

2011年東北地方太平洋沖地震における被害建物の振幅依存振動特性

東北大学災害制御研究センター ○吉田 和史

東北大学災害制御研究センター Tsoggerel Tsamba

東北大学災害制御研究センター 源栄 正人

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は東北地方を中心に甚大な被害をもたらした。この地震により仙台市にある東北大学工学部の人間・環境系研究棟が大きな被害を受けた。また、構造工学において、構造物の固有振動数、減衰定数などの振動特性の変化と被害率の関係は極めて重要である。筆者らは、今回のこの地震と1978年の宮城県沖地震を共に経験したこの建物の振動特性の変化を長期的なモニタリングによって分析し、報告した¹⁾。

本稿では、東北地方太平洋沖地震における人間・環境系研究棟の地震観測記録を用い、当該建物における地震継続中の振動特性の変化について拡張カルマンフィルタを用いて分析した結果を報告する。

2. 対象建物と東北地方太平洋沖地震における被害

対象建物である東北大学工学部の人間・環境系研究棟は仙台市の青葉山丘陵地に位置しており、非充腹型SRC造9階建ての1969年竣工の建物で、1978年宮城県沖地震を経験し、2000年秋～2001年春にかけて耐震改修工事がなされ、2005年の宮城県沖地震や2008年の岩手・宮城内陸地震を経験した建物である。

人間・環境系研究棟3階の4隅の外柱がすべて大破した。写真1に東側妻壁両端の柱の被害状況を示す。東西の妻壁(連層耐震壁)に浮き上がりによる亀裂が確認され、それらの曲げ振動による変動軸力により柱脚部が大破し、鉄骨が抜け出し座屈、主筋が破断・座屈している状況であった。

また、2011年5月には大破した4本の隅柱の柱脚部の応急復旧工事が行われた(RC造ピアと鋼棒による変動軸力対策と4隅の1スパンをRC壁補強)。



写真1 東北大学工学部の人間・環境系研究棟と3階柱脚部の被害

*Amplitude Dependent Dynamic Characteristics of a Damaged Building by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Disaster Control Research Center by Kazushi Yoshida, Tsoggerel Tsamba, Masato Motosaka

3. 観測記録

図1に当該建物における観測計の配置を示す。計測機器は、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の当該建物における観測波形に関しては建築研究所のSMAC-MD（1階と最上階の9階に設置）、それ以外の2007年12月以降の強震記録は東北大学災害制御研究センターのモニタリングシステム（1階、5階、9階に設置）による連続観測である。

図2には東北地方太平洋沖地震の本震における1階と9階の南北（梁間）方向の加速度観測波形を示す。また、図3には1階で観測された波形と、仙台市の平野部に位置する住友生命ビルで観測された加速度波形を利用して、擬似速度応答スペクトルを算出した。なお、算出に際して、観測波形の0秒から70秒までを区間A、70秒以降を区間Bとしてデータを切り出して分析した。この図より、区間Bにおいて、青葉山丘陵地では周期1秒付近で地震動が増幅していることがわかる。

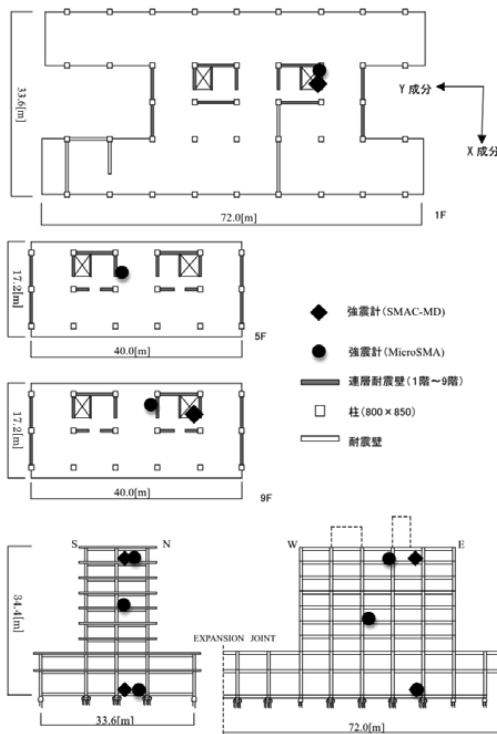


図1 人間・環境系研究棟における観測計の配置

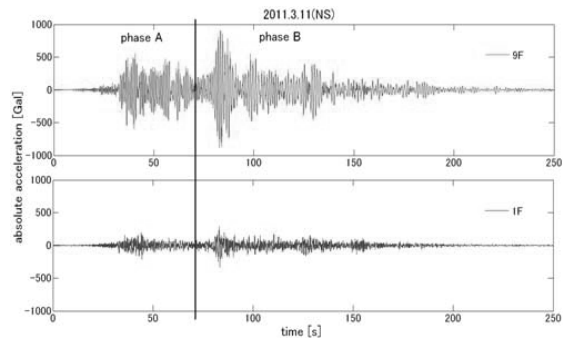


図2 人間・環境系研究棟における加速度観測波形

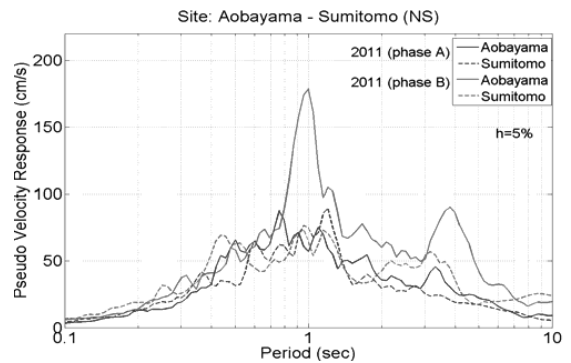


図3 擬似速度応答スペクトルの比較

4. 動的履歴特性の分析

南北方向の観測波形を時間方向に16の区間に分割し、それぞれの区間で加速度波形と相対変位から得られた加速度-変位曲線の履歴を図4に示す。この図から以下のようなことがわかる。

- 1) 小さい振幅レベルでの線形挙動から始まり、Section 5で確認できるように、履歴がわずかに逆S字型を示す。Section 6ではSection 1と比較して、同じ線形挙動であるが剛性が低下している。
- 2) 80秒以降で変位が大きくなるとさらに剛性が低下し、Section 7にみられるような原点志向の履歴ループ

を描く。

- 3) その後、変位が小さくなると、Section 9にあるような逆の S 字形の履歴を示す。振幅は Section 9から Section 10にかけて減少するが、履歴は剛性の低下を示している。
- 4) さらに変位が小さくなり、Section 13 から Section 16 では、Section 7以降で小さくなった剛性を保った状態で、履歴が線形に戻る。

この剛性低下は本震前後の常時微動観測と一致している²⁾。

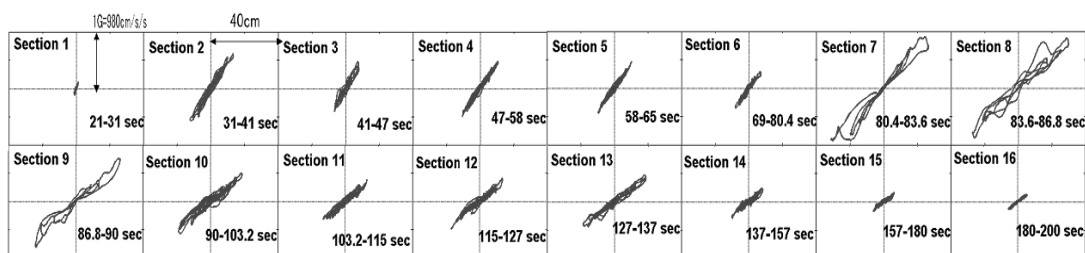


図4 各区間の加速度－変位曲線

5. 拡張カルマンフィルタによる振動特性の推定

カルマンフィルタは、図5のような状態空間モデルで表される可制御、可観測な線形離散時間システムの状態推定に用いられるフィルタとしてよく知られている^{3) 4)}。また、非線形離散時間システムに対して適用できるよう線形化を行ったものが拡張カルマンフィルタである。

図6に拡張カルマンフィルタで地震発生時の東北大学工学部の人間・環境系研究棟の減衰・固有振動数を推定した結果を示す。1階の観測データを入力、9階を出力とみなして解析を行った。一段目が推定変位波形、二段目、三段目がそれぞれ推定した減衰定数、固有振動数の時刻歴である。なお、パラメータの初期値は減衰定数を 0.10、固有振動数を 5.0Hz とし、推定誤差共分散行列の初期値は 10、忘却係数は 0.995 とした。減衰定数、固有振動数の推定結果にはカルマンフィルタの忘却係数の導入によると思われる波打ち現象が見られるため、結果をスムージングした曲線を重ねて示す。本稿における推定に用いる状態空間表示式が 1 質点系であるため、9階の観測記録には 1Hz～2Hz のバンドパスフィルタをかけた。1階の観測記録には 0.4Hz～20Hz のバンドパスフィルタをかけた。拡張カルマンフィルタの図からわかるように推定変位波形は観測波形を積分して求めたものとよく一致している。減衰定数については最大点付近では振幅の増大に伴って増加しているが、その後は振幅が大きいに減衰が小さくなり、それぞれ、原点指向型、逆 S 型の復元力に対応していることがわかる。固有振動数については、区間 A、B と振幅が大きくなるにつれて段階的に小さくなっている。その後、振幅が小さくなるにつれて徐々に元に戻っている様子が推定できた。これは被害状況と整合する。

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t+1) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{w}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t) \end{cases} \quad \begin{cases} \mathbf{x}(t+1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), t) + \mathbf{G}(\mathbf{x}(t), t)\mathbf{w}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(t), t) + \mathbf{v}(t) \end{cases} \quad t = t_0, t_0 + 1, t_0 + 2, \dots$$

図5 カルマンフィルタにおける状態空間モデル

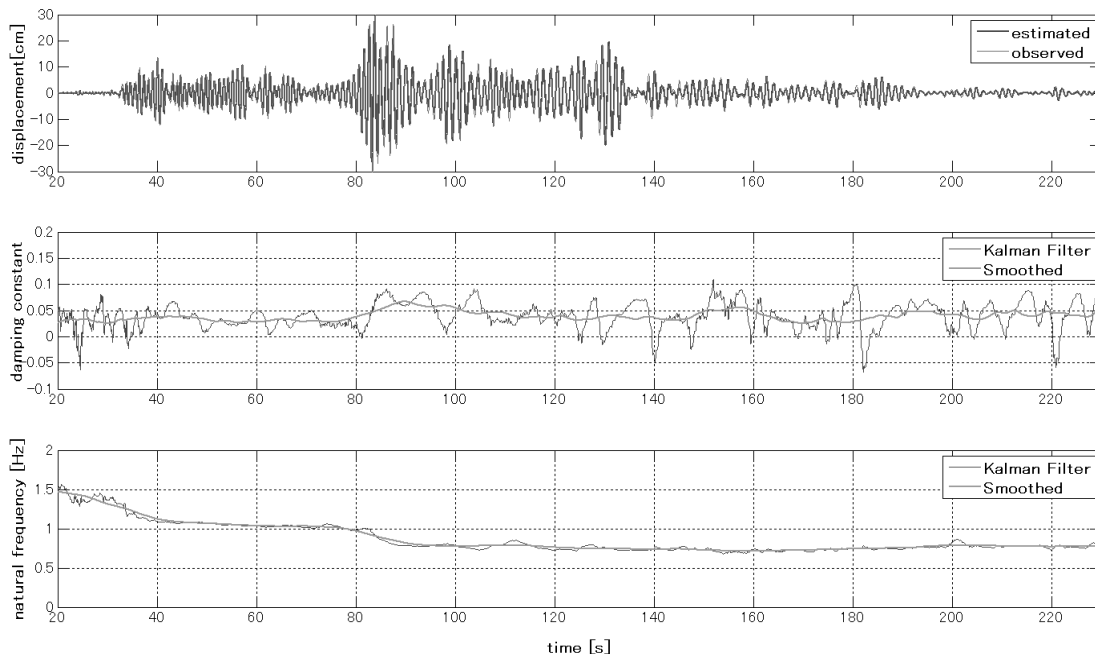


図6 振動特性の推定結果

6. まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震で被害を受けた建物における地震観測データに基づき地震発生時の減衰定数・固有振動数の変化を分析した。分析結果は被害状況と整合する。

- ・ 観測波形を時間方向に細かく分けた動的履歴特性の分析の結果から、応答最大値が発生した80秒付近で原点指向型、その後、逆S型の復元力を示し、振幅の減少に対し固有振動数も低下することがわかった。
- ・ 拡張カルマンフィルタによる振動特性の推定結果から、減衰定数は最大点付近では振幅の増大に伴って増加しているが、その後は振幅が大きい時に減衰が小さくなり、それぞれ、原点指向型、逆S型の復元力に対応していることがわかった。また、固有振動数の推定については加速度-変位曲線の分析結果と一致している。

拡張カルマンフィルタを用いて、被害建物の振動特性はある程度推定できたと考えられるが、今後はカルマンフィルタのパラメータの設定、高次モードの影響などより詳細な検討が必要であると考えている。

謝辞

本稿での観測、分析にあたりSMAC-MD（独）建築研究所による観測記録を使用しました。鹿嶋俊英博士はじめ関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) M.Motosaka et al, Amplitude Dependent Dynamic Characteristics of an Existing Building, 13WCEE, CD-ROM No.1023, 2004
- 2) MOTOSAKA Masato et al. Change of Dynamic Characteristics of a Damaged Building Before, During, and After the 2011 Off Pacific Coast Tohoku Earthquake, AIJ 2011 annual meeting, 2011.8
- 3) 谷萩隆嗣：デジタル信号処理ライブラリー5 カルマンフィルタと適応信号処理、コロナ社、2005.12
- 4) Simon Haykin : Kalman Filter and Neural Networks, WILEY, 2001.10