

巨大地震に対する免震フェイルセーフ制動装置の開発

仲村崇仁^{*1}・加藤貴司^{*1}・金子修平^{*2}・那 超^{*3}・菊地 優^{*4}

近年発生が懸念される南海トラフ沿いの巨大地震では、長周期成分を有する地震動が長時間継続するとされている。このとき長周期構造物である免震構造では、免震部材の減衰性能が低下する可能性が指摘されている。免震部材の性能が低下すると免震層の応答変位は増大し、上部構造の擁壁衝突や免震部材の損傷の発生が懸念される。これに対応するため、免震層の過大变位を免震クリアランス内に制動し、その際の上部構造の損傷を最小限に留めることを目的としたフェイルセーフ制動装置を開発した。実大装置の加力試験では開発コンセプト通りの復元力特性を得ることができた。また、装置を用いた免震建物の地震応答解析によって有効性を確認した。

キーワード：免震構造，巨大地震，長周期地震動，フェイルセーフ，制動装置，低降伏点鋼

1. はじめに

長周期構造物である免震構造では、海溝型地震で発生する地震動の長周期成分により応答変位が大きくなる恐れがある。また、近年発生が懸念される南海トラフ沿いの巨大地震のように長周期成分を有する地震動が長時間継続すると、免震部材は大振幅の繰返し変形を強いられ、減衰性を有する免震支承や減衰ダンパーは、減衰性能が低下（または劣化）する可能性が指摘されている。

このことを受けて2008～2012年に実施された基準整備促進事業¹⁾では、繰返し大変形による免震部材の性能低下が詳細に検討された。続いて、この事業の報告を受けて、2016年6月に国土交通省より技術的助言²⁾が通知され、2017年4月以降に対象とする地域において新築する地上4階以上の免震建物は、長周期地震動による免震部材の性能低下を考慮した設計が求められるようになった。免震部材の性能低下により免震層の応答変位が増大し、上部構造の擁壁衝突や免震部材の損傷さえ懸念されることから、免震建物の設計では免震クリアランスや免震部材の許容変形に対する余裕度の確保がいっそう重要となる。

以上の背景により、近年、免震建物に想定を超える地震動が入力された際の検討として、上部構造の擁壁衝突に関する研究が実施されている^{3～6)}。これらは模型実験や解析による検討が主であり、擁壁衝突が生じた際の応答や損傷度を設計段階で考慮するには、継続的な検討が望まれる。

一方、免震建物に過大变位が生じた際の、フェイルセーフ機構は免震黎明期から検討されており、積層ゴム支承の座屈や破断を想定した、ソフトランディング機構等がある⁷⁾。近年では、擁壁衝突時の上部構造の損傷を緩衝ゴムにて低減を図るフェイルセーフ技術⁸⁾が実用化されて

いる。また、対極的な技術として設計想定以上の地震入力に対して、免震支承を滑らせることにより、上部構造と免震支承の損傷を防ぐフェイルセーフ技術⁹⁾も実用化されている。前者の技術は擁壁に、上部構造の衝突に耐える強さが要求され、後者の技術は免震支承の滑り変位を考慮した擁壁クリアランスが必要となる。

本論文では、これら既存の実用化技術とは異なる「制動」による新たなフェイルセーフ機構を提案する。ここで開発したフェイルセーフ制動装置は、想定を超える地震入力で生じた免震層の過大变位が、免震クリアランス内になるように建物を制動し、その際の上部構造の損傷を最小限に留めることを意図している。

2. フェイルセーフ制動装置

2.1 開発コンセプト

フェイルセーフ（以下FS）制動装置は、レベル2以下の地震入力に対しては上部構造の応答に影響を与えず、想定を超えるようなレベルの地震入力に対しては確実に作用する装置を目指している。装置には確実に機能する信頼性が求められることから、以下の開発コンセプトを定めた。

- ① パッシブ型装置であること
- ② シンプルな構造であること
- ③ メンテナンスが容易であること
- ④ 経年変化が少ないこと

上記の開発コンセプトに基づき、図-1に示す復元力特性を有する装置開発を行うこととした。この復元力特性は、レベル2相当の変位（無感区間）に対しては水平力の発現は無く、免震層の応答に影響は与えないが、それを超える変位が発生した際には水平力（制動力）が立上

*1 建築研究部 *2 株式会社川金コアテック *3 平和発條株式会社 *4 北海道大学

る。なお制動時は上部構造の損傷を可能な限り小さく抑え、かつ制動時の変位が小さくなるように、出来るだけ大きい履歴減衰を有するようにした。

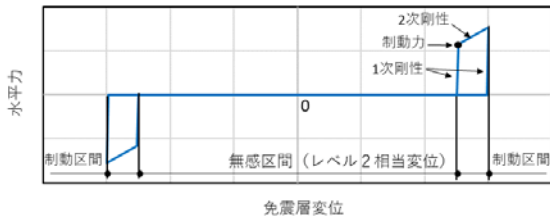


図-1 開発検討による復元力特性

2.2 開発装置概要

本開発におけるFS制動装置は図-2に示すシリンダー型であり、シリンダー内には、制動力立上がり時の衝撃緩衝用に皿ばねユニットを配置している。制動力を負担する制動材には低降伏点鋼を採用した。低降伏点鋼はシリンダー内に配置した爪付きプレートを通じて、シリンダー外周に専用のホルダーで固定されている。そのため、フェイルセーフ作動後の制動材の交換が容易である。本装置は図-1のレベル2相当の変位として、±500 mmの無感区間を備える。500 mmを超える応答変位が生じた際は制動区間に移行し、制動力が発現する。制動区間の機械的ストロークは150 mmであるが、装置使用域としての制動区間は、後述する低降伏点鋼の材料試験結果に基づき100 mmと設定した。また、図-1の第1折れ点に相当する装置の設計制動力は1000 kNとした。

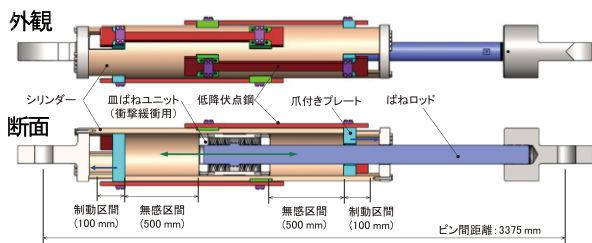


図-2 フェイルセーフ制動装置

2.3 低降伏点鋼の使用範囲

フェイルセーフ制動装置の制動材として採用した低降伏点鋼は、座屈拘束プレース等の制振部材として使用実績の多い材料であり、降伏点や伸び等の機械的性質のばらつきが少ない大臣認定材料である。一般的に、座屈拘束プレースにおける低降伏点鋼の使用方法は押し引き両振幅による塑性変形であり、使用されるひずみ域も建物の風応答等による疲労変形に対応して±1～2%程度である。一方、本装置は想定を超える巨大地震時のみに機能し、低降伏点鋼は引張一方方向のみに変形する。そこで、本装置に適用する低降伏点鋼の使用範囲を定めるために、材料試験を行った。

材料試験はFS制動装置の低降伏点鋼取り付け部と同様

な形状とした図-3に示す固定方法により、1500 kN静的横型試験機を用いて行った。試験片は図-3に示すフィレット部を除いた平行部長さを、Case1:330 mm, Case2:660 mm, Case3:990 mmの3水準とし、各水準で3枚ずつ用意した。加力はひずみ硬化が確認されるまで応力速度10 MPa/s、ひずみ硬化確認後はひずみ速度1%/min程度となるように調整して行った。また、最大引張ひずみは写真-1に示す様に材料にネッキングが発生し、応力低下が確認されるまでとした。

鋼材の材料特性として、引張応力度が最大に達するまで材料は一樣に伸び、それを超えるとネッキングが生じ、構造材としての使用は困難となる。そこで、ネッキングが発生するまでの低降伏点鋼の変形性状を確認した。変形性状の確認は引張試験中の試験片を一定時間間隔で撮影し、試験片に33 mm (材軸方向: X) × 15 mm (材軸直方向: Y) で引いた罫書線の変化率を読み取った。Case3の画像解析結果を材軸方向について図-4に示す。画像解析より低降伏点鋼は同図(b)の引張ひずみ20%相当時(平均ひずみ18.3%)まで一樣に伸びていることが確認できる。これは、後述の引張試験による一樣伸びと合致する。

材料試験における応力度-ひずみ関係を図-5に示す。同図には水平軸に変位量を併記し、引張強さを示す点を丸印で示す。引張強さ到達時のひずみは試験片形状にかかわらず、22～25%の範囲で安定している。この結果より、本装置における低降伏点鋼の限界ひずみは20%とし、その半分の10%を使用域とした。使用域を10%としたのは、低降伏点鋼の使用方法が大きな塑性変形を伴う前例のない使用方法であることから、十分な余裕度を確保するためである。以上の検討結果より、制動材形状はCase3を採用した。

物性値は表-1に示すようにばらつきが小さく、その値は試験片形状に依存しない。また、材料試験による値と試験片形状: JIS Z 2241 5号によるミルシート値との違いはほとんどない。よって、FS制動装置の設計制動力である第1折れ点の算定には材料規格値の中心となる225 MPaを採用することとした。次にFS制動装置の2次剛性の検討にあたり、下降伏点とひずみ10%の応力度の比、(以下、応力度比)を算出した。応力度比も試験片形状による違いはほとんどないが、FS制動装置に採用する試験片形状であるCase3の応力度比1.35を採用することにした。

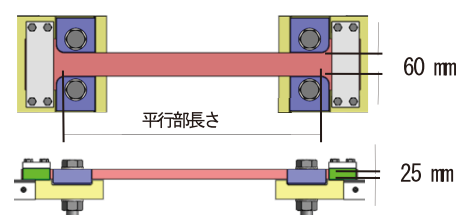


図-3 低降伏点鋼の材料試験方法

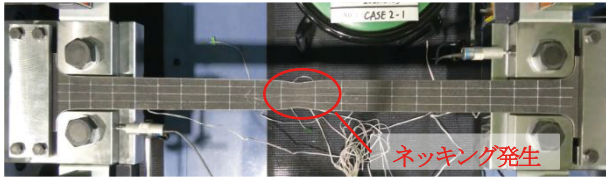


写真-1 材料試験時の試験片ネッキング発生状況 (Case2)

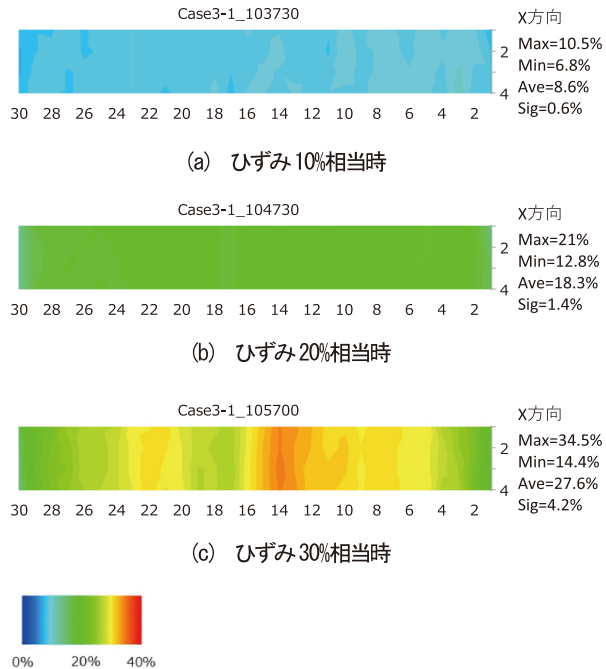


図-4 試験片の変形性状

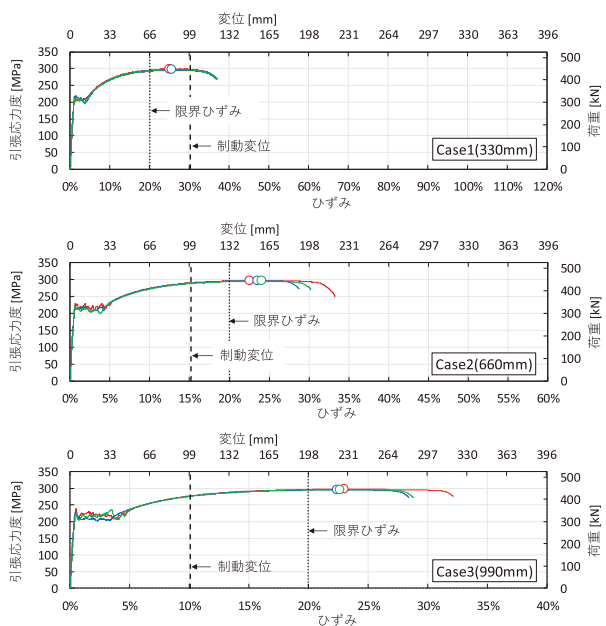


図-5 材料試験による応力度-ひずみ関係

表-1 材料試験による物性値 (平均値)

試験片	下降伏点 [MPa]	10% 応力度 [MPa]	0~10% 応力度比 [-]	引張強さ [MPa]	一様伸び [%]
Case1	203	268	1.32	298	25.5
Case2	204	273	1.34	296	23.7
Case3	206	277	1.35	296	22.2
(ミルシート値)	(211)	-	-	(315)	-

2.4 フェイルセーフ制動装置の加力試験

前節の材料試験より低降伏点鋼の形状を定め、写真-2に示すFS制動装置を製作し加力試験を行った。

加力試験は表-2に示す漸増加力試験と単調加力試験および、ストロークエンドを確認する限界加力試験の3項目とした。加力試験は図-6に示す3000 kN水平一軸サーボ加振機を用いた。センサーを図-7のように配置し、水平力は装置シリンダー側に配置したロードセルで計測し、水平変位はばねロード-シリンダー間に取付けたワイヤー式変位計にて計測した。

漸増加力試験、単調加力試験および限界加力試験で得られた復元力特性を図-8に示す。FS制動装置の復元力特性は図-1の検討時と同様な形状を示し、正側・負側の履歴特性も対称な挙動を示している。また、漸増加力と単調加力のスケルトンは重なっている。限界加力試験においては、装置がストロークエンドに達するまで、動作可能であることを確認できた。なお、ストロークエンドには皿ばねの弾性変形が含まれるため、設計変位の650 mmを若干超えたところで、荷重が立ち上がる。



写真-2 加力試験状況

表-2 加力試験プログラム

No.	試験項目	加力変位 [mm]
押し, (引き)		押し側: -, (引き側: +)
1, (5)	漸増加力試験	0 → -525 → 0, (0 → +525 → 0)
2, (6)		0 → -550 → 0, (0 → +550 → 0)
3, (7)		0 → -575 → 0, (0 → +575 → 0)
4, (8)		0 → -600 → 0, (0 → +600 → 0)
低降伏点鋼交換		
9, (11)	単調加力試験	0 → -600 → 0, (0 → +600 → 0)
10, (12)	限界加力試験	0 → -650 → 0, (0 → +650 → 0)

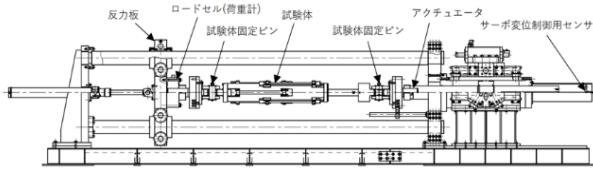


図-6 3000 kN 水平一軸サーボ加振機

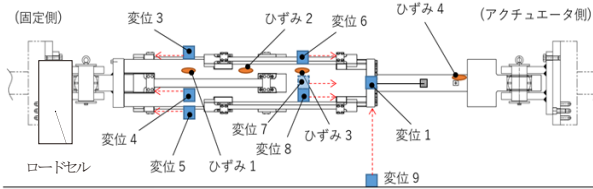


図-7 加力試験におけるセンサー配置

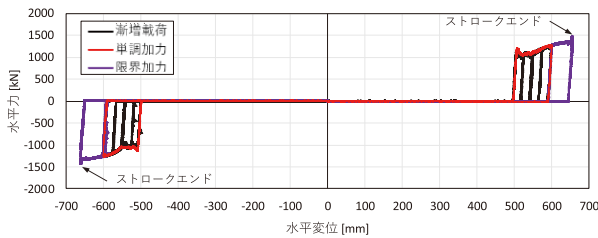


図-8 加力試験におけるフェイルセーフ
制動装置の復元力特性

2.5 フェイルセーフ制動装置の設計特性

低降伏点鋼の材料試験結果より、FS 制動装置の復元力特性の設計値は以下のように定めることとした。

設計制動力： Q_1 は低降伏点鋼の降伏荷重とする。

$$Q_1 = n \cdot A_{LY} \cdot \sigma_{yst} \quad (1)$$

n : 制動材枚数

A_{LY} : 制動材断面積

σ_{yst} : 制動材降伏応力度 (225 MPa)

1次剛性： K_1 は皿ばね，制動材，ばねロッド弾性剛性の直列ばねとする。

$$K_1 = 1 / (1 / K_{DS} + 1 / K_{LY} + 1 / K_{Sh}) \quad (2)$$

K_{DS} : 皿ばねのばね定数

K_{LY} : 制動材弾性剛性

$$K_{LY} = n \cdot A_{LY} \cdot E / L_{LY} \quad (3)$$

E : ヤング率

L_{LY} : 制動材の有効長さ

K_{Sh} : ばねロッドの弾性剛性

$$K_{Sh} = A_{Sh} \cdot E / L_{Sh} \quad (4)$$

A_{Sh} : ばねロッド断面積

L_{Sh} : ばねロッド有効長さ

2次剛性： K_2 は K_1 と制動材の降伏後剛性： K_{dLY} の直列ばねとする。

$$K_2 = 1 / (1 / K_1 + 1 / K_{dLY}) \quad (5)$$

$$K_{dLY} = Q_1(\alpha - 1) / \delta_d \quad (6)$$

δ_d : 設計制動変位 (100 mm)

α : 応力度比 (1.35)

以上によるFS制動装置の設計値を表-3に示す。設計値による制動区間の復元力特性は、図-9に示すように試験結果とよく整合する。次に、試験結果から特性値を読み取り、設計値と比較する。特性値の読み取りは、図-10に示す方法とし、同図②を制動力： Q_L 、③を1次剛性： eK_1 、⑥を2次剛性： eK_2 とする。これら読み取り値は表-3に示す。なお、読み取り値は、漸増加力試験と単調加力試験それぞれの押し側と引き側の合計4ケースの試験結果平均値とした。同表の設計値に対する読み取り値の比：対設計値は±15%以内であり、読み取り値は設計値と良い対応を示す。

表-3 FS 制動装置の制動区間における特性値

項目	1次剛性 [kN/mm]	制動力 [kN]	2次剛性 [kN/mm]
設計値	143.5	1013	3.45
読み取り値	135.3	984	2.99
対設計値	-5.7%	-2.8%	-13.5%

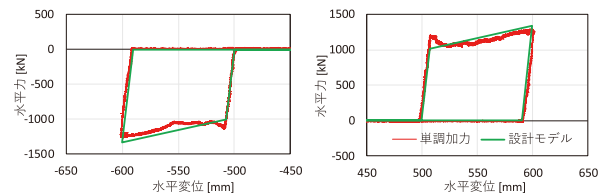


図-9 試験結果と設計特性

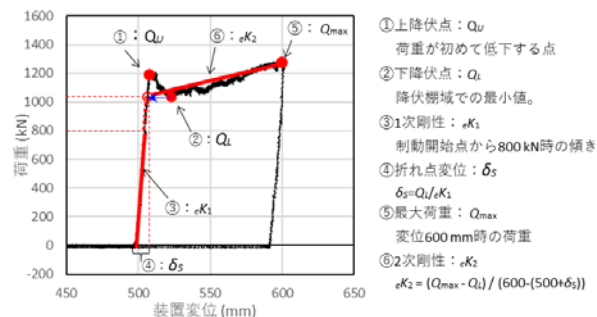


図-10 特性値の読み取り方法

2.4 無感区間の摺動特性

FS 制動装置に設定した無感区間の範囲では、装置はスムーズに伸縮し、免震性能に影響を及ぼしてはならない。FS 制動装置の加力試験の結果から、無感区間のスライド性能を評価した。この区間の摩擦力は非常に小さく、計測ノイズを多く含むので、図-11に示すように変位 50 ~ 450 mm 区間における荷重 - 変位関係から、載荷時と除荷時の平均荷重と回帰直線の勾配を求め、載荷時・除荷時平均荷重の絶対値の平均値を摩擦抵抗力、載荷時・除荷時回帰直線の勾配の平均値を剛性とした。各試験条件で得られた摩擦抵抗力と剛性の平均値を同図に示した。摩擦抵抗力は 2.5 kN であり、免震層全体の復元力に比べて極めて小さい。また、剛性はゼロといって差支えない。したがって、FS 制動装置は無感区間において、免震性能に影響を与えないと言える。

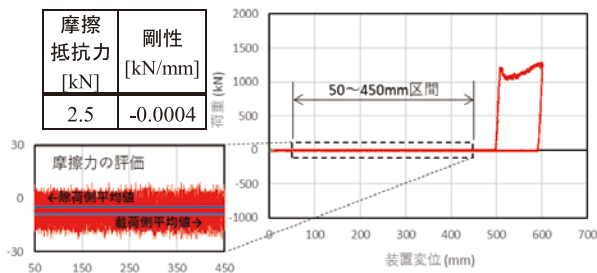


図-11 無感区間の摺動特性

3. フェイルセーフ付き免震構造の地震応答性状

3.1 解析方法

フェイルセーフ制動装置の効果を、地震応答解析により検討する。想定免震建物は鉄筋コンクリート造 15 階建て基礎免震、免震クリアランス 600 mm とした。上部構造については文献¹⁰⁾の桁行方向の諸元を引用した。解析モデルはせん断型質点系モデルとし、上部構造の復元力特性には武田モデルを適用した。減衰は瞬間剛性比例型として免震層固定の 1 次固有周期に対して 3% を上部構造のみに設定した。免震部材は鉛プラグ入り積層ゴム支承：LRB と弾性滑り支承：SSR を併用し、長周期地震動による繰返し変形性能確保のためにオイルダンパー：KYM を追加した。

免震部材の諸元は文献¹¹⁾による上部構造の設計耐力と固有周期の関係を参考に設定している。LRB と SSR の切片荷重の和を上部構造の総重量：123,271 kN で除した切片荷重比は 0.019 とし、KYM のリリーフ荷重を上部構造総重量で除した値は 0.026 とした。この設定による応答変位 400 mm における等価周期は 5.1 秒である。表-4

に免震部材の主要諸元とモデル化について示す。LRB の復元力特性はせん断ひずみ 250% を超えると徐々にハードニングが発生し、300% 以上で顕著となる。想定免震建物の擁壁クリアランスは 600mm であり、積層ゴムのせん断ひずみ 300% に相当する。そのため、FS 制動時はハードニングの影響は少ないとして、修正バイリニアモデルを採用した。

地震応答解析は Newmark-β 法 (β=0.25) による直接時間積分とし、解析時間間隔 0.001 秒にて行った。免震部材の繰返し変形による性能低下の考慮は文献¹²⁾の簡略法を用いた。入力波は OS1 とし、この時の設計クライテリアとして免震層の最大応答変位を 500 mm 以下とした。また、設計想定を超えて FS 制動装置が機能する入力として、OS1 の振幅を 1.2 倍に拡幅し (以下、OS1 × 1.2)、FS 性能の検証を行った。FS 制動時の目標性能として、OS1 × 1.2 入力において上部構造と擁壁との衝突を回避し、その際の上部構造の層の最大塑性率を 1 以下とした。

表-4 免震部材の主要諸元とモデル化

種別 (数量)	主要諸元	モデル化 (数値は 1 基あたり)
LRB (10 基)	外形：φ1000 mm 鉛径：φ180 mm ゴム総厚：200 mm	修正バイリニア 1 次剛性*：19.8 kN/mm 2 次剛性*：1.52 kN/mm 切片荷重*：202.9 kN *せん断ひずみ 100% 時
SSR (4 基)	外形：□600 ゴム総厚：35.1 mm 滑り材：□300 × 4 枚	ノーマルバイリニア 摩擦係数：0.014 1 次剛性：8.1 kN/mm
KYM (4 基)	ストローク：±600mm ピン間距離：2800mm	逆行型バイリニア (カー-速度) 最大減衰力：1000 kN リリーフ荷重：800 kN リリーフ速度：320 mm/s 1 次減衰係数：2.5 kN・s/mm 2 次減衰係数：0.1695 kN・s/mm

3.2 フェイルセーフ諸元の設定

上部構造耐力や適用した免震部材に対して有効な FS の諸元を把握するため、パラメトリックスタディによる検討を行った。検討における制動力の指標は、上部構造の総重量に対する制動力の比である制動係数：W と、FS 制動装置が免震層の応答に影響を与えない無感区間の変位量：δ_F の 2 つとした。検討指標を表-5 に示す。

表-5 フェイルセーフ諸元検討指標

制動係数：W[-]	0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07
無感区間の変位量：δ _F [mm]	350, 400, 450, 500, 550

本検討により得られた結果から、上部構造の最大塑性率と免震層の最大変位の関係を図-12のように整理した。同図では、制動力の大きさを意味するW別にプロットし、各プロットは免震層最大変位について左から δ_F の小さい順に並んでいる。なお、図中の塗りつぶしのシンボルはFS目標性能を満たすFS可能条件を示している。FS制動装置の適用可否の判定については、3.1節で設定したFS目標性能において、免震層の変位がFS制動装置の設計制動変位である100mm以内に制動された条件をFS可能とした。例えば、 δ_F が最小の350mm(最も左のシンボル)の場合、図-12の免震層最大変位は、 $\delta_F = 350$ mmと設計制動変位100mmの和である、450mm以下であることがフェイルセーフの必要条件となる。

以上の判定方法によりFS可能と判断されたのは全部で10ケースであった。また、これら結果より上部構造の最大塑性率が小さく、かつ上部構造の免震応答を可能な限り阻害しない最適なFS諸元として、 $W = 0.03$ 、 $\delta_F = 500$ mmを選定した。この条件における制動力は、上部構造の総重量123,271 kN \times 0.03 = 3698 kNとなり、本論文のFS制動装置に換算すると約4本分に相当する。

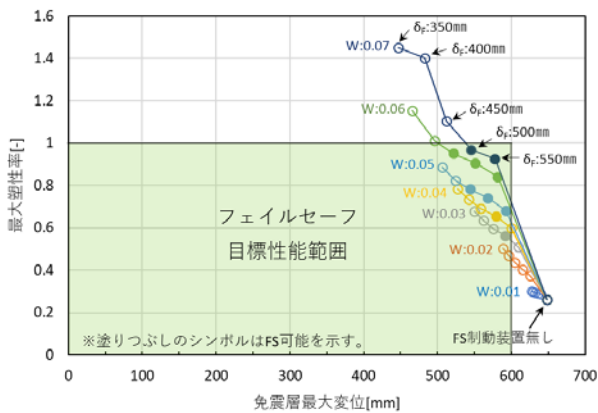


図-12 フェイルセーフの適用可能範囲

3.3 解析結果

地震応答解析による免震部材の履歴ループを図-13に示す。同図の最上段と2段目はFS制動装置が無い場合におけるOS1入力時とOS1 \times 1.2入力時の免震支承の履歴ループである。また3段目は前節で選定した諸元のFS制動装置 ($W = 0.03$ 、 $\delta_F = 500$ mm)を設けた場合における、OS1 \times 1.2入力時の免震支承とFS制動装置の履歴ループである。なお、FS制動装置無しの場合については繰返し変形による性能低下を無視した履歴ループも破線で示す。オイルダンパーについては繰返し変形による性能低下を無視できることから、図の錯綜を防ぐためFS制動装置付きの場合についてのみ最下段に示す。

FS制動装置が無い場合、OS1入力における最大変位は433mmであり、設計クライテリアの500mm以下である。OS1 \times 1.2入力における最大変位は649mmと免震クリアランスの600mm以上となっており、この入力レベルにおいては上部構造が擁壁に衝突する可能性がある。一方、FS制動装置付きのOS1 \times 1.2入力における最大変位は592mmであり、擁壁クリアランス内に留まる。FS制動装置は500mmを超える過大变位を経験すると、無感区間が漸増しながら、設計変位の600mmまで制動を行う復元力特性であるが、この入力条件では正側に1回作用し、免震層の過大变位を制動している。

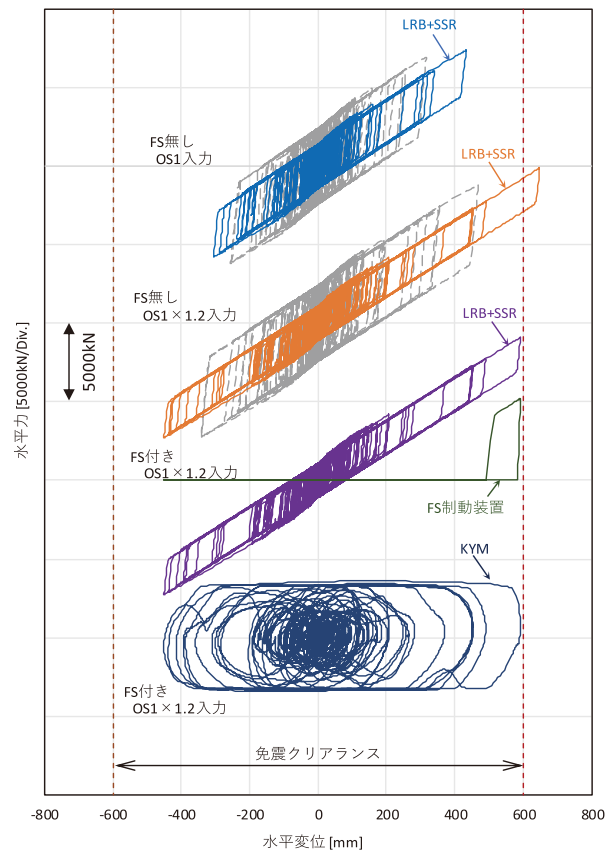


図-13 各免震部材の履歴ループ(解析結果)

次に上部構造の最大応答値分布を図-14に示す。加速度応答はFS制動装置の作用により増大し、特に第1層での増大が顕著となる。最大変位分布はFS制動装置の作用により、免震層の最大変位は600mm以下に留まるが、FS制動装置無しの場合に比べ上部構造の変形が進んでいる。層せん断力係数は、FS制動装置の作用による加速度応答の増大に伴い、全層にわたり大きくなる。上部構造の層の塑性率もFS制動装置の作用により、FS装置無しに対して増大するが、最大で3層目の0.56程度であり、十分に小さい。

FS制動装置が作用した際の各層の最大層間変形角を、解析モデルの上部構造スケルトンカーブに重ねて示す

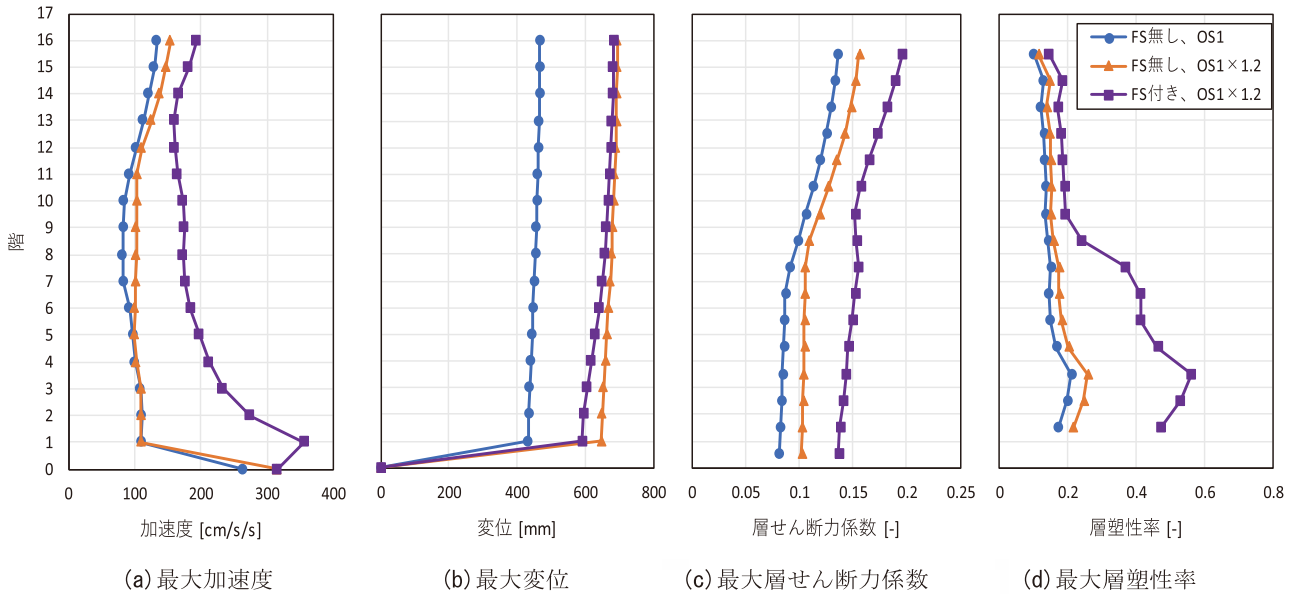


図-14 最大応答値分布

(図-15)。FS 制動装置の作用による最大層間変形角は 4 層目の 1/249 であり、全層にわたり 1/200 以下に抑えられている。これより FS 制動装置は上部構造に過大な損傷を与えることなく、擁壁衝突が回避可能である。

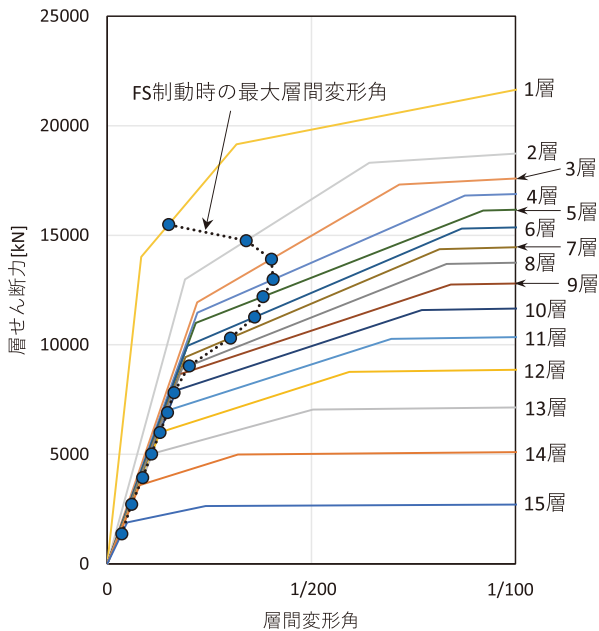


図-15 フェイルセーフ制動時の上部構造最大層間変形角

4. まとめ

想定を超える巨大地震で発生が懸念される長周期地震動に対して免震層の過大变位を免震クリアランス内に制動し、その際の上部構造の損傷を最小限に留めることを

目的としたフェイルセーフ制動装置を開発し、その効果を地震応答解析により確認した。FS 制動装置の加力試験では、開発コンセプト通りの復元力特性を得ることができた。地震応答解析では、FS 制動装置を適用することにより巨大地震による免震層の過大变形を免震クリアランス内に制動可能であり、上部構造の損傷も最小限に抑えられた。

今後の課題としては、FS 制動装置の動的加力試験あるいは材料試験による、実用速度域の性能確認が必要であると考えている。また、本報告での FS 付き免震構造の地震応答解析は、せん断型質点系モデルによる水平 1 方向のみに関する検討であるため、水平 2 方向応答を考慮した検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 22 年度建築基準整備促進事業 成果一覧（課題番号 27-3（平成 22～24 年度）・S11（平成 25 年度）https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/jutakukentiku_house_fr_000016.html（2021.12 参照）
- 2) 国土交通省住宅局建築指導課：超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について（技術的助言）2016.6.24
<https://www.mlit.go.jp/common/001136168.pdf>（2021.12 参照）
- 3) 渡部 翔太郎 他：免震建物の擁壁衝突時における擁壁-背後地盤の抵抗特性，日本建築学会構造系論文集，第 81 巻，第 727 号，pp. 1413-1421, 2016. 09
- 4) 犬伏 徹志 他：擁壁が弾塑性特性を有する場合の簡易評価法への適用 - 免震建物の擁壁衝突時における擁壁部水平抵

- 抗の簡易評価に関する研究 その2- 日本建築学会構造系論文
文集, 第81巻, 第730号, pp.1993-2003, 2016.12
- 5) 丸尾 純也 他: ねじれ応答を伴う免震建物の擁壁衝突に関する地震応答解析, 日本建築学会技術報告集, 第27巻, 第66号, pp.632-637, 2021.6
- 6) 犬伏 徹志 他: 免震建物の擁壁衝突時における擁壁水平抵抗簡易評価法の1質点系への集約, 日本建築学会構造系論文
文集, 第86巻, 第783号, pp.717-726, 2021.5
- 7) 寺村 彰 他: 免震装置のフェイルセーフ機構に関する研究-
フェイルセーフ装置の基本動特性-, 大林組技術研究所報,
No40, 1990.
- 8) 三輪田 吾郎 他: 緩衝装置を含めた免震建物衝突設計手法
の検討(その5) 高減衰ゴム製ブロックの復元力特性, 日
本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.551-552,
2016.8
- 9) 濱口 弘樹 他: フェイルセーフ機構を備える鉛プラグ入
り積層ゴム支承の実用化に関する実験的研究, 日本建築
学会構造系論文集, 第83巻, 第749号, pp.1009-1019,
2018.7
- 10) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の応答制御
技術委員会 報告書・論文集 2002.6
- 11) 大宮 幸 他: 長周期地震動対策に備えた直近の免震建物の構
造特性に関する調査・分析, 日本建築学会技術報告集, 第
25巻, 第59号, pp.61-66, 2019.2
- 12) 建築研究所: 長周期地震動対策に関わる技術資料・データ
公開特設ページ
[https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/
lpe/index.html](https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/lpe/index.html) (2021.12 参照)

Fail-safe braking device for seismic isolation against mega earthquakes

Takahito NAKAMURA, Takashi KATO, Shuhei KANEKO, Chou KEI and Masaru KIKUCHI

A new fail-safe braking device has been developed to protect seismically-isolated structures against ground motions caused by mega earthquakes. The purpose of the device is avoiding collision between the superstructure and retaining wall in the base isolation layer, with the superstructure sustaining damage. A full-scale prototype fail-safe braking device was fabricated, and loading tests were conducted. Expected performance was exhibited in the test. Seismic response analysis was also conducted to confirm the effectiveness of the device.