

昇降機を利用した 新しい耐震機構の 開発



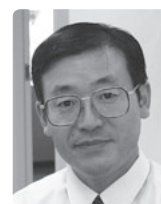
佐々木 和徳*



林 篤*



吉田 一**



増田 達*

耐震補強工事はバリアフリー工事と同時施工されることが多いが、これまで行われてきた一般的な耐震補強工事であるブレースを設置する方法に代わりバリアフリー工事で設置されるエスカレーターをブレースとして用いれば既存建物への支障を最小限にとどめられるとの発想から、エスカレーターを利用した新しい耐震機構を開発することとした。研究では、エスカレータートラスフレームの解析による挙動の確認、実物大相当の耐震機能エスカレーターによるエスカレーターの挙動および性能の確認を行い、考案した耐震機能エスカレーターが橋上駅舎などの耐震部材として十分な性能を有することを確認した。

●キーワード：橋上駅舎、耐震機能エスカレーター、耐震補強、三次元FEM解析、実物大実験

1. はじめに

当社管内ではさまざまな箇所において耐震補強プロジェクトが進行中だが、これまで主として、図1 (a) に示すようにブレースを増設して耐力を増強する方法が採用されてきた。しかし、この方法は使用中の建物が対象となるため、施工上の制約が大きくなる。また、事業スペースでの工事に際しては、営業補償を伴うケースもある。さらに、壁状の耐震機構を配置することは空間の使用可能範囲が減少するなど建築計画上好ましくない。これらの問題を解決するために、既存建物への支障を最低限にしながら効果的に耐震性能を向上させることのできる補強方法の開発が望まれている。

耐震補強は昇降機設置によるバリアフリー化と同時施工されることが多いが、通常昇降機は建築部材として考えられていないため水平力を負担させることは想定されていない。しかし、昇降機、特にエスカレーター（以下、ESC）を耐震機構として考慮することができれば、既存建物への支障を最小限にしながら効果的に耐震性能を向上させることができるため、ESCを利用した新しい耐震機構を開発することとした。

本論文では、この水平力に対して抵抗するESCを耐震機能エスカレーター（以下、耐震ESC）と称し、その構造を図1 (b) に示すようにESCの長手方向において地震時の水平力の一部を負担させることにより、ブレースなどの補強部材を軽減できるものとした。

また、水平地震荷重を負担してもESCのステップやモーターなどの機械類が損傷しないことが前提となる。

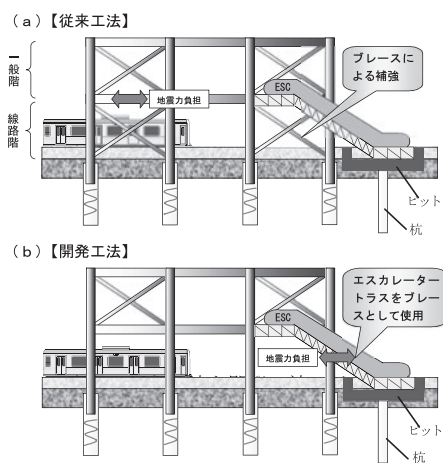


図1 従来工法と開発工法のイメージ

2. 耐震ESCの仕様と三次元FEM解析

2.1 耐震 ESC の仕様

耐震ESCのモーターやステップなどの機械類が損傷しないという前提条件を考慮して、今回開発する耐震ESCの仕様目標は、最大水平力を受けた際にESCトラスの各部材が弾性範囲内の応力となる構造とした。

同時に、ESCピット下に水平抵抗としての杭を施工し、地震時に水平力を負担してもESCのステップやモーターなどの機械類が損傷しないこととした。

ESCフレームについては、補強などを施していない標準のESCフレームの三次元FEM解析により性能を把握して、耐震部材として満足する補強を考案した。

2.2 標準 ESC フレームの補強方法

耐震ESCが負担するせん断力は杭とピット躯体の水平抵

抗力の合計から算出し、耐震ESCに作用する地震時最大水平力を682.5kNと考えた。そこで、この荷重を標準ESCフレームに付与して解析を行い、図2に示す応力コンター図を得た。図2より、ESCトラスフレームの傾斜が水平から斜めになる箇所である上部および下部折れ点部付近には降伏応力以上の応力が発生しており弾性範囲内にとどまっていなかった。特に、上下折れ点部が弱点箇所（波線部）となっていることがわかる。

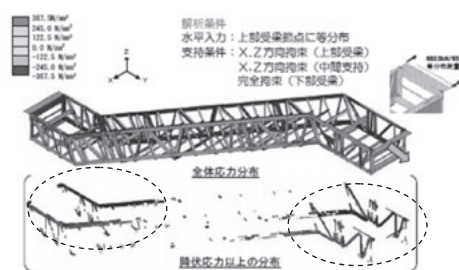


図2 標準ESCフレームの応力分布コンター図

そこで、仕様目標を満足するための対策が必要となり、その方法として、(i) ESCフレーム部材の補強、(ii) ESCフレームの支持機構の変更という2点を考え、両者の組合せにより耐震ESCのディテールを検討することとした。

(i) の対策としては各部材の断面性能向上を図るため弱点箇所を補強し(図3に示す (1) から (7))、(ii) の対策としては、上下にある標準ESCピットの納まりを大きく変えることなく対策できる支持方法を検討した(同 (9)、(10)、(13))。

今回の開発では駅舎に導入されているESCのうち、導入実績の多い階高6m、3分割構造について検討することとし、階高2.4mのところを中間支持を設けている。

2.3 耐震 ESC フレームの三次元 FEM 解析

前節の構造解析および支持構造を施したモデル (図3) において、地震時水平力682.5kNをESC上端部の支持部に等分布の面圧として付与し、各点の応力、変形などの挙動を確認した。図4に三次元FEM解析による応力コンター図を示す。

図3に示す補強を行うことで標準ESCフレームの弱点箇所であった上下折れ点部分を含め、各部材が降伏応力未満であることが図4から確認できた。

なお、図3に示す (5) の下部全面面板補強を上下に分割した場合においても同様な解析条件のもと三次元FEM解析を実施した。上記において実施した三次元FEM解析の応力・変形図を図5、図6に示す。図5から下部全面面板補強を省略した場合でも部材が降伏応力未満であることを確認した。

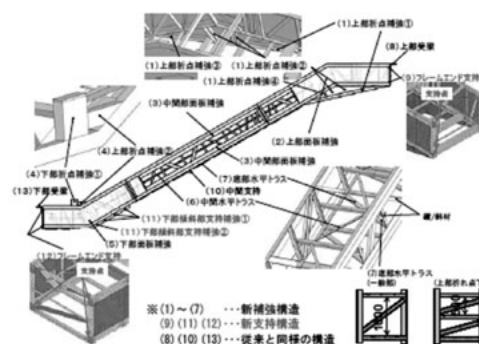


図3 フレーム補強構造案



図4 耐震ESCフレーム三次元FEM解析応力コンター図

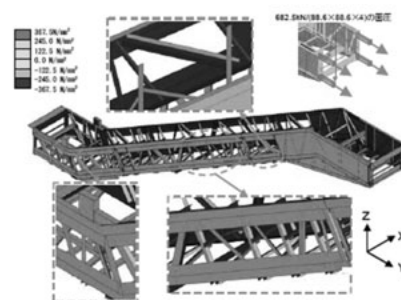


図5 最終形フレームの三次元FEM解析コンター図

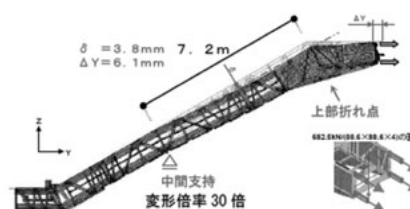


図6 最終形フレームの三次元FEM解析変形図

また、図6から耐震ESCのたわみ δ は、最大支持間長さ7.2m（中間支持から上部折れ点までの距離）に対して3.8mm、ESC上端部の移動量は6.1mmとなり、極めて小さい変形にとどまっている。

以上より、図5および図6に示すESCフレームを最終的な耐震ESCフレームのディテールとした。

3. 耐震ESCの载荷実験とシミュレーション

3.1 目的

前節では、耐震ESCフレームのディテールを提案し、想定される地震力を受けてもESCフレームが弾性範囲内であることを三次元FEM解析などから確認した。しかしなが

ら、耐震ESCは、ESCとしての基本性能を有し、かつ耐震要素としての機能を持たせるものである。このため、実物大の耐震ESCを製作し、載荷実験の結果の解析により耐震ESCとしての最終評価を行うこととした。

3.2 実験概要

耐震ESC単体が水平力を受けた際に、どのような特性を有するかを把握するため、図7に示す階高2.65mの耐震ESCを製作し、図8の試験装置にて静的載荷実験および動的加振実験を行った。

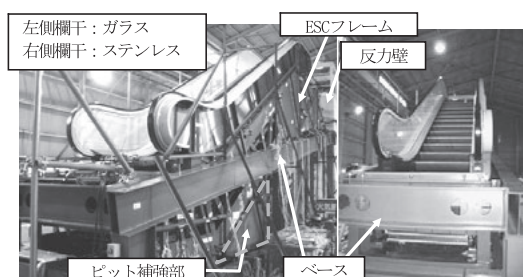


図7 耐震ESC試験体

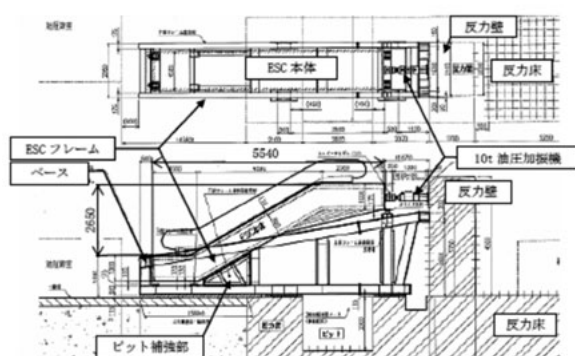


図8 耐震ESC載荷実験概要

3.3 静的載荷実験

静的載荷実験では、反力壁および反力床に固定したベース（図7、図8）に耐震ESC下部を固定し、油圧加振機でESCフレーム長手方向に $\pm 100\text{kN}$ を載荷してESCフレームの変形と応力を測定した。また、変位計は36カ所、ひずみゲージは上下折れ点部の補強箇所や中間部の上下弦材など180カ所に設置した。

3.4 動的加振実験

動的加振実験では、ESCフレーム上下部支持の長手方向をフリーとした状態で0～20Hz程度加振し、ESCフレームに生じる加速度からESCフレームの固有振動数などを算出した。

3.5 実験結果および解析妥当性評価

3.5.1 静的載荷時のフレーム変形

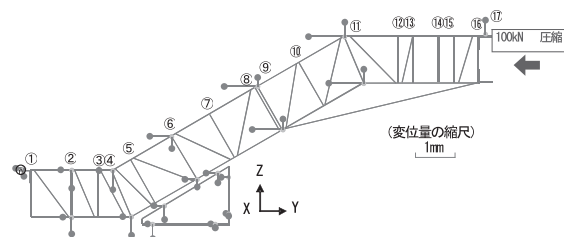


図9 100kN圧縮時のY・Z方向変位測定結果

図9に100kN圧縮時のY方向およびZ方向のESCフレーム節点の変位を示す。図9からわかるように、ESCフレームは圧縮荷重が作用したときには全体的に左側へ変位し、かつ上折れ点は上へ、下折れ点は下へ変形する。すなわち、各折れ点の角度が鋭角になるような変形をする。

3.5.2 ESC フレーム解析モデル

実験の結果、受梁固定部とピット補強部にも変位が生じることがわかったが、これらの変位においても評価するため、ベースを梁モデルとした解析モデルを作成し、解析に反映させた。図10に解析モデルを示す。

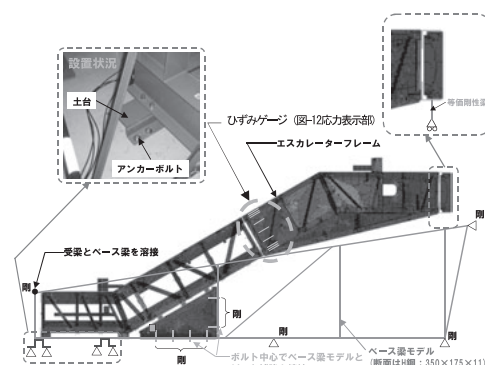


図10 ESCフレーム解析モデル

3.6 実験値と解析値の比較

前節の解析モデルを用いた解析結果と変位測定値を比較した結果を図11に示す。なお、図11は100kN圧縮時における右側上弦材の値（図9に示すNo.参照）を示したものである。図11は一例としてY方向のデータを示したが測定結果と解析結果がよく一致することがわかる。また、Z方向においても同様の結果が得られた。次に、同解析モデルを用いた解析結果と応力測定値を比較した結果を図12に示す。図12は図10に示す上部折れ点部近傍の値を示したものである。図12より応力に関しても測定結果と解析結果がよく一致することがわかる。一例として上部折れ点近傍の応力データを示したが、他の箇所においても概ね同様の傾向であった。また、変位については圧縮側のみ示したが、引張側についても圧縮側と同様の傾向であった。

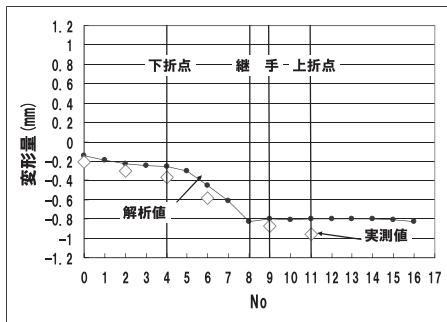


図11 100kN圧縮時の変位測定値と解析値の比較（Y方向）

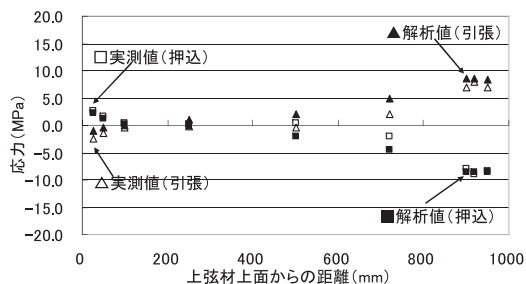


図12 上部折点近傍の応力比較

3.7 動的加振実験結果および ESC フレーム固有値の妥当性評価

動的加振実験では、加速度センサーによりESC各部位に生じる加速度を計測し固有振動数と減衰比を求めた。表1に測定結果を示す。表1より、フレームの各振動数と解析結果はよく一致していることがわかる。

また、耐震ESCの運転中に共振など異常状態が発生しないことおよび各機器の取付け寸法などにも著しい変化がないことを確認した。

表1 解析要素を考慮したフレーム解析モデル

次数	幅方向曲げ1次	幅方向曲げ2次	たわみ方向曲げ1次
モード図			
実測 固有振動数	6.5Hz	8.5Hz	14.8Hz
減衰比	0.058	0.053	0.105
解析 固有振動数	5.8Hz	7.3Hz	13.7Hz

4. 耐震ESCと建屋取合部について

耐震ESCと建屋を剛結すると、剛性の高いESCトラスに想定以上の応力が発生することになる。つまり、耐震ESCと建屋の取合部は、ESC側に所定以上の水平力を負担させないことと地震時の相対変位に追従できる構造が求められる。そこで、この取合部について構造の検討とその要素実験を行った。

4.1 取合部の要求性能

耐震ESC側に負荷させることが出来る水平力や変位を表2に示す。許容変位については、受梁設計フレーム解析結果の値から定めた。

表2 耐震ESCが許容できる水平力と変位

荷重方向	許容水平力	許容変位
ESC長手方向	682.5 k N以下	±10mm以下
ESC幅方向	36 k N以下	±20mm以下

地震時には、耐震ESCに生じる水平力や変位が目標値以下となるような建屋側取合部の構造について検討した。

耐震ESCの幅方向については、耐震ESCをすべり支承とすることで水平力は伝達せず、被災後でも所定の位置に戻る構造とした。なお、すべり支承部は幅方向に4度のV字型傾斜構造として地震時にすべり変位しても自重により元に戻る工夫をしている。

また、耐震ESCの長手方向には、建屋と耐震ESCとの間には変形性能が必要となることから極軟鋼を用いた取合部材（パネル）を配置した。所定以上の荷重が作用した場合には、取合部材（パネル）が塑性変形して所定以上の水平力を耐震ESC側に伝えない構造とする。

上記計画をもとに具体的な取合部の設計、製作をおこなった。図14に要素実験用取合部の具体的な計画図を示す。建屋側を想定した架台と耐震ESCトラス相当部の試験体を製作し、耐震ESCトラスに幅方向の水平力を載荷して支承の機能、性能が実現できるかを確認する。

また、長手方向においては、耐震ESCトラスと建屋の間に設ける極軟鋼取合部材（パネル）を取り出し、鉛直方向に載荷することで耐震ESC側に所定以上の水平力を負担させないことと地震時の相対変位に追従できるか確認する。

4.2 取合部の載荷実験

4.2.1 幅方向載荷試験

幅方向荷重は試験体横の架台に設けた孔にロードセルを設置し、耐震ESCフレーム部に載荷してその反力を測定した。また、鉛直荷重として橋上駅舎を想定した耐震ESCの自重に相当する70kNを載荷し、合わせて比較のために30kN、0kNを鉛直軸力として載荷した。載荷の結果を表3に示す。

表3 幅方向載荷結果

軸力N (kN)	すべり出し荷重 (kN)	平均 (kN)
0	1回目	1.78
	2回目	—
30	1回目	5.90
	2回目	5.90
70	1回目	12.90
	2回目	12.50

橋上駅舎を想定した耐震ESCの自重（治具分の荷重を除く）に相当する70kNを鉛直載荷しても幅方向の反力は12.70kNとなり、表2のESC幅方向の許容値36kNに対して十分余裕があることが確認できた。また、幅方向の荷重を除荷した後は、4度のV字型傾斜構造により、載荷前の状態に戻ることを確認した。

4.2.2 取合部材載荷試験

4.2.2.1 材料試験

取合部の載荷実験に先立ち、取合部材に使用した材料の機械的性質を確認するため材料引張試験を実施した。極軟鋼（LYP235）の試験結果を表4に、またLYP235の引張試験の結果から算出した応力－ひずみ曲線を図13に示す。

今回の実験の指標となる降伏ひずみの算出については、3体の平均値とはせず、降伏点の高い“試験片3”のデータを採用し、明確な下降伏点がないため上降伏点の値を採用した。“試験片3”の降伏ひずみは、図13より1,033 μ とした。

表4 引張試験結果（LYP235）

工事番号: 用 途: : : : 注文番号: 受注番号: R87F7B022 : 試験温度: 22℃ 材 質: LYP235 規格番号:	試験項目 規 格	機 械 的 性 質						
		引 張 試 験	引 張 試 験	引 張 試 験	引 張 試 験	引 張 試 験	引 張 試 験	引 張 試 験
		幅×厚さ mm	標 点 距離 mm	0.2%耐力 (降伏点) N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %	絞り %	切 断 位 置
	試験片番号							
	1	25.03×6.13	50.0	178	302	48	-	A
	2	25.04×6.16	50.0	159	309	47	-	A
	3	25.03×6.12	50.0	(219)	303	48	-	A

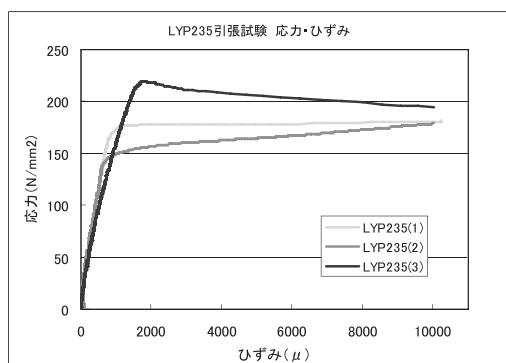


図13 引張試験応力－ひずみ（LYP235）

4.2.2.2 試験計画・概要

載荷試験は取合パネルのみを鉛直に配置し、鉛直ジャッキにて片側一方向載荷（押し側）とした。図14に要素実験用取合部の具体的計画図を示す。なお、計測は、図14 (b)に示す位置でのパネルひずみとした。

4.2.2.3 破壊（載荷）状況

試験体の変形・破壊状況としては、パネル計測点S13のz（45度）方向ひずみが増加して降伏ひずみに達した。その際の荷重は222kN、変位は3.23mm（1 δ ）であった。その後、2581mm（8 δ ）を越えた付近で面外変形が表われ、

パネル部のせん断変形が進展していき、90.11mm（28 δ ）に達した時点で下フランジの溶接箇所へ亀裂が発生し実験を終了した。載荷状況の一例を図15に示す。今回の実験における降伏荷重は、パネル表面のひずみ計測点（三軸ひずみゲージ）の1つが1,033 μ に達するときの荷重（von Misesの降伏条件式により降伏と判定された時の荷重）とした。

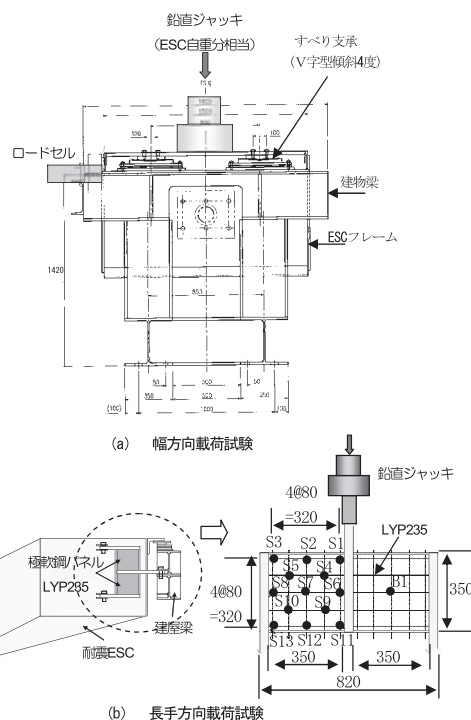


図14 要素実験用取合部の計画図

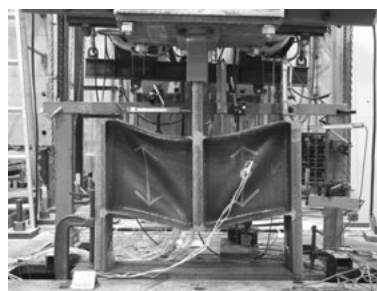


図15 取合パネル載荷状況

4.2.2.4 荷重・変位関係

図16に載荷点の荷重・変位関係を示す。また、図17にはS1～S13およびB1におけるせん断ひずみを示す。なお、図16の●は4.2.2.3で定義した降伏点である。

図16に示す載荷点の荷重・変位関係の変位増加傾向を見ると載荷荷重450kN付近から非線形性があらわれてきている。一方、図17に示す荷重・せん断ひずみ関係の増加傾向においても各測定箇所において450kN～500kN付近においてせん断ひずみが卓越してきていることから変位とひずみの増加傾向はよく対応していることがわかる。従って、試験体の破壊形態は取合パネルのせん断降伏の進展

によるものが支配的であることが推定できる。

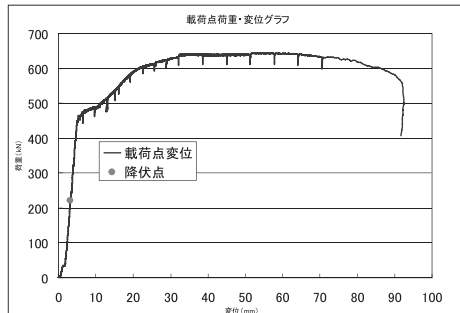


図16 荷重点荷重・変位関係

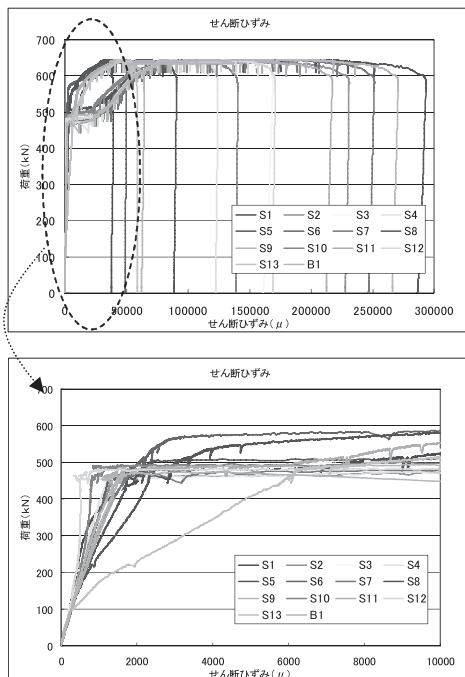


図17 荷重・せん断ひずみ関係

4.2.2.5 取合パネル主ひずみ分布

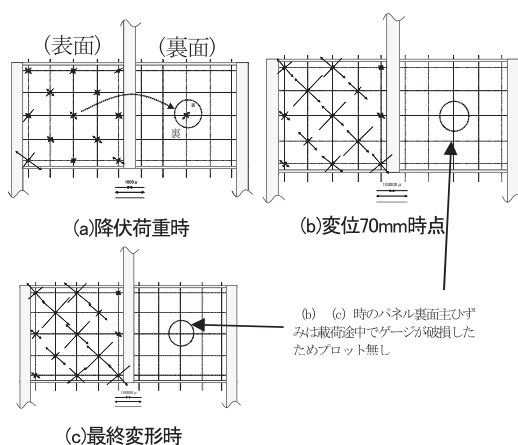


図18 取合パネル主ひずみ分布

図18に取合パネル表面の主ひずみ分布を示す。図18 (a) は4.2.2.3で定義した降伏荷重時における主ひずみ分布である。また、図18 (b) は耐震ESCと建屋梁との間隔70mm (階

高7mで層間変形角1/100となる変位) に達した状況、図18 (c) は最終変形時における主ひずみ分布である。

図18 (a) よりパネルのせん断応力が卓越してみられ、載荷荷重の増加に伴いこの傾向が顕著になっていくことが図18 (b)、(c) より確認できる。また、図18 (b)、(c) よりせん断方向の主ひずみの塑性化が進展しており、極軟鋼のパネルによるエネルギー (水平力) 吸収が確認できる。

4.3 取合部の載荷実験まとめ

耐震ESCフレームを模擬した幅方向載荷試験および極軟鋼 (LYP235) をパネルに用いた試験体による単調載荷試験の結果、以下の知見を得た。

- (1) 耐震ESCと建物の取合部にすべり支承を設け、かつ4度のV字型傾斜構造とすることで、ESCの幅方向の変形に対して十分な復旧性能を有していることを確認した。
- (2) 耐震ESCと建物の取合部に極軟鋼 (LYP235) を用いたパネルを介在することによって、所定以上の水平力が生じた場合には極軟鋼パネルによって荷重制御ができることを確認した。
- (3) 荷重・変位および荷重・ひずみなどの関係から試験体の破壊形態は取合パネルのせん断降伏の進展によるものが支配的であることが推定できる。

5. まとめ

今回、最大水平力682.5kNに耐えうる耐震ESCフレームの仕様を提案した。ESCフレームを耐震要素とすることにより、ブレースが省略でき効果的に耐震性能を向上させることができるようになる。また、新設構造物への適用が可能となる。

今後、一般構造評定の取得により本研究結果を耐震補強やバリアフリープロジェクトなどに適用できるよう水平展開し、フォローアップしていきたいと考えている。

※ 本研究は、株式会社日立製作所との共同研究開発によるものです。

参考文献

- 1) 「建築物の耐震改修の促進に関する法律」, 2005年11月7日改正, 法律第120号
- 2) (財) 鉄道総合研究所: 線路上空建築物耐震診断および耐震改修指針, 1998年5月
- 3) 「昇降機技術基準の解説 (2002年版)」: 国土交通省住宅局指導課, 編集: (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