レンガ造煙突の耐震性評価に関する解析的研究

長崎大学大学院　学生会員　○　日高　哲郎
長崎大学大学院　非会員　松山　直紀
計測リサーチコンサルタント　非会員　梅本　秀二
長崎大学　正会員　松田　浩

1. はじめに

世界遺産の議論の高まりの中，歴史的建造物のみならず，近代化産業遺産建造物の保存･活用が注目されるようになった．このような歴史的建造物の保存･活用を検討する上で，福岡西方沖地震や中越地震のように昨今頻発している大地震に対する耐震性能評価は不可避な課題である．歴史的建造物は全国各地に存在するので，できる限り簡便に評価できる手法の確立が望まれる．

本文では，築後約 100 年のレンガ造煙突を解析対象とした．この煙突はひび割れやレンガ目地のモルタルの劣化が進んでいる．今後これを保存あるいは新構造体として利用するには，現煙突の耐震性評価を行ったうえで，補修･補強を行う必要がある．

本文では，FEM 汎用ソフトを使用して，このレンガ造煙突を対象として，実験結果をふまえた固有値解析および非線形地震応答解析を行い，それらの解析結果から耐震性評価をすることを目的とする．

2. 材料特性および構成則

2.1 概要

レンガ造煙突は，レンガをモルタルでつなぎ合わせたブロックでつくられており，それを FEM モデルに直接反映するのは困難である．そこで本論文ではレンガの目地を二層含むブロック体で抜き出し，引張試験および圧縮試験を行い，材料特性を算定した．また，その結果からレンガの材料構成則を作成した．さらに，地盤の特性を FEM モデルに反映するため，地盤の抵抗値を水平，鉛直，回転の 3 方向のばね剛性で算出した．

2.2 実験結果

圧縮試験および引張試験の結果を，表 1 に示す．また，レンガの構成則を図 1 に示す．さらに，調査結果より，この地盤の特性を表す水平剛性，鉛直剛性，回転剛性の値はそれぞれ，7.39×10^{7} (kN/m)，8.31×10^{7} (kN/m)，5.71×10^{8} (kN･m/rad)となった．

表 1. 材料特性

弾性係数 (N/mm^2)	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	せん断弾性係数 (N/mm^2)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m^3)
1.14×10^{4}	17.6	1.3	5.26×10^{3}	0.084	19

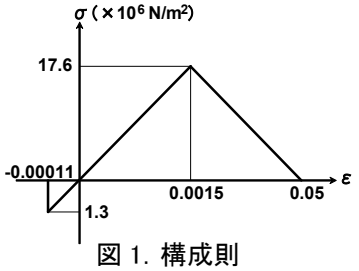

図 1. 構成則

3. レンガ造煙突の固有値解析

3.1 概要

まず，固有値解析を行った．それによって得られた固有振動数と，実験で得られた 1 次モードの固有振動数 1.5(Hz)とを比較検討し，FEM モデルの妥当性の確認を行った．また，有効質量比を算出した．

3.2 モデル概要

モデルの寸法および概略を図 2 に示す．質点の位置，高さは表 2 に示す．それらをもとに作成した FEM モデルを図 3 に示す．

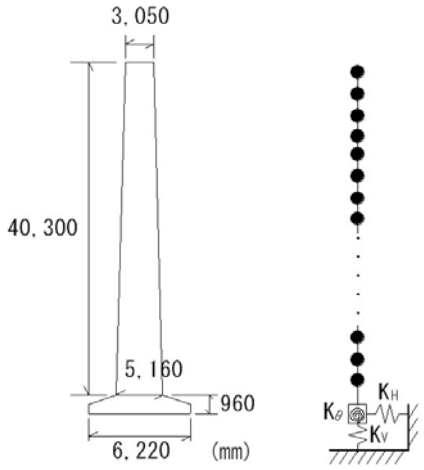

図 2. モデル概略

表 2. 高さごとの質量

モデル	
質点位置(mm)	質点重量(kg)
38685	17029
35445	17626
32536	19658
29930	22290
27446	25007
24962	25666
22326	34367
19583	35374
16750	35527
14335	35563
11961	36416
9567	37269
7361	40538
5604	38090
3847	38090
2090	29431
1230	36739
410	26287

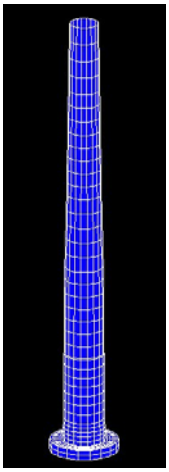

図 3. FEM モデル

3.3 解析結果

解析結果を図 4，図 5 に示す．1 次の固有振動数は，実験値の 1.5(Hz)に対して 1.584(Hz)となり FEM モデルの妥当性が確認できた．また，図 4，図 5 に示す振動モードは，表 3 に示す有効質量比から，頻度の高い振動モードと考えられる．

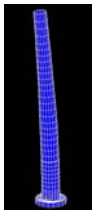

図 4. 1 次モード

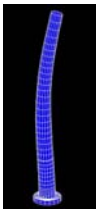

図 5. 2 次モード

表 3. 有効質量比

	振動数(Hz)	有効質量(kg)	有効質量比(%)
Mode 1	1.584	257567	42%
Mode 2	6.593	115124	19%
Mode 3	15.08	59213	10%
Mode 4	19.89	0	0%
Mode 5	21.4	0	0%
Mode 6	22.45	0	0%
Mode 7	26.14	33453	6%
Mode 8	39.02	22329	4%
合計		487686	80%

4. レンガ造煙突の非線形地震応答解析

4.1 概要

ここではレンガ造煙突の非線形地震応答解析を行った. FEM モデルには固有値解析と同様のものを用いて解析を行った.

4.2 耐震解析法および入力地震波

地震応答解析には, Newmark の β 法(β =1/4)を用い, 減衰はレーリー減衰を用いた. レーリー減衰の設定に用いる 2 つのモードは, 表 3 に示す 1 次と 2 次モードである. 減衰定数は, 0.03 とした.

入力地震波は, 道路橋示方書[1]に基づく1種地盤用のタイプ 1(T111. T112. T113)およびタイプ 2(T211. T212. T213)の 6 波である. 入力地震波は, この煙突が存在する地域別補正係数(0.85)で振幅を補正し入力した.

4.3 解析結果

6 波のうちタイプ 2 の T211 の地震波が作用した時のみが煙突の高さ中央付近で塑性した. そのほかは煙突の根元付近で塑性した. それぞれの塑性箇所の拡大図を図 6, 図 7 に示し, その応力-ひずみ関係を図 8～図 10 に示す. 根元が塑性しているものについては, 代表して T111 の地震波が作用しているものを用いる. また, 図 11 に中央付近が塑性する場合と根元が塑性する場合の各高さごとの最大応力分布を示す.

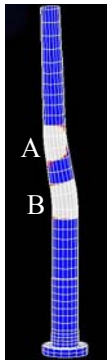

図 6. 中央付近の塑性化
(地震波:T211)

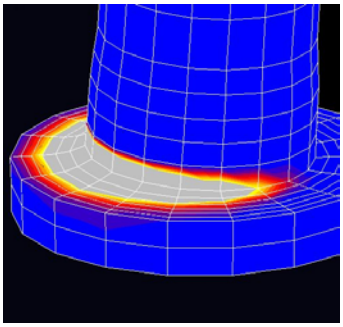

図 7. 根元付近の塑性化
(地震波:T111)

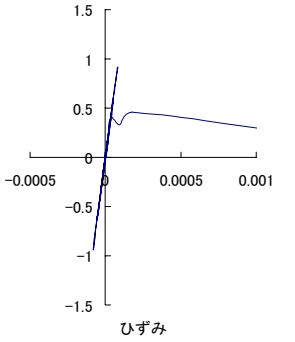

図 8. 中央付近 A の
応力-ひずみ関係

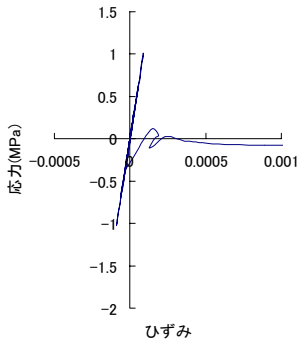

図 9. 中央付近 B の
応力-ひずみ関係

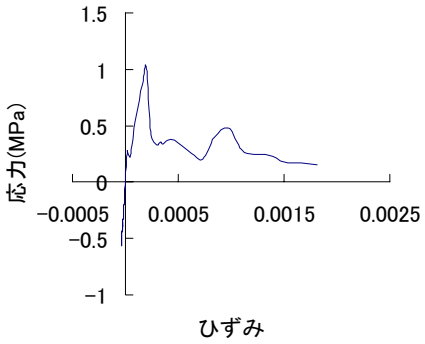

図 10. 根元付近の応力-ひずみ関係

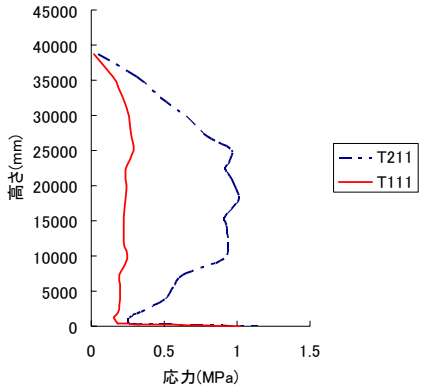

図 11. 高さごとの最大応力分布

5. まとめ

固有値解析では, 実験と解析結果の比較により, FEM モデルの妥当性が確認できた. そのモデルを用いて非線形地震応答解析を行ったところ, T211 の地震波では煙突高さ方向の中央付近で塑性化し, それ以外の地震波では, 煙突の根元付近から塑性化する結果を得た. これらのことから, 入力地震波相当の地震が発生した場合には, 根元および中央部で破壊する可能性があるものと考えられ, 破壊の恐れがある箇所の補修・補強が必要だと考えられる.

また, 歴史的建造物には, 図面等の情報がないものもあるため, 今後は写真計測やレーザ計測により形状データを計測し, それを基に FEM モデルを作成し, 耐震性能を評価するシステムを構築することも必要である.

参考文献

[1] (社)日本道路公団:道路橋示方書・同解説 5 耐震設計編, 平成 14 年