長期連続観測に基づく鉄筋コンクリート造建築物の地震時および通常時における振動特性の変動

CHANGES OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A REINFORCED CONCRETE BUILDING BASED ON LONG-TERM CONTINUOUS VIBRATION MEASUREMENT

畠山智貴 — * 1 王 欣 — * 2
大野 晋 — * 3 源栄正人 — * 4

Tomoki HATAKEYAMA — * 1 Xin WANG — * 2
Susumu OHNO — * 3 Masato MOTOSAKA — * 4

キーワード：

常時微動観測, 振動特性, 共振振動数, 構造ヘルスマニタリング, RC 造低層建築物, 東北地方太平洋沖地震

Keywords:

Microtremor measurement, Dynamic characteristics, Resonant frequency, Structural health monitoring, Low-rise reinforced concrete building, The 2011 Great East Japan Earthquake

Vibration record before and after The 2011 Great East Japan Earthquake was obtained at the low-rise reinforced concrete building in Miyagi Prefecture near the Pacific. This study focused on analyzing dynamic characteristics of the building by using a series of ambient vibration data which was obtained before and after The 2011 Great East Japan Earthquake and during 2009-2010 and 2014-2015.

It is important to obtain various knowledge about dynamic characteristics for SHM, and in analysis of this building, the recovery trend after the big earthquake and temperature dependent of resonant frequency were clearly recognized, for example.

1. はじめに

近年, 計測装置や通信手段の発展とともに, 構造ヘルスマニタリングに関する研究が現在国内外で活発に実施されている¹⁻²⁾。構造ヘルスマニタリングとは, 地震などによる建物の損傷により, 固有振動数などの建物に固有な振動特性が変化する現象を利用して行うものである。建物の供用期間中の経年劣化や, 地震後の構造安全性と使用可能性に関する評価を下す手法の一つとして, 振動特性の変動評価により, 構造ヘルスマニタリングを実施することは有効である。

しかし, 振動特性の変化は, 構造体の損傷による剛性低下³⁾によるのみでなく, 通常時でも地震後の変動⁴⁾や気温変化による変動⁵⁾が指摘されている。振動特性の変化に関する評価として, 地震時のみでなく通常時の変動を考慮することも重要な課題である。

東北大学災害科学国際研究所では現在, 構造ヘルスマニタリング機能を有する地域版早期地震情報統合システムの開発を進めている⁶⁾。このシステムでは, 複数の既存建築に対して, 常時微動計測と強震観測を両立させた継続的かつ連続的な振動観測を実施している。このうち本研究では, 宮城県石巻市太平洋沿岸部沿いに実存する RC 造地上 3 階建ての低層建築物を対象とする。本建物においては, 東北地方太平洋沖地震本震 (以下, 東北地方太平洋沖地震を 3.11 地震と称す) の際に 1000cm/sec² 超の加速度振幅記録 (長軸方向, 3 階の記録) を収録し, またその前後に亘っても貴重な観測記録を得た。

本報では, これまでに対象建物で蓄積された振動観測記録に基づく観測対象建物の振動特性の検討の第一歩として, 長期の常時微動

観測記録を使用し, 観測期間中最大の揺れを経験した 3.11 地震前後の変動, 地震後の共振振動数の回復傾向ならびに気温の影響による共振振動数の変動の傾向について分析, 検討した結果を報告する。

2. 観測対象建物および観測体系概要

2.1 観測対象建物

本報で観測対象とする建物は, 宮城県石巻市に建つ 1975 年 10 月に竣工の, 地上 3 階, 地下無し, 建物高さ約 17m, 延べ床面積 2,222m² の耐震壁付鉄筋コンクリート造の庁舎建築である。対象建物では, 3.11 地震以前の 2007 年より継続的な連続振動観測を行っている。基礎は直接基礎であり, 周辺地盤は N 値 50 以上の岩盤であるため, 基礎と地盤の相互作用の影響は少ないと考えられる。なお 3.11 地震の際には, 対象建物の建つ地区一帯では津波による物的被害等が確認されているが, 本建物は高台の上に建つため津波による被害を免れた。

2.2 観測体系概要

対象建物には各階に 3 方向の高感度地震計を 1 台ずつ常設し, 平時の常時微動から地震時の大振幅応答まで幅広い振動を計測している。地震計の設置個所を図 1 に示す。本報では最上階水平 2 方向 (長軸方向である LD 方向, 短軸方向である SD 方向) の振動記録を用いて, 建物の一次共振振動数を推定する。

振動観測システムは, 加速度計 (MicroSMA), データ収録装置

本稿は 2016 年度日本建築学会東北支部研究報告会に発表した内容¹⁰⁾を再構成し, 加筆したものである。

¹⁾ 東北大学大学院工学研究科都市建築学専攻 大学院生
(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-1215)

²⁾ 東北大学災害科学国際研究所 助教・博士 (工学)

³⁾ 東北大学災害科学国際研究所 准教授・博士 (工学)

⁴⁾ 東北大学災害科学国際研究所 教授・工博

¹⁾ Graduate Student, Graduate School of Eng., Tohoku Univ.

²⁾ Assist. Prof., International Research Institute of Disaster Science (IRIDeS), Tohoku Univ., Dr. Eng.

³⁾ Assoc. Prof., International Research Institute of Disaster Science (IRIDeS), Tohoku Univ., Dr. Eng.

⁴⁾ Prof., International Research Institute of Disaster Science (IRIDeS), Tohoku Univ., Dr. Eng.

(NetDAS)およびデータ通信アプリケーションソフト(GRF Tools Suite)から構成される⁶⁾。MicroSMAは微動から強震まで観測できるダイナミックレンジ120dBのMEMS高感度3成分加速度計である。NetDASは10Hz~1kHzまでの可変サンプリングができ、現在は100Hzサンプリングで設定されている。加速度計からのアナログ信号は24bitでデジタル信号化している。観測時間は、顕著な交信断絶を除き24時間常時である。観測点で収録された振動記録は、専用の通信回線を介しリアルタイムで東北大学災害科学国際研究所に送信される。受信したデータは、一時間単位で自動的に保存もされている。

図1 建物形状と地震計設置位置

3. 一次共振振動数の推定手法

常時微動記録のノイズ成分の影響を消去するため、本報では、一時間の常時微動観測記録に対し、8192点(81.92秒)ずつにデータウィンドウを分割し、アンサンブル平均によりこの一時間のフーリエスペクトルを求めた。スペクトルの平滑化にはウィンドウ幅0.2HzのParzen Windowとして行った。なお、本報では膨大な記録を効率的に分析するため、3階各方向全ての一時間毎の記録に上記と同様のスペクトルの算定を行い、一次共振振動数を読み取り、その変化傾向を観察することとする。

ここで例として図2に、2015年1月1日深夜の時間帯の常時微動計測で得られた3階の加速度記録から計算したLD,SD両方向のフーリエスペクトルを示す。図2から、LD方向では2つのピーク、SD方向では3つのピークが近接しているのが分かる。

これについては既往の研究⁷⁾により、LD方向については低周波数側に表れているピーク(図2では4.68Hzに見られるピーク)がねじれをふくんだLD方向並進一次モード、高周波数側に表れているモードがねじれ一次モードであることがわかっている。SD方向については、最も低周波数側に表れているピーク(図2では4.00Hzに見られるピーク)がねじれをふくんだSD方向並進一次モード、最も高周波数側に表れているモードがねじれ一次モード、その両者の間に見られるピークがLD方向の影響によるものであることがそれぞれわかっているが、このうち本報では、ねじれをふくんだ各方向の並進一次モードのピーク値を読み取る。地盤は岩盤であるが、建物自体が盛土・切土の上に建っているため純粋な並進一次モードが存在しないものと考えられる。

図2 常時微動計測時のフーリエスペクトル

4. 振動特性の変動評価

4.1 3.11地震における一次共振振動数の低下と地震後の回復傾向

対象建物では、3.11地震の本震を含んだその前後に亘る振動記録を収録している。図3(a),(b)に、3.11地震本震時に収録された3階LD,SD両方向の加速度時刻歴波形を示す。これにわかるように、3.11地震の際には、LD方向で853 cm/sec²、SD方向で1057 cm/sec²の最

図3 加速度時刻歴波形

図4 地震前後の一次共振振動数の変化

大加速度応答を記録するなど、大きな振動を経験した。この地震により、壁や床スラブには、亀裂が発生しているのが確認されている。

図 4(a),(b)に、地震前後における各方向の一時間毎のピーク値を読みとり、それをプロットしたものを示す。なお、本震の際にシステムとの通信が一次断絶、その約一か月後(2011 年 4 月 23 日)にシステムが復旧したため図 4 の横軸は図のように一部数値が欠落している。この後、同年 9 月 8 日まで継続した観測が行われた。同図から、大加振に伴い一次共振振動数が大きく低下しているのが確認できる。また、3.11 地震後に一次共振振動数は増加傾向にあるが、その増加傾向は次第に緩やかになっている。

ここで、3 月 11 日の一次共振振動数の日平均値と復旧した日の翌日(2011 年 4 月 24 日)の一次共振振動数の日平均値の差をとると、LD 方向では 0.98Hz、SD 方向では 0.84Hz それぞれ低下していた。なお、復旧した日は記録数がわずかであったので、4 月 24 日の記録を用いることとしている。

続いて、今述べた 3 月 11 日の一次共振振動数の日平均値と 4 月 24 日の一次共振振動数の日平均値の変化率を低下率、同 4 月 24 日の一次共振振動数の日平均値とそのおよそ半年後の 9 月 8 日の一次共振振動数の日平均値の変化率を回復率と定義すると、このとき、低下率は LD 方向 19.8%、SD 方向 20.0% であり、回復率は LD 方向で 11.6%、SD 方向で 10.1% であった。本震後、一次共振振動数は回復していくが、半年が経過しても 3.11 地震以前の水準には戻っていなかったことがこれより分かった。震災後から 9 月までの観測期間中に耐震改修は行われておらず、地盤建物の相互作用の影響が少ない岩盤上に建つという地理的条件を考慮すると、剛性の増大にした理由の一つには揺れによって生じたコンクリートの微細ひびの閉塞が想定されるが、詳細な増大の要因については今後の分析課題である。

既往の研究でも、大きな振幅を経験することで一次共振振動数は低下し、その後回復することが報告されている⁸⁾が、その要因は断言されるまでに至っていない。この観点から、本報のような比較的大きな振幅を経験したあとの一次共振振動数に対する継続的な分析例が十分に蓄積されているとは言い難く、さらに地震を経験した後の実挙動に関する知見を蓄積することは、重要な課題である。

4.2 平時の気温変化による振動特性の変動

ここでは、我が国における気温の季節性並びに対象建物の 3.11 地震による振動特性の変動を考慮し、3.11 地震を経験する以前の 2009 年 1 月から 2010 年 12 月までのおよそ 2 年間 (以下、2009-2010) と、3.11 地震を経験した後の 2014 年 1 月から 2015 年 12 月までのおよそ 2 年間 (以下、2014-2015) にわたる推移をそれぞれ検討する。なお当期間は、最も安定して観測記録の収録ができていた期間である。観測については、観測設備の維持管理などのため、記録のとれていない期間も一部あるが、この期間全体としては長期の変動に対する検討には十分な量の記録の蓄積がある。

以上の期間の通常時における対象建物の一次共振振動数を連続的に算定した結果、そしてその算定値の平均を図 5、図 6 に示す。図 5 は 2009-2010 の検討結果であり、図 6 は 2014-2015 の検討結果である。またそれぞれに、日平均気温の推移も示した。気温情報は、気象庁一元化データより、本建物に最寄りの仙台管区気象台内石巻観測所の記録を参照している。

図 5 によれば、一次共振振動数の変化が微小に留まっているため、

変動パターンが明瞭ではないものの、年間で比較的气温の高かった両年の 7 月から 9 月までの期間中に得られた算定値が半数を超えて検討期間中の一次共振振動数全体の平均値を下回っており、対照的に気温が零度を下回ることもあった 1 月 2 月には半数を超えて平均値を上回っている結果であることが分かった。すなわち図 5 に基づくと、高温化/低温化で一次共振振動数が相対的に低下/増加する傾向にあることから、一次共振振動数と大気温の間には負の相関があると考えられる。

(a) 気温推移

(b) LD 方向一次共振振動数推移

(c) SD 方向一次共振振動数推移

図 5 共振振動数の季節変動 (2009-2010)

(a) 気温推移

(b) LD 方向一次共振振動数推移

(c) SD 方向一次共振振動数推移

図 6 共振振動数の季節変動 (2014-2015)

なお本期間中、一次共振振動数の月平均値比較での増分は両方向ともに最大でも2%程度であった。

しかし図6によれば、変動パターンが図5のものとは全く異なることが認められる。図6では、一次共振振動数の経時データは大気温に相関して変動している傾向が特にLD方向で明瞭に認められる。気温の上昇とともに一次共振振動数が上昇し、またその逆も言えることから、この場合一次共振振動数は大気温に正の相関があると考えられる。詳細には、月平均気温の差が約21℃であった2015年2月と同年7月のLD方向の一次共振振動数の月平均値は4.63Hzと4.93Hzであり、月平均値の増分は約6.5%であった。これは観測期間中に得られた中で最大の変動幅であるが、2009-2010に確認された変動量と比較すると、顕著に変動量が大きくなったことがわかった。SD方向での変動がLD方向に比べて小さい理由としては、日照量の差、耐震壁の配置の差などが考えられるが、SD方向でも同様な周期的変動を確認した。

以上により、本建物について、通常時でも温度に影響を受けて一次共振振動数の一定の周期性をもった変動が生じていることが分かったが、3.11地震の前後で変動パターンは対照的であったことがわかった。変動パターンが対照的であった原因の一つとして考えられるのは、鉄筋コンクリートの損傷度合いの差の影響である⁹⁾。しかし、対象建物では2012年から2013年にかけてクラックへのエポキシ樹脂注入、袖壁の増設といった改修工事が行われているため、原因の解明には改修の影響も考慮した検討が必要である。

また、気温に依存して一定の周期性をもった変動がみられる原因には、3.11地震により生じた微細なひび割れの影響や非構造部材の特性などが想定されるが、しかし本結果は3階単独記録によるものであるから、この点は伝達系の共振振動数を算定し評価するなどして、別途さらなる検討を行うことが今後の研究課題である。

5. 結論と今後の課題

本研究では、文献6)のシステム開発の観点から、宮城県内太平洋沿岸部沿いに建つ低層RC造既存建築に対して実施されている長期連続観測で蓄積された常時微動観測記録を用いた検討の嚆矢として、同建物の3.11地震直後の一次共振振動数の回復傾向と、一次共振振動数の季節変化という比較的長期間での振動特性の変動に着目して分析し、通常時と地震時の振動特性に関する知見の蓄積を行った。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 地震によって建物の剛性が低下した現象の後において、一次共振振動数は上昇する傾向にある。詳細には、本建物では、3.11地震の際に3階LD方向で853 cm/sec²、3階SD方向で1057 cm/sec²の最大加速度を経験しているが、その地震前後の一次共振振動数の変動を分析すると、地震後には一次共振振動数が両方向でそれぞれ約20%低下し、その後観測期間中でゆるやかな回復傾向がみられ、両方向でそれぞれ約10%回復していたことがわかった。なお回復の傾向は、次第に緩やかになっていた。
- 2) 気温の季節性、3.11地震を考慮し、2009年からの2ヵ年と、2014年からの2ヵ年の一次共振振動数の長期的な推移を分析したところ、気温により、一次共振振動数には季節変動があることを確認した。しかし、3.11地震の前の傾向には、高温時/低温時に一次共振振動数が減少/増加の傾向にあったのに対し、3.11地震の後の傾

向には、対照的に高温時/低温時に一次共振振動数が増加/減少の傾向にあったことが示唆された。コンクリートの損傷度合いによって、季節変動の正負の相関が変化する可能性を指摘した。

- 3) 通常時の一次共振振動数の月平均値の最大変動幅は、2009-2010では2%程度であったのに対し、2014-2015では6%超であった。変動の大きくなった理由には別途詳細な検討を要するが、構造部材でのひび割れ量の変化、二次部材のなじみ等の影響が考えられる。以上、本研究の分析から、建物の一次共振振動数は通常時にも変動する量であることを指摘したが、ただし本研究の知見は3階の単独記録から求めた値に基づくものであり、地盤と建物の相互作用を含んだ系の性質の共振振動数である。今後は、相互作用を除いた上部構造のみの応答性状の分析や、他の観測点との比較など、振動特性の変動の解釈についてさらに検討を深めたい。

謝辞

観測の実施にご理解とご協力を頂いている関係各位にこの場を借りて感謝申し上げます。また本研究は、科学研究費補助金助成金・基盤研究(B)(課題番号26289187、研究代表者：源栄正人)および東北大学災害科学国際研究所の特別研究プロジェクトの助成により進められた研究成果の一部です。

参考文献

- 1) 小川修一、亀田浩紀、佐藤宏、三田彰：構造ヘルスモニタリングの実用化に関する研究-データモデルを含む基盤システムの構築-、日本地震工学会論文集、第9巻、第5号、pp.79-93、2009
- 2) Maria I. Todorovska, Mihailo D. Trifunac：Earthquake damage detection in the Imperial County Services Building I：The data and time-frequency analysis, Soil Dynamics and Earthquake Engineering Volume 27, pp.564-576, 2007.6
- 3) John F. Clinton, S. Case Bradford, Thomas H. Heaton, and Javier Favela：The Observed Wander of the Natural Frequencies in a Structure、Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 96, No. 1, pp. 237-257, 2006.2
- 4) 岡本佳久、赤澤隆士、山田真澄、大西良広、林康裕：連続地震観測記録に基づく超高層建築の振動特性評価、日本建築学会技術報告集、第19巻、第41号、pp.59-64、2013.2
- 5) 田中匠子、源栄正人：実存建物の振幅依存振動特性に基づく構造ヘルスモニタリングに関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、構造II、pp.707-708、2009.8
- 6) 源栄正人、本間誠、セルダル・クユク、フランシスコ・アレシス：構造ヘルスモニタリングと緊急地震速報の連動による早期地震情報統合システムの開発、日本建築学会技術報告集、第14巻 第28号、pp.669-674、2008.10
- 7) Francisco Arrecis, Yoshiyuki Takahashi, and Masato Motosaka：Development of an Integrated Early Warning and Structural Health Monitoring System to Real Time Earthquake Information - Part4：The Structural Health Monitoring System、東北地域災害科学研究、第44巻、pp.29-34、2008.3
- 8) 森下真行、齊藤芳人、龍神弘明、田沼毅彦、渡辺一弘：RC造超高層建物の長期地震観測結果に基づく動特性評価、日本建築学会技術報告集、第20巻 第45号、pp.527-532、2014.6
- 9) 金澤健司：温度荷重による固有振動数の変動パターンを指標とする鉄筋コンクリート構造の損傷検知法-部材実験による基本原理の確認-、日本建築学会構造系論文集、第74巻、第638号、pp.619-627、2009.4
- 10) 畠山智貴、源栄正人、王欣、大野晋：連続観測に基づく実存建築物の固有振動特性の長期モニタリング、日本建築学会東北支部研究報告集、第79号、C-10、pp.39-40、2016.6

[2016年9月22日原稿受理 2017年1月23日採用決定]