

令和4年度 建築基準整備促進事業

P14 大地震時におけるエレベーターの 閉じ込め防止に関する検討

成果報告会資料

令和5年4月25日

【事業者】

代表	一般財団法人 日本建築設備・昇降機センター	理事長	坂本 努
	学校法人 東京電機大学	理事長	石塚 昌昭

1.事業の目的等

1.1 事業経緯、目的

建築基準法施行令において、地震時にエレベーターの利用者がかご内に閉じ込められることなく速やかに避難ができるよう、地震時等管制運転装置の設置を義務付けている。

しかしながら、これまでに発生した大地震である東日本大震災、熊本地震、大阪府北部地震等においては、閉じ込めが広い範囲で多数発生している。

また、今後、首都直下地震が起こると最大1.7万人の閉じ込め事故が発生することが想定されている。

このため、本事業では令和3年度に引き続き、次の①及び②の内容を検討することとした。

① 閉じ込め防止のための耐震強化対策の検討

地震時の建築物全体の揺れによる、昇降路の壁の変形、破壊、エレベーターの乗場の戸と隣接する壁との衝突等による戸開閉障害、スイッチ及びセンサ類の故障等による閉じ込め等の発生要因を分析し、対策の立案及び対策効果を実験等によって検証する。

② 閉じ込め等対策としてのリスタート運転機能及び仮復旧運転診断領域拡大の検討

地震後の閉じ込め等対策として、①の検討結果をもとにエレベーターの運行に係る建物関係情報とエレベーター関係情報との共有化等により、リスタート運転の範囲拡大及び自動診断仮復旧運転の領域拡大を図る。

検討にあたっては、「大地震時におけるエレベーターの閉じ込め防止等に関する検討委員会」その下に「耐震対策検討WG」及び「仮復旧運転検討WG」を設置し、地震時及び地震後における建築物の安全を確保し、エレベーターの早期の復旧対策を含め、喫緊の課題となっているエレベーターの閉じ込め防止対策を更に強化した、実現可能な対策の検討及び課題整理を目的として検討を行った。

1.2 検討方法、手順

1.2.1 閉じ込め防止のための耐震強化対策の検討

閉じ込め防止のための耐震強化対策について、次の図の手順により検討した。

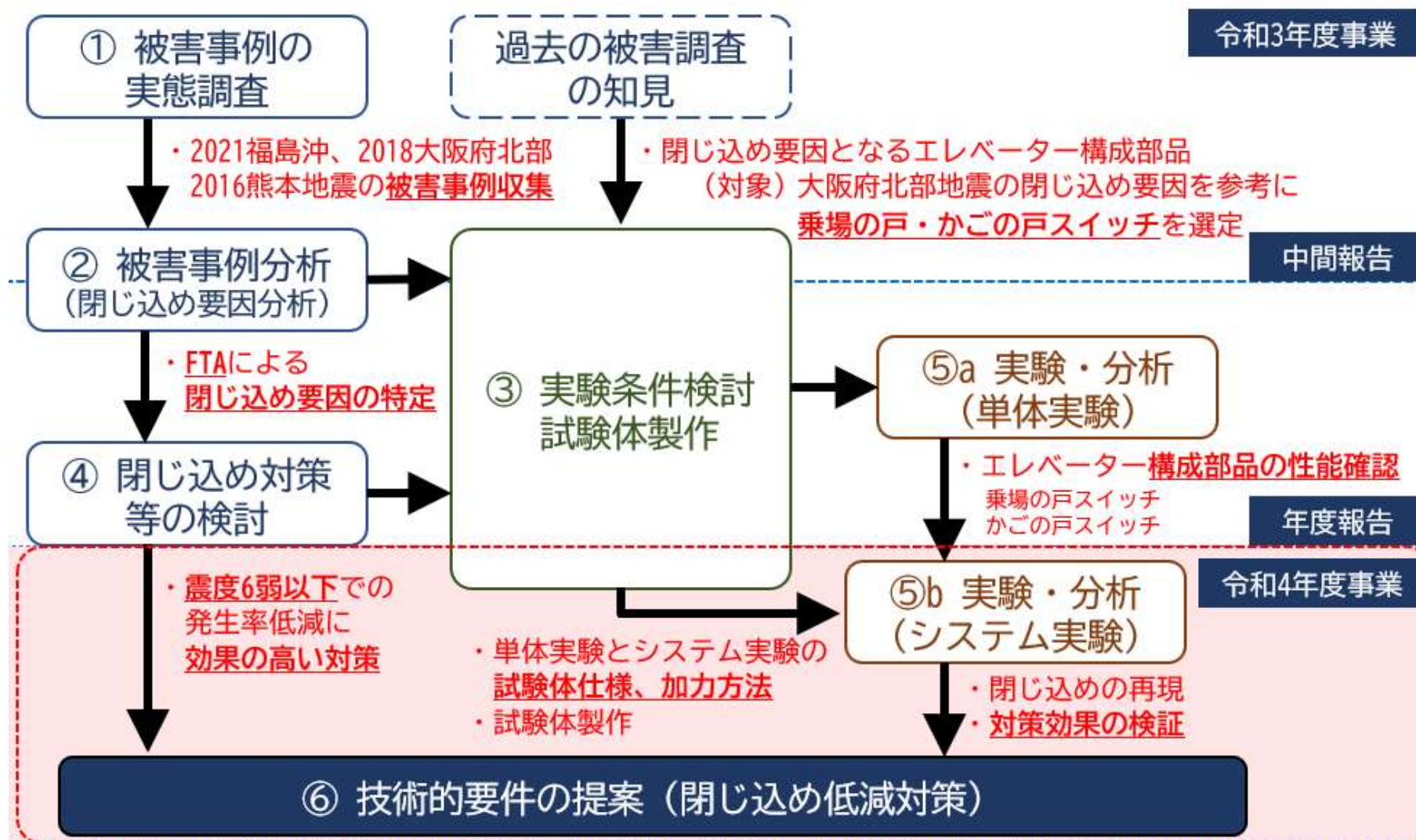


図1.2.1 閉じ込め防止のための耐震強化対策の検討手順

1.2.2 閉じ込め等対策としてのリスタート運転機能及び仮復旧運転診断領域拡大の検討

閉じ込め等対策としてのリスタート運転機能及び仮復旧運転診断領域拡大について、次の図の手順により検討した。

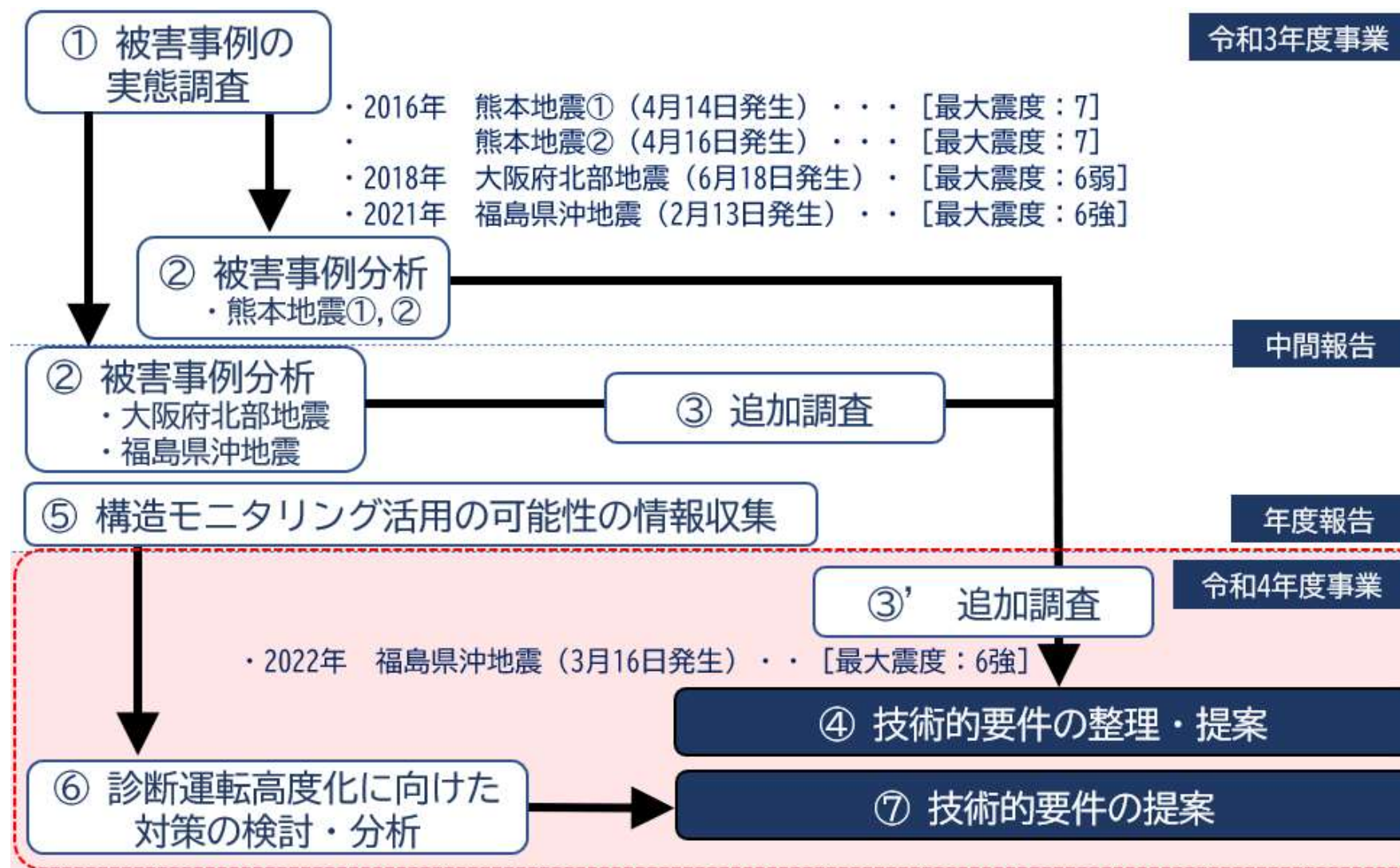


図1.2.2 閉じ込め等対策としてのリスタート運転機能及び仮復旧運転診断領域拡大の検討手順

1.3 工程計画

1.3.1 閉じ込め防止のための耐震強化対策の検討

閉じ込め防止のための耐震強化対策を検討するにあたり、次の図に示す工程計画を立て実施した。

表1.3.1 閉じ込め防止のための耐震強化対策の検討工程計画

事業のフロー		事業の工程計画																																					
項目	実施内容	令和3年度事業															令和4年度事業																						
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3		
被害事例の実態調査	2021年福島県沖地震、2018年大阪府北部地震、2016年熊本地震等の近年に発生した大地震による建物並びにエレベーターの損傷及び閉じ込め事例を収集する。																																						
被害事例分析 閉じ込め要因の分析	震度6弱以下地域の被害事例について、発生頻度の高い損傷部位、閉じ込め要因を特定する。																																						
実験条件検討 及び 試験体製作	発生頻度の高い要因による閉じ込めが発生した事例のエレベーターと建物との仕様を調査し、単体実験及びシステム実験の条件を検討する。また、実験の試験体を製作する。																																						
閉じ込め対策等の検討	発生頻度の高い閉じ込め要因に対して、発生を防止するための対策を検討する。単体実験での分析結果も踏まえ対策を検討する。																																						
実験、実験結果の分析	エレベーターの構成部品の特性を単体実験により確認する。また、エレベーター機器と建物部材とを組み合わせた試験体を用いたシステム実験により、閉じ込め発生条件(振動、変形の大きさ)の確認と閉じ込め防止対策の効果とを評価する。																																						
技術的要件の提案 閉じ込め低減対策	閉じ込め発生の条件(振動、変形の大きさ)を踏まえて、閉じ込めを防止するための要件をまとめる。																																						
報告書	各年度の報告書をまとめる。																																						

1.3.2 閉じ込め等対策としてのリスタート運転機能及び仮復旧運転診断領域拡大の検討

閉じ込め等対策としてのリスタート運転機能及び仮復旧運転診断領域拡大等を検討するにあたり、次の図に示す工程計画を立て実施した。

表1.3.2 閉じ込め等対策としてのリスタート運転機能及び仮復旧運転診断領域拡大の検討工程計画

事業のフロー		事業の工程計画																											
項目	実施内容	令和3年度事業												令和4年度事業															
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3				
被害事例の実態調査	「1. 閉じ込め防止のための耐震強化対策の検討」と共同で活動する。																												
被害事例分析 部材、機器の損傷分析	「1. 閉じ込め防止のための耐震強化対策の検討」の「被害事例分析 閉じ込め要因の分析」と併せ活動する。																												
被害事例分析 復旧方法の分析	平常運転に復旧するために保守技術者の派遣を要したエレベーターについて、推定震度、建物仕様、エレベーター仕様及び復旧方法等を整理、分析する。																												
地震感知器の設定値(診断運転)の要件の検討	建物の仕様、エレベーターの仕様(耐震クラス)ごとの診断運転用の地震感知器の設定値について妥当性を検証する。																												
地震感知器の設定値(診断運転)の要件の提案	過去の大地震の被害状況分析から、診断運転用の地震感知器の設定値(上限値)のあり方についてまとめる。																												
診断運転高度化に向けた対策の検討・分析	耐震強化対策、構造モニタリングシステムのデータの活用等による診断領域の拡大について検討する。なお、耐震強化対策については、「1. 実験結果の分析」を活用する。																												
技術的要件の提案 閉じ込め低減対策、現地情報共有による仮復旧運転高度化	閉じ込め対策を踏まえて、閉じ込めを防止するための仮復旧運転高度化の要件をまとめる。																												
報告書	各年度の報告書をまとめる。																												

2.閉じ込め防止のための耐震強化対策の検討

2.1 システム実験の概要

2.1.1 システム実験の目的と課題（報告書P4～）

耐震対策検討のために被害調査において発生件数の多かった次の6つの閉じ込め要因を再現する

- ・**走行不可**：①かご又は釣合おもりの脱レール、②かご室の固渋、③乗場及びかごの戸スイッチの開路
- ・**戸開不可**：④乗場の戸の変形及び損傷、⑤かご枠及びかご室の変形、⑥ドアの係合異常

2.1.2 システム実験装置の概要（吊りフレーム及び試験体と測定系）

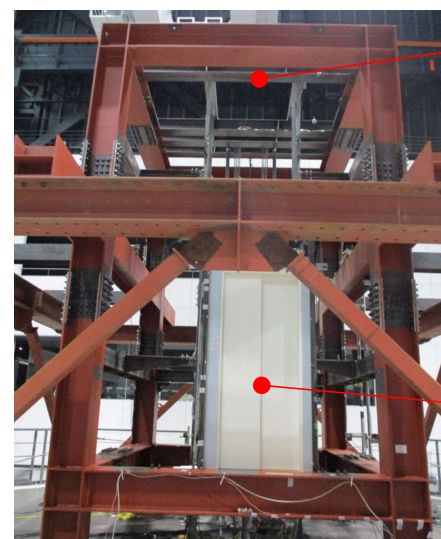
・**試験期間**：令和4年6月20日～8月22日（加振は7月20～29日の6日）

・**加振装置**：清水建設技術研究所3次元大型振動台

・**試験体**：13人乗り機械室レスエレベーター

・**測定項目**：

加速度計	： 58ch
レーザ変位計	： 18ch
ひずみゲージ	： 60ch
戸スイッチ電圧	： 2ch（かご、乗場）
動画撮影カメラ	： 9ch



ロープ支持部

鉄骨支持
フレーム
(高さ6m)

かご
(背面に釣合おもり)

2.1.3 システム実験の条件（報告書P7～）

- ・**振動特性把握**：スweep波（水平0.5-5[Hz]、上下1-10[Hz]）、正弦波（100[Ga1]、1-7[Hz]）、建物応答波（最大100[Ga1]に補正した12波）
- ・**損傷・閉込再現**：正弦波（200[Ga1]、水平2-5[Hz]）、建物応答波（5強、6弱の2波の1～2倍）

※建物応答波は震度4から6弱の地域の建物の上層階で観測された応答波

2.2 システム実験結果

2.2.1 振動特性の把握について（報告書P39～）

(1) 振動特性（共振振動数）

- ・スイープ加振の計測データから乗場床に対する試験体各部の伝達関数を計算
- ・かご、釣合おもりともに共振振動数は5[Hz]付近
- ・ガイド装置、振れ止め、かご位置、かご内負荷おもり等により共振振動数に若干の変化あり

(2) 最大応答加速度（応答倍率）

- ・共振振動数付近での正弦波加振から振動台に対する試験体各部の加速度応答倍率を計算
- ・耐震設計（09耐震以降、耐震クラスA14、高さ60m以下）の想定値である5（建物応答倍率 $2.5 \times$ 機器応答倍率2）を超える応答倍率を観測

(3) 最大相対変位

- ・試験体各部の最大変位は概ね設計で想定した範囲であり、塑性変形はほとんど生じなかった

(4) 戸スイッチの電圧

- ・振動数2, 3[Hz]の正弦波加振とほとんどの建物応答波に対して戸スイッチの開路が発生
- ・戸スイッチの開路は加振台加速度100[Ga1]程度で発生しており、大阪北部地震で比較的小さい地震規模にもかかわらず戸スイッチ開路による閉じ込めが多数発生したのと整合

(5) 試験体各部の時刻歴応答

- ・かご枠、かご室や釣合おもりは概ね加振台の加振周波数で揺れた。また、振動数により上部と下部では加速度に差があり、回転するような振動モードも発生した。
- ・かご/乗場戸周辺は、戸と敷居や扉同士など機器の衝突により、加振周波数より高い振動数の揺れが見られた

2.2.2 損傷状態の把握について(報告書P64～)

(1) 正弦波および建物応答波に対する各部のひずみ

- ・ 加振台加速度300～400[Gal]程度の建物応答波に対して
かご枠の最大加速度1200～1500[Gal]超が発生し、
かご室振れ止めに許容応力を超えるひずみが計測された
- ・ このとき 振れ止めは変形したが (図2.2.1)、閉じ込めに
至る事象は発生しなかった
- ・ その他の部位には、いずれの実験ケースでも許容応力を
超えるひずみは発生しなかった

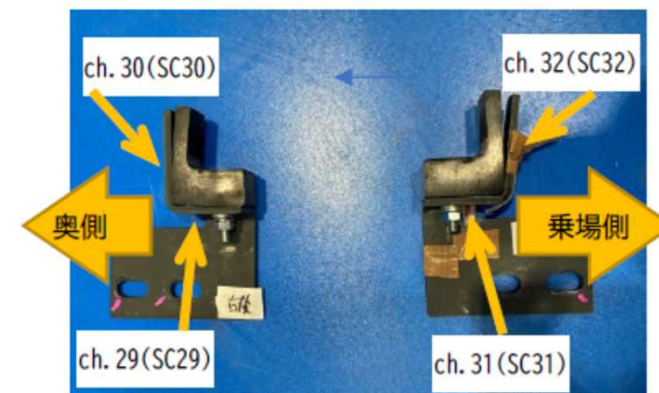


図2.2.1 かご室振れ止めの加振実験後の変形

(2) 建物の層間変形による扉への影響

- ・ 地震による建物の変形を想定して 乗場戸を設置する三方
枠の上部をジャッキで強制的に変位させて、戸開閉動作
及び戸スイッチの動作を確認した(図2.2.2)
- ・ 一般的な鉄筋コンクリート造や鉄骨造の建物における大
地震時の最大層間変位角 (1/100) に相当する 20[mm]の
強制変位を加えても戸開閉動作、戸スイッチ検知とも正
常に行なえた



図2.2.2 乗場三方枠へ強制変位を与えた場合の戸開閉動作確認

2.2.3 閉じ込め事象の再現について（報告書P81～）

表2.2.1 システム実験における閉じ込め要因の再現結果

閉じ込め要因		結果	
走行不可	かご又は釣合おもりの脱レール	再現できず	・かごレールブラケット（上／下段）ひずみ（図 2.2.23） ・かごレール（上／下段）ひずみ（図 2.2.24、2.2.25） ・かごガイド装置（上／下段）ひずみ（図 2.2.26、2.2.27） ・釣合おもりレールブラケット（上／下段）ひずみ（図 2.2.31） ・釣合おもりレール（上／下段）のひずみ（図 2.2.32、2.2.33） ・釣合おもりガイド装置（上／下段）ひずみ（図 2.2.34、2.2.35） ※今回の実験では、脱レールに結びつくような大きな変形・変位は発生しなかった。
	かご室の固渋	再現できず	・かごレール（上／下段）ひずみ（図 2.2.24、2.2.25） ・かごガイド装置（上／下段）ひずみ（図 2.2.26、2.2.27） ・かご枠縦柱中央部ひずみ（図 2.2.28） ※今回の実験では、干渉が想定される部位（乗場とかごの戸廻り等）のクリアランスを超えるような変形は発生しなかった。
	乗場及びかごの戸の戸スイッチの開路	○	・表 2.2.1 にも示す通り、正弦波加振 100[Gal]程度でも戸スイッチの瞬間的な開路発生を確認。
戸開不可	乗場の戸の変形・損傷	△	・試験体の三方枠をジャッキで強制的に変形させ建物変形を模擬した試験において、三方枠の X 方向への変形角 1/100 でも乗場戸の開閉に支障はなかった（三方枠に対し強制変位を加えてドア動作確認、20[mm]まで問題なく稼働）。
	かご枠・かご壁の変形	△	・かご枠縦柱中央部ひずみ（図 2.2.28） ・かご枠かごドア取付梁のひずみ（図 2.2.29） ・かご室振れ止めのひずみ（図 2.2.30） ※かご枠、かご室各部位（振れ止め除く）には、いずれも実験ケースでも戸開閉に影響がでるような変形は発生しなかった。ただし共振的な振動が発生した場合、50[Gal]程度の加振でも目視でわかる程度のかご枠とかご室の変位が発生した。塑性変形はせずともクリアランスを超える変位が発生し、機器同士が干渉して乗場戸/かご戸の動作不良になる可能性は考えられる。
	ドアの係合異常（ドア係合装置の変形・損傷）	再現できず	・かご枠かごドア取付梁のひずみ（図 2.2.29） ※かご室が静止状態での実験であり、完全にドアが完全に係合した状態か、全く係合していない状態であったため、係合装置が変形・損傷することはなかったが、かごが運転中に、中途半端な係合状態で大きな揺れが発生した場合、かごと乗場の係合装置間で衝突、干渉が発生して、変形、損傷することは考えられる。

今回のシステム実験では最終的に震度5強を超える想定 of 地表面加速度での加振も実施したが、かご／乗場戸スイッチの開路以外に、脱レールやかごの固渋などの現象は再現できなかった（表2.2.1）。

全ての実験ケースを通じて試験体各部に発生したひずみは振れ止め部を除いて弾性変形域内にとどまっており、「昇降機技術基準の解説 第4部 昇降機耐震設計・施行指針2016年版」に示された耐震設計の有効性が確認できた。

しかしながら、実際の地震発生後の被害調査結果からは、今回の実験ケースレベルの地震でも閉じ込めは発生しており、この差異の原因を2.3章で考察する。

2.3 システム実験結果の分析と考察

2.3.1 現行耐震指針及び地震被害事例の調査結果との比較分析（報告書P82～）

(1) 現行耐震指針によるエレベーターの耐震設計

現行耐震指針の運行限界耐力（運行を維持できる範囲）と安全限界耐力（かごを吊る機能が維持できる範囲）における耐震クラスと建物基礎部の想定加速度の関係を示す（表2.3.1）。

(2) 地震の強さを表す震度（震度等級）について

地震時の建物基礎部加速度が同じ120[Gal]でも、周波数が3.3～5[Hz]程度ならば震度4～5弱だが、0.6[Hz]付近の揺れならば震度5強に相当する（図2.3.1）。

(3) 地震時の閉じ込め防止等への対応拡大について

現行耐震指針は、地震波の周波数特性に関係なく地表面想定加速度まで耐えられる設計であり、加速度振幅が運行限界耐力を超えた地震でも、地震波の周波数によっては診断運転により仮復旧運転を実施できる余地があると考えられる。

表2.3.1 エレベーターの耐震クラスと建物基礎部想定加速度の関係概念図

耐震クラス	建物の高さ	建物基礎部の想定加速度 [Gal]					
		100	200	300	400	500	600
A ₁₄	60m 以下						
	60m 超え						
S ₁₄	60m 以下	① 稀に発生する地震 (運行限界耐力)			② 極めて稀に発生する地震 (安全限界耐力)		
	60m 超え						

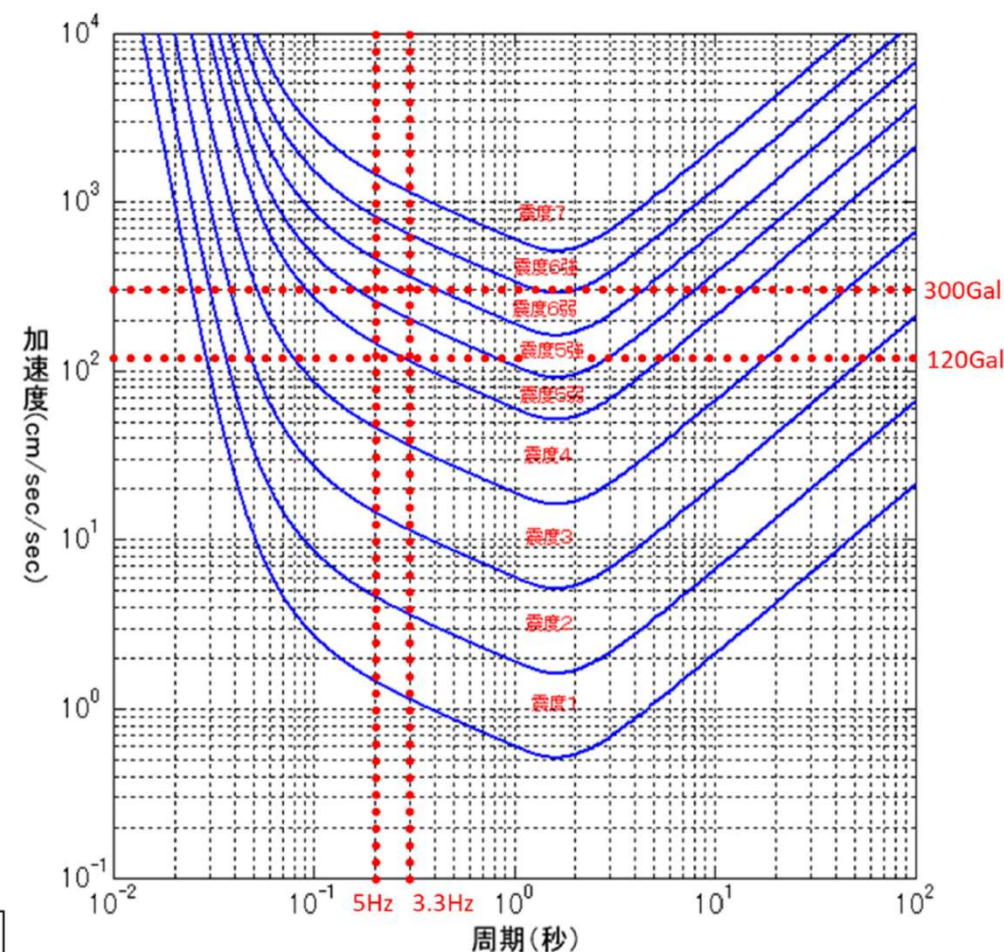


図2.3.1 周期及び加速度と震度（理論値）の関係
（均一な周期の振動が数秒間継続した場合）
気象庁ホームページより

2.3.2 閉じ込め発生状況の推定と対策について（報告書P86～）

(1) システム実験における閉じ込め要因の再現について

今回の実験では、最終的に実際の地震観測波（震度5強相当）の2倍の振幅での加振まで行ったが、戸スイッチの一時的開路以外に閉じ込めに至るような事象は再現できなかった。これは地震波による慣性力が動的荷重であり、その周波数成分によっては想定加速度を超えても機器破損・変形に至らない場合があることや、かご室とレールブラケットや乗場との位置関係等が、閉じ込めが発生し易い条件を模擬しきれていなかったこと等が考えられる。

また、乗場の戸の変形及び損傷に関しては、乗場三方枠にジャッキで強制変位を発生させた試験を実施したが、戸開閉方向（乗場から見て左右方向）での変形角1/100程度でも乗場の戸の開閉は正常に行えた。

(2) 閉じ込め要因の発生可能性と対策に関する考察

大阪北部地震で震度が比較的小さいにもかかわらず戸スイッチ開路による閉じ込めが多く発生したのは、本実験でも地表面加速度100[Gal]程度で戸スイッチ開路したことから説明できる。これには、すでに耐震指針に取り込まれているリスタート運転が有効である。

その他の閉じ込め事象発生は、地震波で引き起こされる慣性力による機器変形・破損だけではなく、地震の動的荷重によって発生する共振的振動による機器同士の干渉や衝突による破損や変形が影響していると考えられる。耐震性の向上には、単に構造強度を上げるよりも、かご周辺機器や乗場、昇降路内機器同士の衝突、干渉、離脱を回避する方策（例えばボルト締結部の長穴におけるズレ防止や振れ止め部材によるかご室とかご枠の変位量の制限など）が有効となる。ただし、レールと案内装置、かご室とかご枠、ドア係合部分、ドアと敷居など可動部分のクリアランスは、機器のスムーズな動作や乗り心地などの快適性にも関係するため慎重な検討を要する。

また地震後の故障調査結果分析においては、冠水や建築物の破損等の発生も地表面加速度300[Gal]程度から発生しており、耐震性向上のためには、エレベーター機器とともに建物側対策と合せた対策が必要である。

3.閉じ込め等対策としてのリスタート運転機能及び仮復旧診断運転領域拡大の検討

3.1 被害事例の実態調査結果（追加調査結果）

令和3年度の地震被害調査に追加し、令和4年3月16日に発生した福島県沖地震の被害調査を実施した。令和3年度の被害調査及び今回の追加調査での地震感知器が動作（専門技術者が復旧）したエレベーターにおける復旧作業有無状況を以下表に示す。

結果、令和3年度の調査と概ね同様の98.76[%]が閉じ込めや物損がなかった（復旧作業を要しない）ことが確認された。

これを踏まえ、昨年度検討した閉じ込め時リスタート運転による閉じ込め救出の拡大対象および専門技術者が閉じ込め救出やエレベーター復旧作業に注力することが期待できる物損のないエレベーターの診断による自動仮復旧の拡大に向けた具体的要件について検討を進めた。

表3.3.1 復旧作業要否状況

		令和3年度調査					令和4年度追加調査		単位：台	
		熊本①&②	大阪府北部	福島県沖	計	構成率	福島県沖	構成率	合計	構成率
地震時管制運転装置 地震計（低）作動台数	復旧作業否	19,701	66,479	37,964	124,144	100.00%	54,329	100.00%	178,473	100.00%
	物損あり	1	0	0	1	0.00%	0	0.00%	1	0.00%
	物損なし	18,749	65,558	37,458	121,765	98.08%	53,654	98.76%	175,419	98.29%
	復旧作業要	951	921	506	2,378	1.92%	675	1.24%	3,053	1.71%
	閉じ込めあり	53	365	11	429	0.35%	37	0.07%	466	0.26%
	物損あり	31	40	5	76	0.06%	6	0.01%	82	0.05%
	物損なし	22	325	6	353	0.28%	31	0.06%	384	0.22%
	閉じ込めなし	898	556	495	1,949	1.57%	638	1.17%	2,587	1.45%
	物損あり	895	533	493	1,921	1.55%	632	1.16%	2,553	1.43%
	物損なし	3	23	2	28	0.02%	6	0.01%	34	0.02%

3.2 地震による閉じ込め発生時の救出運転（閉じ込め時リスタート運転）適用拡大

現行の地震時管制運転装置の一般的な基本フロー例を以下図に示す。エレベーター走行中に地震が発生した場合、エレベーターは基本的に自動で最寄階に停止する。エレベーターが急行ゾーン走行中（10秒程度の走行で最寄階に停止できない状態）で、S波感知器（高）が作動した場合は、一旦停止後手動操作で最寄階に停止する。よって、地震によるエレベーター機器の被害や安全装置の動作がなければ地震による閉じ込めは起こらない基本フローとなっているが、調査において手動操作による運転に至らず閉じ込めとなっている事象が確認されたため、本閉じ込め防止に向け、自動での運転を可能とする課題について検討した。

検討内容
① 急行ゾーン特有の機器被害について ⇒急行ゾーンによる機器被害リスクが増すことはない。
② 急行ゾーン特有の安全上の懸念事項について ⇒急行ゾーンによる安全上のリスクが増すことはない。 ※かご室が固渋した場合、救出・復旧に長時間を要する 場合がある。（現行も同様）
③ 昇降行程が長いことによる懸念事項について ⇒長尺物の引っ掛かり異常を検知し停止する機能具備が 望ましい。（現行も同様）
④ 走行時間（距離）が長くなることの懸念事項について ⇒綱車が空転し、長時間運転するとロープが破断するリス クが高くなるため、綱車の空転を検知する必要がある。 ⇒アナウンス、かご内表示にて乗客に救出運転を行っている 旨お知らせする機能が推奨される。

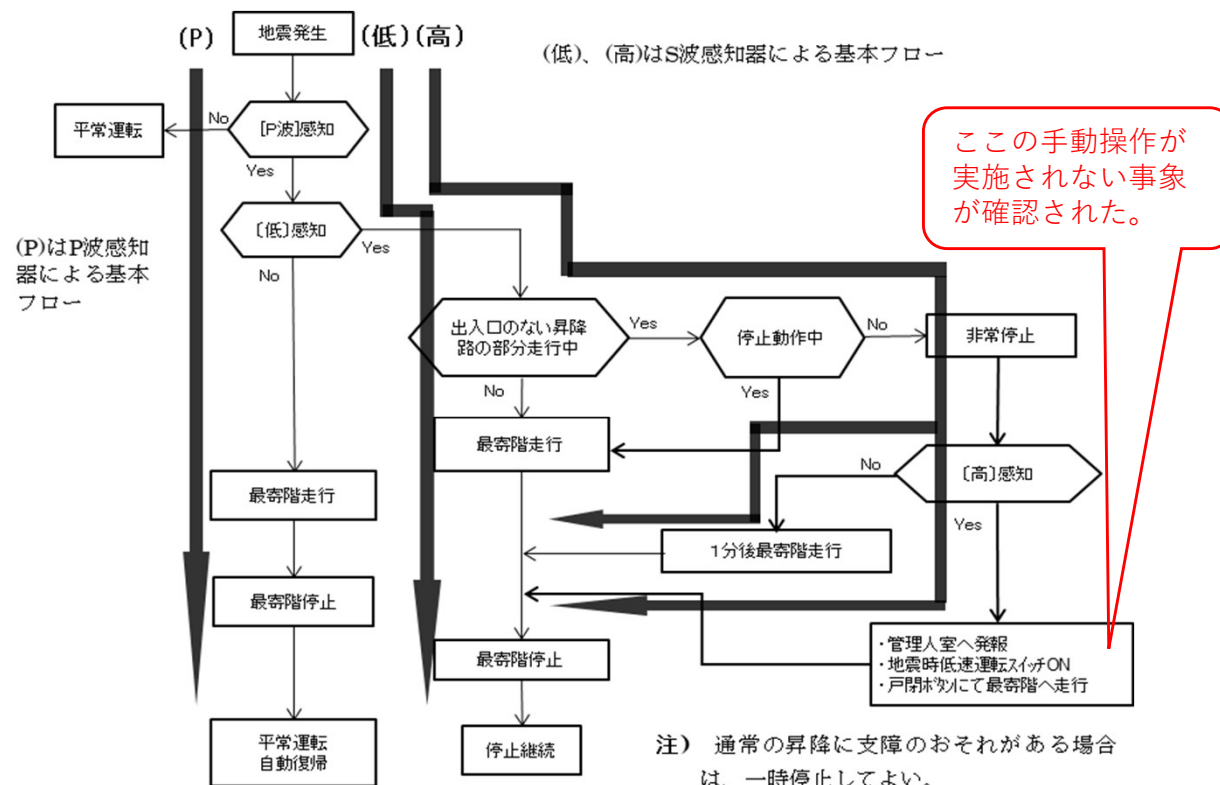


図3.2.1 一般的なエレベーターの地震時管制運転基本フロー例

3.3 自動診断仮復旧運転領域拡大

3.3.1 調査対象エレベーターの地震強度（最大加速度）分布

令和4年度の追加調査で地震時管制運転により継続的に停止したエレベーターの地震強度（最大加速度）別の分布を右図に示す。

震度5強の目安である250[Gal]程度で全体の78.4[%]（令和3年度調査：80.4[%]）を占めていた。250[Gal]以上の占有率は、地震別に比較しても概ね同様であり、250[Gal]以上に領域拡大できれば、80[%]以上が対象となり得る。

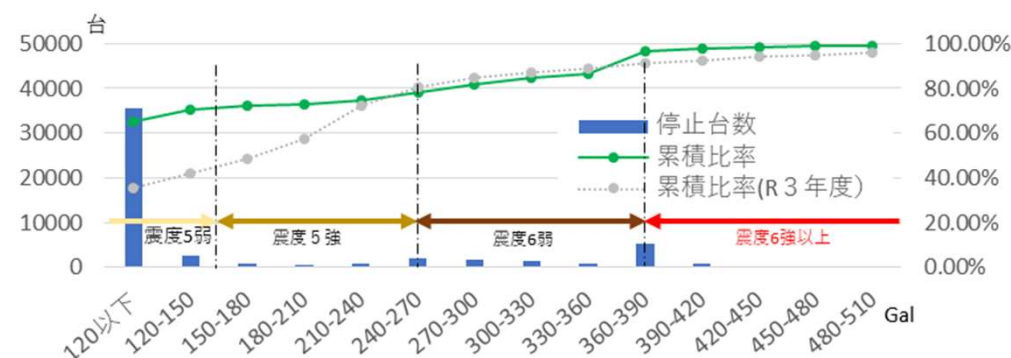


図3.3.1 エレベーター停止台数

3.3.2 建物側被害発生状況（令和3年度・4年度の集計結果）

今までの調査で判明した建物側被害状況の地震強度（最大加速度）別分布を右図に示す。

地震強度（最大加速度）別の物損率※¹をみると、300[Gal]までは0.3[%]以下と低位であり、大部分の被害は冠水によるものであった。

（物損率※¹：各地震強度領域における「物損台数／対象台数」）

<冠水に対する検討結果>

エレベーターの最下階が地表より低い場合は、ピット冠水を検知しエレベーターを休止できる機能が必要。

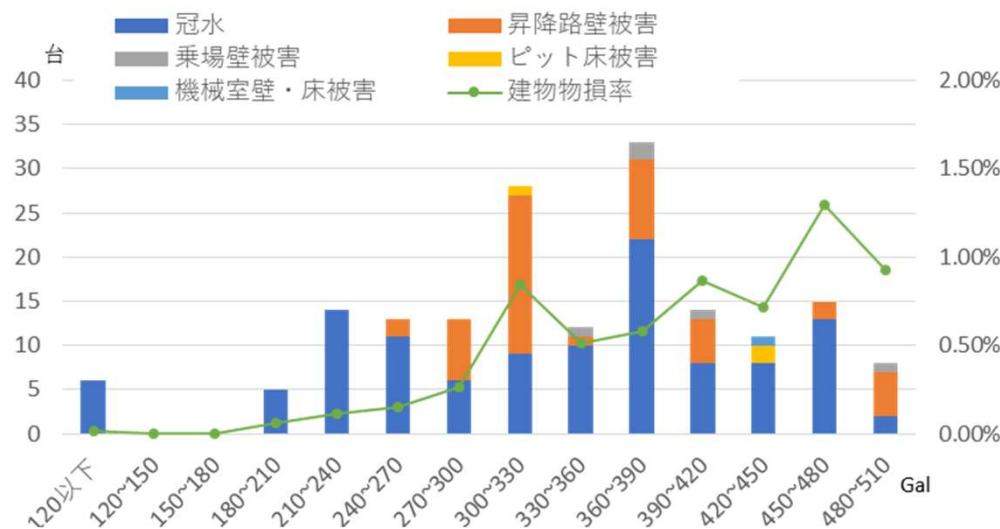


図3.3.2 建物側被害状況

3.3.3 エレベーター機器側被害発生状況（令和3年度・4年度の集計結果）

現行システムでは検知できない、かつ、仮復旧の運行に支障をきたす可能性がある機器の地震強度（最大加速度）別の被害分布を右図に示す。

結果、①ガイド装置の変形及び破損、②脱レール（かごと昇降路機器との干渉リスク含む）について対応等検討することとした。

注1：「駆動装置等の転倒又は移動」は今回の調査において確認されなかった。

注2：脱レールに至らないガイドレールの変形の場合、仮復旧運転は可能であり検知は推奨レベルとした。

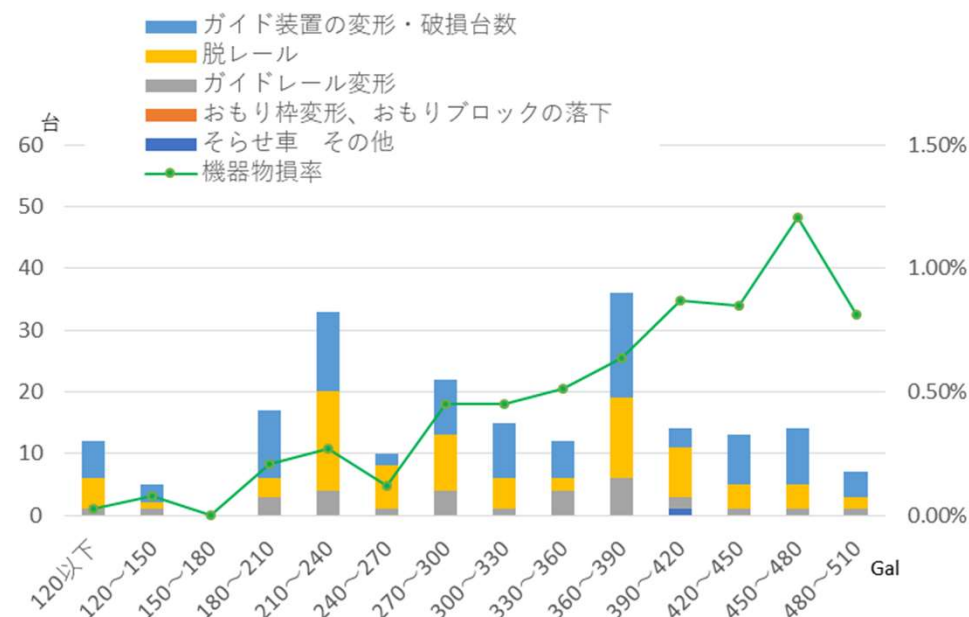


図3.3.3 エレベーター機器側被害状況

<ガイド装置の変形及び破損に対する検討結果（必要と思われる事項）>

- ・ 仮復旧運転において支障となる「ガイド装置の変形及び破損」を検知し停止すること。
- ・ 脱レールに至らない場合は、仮復旧運転において支障が出ない構造とすること。

<脱レールに対する検討結果（必要と思われる事項）>

- ・ 「脱レール」が発生した場合に、これを直接あるいは間接的に検知して停止すること。
- ・ 上記対応が困難な場合は、検知できない「脱レール」モードに至らない範囲とすること。

3.4 仮復旧診断運転高度化の検討

3.4.1 構造ヘルスマモニタリングの活用

エレベーターの仮復旧診断運転高度化における活用として、建物での地震時揺れをモニタリングし健全性を評価する「構造ヘルスマモニタリング」を用いることを検討する。まずは現状におけるモニタリング技術について調査しまとめた。

(1) 建物におけるモニタリング技術

2011年東北地方太平洋沖地震後は、MEMS加速度計の低価格化等の要因により、商用の構造ヘルスマモニタリングが普及し始め、建物の健全性判定手法により損傷判断ができるようになってきた。

(2) モニタリングシステム

標準的なモニタリングシステムは、建物に設置したセンサによって建物での地震の揺れを検知し、地震直後数分程度で建物の安全性（構造躯体・内外装〈非構造造部材〉等）を判定して情報表示するシステムである。

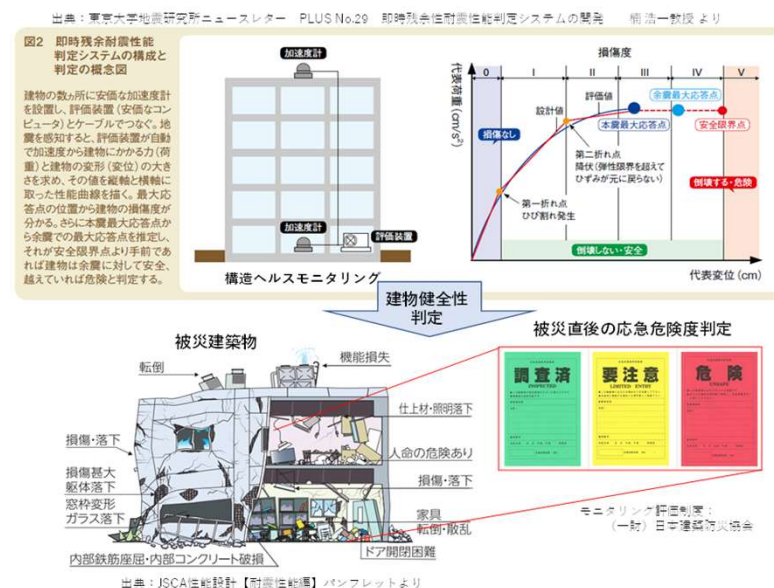


図3.4.1 構造ヘルスマモニタリングシステムによる応急危険度判定

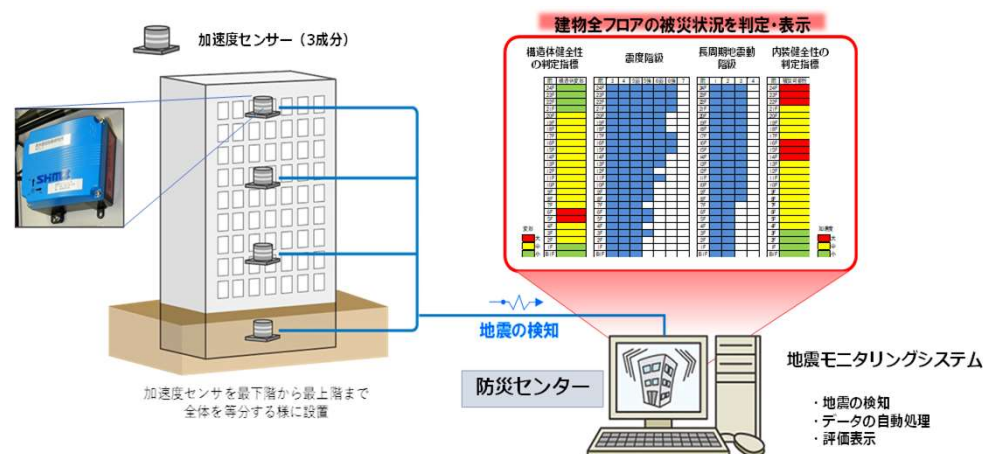


図3.4.2 地震モニタリングシステム（例：安震モニタリング）

(3) 商用化されたモニタリングシステム

構造ヘルスマニタリング技術を用い商用化されたシステムは、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の発生以降に作られている。ここでは、商品として販売されている7つのシステムを紹介する。

- ①白山工業：計測地震防災システム VissQ
- ②NTTファシリティーズ：建物安全度判定サポートシステム 揺れモニ®
- ③日建設計：地震時被災度判定システム NSMOS
- ④清水建設：建物健全性判定支援システム 安震モニタリング®
- ⑤戸田建設：建物モニタリング診断システム ビルメディカルシステム® ・ユレかんち
- ⑥森ビル：被災度推測システム e-Daps
- ⑦鹿島建設（小堀鐸二研究所）：建物安全度判定支援システム q-NAVIGATOR

(4) 事業者採用されるモニタリングシステム

ビルを管理する事業者の間では、建物における地震発災時の健全性判定を支援するモニタリングシステムの導入が進んでいる。

主に自社が管理する不動産のビル被災情報の収集、企業における事業継続計画（BCP）や建物の機能維持・回復（レジリエンス）のための活動を迅速に行うためのツールとして利用する。

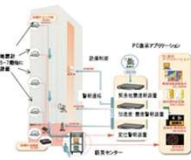
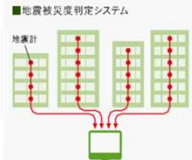
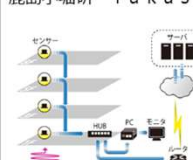
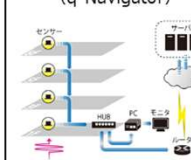
事業者	三井不動産	三菱地所	東京建物	日本生命
活用システム	白山工業（VissQ）	白山工業（VissQ）	白山工業（VissQ） 鹿島小堀研・Takusu	鹿島小堀研・Takusu （q-Navigator）
メーカーシステム図				
緊急地震速報導入	○	○	○	—
導入開始年	2012	2012	2015	2016
導入ビル数	約160棟（超高層）	約6棟	不明	約200棟
主な導入ビル	・新宿三井ビルディング ・日本橋三井タワー ・東京ミッドタウン ・浜離宮三井ビルディング ・横浜三井ビルディング ※2018年以降60m未満のビルにも導入展開 ※採用システムのVissQとしては、100棟以上の導入実績がある	・丸の内ビル・新丸の内ビル・丸の内パークビルを起点に大手町・丸の内・有楽町・横浜・青山エリアの超高層ビルに順次導入。	・導入当初はVissQを利用していたが、最近、q-Navigatorのシステムに変更した様子。 ・シミズ安震モニタリングは、東京スクエアガーデンに導入	・日本生命所有建物 ※60m以下の建物を中心に導入中。60m以上の建物では、他システムの導入がされている。 ・シミズ安震モニタリングは、ニッセイアロマスクエアに導入

図3.4.3 事業者が採用する建物モニタリングシステム

3.4.2 診断運転高度化における建物モニタリング活用

仮復旧運転検討WGでは、地震発災時のエレベーターの運用に関して構造ヘルスマニタリング(SHM)を活用するために意見交換を行った。今後の活用における可能性を考え、WGに参加するエレベーター各社(5社)にヒアリングし検討を行った。

(1) 技術活用に向けたエレベーター各社ヒアリング

SHMにおける地震後の建物健全性判定し情報発信ができるシステムが商用化されている。このようなシステムがどのように活用できるかどうかについて10項目の質問をし、回答を得た。

(2) ヒアリングから得た建物モニタリング活用のまとめ

エレベーター各社へのヒアリング後、本仮復旧運転検討WGでは意見交換を行い、結論として構造ヘルスマニタリングから得られる情報を利用することが、エレベーターの仮復旧運転の高度化に有用であると共通認識された。

(3) モニタリングの具体的な活用案

意見交換のまとめから本仮復旧運転検討WGでは、構造ヘルスマニタリングの具体的な活用について検討し、自動復旧運転対応のシステム案をまとめた。

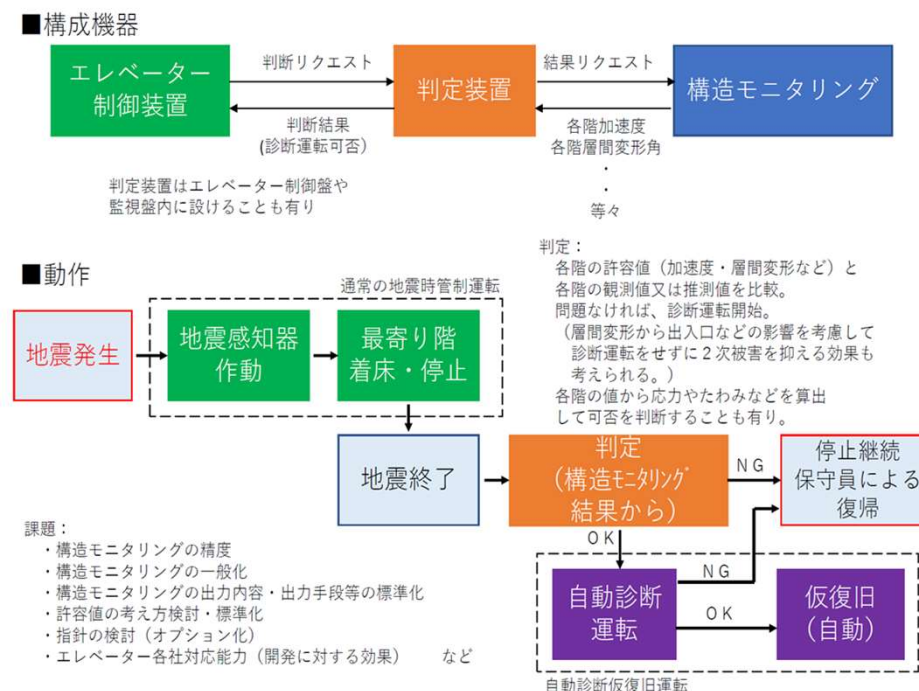


図3.4.4 具体的な自動復旧運転対応のシステム案

【提案のまとめ】

システムの実現により、自動復旧運転の高度化につながるとともに、構造ヘルスマモニタリング活用している建物では地震後の建物が安全であるとの情報があれば、保守技術者が安心して復旧活動ができる利点がある。この結果、地震発生直後にエレベーターが早期復旧でき、建物内の他の建築設備の復旧も早くできることになり、建物所有者、在館者、マンションであれば住民等にとって防災上で非常に有益な状況が実現される。

【提案されたシステムの実用化を進めるための課題】

- ・ 構造ヘルスマモニタリングによる建物損傷の判定・推定精度の確認
- ・ 構造ヘルスマモニタリングのシステムの一般化
- ・ システムにおける情報共有・出力の標準化、指針への検討
- ・ エレベーター各社が参画して技術的仕様の検討対応、機能追加による効果の確認

今後、これらの追加課題の検討・準備を始めることが、早期の普及展開に繋がっていくと考えられる。

4.まとめ

4.1 閉じ込め防止のための耐震強化対策の検討

4.1.1 閉じ込め事象に向けた提言（まとめ）

- (1) **地震時の閉じ込めに関する評価方法**：加速度振幅が運行限界耐力を超えた地震発生後における合理性の高い運行判断方法の検討が有効（周期特性を考慮することで現行耐震設計のもとで運行範囲拡大の可能性がある）。
- (2) **かご又は釣合おもりの脱レール**：より積極的な脱レール発生を抑制するために、ガイド装置の締結部の滑りや据付状態を管理することが有効。
- (3) **かご室の固渋**：地震時に発生する慣性力まで考慮した振れ止めの強度やガイド装置取付部のボルト締結力の保持を設計時に留意することなどで耐震性を高める効果がある。
- (4) **乗場及びかごの戸の戸スイッチの開路**：戸スイッチの瞬時開による閉じ込め防止にはリスタート運転が有効であり、一層の普及の検討が必要（戸スイッチの十分な耐震強度は実証されたものの共振応答による誤作動の検出も確認されたため戸開動作の検出方法の高度化も併せて検討する必要がある）。
- (5) **乗場の戸の変形、損傷**：加力試験より乗場の戸の開閉裕度を確認したものの昇降路内機器や昇降路壁等の落下物との衝突や走行中にかごの戸開閉装置と干渉することで破損、変形が発生し、扉の開閉が出来なくなる可能性には注意が必要。
- (6) **かご枠、かご壁の変形、ドアの係合異常**：地震時の振れ止めやガイド装置などの変形やズレによるかご室とかご枠との衝突など機器同士の干渉でドア開閉ができなくなる可能性の検討が有効。

(7) **エレベーターシステムとしてのさらなる耐震性及び機能限界向上による閉じ込め防止**：構造強度を上げるよりも、かご周辺機器、乗場と昇降路内機器との衝突、干渉、離脱を回避する方策が有効。次のような設計上確保されているクリアランス部の確認が重要。

- ・ ボルト締結部の長穴におけるズレ防止や振れ止め部材によるかご室とかご枠の変位量の制限などの検討
- ・ レールと案内装置、かご室及びかご枠、ドア係合部分、ドア及び敷居等可動部分のクリアランスから生じる最大可動範囲の検討。

なお、設計上のクリアランスは、機器のスムーズな動作や乗り心地などの快適性などにも関係することから慎重な検討が必要。

4.1.2 今後の課題

- ・冠水や建築物の破損などは、地表面加速度300[Gal]程度から見られる。さらなる耐震性向上のためには、エレベーター機器とともに建物側とのバランスを考慮した対策が必要である。
- ・機器の変形、破損も地表面加速度300[Gal]前後からでありシステム実験結果の傾向と合致する。
- ・戸スイッチ開路による閉じ込めはリスタート運転による対策が有効である。しかし、その他の閉じ込め事象は、かご周辺機器と昇降路、乗場機器との位置関係や動的変位、変形と関係して発生すると考えられるため、ダイナミクスを考慮したモデルによる検討などが必要である。
- ・地震管制運転、リスタート運転および仮復旧のための診断運転の実施条件を明確にするには、地震波の周波数特性の考慮とともに、現行耐震指針では考慮されていない機器同士の衝突や干渉による機器の破損や変形による影響を明らかにすることも必要である。

以上より、大型振動台を用いて実機レベルに近い建築構造物の応答を表現可能な試験体に昇降機を組み込んだ大規模システムでの地震時耐震性ならびに機能限界を総合的に評価し得る振動実験が重要になる。また、システムが有するがたつき、摩擦系を考慮した非線形応答評価とともに、場合によっては、衝突等により生じる高加速度、高振動数領域での摩擦係数の面圧、速度依存性、あるいは経年劣化についても考慮することが必要になる。さらに、システム機能維持の観点からは昇降機システムの各要素の耐力、機能限界から求められるフラジリティを考慮した確率論的リスク評価の適用についても有効になると考えられる。

4.2 閉じ込め等対策としてのリスタート運転機能及び仮復旧運転診断領域拡大の検討

4.2.1 提言（まとめ）

(1) 閉じ込め時リスタート運転適用拡大（「現行耐震指針」の改訂）

- ・ 現行の地震時管制運転では、急行ゾーン走行中に地震感知器動作により非常停止し「〔高〕感知器」が動作している場合、管理室等での人による操作での手動運転を想定しているが、「閉じ込め時リスタート運転」による自動での救出運転も可能とする。
- ・ 現行の「閉じ込め時リスタート運転」は、急行ゾーンからの救出運転を除外しているが、急行ゾーンを含めた全ての区間を運転対象とし、運転時間の制限をなくす。

(2) 自動診断仮復旧運転領域拡大に向けた提言（「現行耐震指針」の改訂）

- ・ 現行の自動診断仮復旧運転における診断が行える上限値は「現行耐震指針」でエレベーターがもつべき耐震性能（下限値）を基に示されているが、この上限値を地表加速度300[Gal]まで拡大し、上限値の範囲内でエレベーターの耐震強度に見合った自動診断仮復旧運転を可能とする。
（診断設定値はエレベーターにより耐震強度が異なることから、一律の設定値とはしない。）
※建物高さ、耐震クラスによりエレベーター機器としては更なる拡大の可能性が残されるが、建物の被害調査結果から、まずは一律に設定可能な上限値を300[Gal]とすることを提言する。

(3) 診断運転高度化に向けた提言

- ・ エレベータシステムに構造ヘルスマモニタリングからの情報を積極的に取込み、閉じ込め防止のための診断運転のさらなる領域拡大と安全性の向上を目指す。

4.2.2 今後の課題

- 4.2.1で提案した提言に対する今後の展望・課題は以下の通りである。
- ・ 綱車の空転、冠水、駆動装置の転倒、ガイド装置の変形及び破損、脱レール等の仮復旧運転での支障を検知し、エレベータを停止させる機能が必要。
 - ・ 1998年昇降機耐震設計・施工指針以前に設置されたエレベーターへの地震時管制運転の設置と安全性に応じた適用拡大も検討が必要。
 - ・ 建物高さ、エレベーターの耐震クラスに応じて耐震性が異なることから、仮復旧診断領域のさらなる拡大も期待できる。
 - ・ 構造ヘルスマモニタリングの早期活用には、エレベータシステムとのインターフェースを標準化させることが重要であり、各階の加速度・層間変形角と実際の被害との関係についての精査が必要。
 - ・ 実際の運用段階においては、情報保護の観点から所有者とエレベーター保守会社との間で取り交わす保守契約に「構造ヘルスマモニタリングのデータ提供」についての条項を追加することも必要。

以上のように、本提言の内容を迅速に普及させるためには、関係者・関係団体での協議・検討により早急に具体策を明確化し、現行耐震指針や業界標準などにて示していく必要がある。

以上