

論文 高さ方向に不連続な曲げ強度分布を考慮した鉄筋コンクリート造煙突の弾塑性地震応答

金 秀禧^{*1}・塩原 等^{*2}

要旨：鉄筋コンクリート造煙突の曲げ強度分布は、高さ方向に主筋の切り替わる位置で階段状になる不連続な分布になる。本研究では、高層煙突を対象として、高さ方向に 7, 28, 56 または 112 に分割し、曲げ変形を考慮する質点モデルで表し、煙突の不連続な強度分布と部分的な配筋詳細の不具合による局所的な強度欠陥を考慮した弾塑性応答性状の検討を行う。入力地震動の最大加速度が同一であっても、地震動の卓越周期によって煙突の損傷度と損傷分布に影響があることが示される。また、煙突の高さ方向に主筋が変化する部分で応力が集中し、さらに局所的な強度欠陥がある場合は、局所的に過大な変形が集中することを明らかにする。

キーワード：鉄筋コンクリート造、煙突、不連続な曲げ強度分布、分割数、曲げ塑性率、部分的強度欠陥

1. はじめに

2007年7月16日発生した新潟県中越沖地震により、清掃工場の高さ58メートルの鉄筋コンクリート造煙突が大きな被害を受けた。文献¹⁾には、煙突の損傷状況は、外筒部のGL+17.6mから上部がおよそ6メートル破壊したと報告されている。

鉄筋コンクリート造塔状工作物における鉄筋の配筋は、設計用モーメントにあわせて上方ほど主筋量を減じているのが一般的である。しかし、実際の曲げ強度は、鉄筋には定尺があるため、高さ方向に鉄筋断面を切り替える位置で階段状に減少する不連続な分布となっている。国土技術政策総合研究所や建築研究所の資料²⁾では、被害を受けた煙突の各高さ位置での断面の許容曲げモーメントは建築基準法令の耐震基準で要求される必要曲げモーメントを上回っていたが、主筋をダブル配筋からシングル配筋に切り替える位置では、主筋の重ね継手

や主筋のカットオフによる強度の欠陥があり、局所的に曲げ強度が減少する不連続な部分もあったことが報告されている。このように、鉄筋コンクリート造の煙突は、配筋上の配慮の不足や拘束鉄筋の不備があると、断面の一体性が確保できなくなり、曲げ強度の低い断面に塑性変形が集中し、その部分が折損する原因になった可能性が高い。

そこで本研究では、そのような現象を解明するために、不連続な曲げ強度の分布を考慮した鉄筋コンクリート造煙突の耐震性能を検討することを目的として、短周期および長周期の地震動を用いて、高さ58メートルの鉄筋コンクリート造煙突を対象とした弾塑性地震応答解析を行い、応答特性を検討する。

2. 煙突の構造概要と解析モデル

2.1 煙突の構造概要

表-1 煙突の概要

番号	高さ (m)	外筒部分					鉄筋配筋	
		平均径 (m)	平均壁厚さ (m)	断面積 (m ²)	各部重量 (kN)	軸力 (kN)	外側	内側
7	53.5~58	4.6	0.19	3.30	392	392	100-D16	-
6	44.5~53.5	4.6	0.21	3.66	870	1262	100-D16	-
5	35.5~44.5	4.6	0.24	4.14	985	2247	100-D19	-
4	26.5~35.5	4.6	0.27	4.62	1098	3345	100-D22	-
3	17.5~26.5	4.6	0.30	5.09	1209	4554	100-D25	-
2	8.5~17.5	4.6	0.32	5.55	1319	5872	100-D22	92-D22
1	GL~8.5	4.6	0.35	5.99	1344	7216	112-D25	100-D25

*1 東京大学 大学院工学系研究科建築学専攻 修士課程 (正会員)

*2 東京大学 大学院工学系研究科建築学専攻 准教授 工博 (正会員)

煙突は、外筒型独立式 RC 造となっており、外筒部は、高さ 58m の鉄筋コンクリート造で外径が一辺 4.6 メートルの正方形箱型断面を有している。外筒の壁板厚と鉄筋の配筋は高さ方向に変化している。本研究では鉄筋コンクリート造である外筒部分を解析対象とする。表-1 には、独立行政法人建築研究所の資料²⁾をもとに、解析対象の煙突の概要を示している。

2.2 解析モデルと解析条件

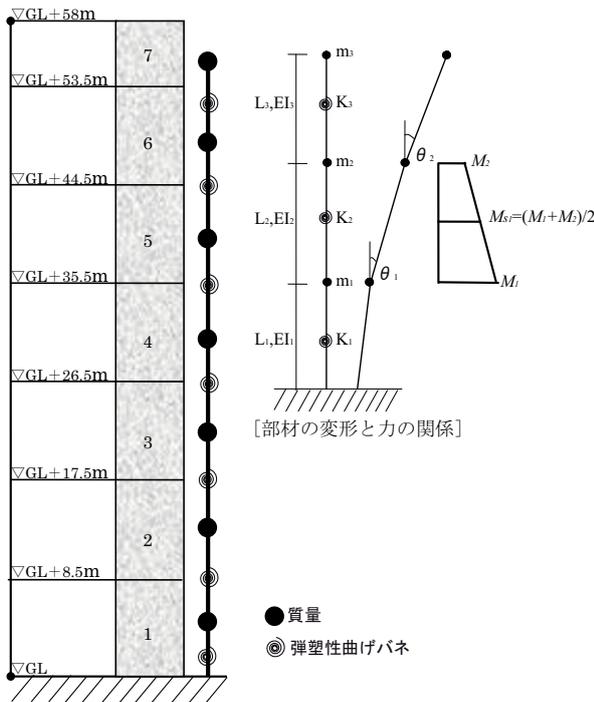


図-1 煙突のモデル(7分割)

高層煙突の設計においては、実用性の観点から実務では高さ方向に 9~13m ごとに分割した曲げ変形を考慮する質点モデルで時刻歴地震応答解析を行い、安全性を検討することが一般的になってきた。ところが、不連続な曲げ強度分布や、局所的な断面の強度欠陥がある煙突の弾塑性応答性状を正確に検討するためには、煙突の高さ方向に要素の分割数を増やす必要がある。そこで、本研究では、最近の時刻歴応答解析による設計事例を参考にして、煙突の最小分割数を主筋の配筋が切り替わることを基準に 7 分割とする。さらに、不連続な曲げ強度分布の影響をより精確に考慮するために、要素を小さくした場合を考え、それぞれの要素 1 つを 4 分割、8 分割、16 分割して、合計 7 分割、28 分割、56 分割、112 分割となるようにする。

煙突は、各要素の中央に変形を、節点に質量をそれぞれ集約させる多質点曲げせん断棒バネモデルに置換する。各要素の中央には弾塑性回転バネを設けそれらをつなぐ要素は剛であるとする。そして、各節点の自由度は、水平方向 1 自由度、回転方向 1 自由度とし、各要素の断

面性能においては、各ブロック中央レベルにおける断面を採用し、要素内は一樣断面とする。基礎は固定として仮定する。この煙突を 7 分割した場合の解析モデルを図-1 に示す。応答解析上の数値積分は Newmark- β 法 ($\beta = 1/4$) を用い、計算時刻刻み Δt は 0.001 秒とする。減衰定数は内部粘性減数として、系の 1 次と 2 次周期に対して 2% の Rayleigh 型減衰とする。

2.3 部材の応力と変形

要素の中央に配置される弾塑性回転ばねの柔性 f より、要素の剛性マトリクス $[K]$ は次のように定められる。



柔性マトリクス $[F]$ と釣合マトリクス $[H]$ は式(1)と式(2)で表す。

$$\begin{Bmatrix} dx_2 \\ d\theta_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L^2}{3} f & \frac{L}{2} f \\ \frac{L}{2} f & f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_2 \\ m_2 \end{Bmatrix} \quad (d_2 = [F] \cdot P_2) \quad (1)$$

$$[H] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ L & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

部材の応力と変形の関係は次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} HKH^T & -HK \\ -KH^T & K \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{Bmatrix}, [K] = [F]^{-1} \quad (3)$$

$$P_1 = \begin{Bmatrix} p_1 \\ m_1 \end{Bmatrix}, P_2 = \begin{Bmatrix} p_2 \\ m_2 \end{Bmatrix}, d_1 = \begin{Bmatrix} dx_1 \\ d\theta_1 \end{Bmatrix}, d_2 = \begin{Bmatrix} dx_2 \\ d\theta_2 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

2.4 復元力特性

弾塑性回転バネの復元力特性は、曲げ変形を考慮して定め、日本建築学会の煙突構造設計指針 2007³⁾に従い、弾塑性回転バネの位置の煙突断面について求めたコンクリートひび割れ点 (M_c)、引張側最外筋の降伏点 (M_y)、および圧縮縁コンクリートの圧縮による終局点 (M_u) の 3 点で決まるトリリニア型とした。履歴法則は、Takeda モデルとし、せん断に対しては弾性とした。

(1) ひび割れモーメントと変形

ひび割れモーメント M_c は、式(5)により求める。

$$M_c = (f_r + N/A_c) \cdot Z_c \quad (5)$$

ここで、 M_c : ひび割れモーメント

f_r : コンクリート引張強度 = $0.38\sqrt{F_c}$

N : 断面に働く軸方向力

A_c : 等価断面積

Z_c : 有効断面係数

ひび割れ曲率 ($1/\rho_c$) は、コンクリートのヤング係数 E_c と、断面 2 次モーメント I_c を用いて式(6)となる。

$$1/\rho_c = M_c / (E_c I_c) \quad (6)$$

(2) 降伏時のモーメントと変形

断面保持の仮定より、断面応力の釣り合いから中立軸を求め、降伏時のモーメント M_y を求める。降伏曲率は、断面の応力-ひずみ分布が直線分布であるから、式(7)となる。

$$1/\rho_y = (\varepsilon_c + \varepsilon_y) / d \quad (7)$$

ここで、

$\varepsilon_y = \sigma_y / E_s$ (最外端鉄筋ひずみ)

$\varepsilon_c = \varepsilon_y x_n / (d - x_n)$ (圧縮側コンクリートひずみ)

σ_y : 鉄筋降伏応力度

x_n : 降伏時の中立軸位置

d : (直径)-(引張側コンクリートかぶり厚さ + 1/2 × 主筋径)

したがって、第2剛性勾配比 α_1 は弾性剛性に対して

$$\alpha_1 = \left(\frac{M_y - M_c}{1/\rho_y - 1/\rho_c} \right) / (E_c I_c) \quad (8)$$

(3) 降伏時のモーメントと曲率

Tri-linear 形スケルトンカーブの第3剛性勾配比 α_2 を求めるために、終局時の曲げモーメント M_u 、曲率 $1/\rho_u$ を計算する。

$$1/\rho_u = (\varepsilon_c + \varepsilon_t) / d \quad (9)$$

ここで、

ε_c : コンクリート圧縮縁ひずみ (=0.4%)

ε_t : 引張側最外端鉄筋ひずみ

したがって、第3剛性勾配比 α_2 は弾性剛性に対して

$$\alpha_2 = \left(\frac{M_u - M_y}{1/\rho_u - 1/\rho_y} \right) / (E_c I_c) \quad (10)$$

表-2 は図-1 に表した煙突モデルのそれぞれ位置で設計用モーメント (M)、ひび割れモーメント (M_c)、降伏モーメント (M_y)、剛性勾配比を示す。

表-2 復元力特性

位置	M (kNm)	M_c (kNm)	M_y (kNm)	剛性低下率	
				α_1	α_2
7	3629	3266	5171	0.03	0.001
6	10685	10059	11373	0.08	0.003
5	17539	12308	19810	0.12	0.007
4	24394	14637	27136	0.15	0.012
3	31248	16409	36223	0.18	0.016
2	38102	19594	50856	0.21	0.020
1	44957	22200	71861	0.25	0.023

2.5 煙突施設の設計用地震荷重と解析時の耐力

(1) 設計用モーメント

地震荷重による設計用モーメントは、昭和56年建設省告示第1104号(現在は、平成12年建設省告示第1449号に移行) ⁴⁾に基づいて式(11)により求める。

$$M = 0.4 \times h \times C_{si} \times W \quad (11)$$

ここで、

M : 設計用曲げモーメント

h : 地盤から煙突頂部の高さ ($h=58\text{m}$)

W : 煙突の地上部分の全重量

C_{si} : 外筒の地上部分の高さ方向の力分布を表す数字で、計算しようとする該当外筒の部分の高さに応じて次の式に適合する数値

$$C_{si} = 0.3 \times Z \times \left(1 - \frac{h_i}{h}\right)$$

Z : 地域地震係数 (新潟県 $Z=0.9$)

h_i : 外筒の地上部分の各部分の地盤からの高さ

(2) 高さ方向の降伏時の曲げモーメントの分布

本解析では、図-3のように2種類の降伏時の曲げモーメント分布を考慮して比較した。ケース1は、地震被害を受けた煙突の配筋から求めた分布で、断面欠損がないと仮定しているため、主筋の配筋が切り替わることで降伏時の曲げモーメント分布が不連続に変化する階段状の分布となっている。ケース2は、これに加えて、煙突の地上から高さ17.5メートルで局所的な強度欠陥があることを考慮した曲げモーメント分布であり、ケース1を基準(100%)として、欠陥がある位置で降伏時の曲げモーメントを80%、70%、60%と次第に低減させながら解析を行い、比較した。

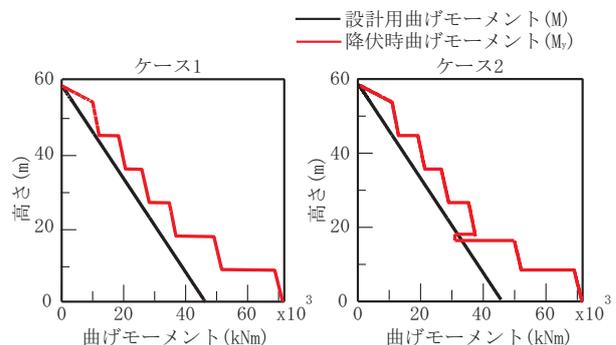


図-3 降伏時の曲げモーメント分布

2.6 入力地震動

本解析では、表-3に示す地震動を用いて、それぞれの地震動は、最大加速度が0.3g、0.5g、0.7gとなるように倍率を乗じて基準化した。図-4には最大加速度を0.7gと基準化した地震動の速度応答スペクトルを示す。

表-3 入力地震動

地震波	発生年	最大加速度(gal)	地震名
El Centro NS	1940	341.7	Imperial Vally
Taft EW	1952	175.9	Kern County
宮城沖 LG	1978	311.5	宮城県沖地震
小千谷 2004 NS	2004	779.0	新潟県中越地震
柏崎 2007 NS	2007	667.0	新潟県中越沖地震

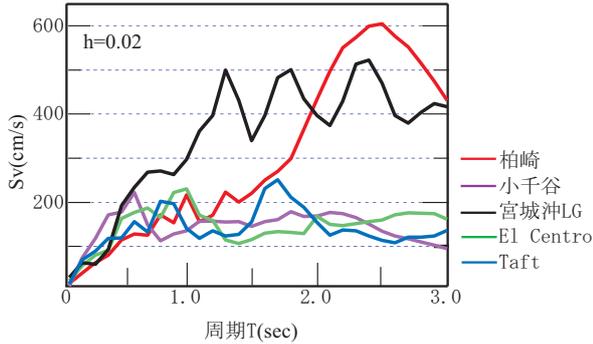


図-4 最大速度応答スペクトル

3. 解析結果

3.1 固有値解析結果

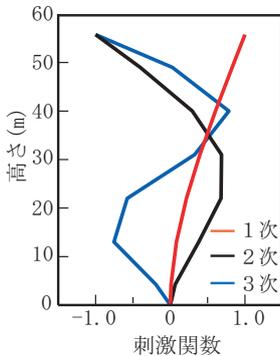


図-5 固有モード形状

表-4 固有周期

モード	固有周期 (sec)
1次	1.012
2次	0.185
3次	0.072

3.2 応答解析結果

(1) 最大変位および曲げモーメント応答

図-6~8は、煙突の局所的な曲げ強度の欠陥がないケース1と、欠陥があるケース2において、地震動の強さによる応答の比較をしている。図-6ではそれぞれの入力地震動の最大加速度を0.3g, 0.5g, 0.7gとした時の煙突の最大変位応答を示し、図-7では最大曲げモーメント応答を示す。そして、図-8では煙突の頂部の時刻歴変位応答を示している。

全体的に小千谷, El Centro, Taftの地震動による応答は、最大加速度を0.3gから0.7gと増大するに従って、煙突の頂部の変位応答は約10cmから40cm程度と大きくなるが、煙突の特定の高さに欠陥の有無による変位応答の差

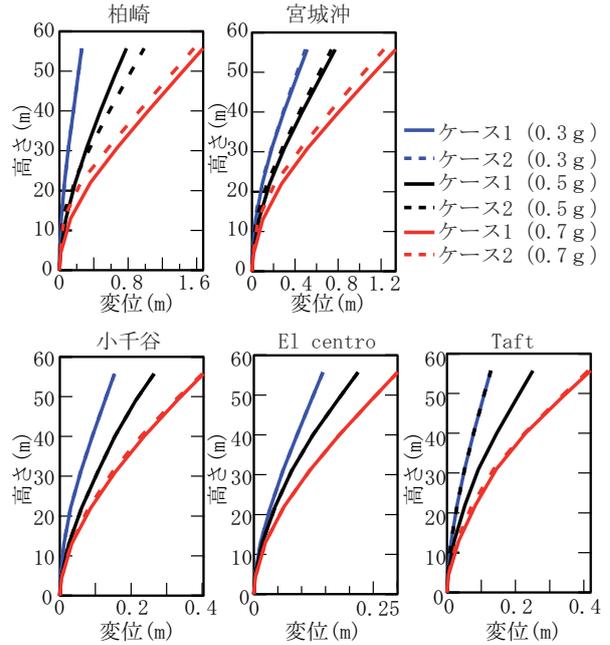


図-6 最大変位応答

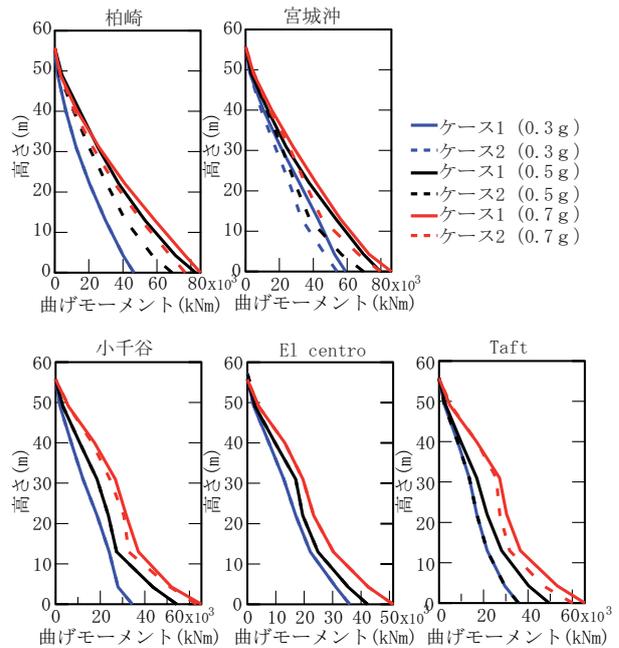


図-7 最大曲げモーメント応答

は見られない。そして、柏崎 2007 と宮城沖の地震動による変位応答は、地震動の強さが大きくなるに従い、煙突の頂部の変位が約20cmから160cmに大きく変化していることがわかる。なお、最大加速度を0.3gとして入力した場合は宮城沖地震による応答が柏崎 2007 による応答を上回っているが、0.5gおよび0.7gと強くするに従い、柏崎 2007 による応答が宮城沖による応答を上回る。それから、最大加速度を0.7gとして入力した場合、煙突に部分的な強度欠陥があるケース2において最大変位が少し減少しているが、全体的に大きな差は見られない。

最大曲げモーメント応答は、小千谷, El Centro, Taftに

対して、地震動の強さに従い、ベースモーメントが増加しているが、煙突の強度欠陥による応答の変化は大きくない。柏崎 2007 と宮城沖の地震に対しては、最大加速度が 0.5g および 0.7g とした場合に、煙突の欠陥があると考慮したケース 2 で、ベースモーメントが低減する。

図-8の柏崎 2007 と宮城沖地震動による煙突頂部の時刻歴変位応答では、地震動の強さに従い、徐々に周期が長くなっている。また、強度の欠陥があるケース 2 ではケース 1 と比べ、さらに周期が長くなる。最大加速度 0.3g の入力の際は、応答は 2 秒以下の周期であるが、最大加速度 0.5g の入力の際は、2 秒～3 秒の周期となっており、最大加速度 0.7g の入力の際は、3 秒以上の周期となる。図-4の応答スペクトルから、1 秒～2 秒の間の周期の領域では宮城沖のパワーが大きい。2 秒では宮城沖と柏崎 2007 がほぼ同程度のパワーを持ち、2 秒以上では柏崎のパワーがもっとも大きくなることから、地震動の大きさによる最大応答変位の変化の理由が説明できる。そして、柏崎 2007 の元波に近い 0.7g の最大加速度は約 100kine に相当することから、設計用地震力より大きな地震力の入力があったことが予測される。

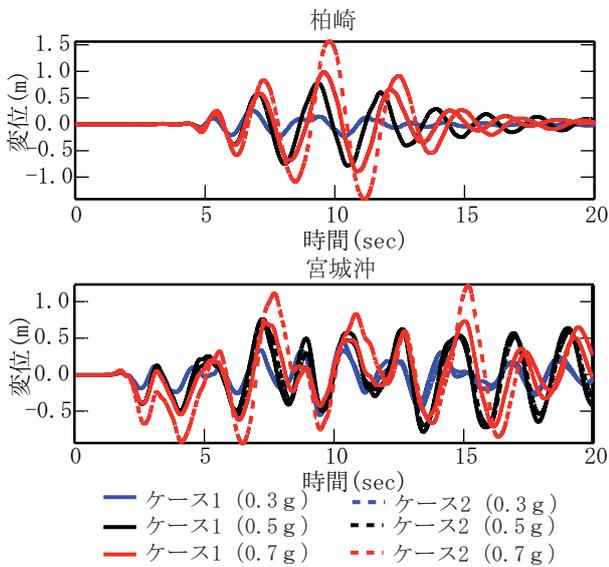


図-8 煙突の頂部の時刻歴応答変位

(2) 最大曲げ塑性率分布

図-9 と図-10 では地震動の最大加速度を 0.7g とし、入力時の煙突の曲げ強度の欠陥がないケース 1 と部分的な曲げ強度の欠陥を想定したケース 2 において、解析分割数による最大曲げ塑性率応答を示す。ケース 1 では、煙突の高さ方向の主筋の切り替えにより曲げ強度が不連続な階段状となり、曲げ強度が大きく変化するところで、応力が集中し煙突の上方向に塑性率の分布が鋸歯状になっている。特に、柏崎 2007 と宮城沖地震動の入力の場合で分割数を 7 分割から 112 分割に増やしていくに

つれて、塑性率の分布が鋸歯状になる度合いが大きくなる。一方、ケース 2 では、煙突の強度の欠陥を想定した高さで変形が集中し、塑性率が大きく突出する分布となることがわかる。

そして、ケース 1 とケース 2 の場合ともに、塑性化していないところでは分割数による最大応答曲げ塑性率の変化は小さく、塑性化が大きく進んだところでは、分割数が多くなるほど、曲げ塑性率が大きくなる。このように煙突の曲げ強度分布が不連続なところで最大曲げ塑性率が最も大きくなる。さらに、部分的な曲げ強度の欠陥があると、強度が低下する部分に変形が集中するため、煙突施設の損壊を招く原因になると考えられる。

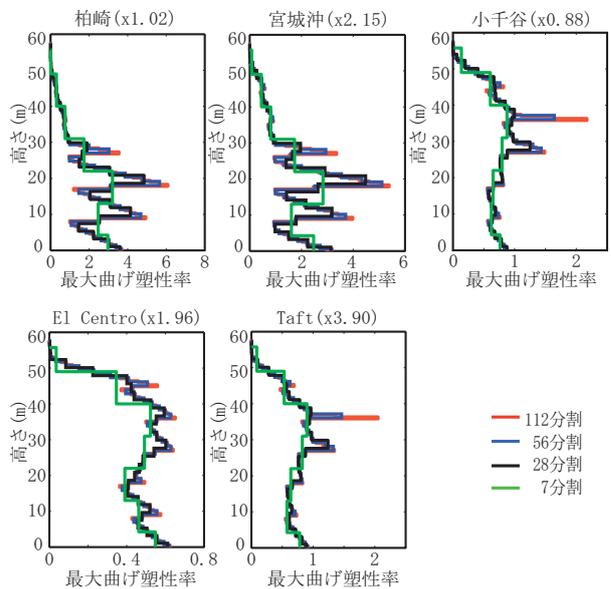


図-9 最大曲げ塑性率(ケース 1)

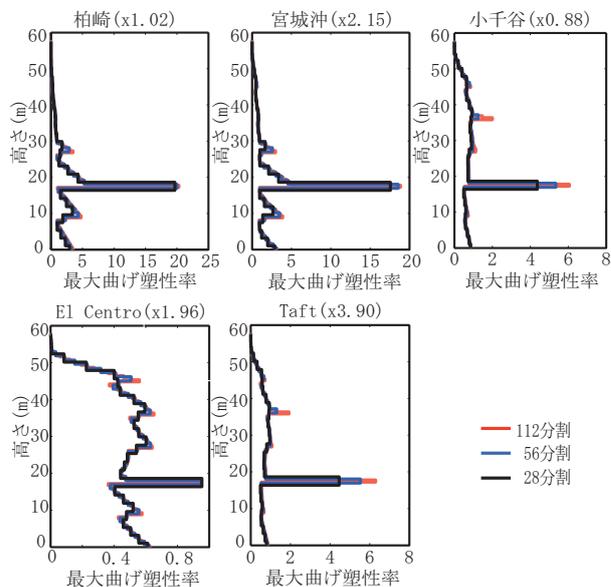


図-10 最大曲げ塑性率(ケース 2(60%))

(3) 分割数と耐力低下率による曲げ塑性率応答

図-11 は部分的な強度の欠陥がないケース 1 に加えて、煙突の高さ 17.5m のところに部分的な曲げ強度の欠陥を想定し、ケース 1 を基準に 100% として、欠陥がある断面の曲げ強度が 80%、70%、60% となった場合、耐力低下率および分割数による最大応答曲げ塑性率の変化を示す。曲げ塑性率が 1 以下の応答の場合には、強度低下が 60% に至っても分割数によらず、曲げ塑性率の増大は小さく、1 以下にとどまることが多い。

一方、塑性応答領域に入る場合には、局所的な強度低下する部分の強度が低くなるほど、最大応答塑性率は増大し、さらに、煙突の分割数が増えるとともに最大応答塑性率が大きくなる。特に、長周期領域で大きなパワーを持つ柏崎 2007 の最大加速度を 0.7g として入力した場合には、強度の欠陥がないケース 1 と煙突の局所的な部分の曲げ強度が 60% になったケース 2 を比べると、最大曲げ塑性率が 5 から 20 を超える値となる。従って、設計では想定されていない強振動の地震力が高層煙突の加わった場合は、部分的な強度の欠陥があると損傷が集中し、構造物の折損や被害を受けると考えられる。

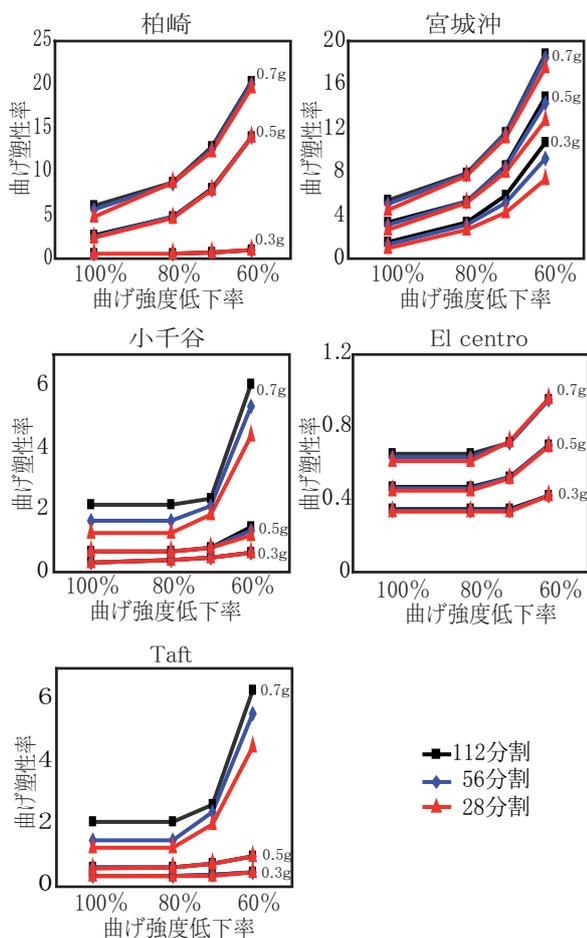


図-11 部分的な曲げ強度低下による最大曲げ塑性率

4. まとめ

高さ方向の不連続な曲げ強度分布を考慮した鉄筋コンクリート造煙突の耐震性能を検討することを目的として、地震被害があった高さ 58 メートルの煙突を対象として、弾塑性応答地震解析を行った。また、煙突の高さの途中に、断面欠損などによる部分的な強度欠陥を想定した場合の、耐力の低下率および解析分割数による損傷集中度の変化を検討した。その結果、以下のような知見を得た。

- (1) 入力地震動の最大加速度が同一であっても、それぞれの地震動の卓越周期によって煙突の損傷度と損傷分布に影響が見られ、長周期で卓越する地震動に対する応答が短周期で卓越する地震動に対する応答より大きくなることがわかった。
- (2) 最大曲げ塑性率の高さ分布は、主筋が切り替わるところで塑性化がより集中するものとなり、特に、配筋の定着長さの不足などによる局所的な強度欠陥がある場合、その断面に曲げ変形が集中することがわかった。
- (3) 煙突の局所的な断面欠損による強度欠陥を想定した場合、高さ方向に小さい要素で分割して解析をするほど、損傷が集中する度合いがさらに大きくなり、強振動かつ長周期の地震動においては強度欠陥を想定したところで最大曲げ塑性率が 20 を超えた。

よって、現行の設計法の設計曲げモーメントを満たすよう配筋するのみの設計においては、煙突の不連続な強度分布による局所的な損傷集中の影響を過小評価する恐れがある。そのため、鉄筋コンクリート造煙突の耐震設計においては、塑性化が進まないような十分な強度を確保するとともに、不連続な曲げ強度分布を避け、塑性化が進行しても断面の一体性と十分なじん性を得られるような配筋詳細につとめることが極めて重要である。

参考文献

- 1) 小野寺晃宏, 板羽正和, 岡田秀夫, 坂野 栄: 平成 19 年新潟県中越沖地震によるクリーンセンターかしわざきの煙突施設被害について, 都市清掃 61(282), 188-198, 2008-03
- 2) 国土技術総合研究所, 建築研究所: 塔状工作物 (鉄筋コンクリート造) の被害, 2007
- 3) (社)日本建築学会: 煙突構造設計指針, 2007
- 4) 昭和 56 年建設省告示 1104 号(平成 12 年建設省告示第 1149 号)
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010