 $5 \sim 10 \text{ N/mm}^2$ の幅で変動していることが分かる．

6. おわりに

設計時の想定を上回る巨大地震に見舞われた場合でも建物の安全性や機能性を保持する免震装置 FSLRB の開発を行い，免震建物の地震応答解析によりその効果を確認した．

今後も引き続き，すべり機構部の摩擦係数の経年変化データの蓄積，FSLRB の水平 2 方向加振時特性や摩擦係数の速度依存性など，残る課題の検討を継続する．

参考文献

- 1) 濱口他：想定を上回る地震に対して安全性の高い免震構造の提案（その 1～7），日本建築学会大会梗概，2010～2012