

実地震記録と GIS に基づく中高層建物におけるマイコンメーター遮断推定

日塔哲広¹⁾，丸山喜久¹⁾，山崎文雄¹⁾，細川直行²⁾，萬来雄一²⁾

- 1) 千葉大学 大学院工学研究科, nitto-natto@hotmail.co.jp, ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp, yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp
2) 東京ガス(株) 防災・供給部, naoyuki@tokyo-gas.co.jp, banrai@tokyo-gas.co.jp

1. はじめに

都市ガス供給網は、数々の地震により甚大な被害を被ってきており、地震発生時の被害軽減に向けた様々な取り組みが行われている。その一例として、東京ガス(株)では 2001 年から SUPREME (Super-Dense Real-time Monitoring of Earthquake) と呼ばれる防災システムを導入し、高密度に配備された地震計により観測された地震記録をもとに、地区ガバナ単位でガス供給を停止する¹⁾。また、各需要家には、ガス供給を自動的に感震遮断するマイコンメーターが設置されており、その遮断数を推定する機能も SUPREME は有している。しかし、実際の建物応答の推定は不確定性が大きく、現在の遮断数の推定精度は高いとはいえない。

既往の研究として、山崎ら²⁾は、2005 年 7 月 23 日に発生した千葉県北西部地震の際に得られた約 20 万件の遮断・未遮断記録をもとに、低層の木造建物を対象としたマイコンメーターの遮断率推定式を構築した。また、建物の地震応答の特性により地震動が増幅される影響で、低層階や周辺の木造建物のマイコンメーターが感震遮断しなくとも、上層階で感震遮断する可能性を示した³⁾。そこで本研究では、同地震記録と地図情報を用いて、中高層建物のマイコンメーターの遮断数を推定する方法を検討する。

本研究では、まず地表面地震動に対する建物各階の応答加速度を推定する方法について検討する。次に、東京ガスの建物データベースと建物高さ情報を有する 3 次元都市データとの関係性を評価する。さらに、各地区ガバナで観測された地震記録と地図情報をもとに、建物応答シミュレーションを行い、推定した応答値と実地震でのマイコンメーターの遮断・未遮断状況と比較し、中高層建物におけるマイコンメーターの遮断推定法を提案する。

2. 建物応答評価手法に関する検討

2.1 応答加速度の評価手法

地震による建物応答を評価するために、応答加速度を推定する手法に関して検討を行った。地盤の震動を受けて揺れる建物の実際の挙動は複雑であるが、建物の基本的な特性を捉えた力学モデル

を用いて、建物挙動を表現することを試みる。通常、多層の建物の地震応答を考えると、各層の床に質量が存在していると仮定して多質点モデルとして表すことが多い³⁾。このようなモデルを用いて入力地震波に対する建物の地震応答を評価する様々な方法のなかで、以下に示す 2 つの方法を比較した。

1) 田村らによる応答評価手法⁴⁾

この評価手法で用いる入力値は、地震動の最大加速度と最大速度の比 (A/V)、最大加速度 (A)、建物の構造種別 (S 造, RC 造) と階数 (N) である。これらの情報をもとに、最上階、中間階、最下階の応答加速度 (A_H , A_M , A_L) が求められる。なお、任意の階の応答値は、線形補間して求める。RC 造建物の応答評価法を式(1)~(3)に示す。

$$A_H = \frac{493}{(A/V)^2 + 7(A/V) + 161} \cdot \frac{45}{N+15} \cdot A \quad (1)$$

$$A_M = \frac{1037}{(A/V)^2 + 47(A/V) + 478} \cdot \frac{45}{N+15} \cdot A \quad (2)$$

$$A_L = A \quad (3)$$

2) 1 次モードと応答スペクトルを用いる方法

この方法では、1 次モードと建物の固有周期 (T) での加速度応答スペクトル $S_A(T)$ から求まる応答の最大値を建物の最上階の天井応答とする。N 階建ての建物における最上階の天井応答 (Acc_N) は式(4)で表される。

$$Acc_N = \beta \cdot u_N \cdot S_A(T) \quad (4)$$

ここで、 u_i は i 階の天井の 1 次モード、 β は 1 次モードの刺激係数である。

$$u_i = \sin \left(\frac{i}{N} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \cdot u_i}{\sum_{i=1}^N m_i \cdot u_i^2} \quad (6)$$

また、 m_i は i 番目の質点 (i 階の天井位置) の質量であり、各質点の質量は一樣であると仮定する。さらに、1 階の床応答は地震動の最大加速度 (PGA) とし、任意の k 階の床応答 (Acc_k) は式(7)のように線形補間により求める。

$$Acc_k = (Acc_N - PGA) \cdot \frac{k-1}{N} + PGA \quad (7)$$

建物の構造別による減衰定数は3%または5% (RC造), 2% (S造) とし, 固有周期 T はそれぞれ $0.06N$ (RC造), $0.09N$ (S造) とした.

2.2 建物モデルと入力地震波

各階の地震応答評価法を検討するために, 多質点モデルを用いたモード合成法による地震応答解析結果と応答評価法の比較を行った. 比較に用いる建物モデルは, 低層の建物の例として RC 造 3 層モデル, 中層の例として RC 造 8 層モデル, 高層の例として S 造 18 層モデルの 3 モデルを用いた. 入力した地震波は, 2005 年千葉県北西部地震で東京ガスが観測した千葉市都町 2 丁目記録の Y 成分, 千葉市東千葉 1 丁目記録の X 成分, 兵庫県南部地震で神戸海洋気象台 (JMA 神戸) 記録の NS 成分を最大加速度 100gal にスケーリングしたものの 3 波を用いた. 入力した地震波の加速度応答スペクトル (5%減衰) を図 1 に示す.

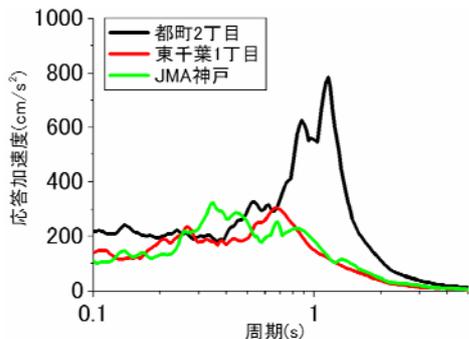


図 1 入力地震波の加速度応答スペクトル (5%減衰)

2.3 応答加速度の簡易推定結果と地震応答解析結果の比較

前節で定めた 3 つの建物モデルに地震簡易評価法を用いた推定結果と地震応答解析結果を比較した. 図 2 に RC 造 3 層モデル, 図 3 に RC 造 8 層モデルでの出力結果を示す.

図 3 によると, 東千葉 1 丁目と JMA 神戸の地震波に関しては, 評価法(1), (2)ともに, おおむね解析結果と当てはまりがよいと言える. 一方, 都町 2 丁目の地震波に関しては, 評価法(1), (2)ともに, 上層階になるにつれて解析結果との出力値にずれが生じている. よって, 中層の建物に関しては, 両評価法の推定精度は同程度である. 一方, 図 2 によると, 都町 2 丁目と東千葉 1 丁目の地震波に関しては, 評価法(2)の出力値は解析結果に対して良好な結果を得たが, 評価法(1)の出力値は解析結果と大きく乖離し過大評価をしている. JMA 神戸の地震波に関しては, 評価法(1)の出力値の解析結果に対する当てはまりが良いが, 評価法(1)は, 5 階以上の建物を対象として構築された式であることから, 低層の建物における推定精度は疑わしい. さらに, S 造 18 層モデルにおける同様の検討

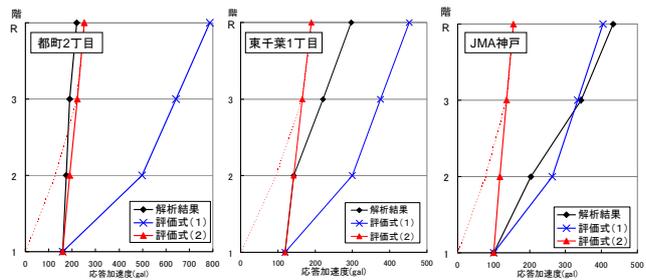


図 2 RC 造 3 層モデルにおける応答加速度の比較

都町 2 丁目 (左), 東千葉 1 丁目 (中), JMA 神戸 (右)

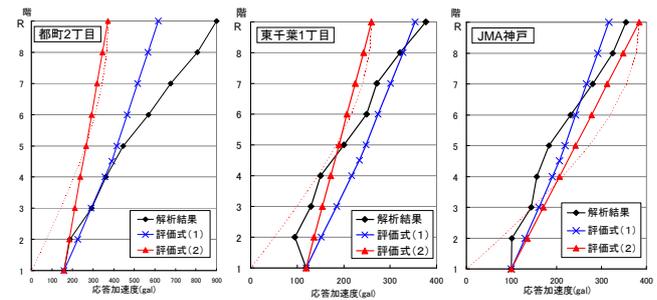


図 3 RC 造 8 層モデルにおける応答加速度の比較

結果でも, 評価法(2)の出力値は良好な結果を得ている. 以上の結果から, 1 次モードと加速度応答スペクトルを用いた評価法(2)を本検討の建物応答評価手法として採用することにした.

3. 建物応答評価のための GIS データの利用

3.1 東京ガスメッシュデータ

東京ガスでは, 供給エリアの建物データベースを $25m \times 25m$ のメッシュ要素として管理している. その 1 つの要素に含まれるデータは, {メッシュ番号・建物構造コード・ガス管の埋設年コード・建物件数・需要家件数} である. 本検討では, 3 階建て以上の建物 (便宜上, 以下「高層建物」と呼ぶ) を対象としているため, 重要になるのが建物構造コードである. しかし, そのコード区分は {不明・低層・高層 (3 階以上)} のみであるために, 東京ガスメッシュデータのみから建物応答を評価するのは難しく, 詳細な建物高さデータをもつ地図情報を用いて本検討を進める.

3.2 3 次元都市データ

建物応答シミュレーションを行うためには, 建物階数データが必要である. 本検討では, 3 次元都市データの MAP CUBE を用いて建物高さを算出し, 階数を割り出した. MAP CUBE はレーザー測量データ (パスコ社製) と 2 次元ベクター地図 (インクリメント P 社製) をベースに, 3 次元都市データ構築システム (キャドセンター社技術) を用いて開発された. 建物の高さ方向誤差は $\pm 15cm$ 以内の高精度の 3D 形状モデルである⁹⁾.

MAP CUBE は建物ポリゴンと地盤ポリゴンに分かれて構成されており, 各ポリゴンには標高データが含まれている. 図 4 のように, 地理情報システム (GIS) を用いて地盤ポリゴンの上に建物ポ

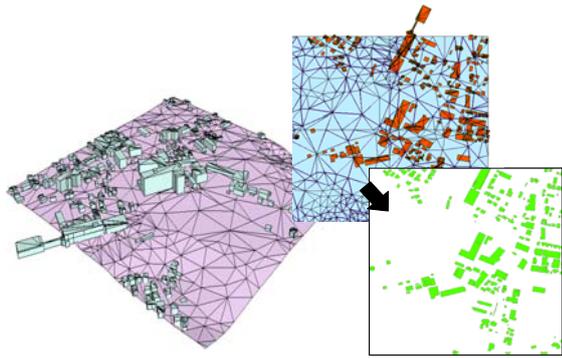


図4 MAP CUBEの3D表示と建物高さデータの生成イメージ

リゴンを重ね合わせ、建物ポリゴンと地盤標高データの差を取ることで、建物高さをもつポリゴンを生成した。

3.3 メッシュデータとMAP CUBEの関係

東京ガス(TG)メッシュデータとMAP CUBEの関係について検討した。まず、TGメッシュデータの高層建物がMAP CUBE上のどの建物に対応するかを調べた。図5(左)は、MAP CUBEにおける千葉市中央区のある500m×500mのエリアである。このエリアには9つのTG高層建物メッシュ要素が対応した。また、それぞれのメッシュ要素ごとに1件の建物が含まれていた。次に、MAP CUBEにおいて、建物の階高を3mとして階数を算出し、3階以上の建物を抽出した。さらに、ある閾値以下の建築面積で建物を取り除いた結果、11件の建物ポリゴンが該当した。そして、図5(右)のように、各高層建物メッシュ要素から最も近い距離にある建物ポリゴンの階数データを、それぞれのメッシュ要素に付加した。

4. 実地震データに基づく建物応答推定

4.1 千葉県北西部地震とSTATION24データ

2005年7月23日16時35分頃、千葉県北西部を震源とする地震(最大震度5強)が発生した。各家庭のマイコンメーターは震度5強相当でガスを自動遮断するため、東京ガスの供給エリア内でも、かなりの件数でマイコンメーターが動作し、自動的にガス供給を遮断した。

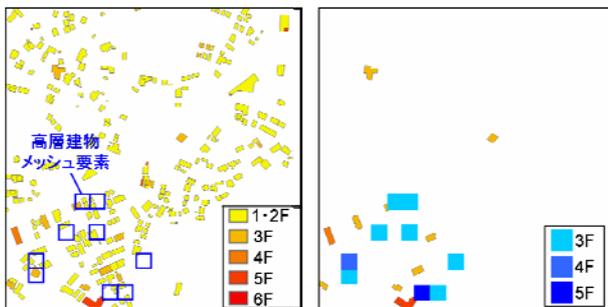


図5 MAP CUBEの建物データとTG高層メッシュ要素の対応(左)と階数データを付加したTG高層メッシュ要素(右)

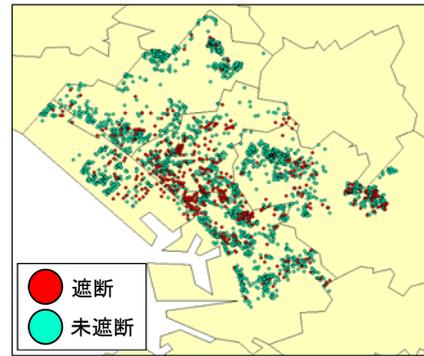


図6 千葉市におけるマイコンメーターの遮断・未遮断の分布

東京ガスのSTATION24(ST24)は、各家庭に設置してあるマイコンメーターを監視センターと電話回線で結んで24時間監視するシステムで、マイコンメーターの遮断履歴情報が遠隔で取得できる¹⁾。このデータには住所や建物構造などの情報も含まれている。図6に千葉県北西部地震の際にST24で得られた千葉市におけるマイコンメーターの遮断・未遮断の分布を示す。

4.2 検討エリアと地区ガバナ距離

千葉市を対象として、ST24で得られたデータの建物構造がS造・RC造である建物の遮断・未遮断情報をもとに検討を進めた。建物応答推定に用いる地震動は、各建物から最も近くにある地区ガバナの観測地震記録を用いた。しかし、地震記録を取得できなかった地区ガバナも存在したために、有効な地区ガバナまでの距離を1000mとした。その結果、検討に用いた千葉市におけるS造・RC造建物のマイコンメーター遮断件数は143件、未遮断件数は501件であった。

4.3 建物応答シミュレーション

実地震の地震動記録とMAP CUBEから算出した建物高さデータをもとに、応答加速度評価法を用いて建物応答シミュレーションを行い、実地震によるマイコンメーターの遮断・未遮断状況と比較する。建物の階数は階高3mとして算出し、入力する加速度応答スペクトルは、地震記録の水平方向の2成分合成で求めた。

図7(左)は、千葉市稲毛区あやめ台のMAP CUBEで作成した地図データである。このエリアでは実地震によるマイコンメーターの遮断・未遮

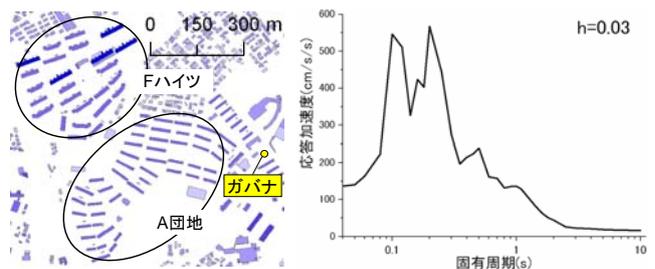


図7 千葉市稲毛区あやめ台付近の地図データ(左)と地区ガバナで記録された地震動の加速度応答スペクトル(右)

表 1 建物応答シミュレーションと実地震によるマイコンメータ
一遮断・未遮断状況との比較例
F 高さ 11F (左), 5F (中), A 団地 (右)

階数	遮断	未遮断	gal	階数	遮断	未遮断	gal	階数	遮断	未遮断	gal
11	1		193								
10	2		187								
9		1	181	5	7		292	5	2	1	292
8		1	174	4	1		252	4	3	2	252
7		1	168	3	1	7	211	3	4	2	211
6		2	162	2		6	171	2		2	171
5		4	155	1		9	130	1		9	130
4		1	149								
3		2	143								
2		2	136								
1			130								

断記録を比較的多く取得できた。F 高さ (11 階建・5 階建) と A 団地 (5 階建) の 3 つの建物群ごとに遮断・未遮断記録をまとめ建物応答シミュレーションを行った。地震動はガバナ局名: あやめ台で観測されたもので、その応答加速度スペクトル (3%減衰) を図 7 (右) に示す。

表 1 にそれぞれの建物群ごとの各階の出力応答加速度と実地震によるマイコンメータの遮断状況を示す。マイコンメータは、150~250gal の加速度が感知された場合に遮断するように設計されている。F 高さ 11 階建ての比較結果をみると、9 階までは遮断せず、10, 11 階のみで遮断が確認された。200gal 付近から遮断し始めた想定すれば、実地震での建物応答と近いと考えられる。また、F 高さ 5 階建ての比較結果をみると、1, 2 階では遮断せず 3 階から遮断し始め、4, 5 階では遮断のみが確認された。遮断と未遮断の両方が存在する 3 階の応答値が約 200gal であることは、十分にありうる結果といえる。A 団地の比較結果をみると、F 高さ 5 階建てと同様に 3 階から遮断し始めているが、5 階の応答値が約 300gal であるにもかかわらず、未遮断のマイコンメータが存在している結果をみると、やや過大評価していると考えられる。しかし、地盤特性や建物構造の違いなどの条件を考慮せずに評価した結果としては、応答値の推定精度は良好であると言える。

5. 高層建物における遮断推定式の構築

前章で行った検討結果を用いて、応答加速度評価法から求まる推定値と実地震によるマイコンメータの遮断・未遮断記録の関係から遮断推定式の構築を試みた。本検討では、遮断推定式として、式(8)で表される対数正規分布を用いた。

$$P = \Phi\left(\frac{\ln Acc_k - \lambda}{\xi}\right) \quad (8)$$

ここで、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布の確率関数である。 λ は対数平均、 ξ は対数標準偏差であり、確率紙上での最小自乗法により値を求めた。

本検討で構築した応答加速度に対する遮断推定曲線と、同地震記録に基づく、木造住宅を対象とした PGA に対する遮断推定曲線 (山崎ら²⁾) と比較した (図 8)。中高層建物のデータを回帰分析して得られた遮断率推定曲線は、木造建物に対するものと比較的好く近似しているが、両推定曲線の対数標準偏差には差がある。これは推定曲線の構築に用いたデータ数が圧倒的に違うことが原因だと思われる。このことから、本研究で提案した建物応答評価法と 3 次元 GIS データを組み合わせたマイコンメータの感震遮断率推定方法の妥当性が示されたので、東京ガスで建物データに建物高さを付加したデータ整備が進めば、中高層建物も含めた遮断率推定システムを構築することが可能となる。

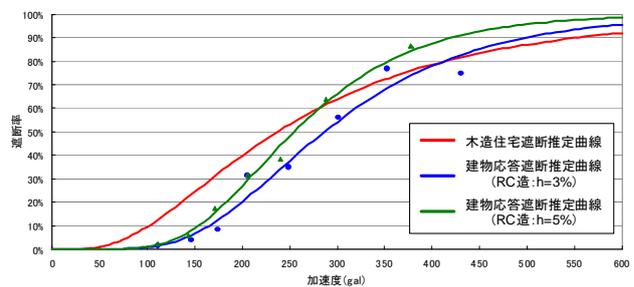


図 8 マイコンメータ遮断推定曲線の比較

6. まとめ

本研究では、中高層建物の地震応答によるマイコンメータの遮断状況の推定手法について検討を行った。応答加速度評価法と 3 次元都市データを用いた建物応答シミュレーションを行い、実地震記録と比較した検討の結果、対数正規分布による中高層建物のマイコンメータの遮断推定曲線を構築した。今後、東京ガスメッシュデータと MAP CUBE の相関をより明らかにすることで、地震時の建物応答によるマイコンメータの遮断状況の把握の自動化が期待される。

参考文献

- 1) 清水善久, 石田栄介, 磯山龍二, 山崎文雄, 小金丸健一, 中山渉: 都市ガス供給網のリアルタイム地震防災システム構築及び広域地盤情報の整備と分析・活用, 土木学会論文集 No. 738/I-64, pp.283-296, 2003.
- 2) 山崎文雄, 矢野嘉久, 丸山喜久, 山内亜希子, 菜花健一: 実地震データと振動台実験結果に基づくマイコンメータの遮断特性評価, 首都圏大震災軽減のための実践的都市地震工学研究の展開, 平成 18 年度成果報告シンポジウム予稿集, pp.87-92, 2007.
- 3) 柴田明徳: 最新耐震構造論, 森北出版, 1981.
- 4) 田村和夫, 中村豊, 金子美香, 神原浩: 高層建物内の地震安全性評価技術の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.623-624, 2005.
- 5) MAPCUBE: <http://www.mapcube.jp/>