

令和3、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」の成果概要について

東京電機大学 工学部

特別選任教授 藤田 聡

FUJITA Satoshi

客員教授 下秋 元雄

SHIMOAKI Motoo

埼玉工業大学 工学部

准教授 皆川 佳祐

MINAGAWA Keisuke

1. はじめに

国土交通省では、建築基準法等の整備のための検討について、民間の能力を積極的に活用し基準の整備や見直しを図ることを目的として、建築基準整備促進事業を実施している。本事業では、国(国土交通省住宅局建築指導課、住宅生産課及び国土技術政策総合研究所)が調査事項を提示し、技術的知見の調査等を行う事業者を公募によって募り、最も適切な計画を提案してものに対して、調査費用を補助している。令和3年度は13テーマ、令和4年度は18テーマの調査事項に対して公募事業が実施され、筆者らも一般財団法人建築設備・昇降機センターと学校法人東京電機大学としてこれに臨んだ。その成果については、令和5年5月25日、26日に住宅金融支援機構すまい・るホールにおいて報告した⁽¹⁾。

建築基準法令では、地震時にエレベーターの利用者が閉じ込められることがなく速やかに避難でき

るように、地震時等管制運転装置の設置を義務付けているものの、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た⁽²⁾。また、今後発生が想定されている大規模地震の首都直下地震が起きると、最大1.7万人が閉じ込められるとされるとの予測^{(3)、(4)}もあることから、閉じ込め事象発生の要因分析とその対策方法の確立が強く望まれている背景がある。

そこで、本事業においては、具体的には、これまでに発生した大地震による被害事例と閉じ込め発生状況を精査し、地震時/地震後における建築物の健全性の確認、並びにエレベーターの早期の復旧対策とを含め検討した。その上で、エレベーターの閉じ込め事象をさらに低減しうる対策手法の検討ならびに今後の課題の整理を目的として実施した。このため、本事業では次の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り検証した。

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った。

2. 事業概要

令和3年度は、熊本地震、大阪府北部地震に加え令和3年2月に発生した福島県沖地震における被害状況について、エレベーターが設置されている建物の位置の緯度、経度からその地点の地震入力大きさを推定した上で、約12万件に亘る調査を実施した。その結果、比較的発生頻度の高い震度6弱程度での閉じ込め要因を分析、検討することにより、閉じ込めを低減するための耐震対策法、これに基づいたリスタート運転、自動診断仮復旧運転に係わる事項を明確にした。加えて、閉

じ込め原因の一つである施錠装置の誤動作(過大な振動入力による一時的な開路現象)に関して、令和4年度のエレベーターシステム実験に向けての予備の実験という位置付けで施錠装置及び戸スイッチの単体実験を実施し、その限界特性を明確にした。これらの結果に基づき、令和4年度実施の実大エレベーターシステム振動実験における調査項目を洗い出した。

令和4年度は、エレベーター機器と建物部材とを組み合わせた実態に近い試験体を用いた実験により、閉じ込めに到った状況を再現し、閉じ込めが発生する時の各部の挙動を確認し、閉じ込め対策効果について評価した。なお、試験体の具体的な仕様は、震度6弱以下の地域で実際に発生した閉じ込め事例を参考に定めた。また、実験は、振動実験又は静的加力実験のうち、対象とする閉じ込めに到った状況を再現するのに適切な方法で行った。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においては、昨年度実施の調査結果に加え令和4年3月に発生した福島県沖地震など頻繁に発生する被害地震による事例調査を継続的に実施することでデータの拡充を図った。

図-1は閉じ込め防止のための耐震強化対策の検討手順を、図-2は閉じ込め等対策としてのリ

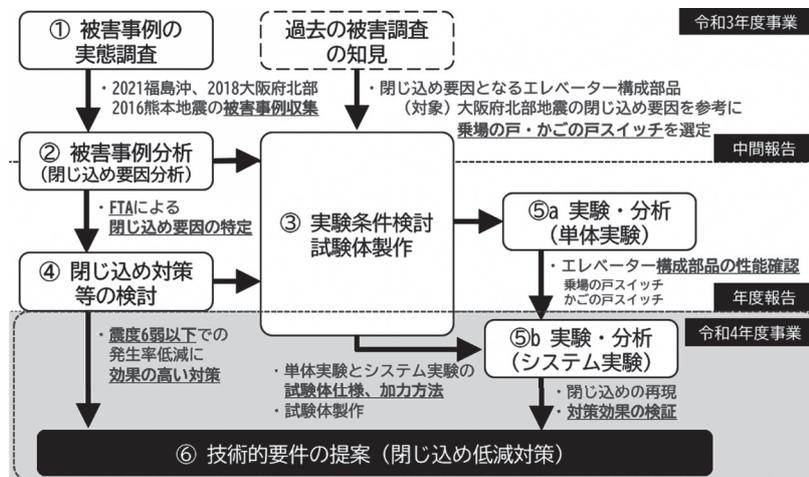


図-1 閉じ込め防止のための耐震強化対策の検討手順

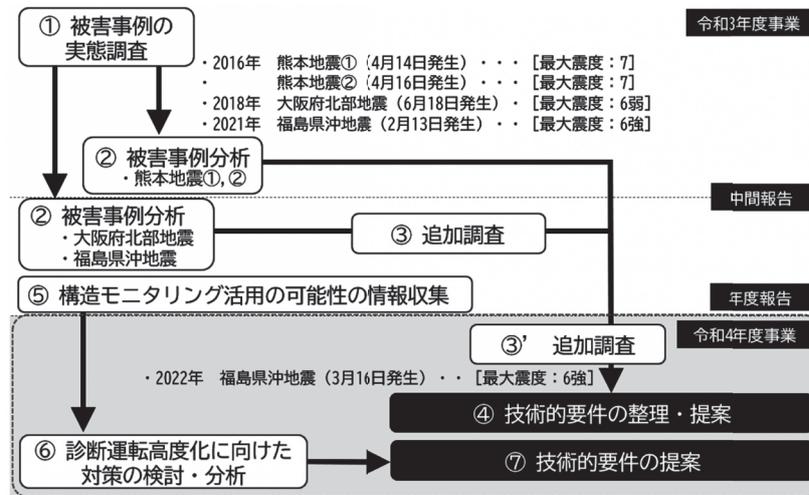


図-2 閉じ込め等対策としてのリスタート運転機能及び仮復旧運転診断領域拡大の検討手順

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を事業遂行に従って示したものである。

3. 閉じ込め防止のための耐震強化対策の検討

3.1 地震時における乗場の戸/かごの戸施錠装置の誤作動についての実験的検討 (単体実験；令和3年度)

地震時の閉じ込め発生の要因の一つとなっているエレベーターの乗場の戸/かごの戸に設けた施錠装置の機械的な錠(以下「カギ部」という。)及び電気的なスイッチの接点が開路する現象がある。ここでは、その基本挙動を把握するため、事業参画企業5社の製品及び一般に購入可能な汎用品の施錠装置を直接振動台上に設置し基本特性実験を実施した。そして、正弦波と地震波を用いてカギ部が動き出す加速度及び動作寸法、スイッチの接点が開になる(開路)加速度等の特性を調査した。実験項目としては、次の4通りで、その結果の要約を記載する。なお、図-3は、振動台上に設置された供試体の一例である。

①水平加振、平行取付；施錠装置を水平加振方向と平行に取り付けて正弦波で加振する実験

施錠装置が解錠する方向である水平加振、平行取付の条件(図-3に示す方向)では、一部を除き

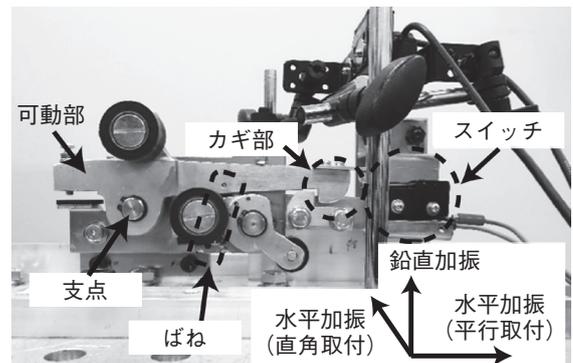


図-3 振動台上に設置された供試体例

殆どの施錠装置で開路現象が確認された。振動台加振性能上の制約から明確な共振特性を得ることはできなかったが、4Hz程度以上の振動数帯域で開路事象が再現された。スイッチ開路が始まる入力加速度は、施錠装置の種類によって異なるが、概ね $10.6 \sim 31.2 \text{ m/s}^2$ の範囲であり、振動数の影響よりも、入力加速度の大きさによる影響が支配的であった。なお、スイッチの開路現象は開閉を繰り返すものであるが、加振実験後にはスイッチ接点は閉じた状態に戻り、施錠装置に損傷はないことから、一時的な開路現象への対応策を考慮することが肝要である。

②水平加振、直角取付；施錠装置を水平加振方向に対して直角に取り付けて正弦波で加振する実験
施錠装置が解錠する方向に対して直角方向であ

る水平加振、直角取付の条件では、基本的にはスイッチの接点が開く事象は見られなかった。施錠装置の可動方向に対して直角の方向のため、構造的にもスイッチの接点が開くことはないと考え。

③鉛直方向；施錠装置を鉛直加振方向に正弦波で加振する実験

全ての施錠装置でスイッチの接点が開く事象が確認された。スイッチの接点が開いた振動数は、①の場合とほぼ同様で4Hz程度であった。また、鉛直加振についてもスイッチの接点が開いた時の入力加速度に対する振動数の影響は小さいことが確認された。スイッチ開路が始まる入力加速度は、施錠装置の種類によって異なるが、6.0～38.0m/s²の範囲であった。①の場合と同様であることから、この場合も一時的な開路現象への対応策を考慮することが肝要であるとの知見を得た。

④水平加振方向と平行に取り付けた施錠装置、数台を実地震波で加振する実験

実地震波加振実験についても、一部に開路が生じない施錠装置があったが、大半の施錠装置で開路現象が確認された。スイッチ開路時の最大入力加速度は施錠装置によって異なるが、16.1～29.3m/s²の範囲であった。他の加振条件下と同様に、加速度によって施錠装置の可動部分に発生する慣性力がばねによる押付け力を上回ることによってスイッチの接点が開くことは同様であり、ばねの押付け力を強めるとスイッチの接点が開かなくなった。

以上の実験結果から、施錠装置カギ部の押付け力を増加させることが効果的であることが推察されたことから、ばねの押付け力を強めて確認実験した。

カギ部をスイッチの接点に押付ける力を強めると、その結果、スイッチ開路に至る入力加速度が増加することが確認された。これらのことから、施錠装置の可動部分の自重とばね等による押付け力に対して、加速度によって生じる可動部

分の慣性力が上回るとカギ部が動作し始めることが判明した。

3. 2 システム実験の概要(令和4年度実施)

令和3年度に実施した地震被害事例の調査結果の分析を踏まえて閉じ込め対策検討につながる実験を計画し、実施した。震度6弱以下での閉じ込め発生率低減に効果の高い対策を検討するため、被害調査の分析結果から次の①から⑥までの6つの閉じ込め要因の再現を試みた。

- 走行不可に至る要因：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
- 戸開不可に至る要因：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

3. 2. 1 実験供試体、測定項目及び加振条件

実験は共同研究者である清水建設技術研究所の3次元大型振動台を使用して、2022年6月20日から8月22日の期間に実施した。図-4は振動台上に設置された供試体である。設置したエレベーターは、地震被害調査分析結果をもとに、標準的な「13人乗り機械室レスエレベーター」を選定し、本体は共同研究者の三菱電機(現三菱電機ビルソリューションズ)が設計・製作した。戸スイッチ等の詳細が異なることもあり、必要に応じて適宜共同研究者として本事業に参画している各エレベーターメーカー各社(三菱電機、日立ビルシス

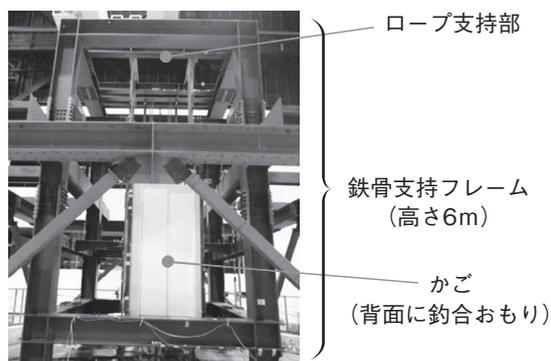


図-4 振動台上に設置された供試体

テム、東芝エレベータ、日本オーチス・エレベータ、フジテック)の製品に換装して実施した。また、これを懸垂支持するために高さ6mの鉄骨フレームを振動台に設置した。

計測は、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(開路現象把握のため；かご、乗場)、動画撮影カメラ：9chを用いて行った。

加振は、エレベーターシステムの基本振動特性を把握するための加振レベル、及び損傷・閉じ込め事象の再現を確認するための加振レベルの2段階で以下の通り実施した。

振動特性把握実験：スイープ波(水平0.5-5Hz、上下1-10Hz)、正弦波(100Gal、1-7Hz)、建物応答波(最大加速度を100Galに補正した12波)

損傷・閉じ込め再現実験：正弦波(200Gal、水平2-5Hz)、建物応答波(震度5強、6弱地域で計測された建物応答波の2波の入力加速度レベル1～2倍としたもの)を使用した。

3. 2. 2 振動特性把握実験結果

(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求めた。その結果、ガイド装置、振れ止め、かご位置、かご内負荷おもり等の差異により共振振動数に若干の変化あるものの、かご、釣合おもりともに共振振動数は5Hz近傍に存在することが判明した。これは、建物振動特性にもよるが、一般的に地震波の卓越振動数領域に存在することとなる。

(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求めたところ、昇降機耐震設計・施工指針⁽⁵⁾(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×機器応答倍率2)を超える応答倍率を観測した。エレベーター機器には隙間によるガタや各部位での摩擦などの影響もあり、高振動数の応答を増幅したものとも考えられる。

(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) 戸スイッチの開路現象(電圧計測)

振動数2、3Hzの正弦波加振と殆どの建物応答波に対して戸スイッチの開路が発生した。戸スイッチの開路は振動台加速度100Gal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事象と整合していると考えられる。なお、3.1節に示した単体実験との大きな差異は、システム実験では乗場及びかごの扉等の質量が付加されるため、当該振動数帯域で応答が増幅したためである。

(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／乗場の戸周辺は、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。

3. 2. 3 損傷・閉じ込め再現実験結果

(1) 正弦波及び建物応答波に対する各部のひずみ

振動台加速度300～400Gal程度の建物応答波に対してかご枠の最大加速度1,200～1,500Gal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。このとき図-5に示すように、かご振れ止めは若干塑性変形したが、閉じ込めに至る事象は発生しなかった。その他の部位に

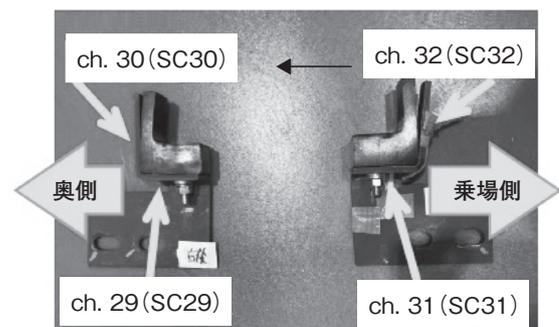


図-5 かご室振れ止めの加振実験後の変形

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。

(2) 建物の層間変形による扉への影響

振動実験では過大な相対変形を供試体に与えることが困難であったため、図-6に示すように、地震による建物の変形を想定して乗場の戸を設置

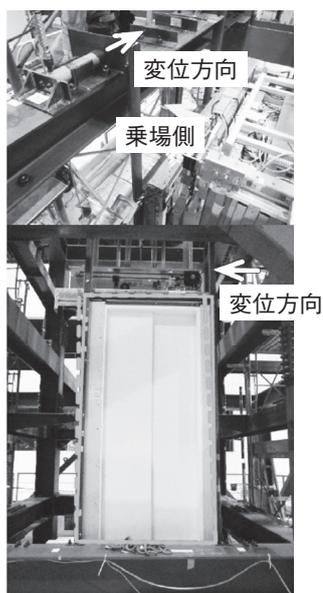


図-6 乗場三方枠へ強制変位を与えた場合の戸開閉動作

する三方枠の上部を静的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。

その結果、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20mm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ることが確認された。

3. 2. 4 閉じ込め事象の再現実験結果の考察

- 1) 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/乗場の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表-1に示すように再現できなかった。
- 2) 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⁽⁶⁾に示された耐震設計の有効性が確認できた。
- 3) 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

表-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		再現	発生メカニズム・発生条件に関する考察
走行不可	かご又は釣合おもりの脱レール	再現せず	●実験ではガイドレールの変形、かご・釣合おもりの変形量は小さかった。 (発生可能性の考察) ※ファスナー部や建物層間変位、及び、機器クリアランス等の影響? ※故障分析時の現場状況で建物、ガイド装置等の変形はあったか?
	かご室の固渋	再現せず	●かご走行不可となるような、かご枠、ガイド装置、振れ止め部等の変形・変位量の評価。 ⇒干渉が想定される部位(乗場とかごの戸廻り等)のクリアランス等
	乗場及びかごの戸の戸スイッチの開路	○	●正弦波加振 100 [Gal] 程度でも、戸スイッチの開路発生を確認。 ※開路発生時の戸スイッチ固定部加速度の確認、スイッチ開路のメカニズム説明。
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でも乗場の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	△	●50 [Gal] 程度の加振時でも、共振的な振動が発生した際には目視できる程度のかご枠とかご室の相対変位が発生。 ⇒塑性変形はせずとも、クリアランスを超える変位が発生することで、乗場の戸とかごの戸やかご周辺機器同士が干渉することは考えられる。
	ドアの係合異常(ドア係合装置の変形・損傷)	再現せず	●着床時の振動により、係合できない変位発生の可能性を検討。 ⇒かごと乗場の戸が係合した状態(乗場停止状態)で、三方枠のX方向への変形角1/100でも乗場の戸の開閉に支障はなかった。

でも閉じ込めは発生しており、この差異の原因について以下に考察する。

- 4) 現行耐震指針によるエレベーターの耐震設計について、表-2に示すように運行限界耐力と安全限界耐力の考え方が異なる。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が示されるものの、各機器固有の振動特性の影響が評価・反映されていない。
- 5) 表-3に2009年耐震指針以降の耐震設計パラメータを示す。地震の強さを表す震度(震度等級)について、例えば地震時の建物基礎部加速度が同じ120Galでも、周波数が3.3~5Hz程度ならば震度4~5弱だが、0.6Hz付近の揺れならば震度5強に相当する。よって、今後は4)に述べた事を含めて、エレベーター機器のように様々な振動特性を有する部位から構成されるシステムの耐震設計には修正震度法等の考え方を導入して、より合理的な設計を目指すべきである。

- 6) 地震時の閉じ込め防止等への対応拡大については、上述のように現行耐震指針は、地震波の振動数特性に関係なく基本的には地表面想定加速度まで耐えるとした設計である。最大応答加速度が運行限界耐力を超えた地震でも、地震波の卓越振動数によってはより高度な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。

3. 2. 5 閉じ込め発生状況の推定と対策について

(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。

表-2 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

耐震クラス	建物の高さ	建物基礎部の装釘加速度 [Gal]					
		100	200	300	400	500	600
A ₁₄	60 m以下						
	60 m超え						
S ₁₄	60 m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)		
	60 m超え	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)		

表-3 2009年耐震指針以降の耐震設計パラメータ

耐震クラス	建物の高さ	建物基礎部の加速度基準 [Gal]	建物応答倍率	機器応答倍率
A ₁₄	60 m以下	120	2.5	2
	60 m超え	200	建物設計値による	2
S ₁₄	60 m以下	200	2.5	2
	60 m超え	300	建物設計値による	2

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100Gal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、構造的に開路しにくい設計とすることや、既に耐震指針に取り込まれている閉じ込め時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)が有効となろう。

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300Gal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わせた対策が必要である。

4. 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

4.1 被害事例の実態調査結果(含追加調査結果)

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(保守技術者が復旧)したエレベーターにおける復旧作業有無状況を表-4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、令和4年度は、令和3年度に検

表-4 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	19,701	66,479	37,964	124,144	100.00%	54,329	100.00%	178,473	100.00%
復旧作業否	18,750	65,558	37,458	121,766	98.08%	53,654	98.76%	175,420	98.29%
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%

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及び保守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。

4. 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図-7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り階に停止できない状態)で、S波感知器(高)が作動した場合には、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、以下の考えをまとめた。

①急行ゾーン特有の機器被害について

昇降行程が長い、定格速度が速いことによるリスクはあるが、急行ゾーン特有の機器被害リスクが増すことはない。ただし、救出時の走行距離が長くなることは要考慮である。

②急行ゾーン特有の安全上の懸念事項

急行ゾーン特有の安全上の懸念はない。ただし、急行ゾーン内で釣合おもり、かご室が機械的に固渋した場合、乗場からの足掛かりがないため救出及び復旧作業に長時間を要する懸念がある(現状も同様のリスクあり)。

③消耗工程が長いことによる懸念事項

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(現状も同様のリスクあり)。

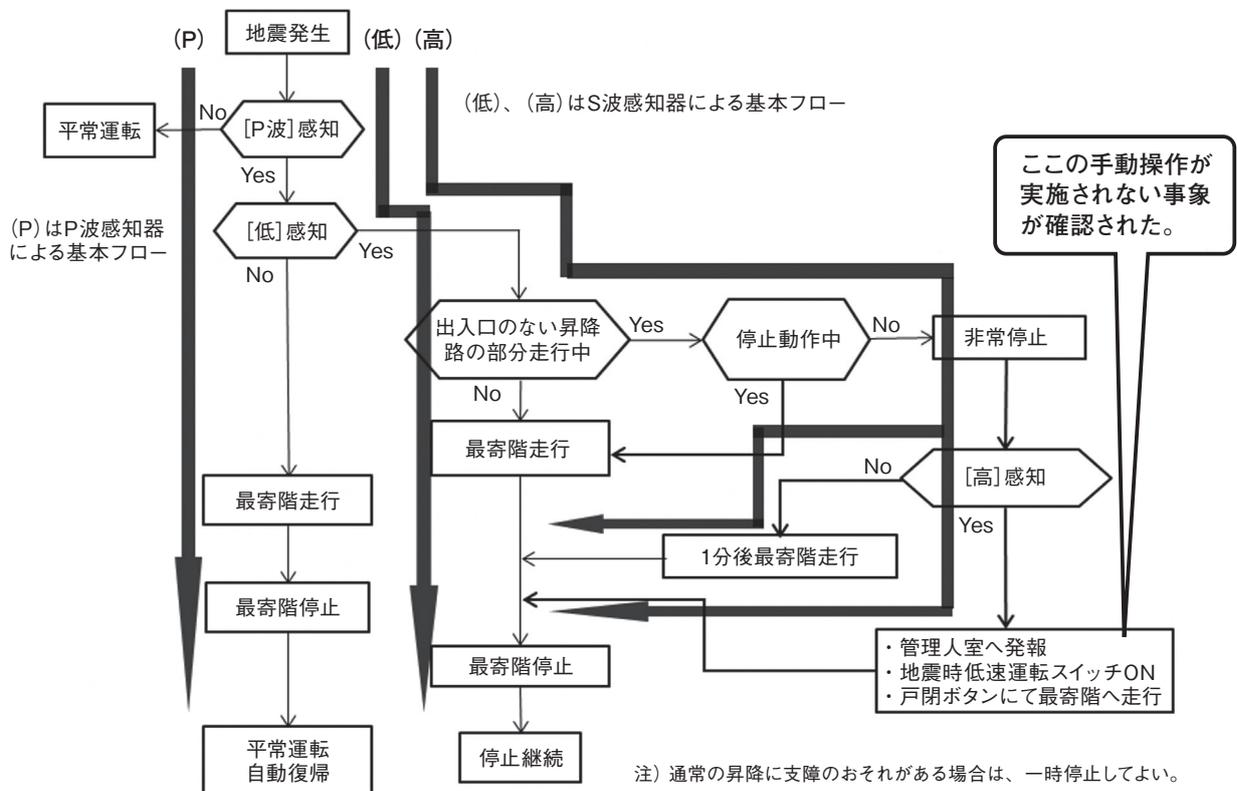


図-7 一般的なエレベーターの地震時管制運転基本フロー例

④走行距離(時間)が長くなることの懸念事項

長尺物等の引っ掛かりなどによりかご室が固渋した場合、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。また、救出運転時間が長くなることにより乗客が不安を感じないように、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。

4. 3 自動診断仮復旧運転領域拡大

4. 3. 1 調査対象エレベーターの地震強度(最大加速度)分布

図-8は令和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)別の分布である。

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

4. 3. 2 建物側被害発生状況(令和3年度・4年度の集計結果)

図-9はここでの調査で判明した建物側被害状

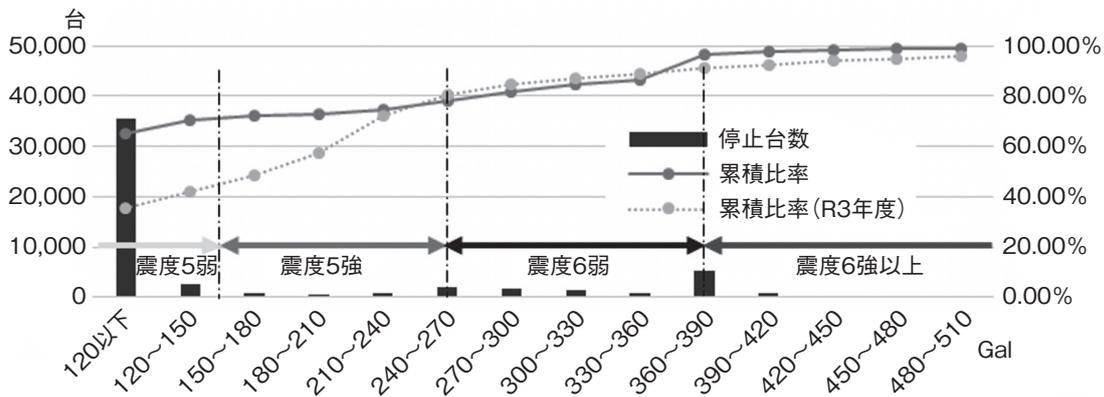


図-8 エレベーター停止台数

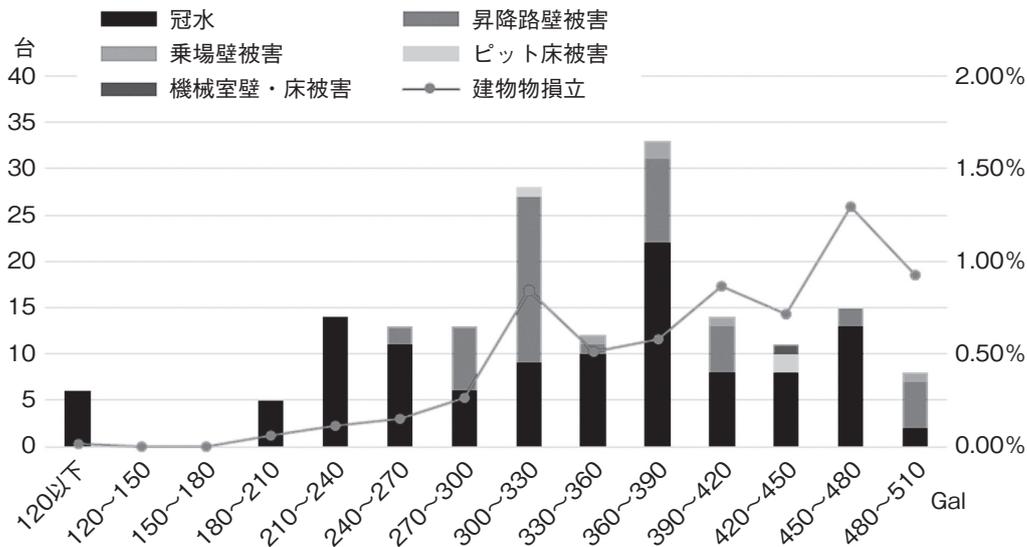


図-9 建物側被害状況

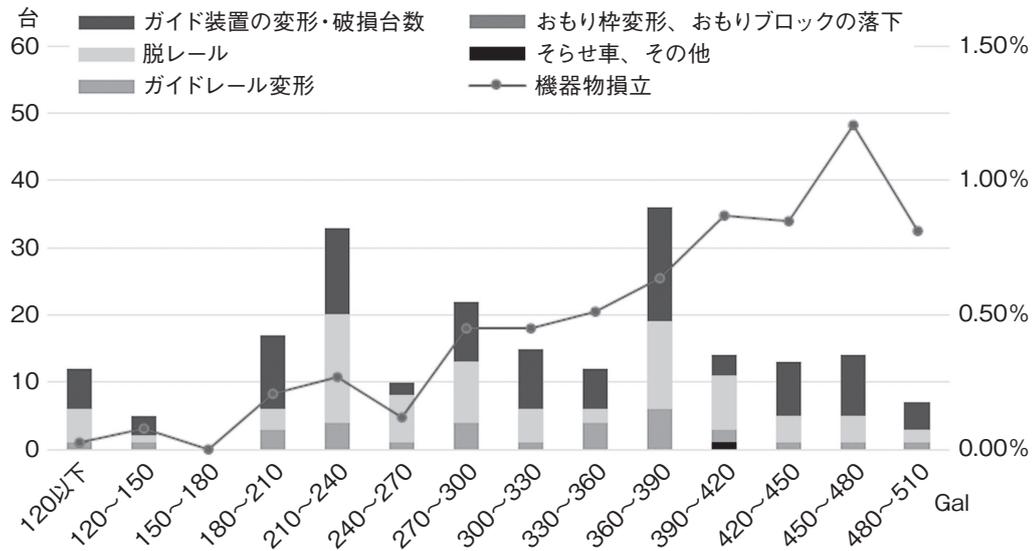


図-10 エレベーター機器側被害状況

況の地震強度(最大加速度)別分布である。地震強度(最大加速度)別の物損率^{※1}をみると、300Gal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」)

4. 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)

図-10は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)別の被害分布である。

その結果、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の必要があることが判明した。

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。

5. 仮復旧診断運転高度化の検討

5. 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」による情報を活用することを検討した。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り、図-11に示すように応急危険度判定などにも活用されている。

(2) モニタリングシステム

図-12は標準的なモニタリングシステム例で、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。

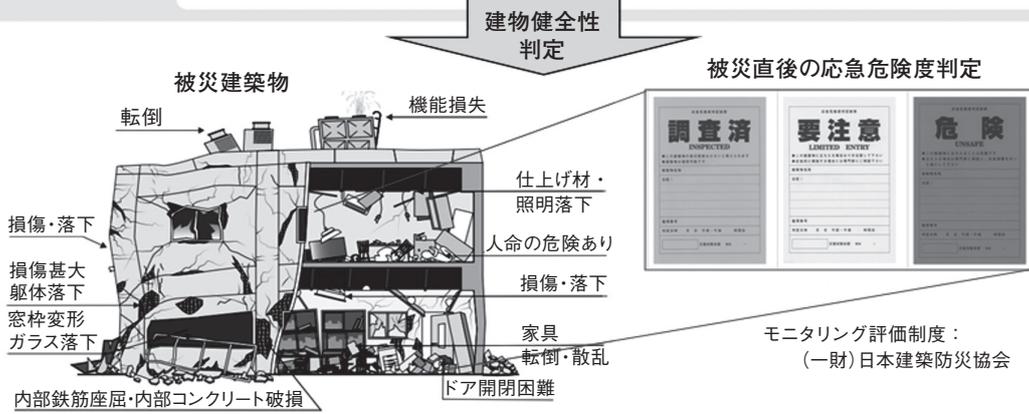
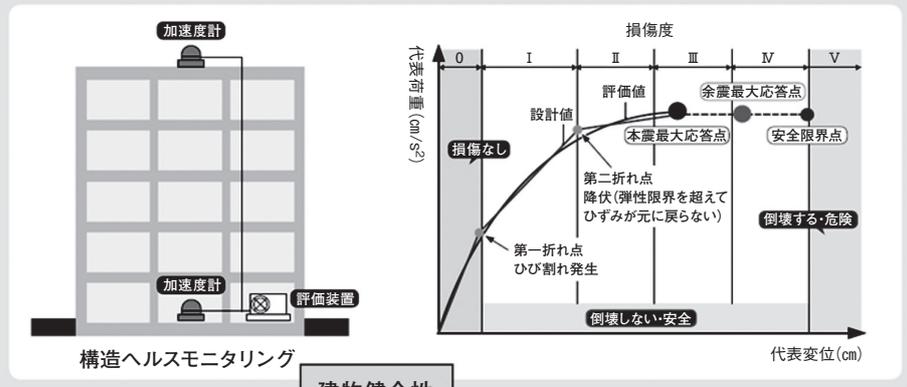
(3) 商用化されたモニタリングシステム

構造ヘルスマモ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

出典：東京大学地震研究所ニュースレター PLUS No.29 即時残余性耐震性能判定システムの開発 楠 浩一教授より

図2 即時残余耐震性能判定システムの厚生と判定の概念図

建物の数力所に安価な加速度計を設置し、評価装置(安価なコンピュータ)とケーブルでつなぐ。地震を感じると、評価装置が自動で加速度から建物にかかる力(荷重)と建物の変形(変位)の大きさを求め、その値を縦軸と横軸に取った性能曲線を描く。最大応答点の位置から建物の損傷度が分かる。さらに本震最大応答点から余震での最大応答点を推定し、それが安全限界点より手前であれば建物は余震に対して安全、越えていけば危険と判定する。



出典：JSCA性能設計【耐震性能編】パンフレットより

図-11 構造ヘルスマonitoringシステムによる応急危険度判定

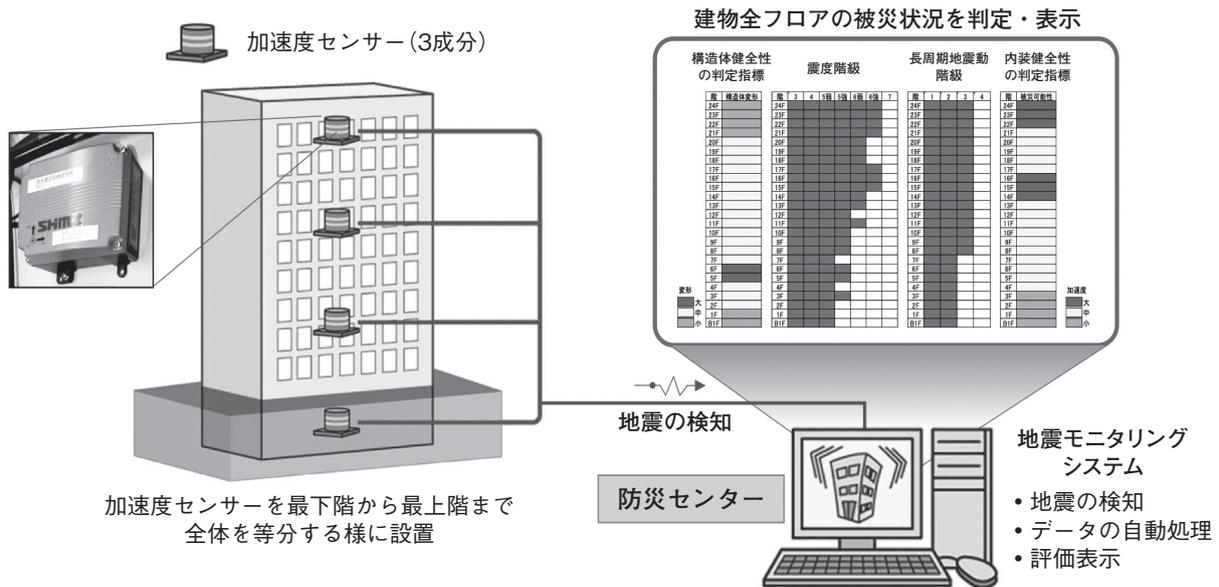


図-12 地震モニタリングシステム (例：安震モニタリング)

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されている。

5. 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図-13のとおりまとめた。

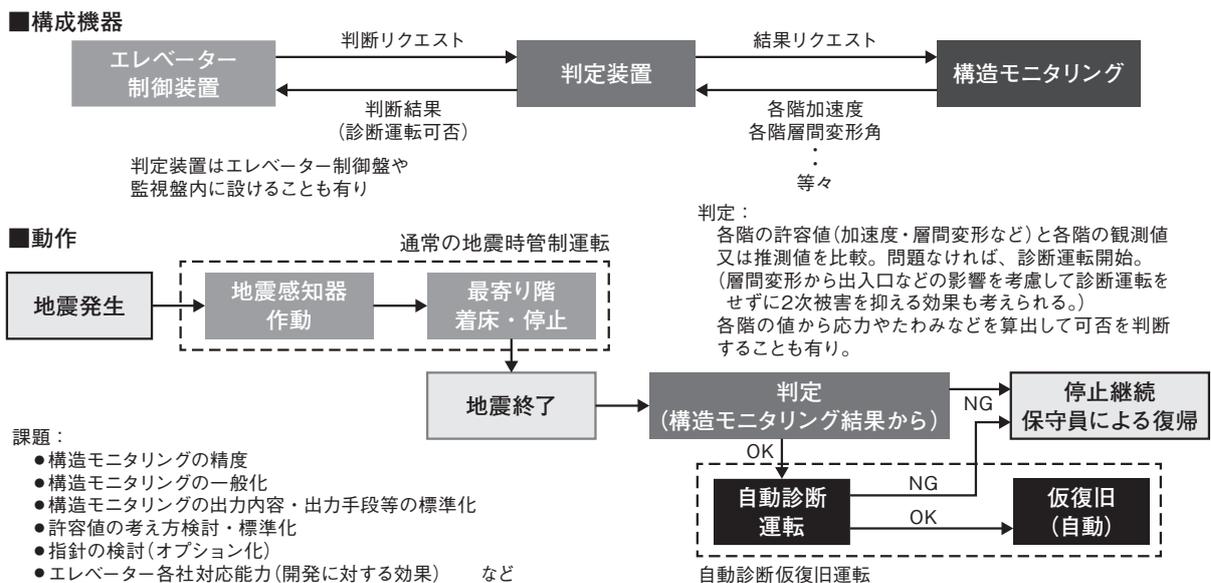


図-13 具体的な自動復旧運転対応のシステム案

【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。

6. 本事業のまとめ

6. 1 閉じ込め防止のための耐震強化対策の検討

6. 1. 1 閉じ込め事象に向けた提言

- (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との変位量の制限などの検討
 - レール及びガイド装置、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であろう。

6. 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 300Gal程度から散見された。さらなる機能維

持を目的とした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300Gal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その構造的な対策とともに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が必要である。
- 地震時管制運転、閉じ込め時リスタート運転及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及び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、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。

6. 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

6. 2. 1 リスタート運転機能及び仮復旧運転診断領域拡大提言

(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300Gal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300Galとすることを提言する。

(3) 診断運転高度化に向けた提言

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

6. 2. 2 今後の課題

- 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、エレベーターを停止させる機能が必要である。
- 「昇降機耐震設計・施工指針1998年版」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検討が必要である。

- 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、仮復旧診断領域の更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、エレベーター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である。
- 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が必要である。

以上、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示していく必要がある。

7. おわりに

本事業のテーマである「大地震時におけるエレベーターの閉じ込め防止」は「建物機能維持」、「都市機能維持」の観点からも非常に重要な課題であることを再認識するとともに、ここでの検討結果によりその解決課題も明確になったものと思料する。本事業で得られた成果をもとに、閉じ込め発生の更なる低減とエレベーターの早期復旧を図ることで、エレベーター利用者、所有者、管理者等が要求する安全性の確保と利便性の向上が期待できるものと考えている。

最後に、検討委員会副委員長の清水建設福喜多輝様をはじめ委員、協力委員の皆様方、耐震対策検討WG委員長の東京電機大学古屋治教授、同副委員長の清水建設神原浩様、三菱電機ビルソ

リューションズ岡本健一様、仮復旧運転検討WG委員長の東京農工大学鎌田崇義教授、同副委員長の清水建設岡田敬一様、三菱電機ビルソリューションズ檜森正博様をはじめ各WG委員、協力委員の皆様方の多大なるご尽力のもと本事業は遂行できたものと深謝申し上げます。

さらには、地震による被害調査へのご協力を頂いたエレベーター各会社に、そして振動実験遂行にあたり多大なるご協力いただいた清水建設及びエレベーター各社に対し、感謝の意を評します。加えて、本事業の遂行にあたっては一般財団法人建築設備・昇降機センターの大塚正和様をはじめ同法人の皆様方の着実な運営があって成し得たものと改めて感謝申し上げます。

【参考文献】

- (1) 国土交通省プレスリリース, 2023. 4. 4., <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001599096.pdf>.
- (2) 国土交通省 住宅局 建築指導課, エレベーターの地震対策の取組みについて(報告), 令和2年7月14日, <https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/content/001344498.pdf>.
- (3) TELENET, 首都直下型地震で、1.7万人がエレベーターに閉じ込められる可能性がある, 2018年10月12日 https://telenet.co.jp/column/column_20181012/.
- (4) 内閣府中央防災会議首都直下地震対策検討ワーキンググループ, 首都直下地震の被害想定と対策について(最終報告), 平成25年12月. https://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku_wg/pdf/syuto_wg_siry002.pdf.
- (5) 昇降機技術規準の解説2009年版分冊 昇降機耐震設計・施工指針2009年版, 国土交通省住宅局建築指導課, (財)日本建築設備・昇降機センター, (社)日本エレベーター協会編, 2009年8月.
- (6) 「昇降機技術基準の解説 2016年版 付 追補版」, 国土交通省住宅局建築指導課, (財)日本建築設備・昇降機センター, (社)日本エレベーター協会編, 2021年8月.