

## 組積煉瓦壁の圧縮破壊試験と FEM 解析による簡易ピエゾ計測センサの性能評価

### Evaluation of Simple Piezoelectric Measurement Sensors due to Compression Failure Test and FEM Analysis of Brick Masonry Specimens

○佐々木拓哉\*, Calros Cuadra\*, 間所洋和\*, 中正和久\*, 下井信浩\*

○Takuya Sasaki\*, Calros Cuadra\*, Hirokazu Madokoro\*,  
Kazuhisa Nakasho\*, Nobuhiro Shimoi\*

\*秋田県立大学

\* Akita Prefectural University

**キーワード:** ピエゾセンサ (Piezoelectric Sensor), 圧電素子 (Piezoelectric Material),  
組積煉瓦 (Brick Masonry), FEM 解析 (Finite Element Method Analysis),  
構造ヘルスマニタリング (Structural Health Monitoring)

**連絡先:** 〒015-0055 秋田県由利本荘市土谷字海老ノ口 84-4

秋田県立大学大学院 システム科学技術研究科 機械知能システム学専攻

佐々木拓哉, Tel.: (0184) 27-2220, Fax.: (0184) 27-2188, E-mail: m17a015@akita-pu.ac.jp

## 1. 緒言

全世界の約 60 % の人々が、煉瓦や石等を積み上げた組積造構造物の住居に居住している。この居住地域の一部には地震多発地域に属する発展途上国が存在する。これらの国々では、ノンエンジニアド構造物 (Non-Engineered Structure) と呼ばれる構造的に脆弱な建物が多い。ノンエンジニアド構造物とは、地域で入手・製作できる石材や煉瓦を用いて、工学的な知識が不十分な住民・その地域の職人らが建設した構造物である<sup>1)</sup>。適切な建設材料を使用していない、建設業者が建設に携わらない等の要因が重なり、これらの構造物の耐震性は一般のものと比べて劣る。そのため、地震発生時は多くの建物が倒壊しており、人的被害が後を絶たない<sup>2)</sup>。主な事例として、ペルー・南部沖地震 (2007 年) が挙げられる。地震多発地域に属するペルーでは多数の組積造構造物が倒壊し、多くの人々が犠牲となった<sup>3)</sup>。

このような世界各地における地震による組積造構造物の倒壊から人的被害を防ぐには、耐震補強技術が必要となる。しかし、実際に組積

造構造物に対して耐震補強技術の適用を想定すると、施工に多くの費用と労力がかかる問題がある。そのため、現状では発展途上国における耐震補強技術の普及は進んでいない<sup>4)</sup>。今後、これらの国において組積造構造物の耐震補強技術や新たな工法の普及を推進することが大きな課題となっている。しかし、これらの技術や工法が確立するまでに多くの人々が犠牲になることが予想される。そこで、建物の倒壊による人的被害を防ぐための危険予知システムを構築することが必要と考える。

近年、構造物の寿命を診断する技術である構造ヘルスマニタリング (Structural Health Monitoring) の研究が盛んに行われている。構造ヘルスマニタリングとは、構造物の各所にセンサを設置し音や振動等を計測することで、構造物の損傷の検出や、構造物の健全性を監視および診断する技術である<sup>5),6)</sup>。従来の構造ヘルスマニタリングに用いられる手法として、AE (Acoustic Emission) 法や光ファイバーセンサ等が挙げられる。しかし、AE 法の欠点として、AE センサがノイズの影響を受けやすいこと、弾性波を測定するために被計測対象に応力を

負荷しなければならないこと、計測を行う際は高い専門性が要求されること等が挙げられる<sup>7)</sup>。また、光ファイバーセンサの場合は、データ収集装置に関連するコストが高いこと、構造物の建設中にセンサを設置する必要があること等の課題がある<sup>8)</sup>。

本研究では、組積煉瓦構造物の安価な構造ヘルスモニタリングシステムの構築を目的とする。構造物の健全性をモニタリングすることで、構造物の崩壊による人的被害を防ぐ危険予測システムへの応用を目指す。現在は、システムに実装するセンサである圧電素子を用いた簡易ピエゾ計測センサの開発および評価を行っている。

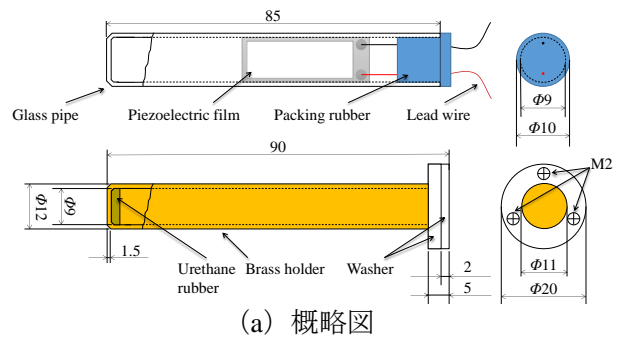
評価実験では、2種類のピエゾセンサを設置した組積煉瓦試験体の圧縮破壊試験を実施し、試験結果からセンサの有効性を検証した。さらに、有限要素法 (Finite Element Method, 以下, FEM と略記) により煉瓦試験体の破壊状態をシミュレーションし, FEM 解析結果と圧縮破壊試験結果を比較することでセンサの有効性について検証した。

## 2. 簡易ピエゾ計測センサ

組積煉瓦試験体の圧縮破壊試験に用いたピエゾセンサは、静荷重に対して用いるセンサおよび振動や動荷重に有効なセンサの2種類である。以下、前者をピエゾ極限センサ、後者をピエゾ振動センサと呼ぶこととする。両センサは従来の高分解能かつ高精度な計測器とは異なり、構造物の崩壊や接合部等における損傷が起きる前のきわめて危険な状態の検知を目的とする簡易計測センサとして開発している。本章ではこれら2種類のセンサについて説明する。

### 2.1 ピエゾ極限センサ

Fig. 1 にピエゾ極限センサの概略図 (a) と外観 (b) を示す。このセンサは静的荷重用センサとして設計したものである。直径 10 [mm]、長さ 85 [mm] のガラス管の内部に圧電素子であるピエゾフィルム (株式会社東京センサ製 DT2-028K/L) を貼付し、ガラス管を金属ホルダ (直径 12 [mm]、長さ 90 [mm]) に挿入した構造となっている。金属ホルダはセンサを使用する環境や構造物に応じて、真ちゅうや鉄等の金属を選択可能である。もしくはガラス管のみの状態でも使用できる。さらに、圧電効果を起こすピエゾフィルムを使用しているため、センサ



(a) 概略図



(b) 外観

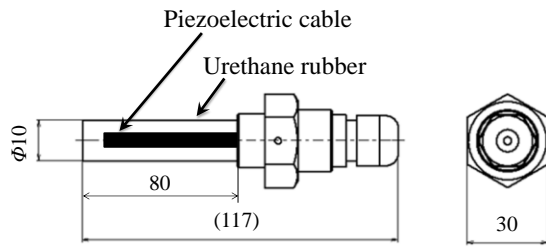
Fig. 1 ピエゾ極限センサ

本体用の電源を必要としない。加えて、ピエゾフィルムはウレタン栓によって密封されており、経年劣化に強く、メンテナンスフリーという利点を持つ。したがって、長期間のモニタリングを想定すると、従来の計測システムよりも運用コストの削減が期待できる。

構造物における梁同士の接合部や基礎部では、経年劣化や地震等による振動の影響を受け、部材の変形やひび割れが発生する。実際に RC 造構造物や鋼構造物等の上記のような箇所にセンサを設置した場合、センサに対して荷重、圧力が負荷され、センサに加わる応力が增大していく。応力が極限センサの金属ホルダの降伏応力に達すると、ホルダは変形を始める。金属ホルダの変形により内部のガラス管に亀裂が生じると、ピエゾフィルムが変形し圧電効果が生じるため電圧が出力される。この出力電圧から構造物の損傷を検出可能であると期待できる。特に、ピエゾ極限センサは、センサ設置箇所が完全に破壊する直前において、センサ自身が大きく変形するため突出した電圧を出力する。

### 2.2 ピエゾ振動センサ

ピエゾ振動センサの概略図 (a) および外観 (b) を Fig. 2 に示す。このセンサは動荷重用センサとして設計した。ピエゾケーブル (株式会社東京センサ製 AWG ピエゾケーブル) を直径 10 [mm]、長さ 80 [mm] の中空ウレタン樹脂の中心に挿入し接着固定している。また、この



(a) 概略図



(b) 外観

Fig. 2 ピエゾ振動センサ

センサはボルトの形状をもとに設計したため、六角ボルトを用いる梁の接合部や構造物の基礎部等に設置して使用できる。

ピエゾ振動センサは、構造物の変位や振動の大きさに比例した電圧を出力する。ピエゾケーブルの変形に応じて出力された電圧を測定することで、センサ設置箇所に生じる変位や振動の大きさを簡易的に計測することができる<sup>9)</sup>。

さらに、上記のような構造に設計したため、センサ本体用電源は不要であり、メンテナンスフリーで使用できる等、極限センサと同様の利点を持つ。

両センサを構造物へ実装する際は、梁の接合部や基礎部など、変形やひずみが生じやすい箇所に設置することで、損傷を検知可能と期待できる。

### 3. 組積煉瓦壁の圧縮破壊試験

本研究では、組積煉瓦造試験体を製作し、ピエゾ極限センサとピエゾ振動センサを取付け、圧縮破壊試験を実施した。試験結果から、本センサの出力電圧と圧縮応力・荷重、圧縮ひずみとの関係を検討した。さらに、試験体の破壊が始まる時点、最終破壊が起こる前の予兆、最終破壊（終局）を迎える時点をセンサ出力より検出できるか検証した。

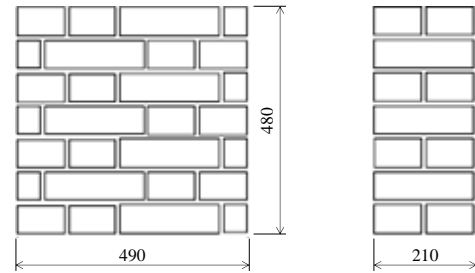
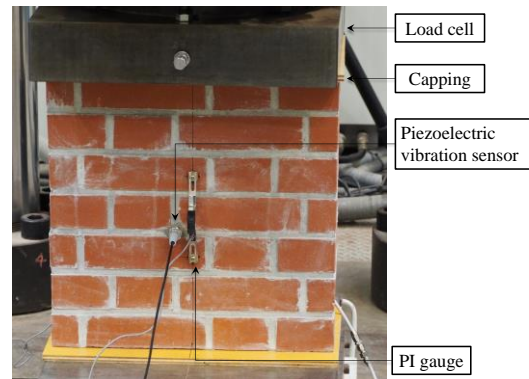
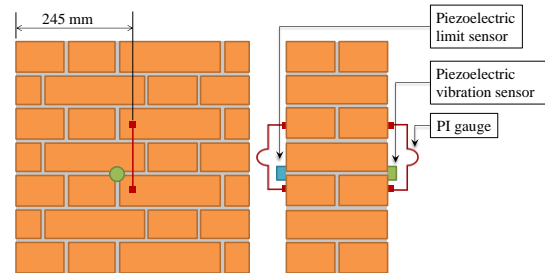


Fig. 3 フランス式組積



(a) 外観



(b) 各センサの設置位置

Fig. 4 組積煉瓦試験体

#### 3.1 組積煉瓦試験体

圧縮破壊試験では、組積煉瓦試験体の煉瓦の積み方を、広く普及しているフランス式とした。Fig. 3 にフランス式組積を示す。フランス式は各段において長手の煉瓦と小口の煉瓦を交互に並べる積み方である。

試験体の寸法は高さ 480 [mm]×幅 490 [mm]×厚さ 210 [mm]、目地幅 10 [mm]とした。試験体は組積煉瓦造構造物の壁面を模しており、7 段積みの組積煉瓦壁試験体として製作した。

#### 3.2 試験方法

圧縮破壊試験では、株式会社島津製作所製大型構造物試験機 UH-5000kN I 型を用いて試験体上面から圧縮荷重を印加した。JIS R 1250 (普通れんが及び化粧れんが) に準拠し、荷重荷重速度を毎秒 0.5~1.0 [N/mm<sup>2</sup>]に設定し、組積煉瓦試験体を加圧した。

Fig. 4 に製作した組積煉瓦試験体の外観および各センサの設置位置を示す。試験体の変形に

に伴う変位量を測定するために、東京測器研究所製パイ型変位計 PI-5-100（以下、パイゲージとする）を、正面および背面中央に1個ずつ設置した。パイゲージを設置した付近の目地交差部に直径15 [mm]の穴を開け、振動センサを正面、極限センサを背面に1本ずつ設置した。両センサはモルタルにより固定され、試験体と一体化させた。試験体上面から均等に荷重を加えるため、試験体の上面に木板を敷いた。本試験ではガラス管型のピエゾ極限センサを用いた。

試験実施中は、荷重試験機によって試験体に静的荷重を加えつつ、両センサの出力電圧およびパイゲージの変位を測定した。これらはグラフテック株式会社製ロガーGL900-8を用いて時系列に計測した。極限センサと振動センサのサンプリング周波数を100 [Hz]、パイゲージと圧縮試験機を1 [Hz]に設定した。

### 3.3 応力とひずみの比較

組積煉瓦試験体の強度を評価するために圧縮応力と圧縮ひずみの関係を求めた。以下に示す(1)式より圧縮応力、(2)と(3)式より圧縮ひずみを求めた。

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{2} \quad (2)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\bar{\delta}}{l} \quad (3)$$

ここで、 $\sigma$  は圧縮応力[N/mm<sup>2</sup>]、 $F$  は圧縮荷重[kN]、 $A$  は試験体の断面積[mm<sup>2</sup>]を表し、 $\delta$  は変位量[mm]、 $l$  はパイゲージの有効長さ(140 [mm])、 $\varepsilon$  は圧縮ひずみを表す。(2)式では、2つのパイゲージの測定値の合計 $\delta$ から平均値 $\bar{\delta}$ を求めた。さらに、(3)式より、 $\bar{\delta}$ をパイゲージの有効長さ $l$  (140 [mm]) で割ることで試験体全体の圧縮ひずみを表す平均ひずみ $\bar{\varepsilon}$ を求めた。

組積煉瓦試験体の圧縮応力と圧縮ひずみの関係を Fig. 5 に示す。試験体は、290 [sec]頃に最大応力 26.8 [N/mm<sup>2</sup>]、最大ひずみ 0.0042 に達し、最終破壊に至った。また、最大応力に達する前の270 [sec]付近に注目すると、ひずみが急激に変化していることがわかる。この時の圧縮応力は約 23.8 [N/mm<sup>2</sup>]であり、平均ひずみは約 0.0030 であった。

次に、ピエゾ極限センサおよびピエゾ振動センサを用いることで、試験体の破壊開始時点を検出可能かどうか評価するため、各試験体の破壊が始まる応力・荷重値の概算値を求めた。具

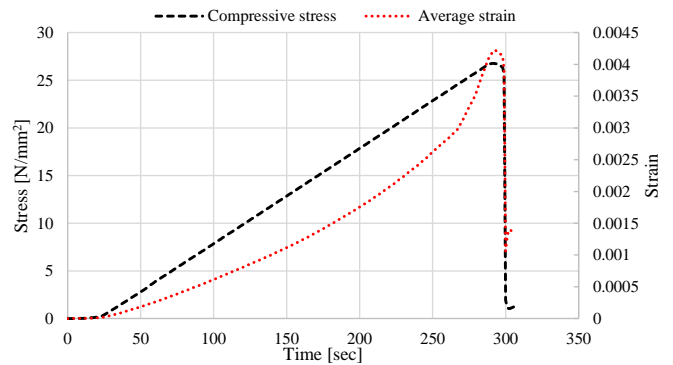


Fig. 5 応力とひずみの関係

体的には、組積煉瓦試験体における目地モルタル部でひび割れが生じると推測し、モルタルの破壊が始める時点を求めた。一般に、モルタルはコンクリートと同様に、最大応力の1/3を超えると、砂とセメントとの境界面で微細なひび割れを起こすと言われている<sup>10)</sup>。そこで、以下の(4)と(5)式より、試験体の破壊開始時点付近における荷重・応力の概算値を求めた。

$$\sigma_{1/3} = \frac{\sigma_{\max}}{3} \quad (4)$$

$$F_{1/3} = \sigma_{1/3} \times A \quad (5)$$

ここで、 $\sigma_{\max}$  は圧縮破壊試験で測定された最大荷重値から求めた最大応力値[N/mm<sup>2</sup>]、 $\sigma_{1/3}$  および $F_{1/3}$  は最大応力[N/mm<sup>2</sup>]および最大荷重[kN]の1/3倍における各々の概算値を表す。(4)式より最大応力の1/3倍を求めると、約 8.9 [N/mm<sup>2</sup>]となった。さらに、(5)式より荷重へ換算すると、約 917.9 [kN]となった。以上より、試験体の破壊開始時点を、これらの応力・荷重値を超えた後であると推測した。

### 3.4 ピエゾ極限センサとピエゾ振動センサの性能評価

圧縮破壊試験結果からピエゾ極限センサとピエゾ振動センサの性能を評価した。具体的には、両センサの出力電圧と圧縮応力、圧縮ひずみの関係を考察することで、両センサの性能を比較評価した。

Fig. 6 にピエゾ極限センサとピエゾ振動センサそれぞれのセンサ出力と圧縮応力の関係を示す。横軸は時間[sec]であり、線形的に増加していく応力とセンサ出力の関係を表している。ここで、考察にあたり以下の3項目を定義する。

- $\sigma_A$  : 破壊開始時点の圧縮応力値
- $\sigma_B$  : 最終破壊前の予兆が測定された時点の圧縮応力値
- $\sigma_C$  : 最終破壊時点の圧縮応力値



Table 1 センサ出力と応力の関係  
(ピエゾ極限センサ)

	$\sigma_A$	$\sigma_B$	$\sigma_C$
Time [sec]	245	273	300
Output voltage [V]	1.56	1.33	3.59
Stress [N/mm <sup>2</sup> ]	22.4	25.1	25.6

Table 2 センサ出力と応力の関係  
(ピエゾ振動センサ)

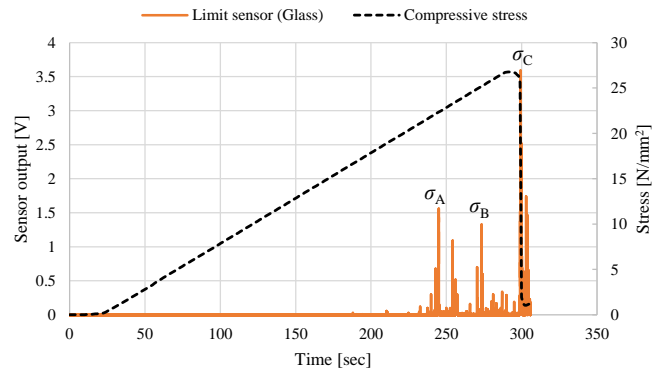
	$\sigma_A$	$\sigma_B$	$\sigma_C$
Time [sec]	—	281	300
Output voltage [V]	—	0.40	4.85
Stress [N/mm <sup>2</sup> ]	—	25.9	25.6

上記の応力値では、特等的なセンサ出力が測定された。これらの関係を Table 1 および Table 2 に示す。Table 1 は極限センサ、Table 2 は振動センサのセンサ出力と応力の関係を示している。なお、センサ出力が測定されなかった応力値については表中に「—」と表記した。

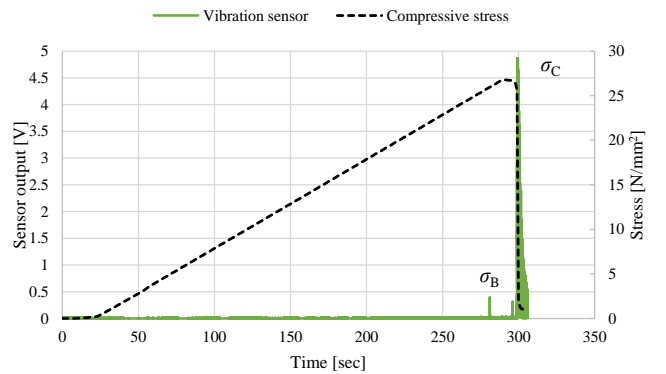
極限センサの場合は、Fig. 6 (a) に示すように  $\sigma_A$ 、 $\sigma_B$ 、 $\sigma_C$  それぞれで特徴的なセンサ出力が測定された。一方、振動センサの場合は、Fig. 6 (b) に示すように、特徴的なセンサ出力は2点測定された。Fig. 6 (a) と比較すると、破壊開始時点  $\sigma_A$  付近で出力が計測されなかったことがわかった。よって、振動センサにより破壊開始時点  $\sigma_A$  を検出することは困難であったと推測した。また、破壊が始まると推測した最大応力の1/3付近では両センサで出力は測定されず、これ以降でセンサ出力が測定された。このため、両センサの出力と計算で求めた破壊開始時点との整合性が認められた。

次にセンサ出力と圧縮ひずみの関係について説明する。Fig. 7 に組積煉瓦試験体におけるセンサ出力と圧縮ひずみの関係を示す。ここで、ひずみ曲線は、試験体の変形に対するセンサの応答を評価するために、各センサ付近に設置したパイゲージの測定値から算出したひずみ値を描画している。

Fig. 7 (a) に示す極限センサ側では、試験開始から約 245 [sec]の間で、荷重の増加に比例してひずみもほぼ線形的に増加した。ひずみが約 0.0024 に達した 245 [sec]に、約 1.6 [V]のセンサ出力が測定された。この時、試験体壁面にひび割れは観察されなかった。そのため、極限センサ周辺の試験体内部でひび割れが発生したと推測した。ひび割れによって試験体が微小に変形し、センサに負荷がかかったためガラス管

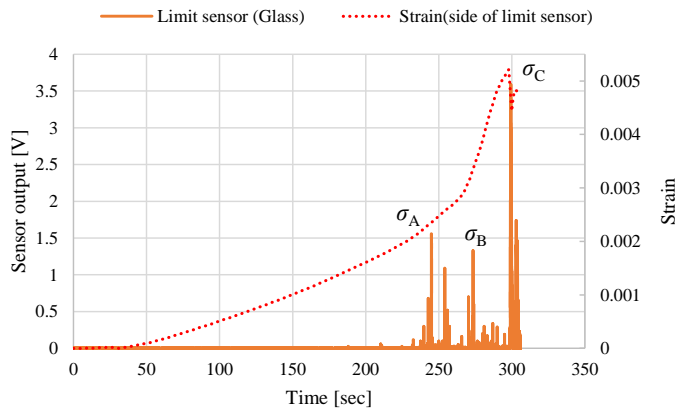


(a) ピエゾ極限センサ

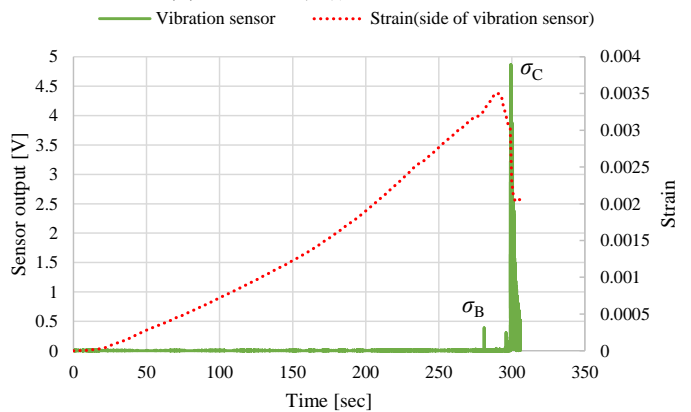


(b) ピエゾ振動センサ

Fig. 6 センサ出力と圧縮応力の関係



(a) ピエゾ極限センサ



(b) ピエゾ振動センサ

Fig. 7 センサ出力と圧縮ひずみの関係

に亀裂が生じたと考える。したがって、このセンサ出力が計測された時点を、組積煉瓦試験体の破壊開始時点  $\sigma_A$  と推定した。

265 [sec]付近で、ひずみ曲線の勾配が大きくなっており、ひずみの増加率の変化が測定された。この時、極限センサから約 1.3 [V]の出力が測定された。これは、最大応力に達する直前で生じた、試験体の大きな変形を検知できたことを意味する。したがって、このセンサ出力は試験体の最終破壊の予兆  $\sigma_B$  を示す出力であると推測した。

最後は、300 [sec]に最大応力に達した後に終局を迎え、試験体は最終破壊に至った。最終破壊と同時に極限センサから最大センサ出力が測定された。よって、極限センサにより最終破壊を正常に検知できたことを確認した。

一方、Fig. 7 (b) に示すピエゾ振動センサ側でも、試験開始から約 275 [sec]の間で、荷重の増加に比例しひずみもほぼ線形的に大きくなった。275 [sec]付近でひずみ曲線の勾配が変化し、ひずみの増加率が大きくなった。この近辺である 281 [sec]では、振動センサより 0.40 [V]の出力が測定された。さらに、Fig. 7 (a) を見ると、この出力が測定される前 (273 [sec]) には、最終破壊の予兆  $\sigma_B$  を示す極限センサの特徴的な出力が測定されたことがわかる。このことから、振動センサにより、最終破壊に至る前の、センサ周辺で生じた試験体の変形を検出できたと推測した。よって、このセンサ出力は最終破壊の予兆  $\sigma_B$  を示す出力であると考えた。

また、極限センサと同様に、300 [sec]に最大応力に達した後、試験体は最終破壊に至った。これと同時に振動センサから約 4.8 [V]の最大センサ出力が測定された。したがって、振動センサにより、正常に最終破壊を検知できたことを確認できた。

しかし、極限センサでは 245 [sec]頃に破壊開始時点  $\sigma_A$  を示すセンサ出力が測定され、同時間において振動センサでは出力が測定されなかった。このため、極限センサと異なり振動センサの場合は、試験体内部で生じたひび割れによる変形を検知することが困難であったと推測した。したがって、振動センサでは破壊開始時点  $\sigma_A$  を検知できなかったと考えた。

以上、組積煉瓦試験体の圧縮破壊試験結果より、ピエゾ極限センサとピエゾ振動センサによって煉瓦試験体の内部で生じた損傷を検知できる可能性が得られた。また、試験体内部のひび割れによる破壊開始時点  $\sigma_A$  の検出については、ピエゾ振動センサよりもピエゾ極限センサのほうが優れることが示唆された。

## 4. FEM 解析

### 4.1 解析モデル

静的な変形における三次元非線形有限要素解析を行った。FEM 解析結果と圧縮破壊試験結果を比較し、センサの有効性について検証した。

要素タイプは六面体要素(立体)を設定した。圧縮破壊試験の結果と解析結果との比較を行いやすくするために、解析モデルの寸法・目地幅は、実際の試験で用いた試験体と同様の寸法とし、煉瓦の積み方もフランス式を再現した。さらに、目地モルタル部および煉瓦部を再現するためにそれぞれ小さい要素と大きい要素に分割するメッシュ割りを設定した。

### 4.2 解析条件

FEM 解析にあたり、(4)、(5) 式より求めた破壊開始荷重の概算値  $F_{1/3}$ 、破壊開始時点の圧縮応力値  $\sigma_A$ 、最終破壊予兆測定時点の圧縮応力値  $\sigma_B$ 、最終破壊時点の圧縮応力値  $\sigma_C$  の 4 項目に注目した。

FEM 解析と実際の圧縮破壊試験では、試験体の最終破壊時点である最大荷重値に差が生じた。このため、上記 4 項目について圧縮破壊試験結果と FEM 解析結果を比較するには、最大荷重値の差を補正し解析を実行する必要がある。この差を補正するため、実際の試験で測定された荷重値に、係数を乗算して得られた荷重値を用いて解析を実行した。FEM 解析で得られた最大荷重値を、圧縮破壊試験で計測した最大荷重値で除算した値を係数とした。計算した結果、係数は 0.73 となり、この係数と圧縮破壊試験で測定した荷重値から、FEM 解析を実行する荷重値を求めた。算出した荷重値は以下の 4 通りであり、これらの荷重値を Table 3 に示す。

$P_{1/3}$ : 最大荷重 1/3 時点の荷重値 ( $F_{1/3}$ ) に係数を乗算した荷重値

$P_A$ : ピエゾ極限センサの出力から求めた破壊開始時点 ( $\sigma_A$ ) の荷重値に係数を乗算した荷重値

$P_B$ : 最終破壊予兆測定時点 ( $\sigma_B$ ) の荷重値に係数を乗算した荷重値

$P_C$ : センサ出力が見られた最終破壊時点 ( $\sigma_C$ ) の最大荷重値に係数を乗算した荷重値

本研究では、ピエゾ極限センサに焦点を当て、FEM 解析を実行した。そのため、極限センサの特徴的な出力が測定された破壊開始時点、完全破壊時点、最終破壊時点における荷重値に対して係数を乗算して求めた荷重値をもとに解析を実行した。

Table 3 FEM 解析のパラメータ

Parameter	Load [kN]
$P_{1/3}$ [kN]	670.07
$P_A$ [kN]	1679.1
$P_B$ [kN]	1888.6
$P_C$ [kN]	1923.8
Coefficient	0.73

#### 4.3 解析結果

Fig. 8 に FEM 解析より得られた組積煉瓦試験体のひび割れ図を示す。ひび割れ図では、試験体に生じるひび割れ等の破壊状態を可視化しており、図中の矢印で亀裂が生じている箇所を示した。

最大荷重の 1/3 付近  $P_{1/3}$  以降に、微細なひび割れが発生し破壊が始まるとされている。実際の試験でも、最大荷重の 1/3 付近  $P_{1/3}$  を大きく超えた後にひび割れ等の損傷が観察され、最大荷重の 1/3 付近ではひび割れは観察されなかった。Fig. 8 (a) に示すひび割れ図においても、ひび割れは見られなかった。さらに、実際の圧縮破壊試験でも目立ったセンサ出力は測定されなかったため、整合性が認められた。

また、Fig. 8 (b) と (c) に示した、特徴的なセンサ出力が計測された  $P_A$  および  $P_B$  では、荷重の増加に比例してひび割れが進展していく解析結果が得られた。実際の圧縮破壊試験では、目視によるひび割れ等の損傷の観察が困難であったが、センサ出力によりその発生を検出できたため整合性を確かめることができた。

Fig. 8 (d) に示す最終破壊時点  $P_C$  では、解析モデルと実際の試験体ともに最大荷重に達した際に大きくひび割れが発生し終局を迎えた。実際の試験においても、最大センサ出力が測定されたため整合性を確認できた。

以上より、FEM 解析結果と圧縮破壊試験結果の間で、試験体が終局を迎えるまでで大きな差異は認められず、両者の間で整合性が取れていることを確認できた。さらに、圧縮破壊試験においてセンサ出力が計測された時点における荷重値について解析した結果、シミュレーション上でもひび割れが発生、進展していた。

## 5. 結言

本研究では、ピエゾ極限センサおよびピエゾ振動センサを用いた組積煉瓦試験体の圧縮破壊試験を行い、両センサの有効性を検証した。

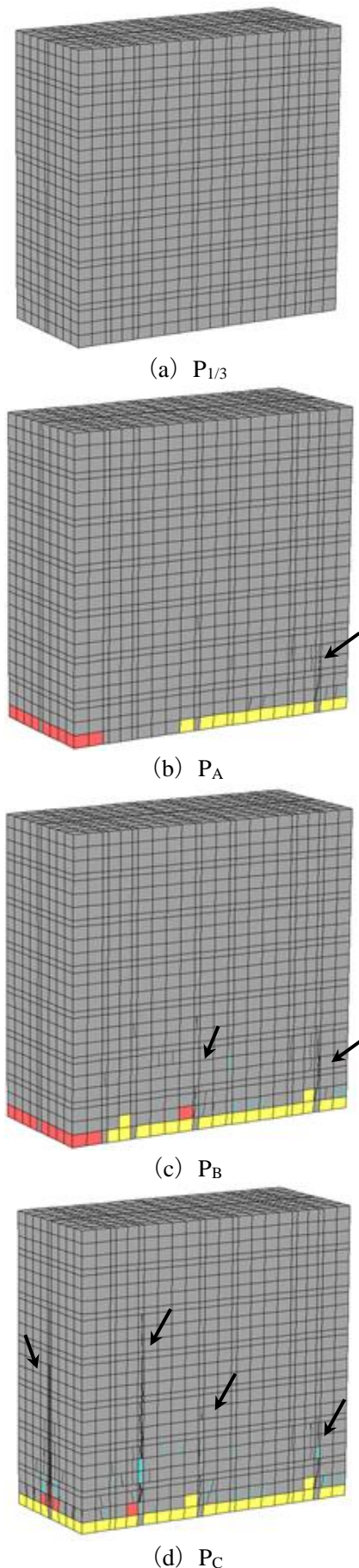


Fig. 8 FEM 解析によるひび割れ図

さらに、実際の圧縮破壊試験を再現した FEM 解析を行い、試験結果と FEM 解析結果を比較し、センサの有効性について検証した。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) ピエゾ極限センサおよびピエゾ振動センサを組積煉瓦試験体へ挿入することで、センサ出力電圧値により試験体の破壊進行具合を推定できる可能性が得られた。
- (2) ピエゾ極限センサによって、ピエゾ振動センサよりも精度よく試験体の破壊開始時点を検知できる可能性が得られた。
- (3) 実際の圧縮破壊試験と FEM 解析の結果を比較した結果、実際の試験で特徴的なセンサ出力が測定された荷重値において FEM 解析上でもひび割れが可視化され、実際の試験結果と FEM 解析結果の整合性が認められた。

以上より、ピエゾ極限センサとピエゾ振動センサによって、構造物の変形やひび割れ等の損傷を検知し、構造物の最終破壊の危険予知へ応用できる可能性が得られた。

今後は、さらに圧縮破壊試験を実施し、ピエゾ極限センサおよびピエゾ振動センサの信頼性について検討する予定である。ならびに、センサ出力からセンサ設置箇所付近に生じる応力や変位量等を簡易的に求めるために、ピエゾ極限センサの単体特性試験を実施し、センサ出力電圧値と荷重やひずみとの関係を検討する予定である。

## 参考文献

- 1) 檜府龍雄：「ノンエンジニアド住宅の地震被害軽減方策に関する研究：学際的、業際的、国際的なアプローチの提案」、地域安全学会梗概集, 28, 11/14 (2011)
- 2) 目黒公郎：「2005年パキスタン北部地震による一般住宅の被害と簡便で低価格な耐震補強法の提案」、自然災害科学学会, 25-3, 381/392 (2006)
- 3) 田阪昭彦：「ノンエンジニアド住宅の耐震性向上のための阻害要因分析に関する研究」、国立大学法人 横浜国立大学大学院工学府 博士論文 (2013)
- 4) 山本憲二郎, 沼田宗純, 目黒公郎：「特殊繊維塗料を用いた組積造構造物の耐震補強に関する実験的研究」、生産研究, 66-6, 561/564 (2014)
- 5) 山本鎮男 (編)：「ヘルスマニタリングー機械・プラント・建築・土木構造物・医療の健全性監視ー」、3/5, 共立出版 (1999)
- 6) 中村 充：「建築構造物のヘルスマニタリング」、計測と制御, 41-11, 819/824 (2002)
- 7) 一般社団法人 日本非破壊検査協会 (編)：「アコースティックエミッションによる機械診断」、2, 一般社団法人 日本非破壊検査協会 (2014)
- 8) P. C. Chang, A. Flatau, and S. C. Liu. : 「Review paper: health monitoring of civil infrastructure」、Structural health monitoring, 2-3, 257/267 (2003)
- 9) 下井信浩, Carlos H. CUADRA, 間所洋和, 西條雅博：「簡易ピエゾケーブル変位センサと有限要素法を用いた伝統木造構造物の振動解析」、日本機械学会論文集 C 編, 79-806, 3442/3452 (2013)
- 10) 市ノ瀬敏勝：建築学の基礎② 鉄筋コンクリート構造, 共立出版, 20/22 (2000)