設計用地震応答解析モデルに基づく超高層 RC 造建物における最大層間変形角の高さ分布

HEIGHT-WISE DISTRIBUTION OF MAXIMUM INTERSTORY DRIFT ANGLES IN SUPER HIGH-RISE RC BUILDINGS BASED ON EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS MODELS FOR STRUCTURAL DESIGN

山根義康 — * 1 永野正行 — * 2
肥田剛典 — * 3 田沼毅彦 — * 4

Yoshiyasu YAMANE — * 1 Masayuki NAGANO — * 2
Takenori HIDA — * 3 Takehiko TANUMA — * 4

キーワード：
超高層 RC 造建物, 地震応答解析モデル, 復元力特性, 卓越周期, 最大層間変形角, 2011 年東北地方太平洋沖地震

Keywords:
Super high-rise RC building, Earthquake response analysis model, Restoring force characteristics, Predominant period, Maximum interstory drift angle, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake

This report describes height-wise distribution of maximum interstory drift angles in super high-rise RC buildings based on earthquake response analysis models for structural design. Yielding loads in the restoring force characteristics are almost consistent for plural buildings when normalized by base shear coefficients. The height-wise distributions of interstory drift angles mainly depends on characteristics of input wave motions. As a result of the response analyses using various pulse waves and harmonic waves, the maximum interstory drift angles in low level floors occur when predominant period of input wave is longer than first natural period of the building.

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震では震源から離れた首都圏の超高層建物にも大きな揺れを及ぼした。このうち超高層 RC 造建物を対象とした地震動シミュレーション解析もいくつか行われている¹⁾²⁾。これらのシミュレーション解析で最大層間変形角等の高さ方向分布が報告されているが、分布形状は建物によって異なる。

シミュレーション解析では設計図書を参照して解析モデルが作成されている。既存の超高層 RC 造建物のモデル概要については野路ら⁴⁾、和泉ら⁵⁾が軒高、固有周期、設計用ベースシア係数等の基本情報をまとめている。しかし、超高層 RC 造建物の設計モデルの質量、剛性、耐力分布等の高さ分布に関する情報は少ない。

建物被害と関係性が高い地震動入力時の最大層間変形角に関して、古くから研究が行われている。芳村ら⁶⁾は耐震壁の数、高さ方向の梁耐力分布をパラメータとして、層間変形角の変化を分析している。秋葉ら⁷⁾は極めて稀に発生する地震動と同程度のホワイトノイズを用いて高層建物を対象に非超過確率をパラメータとした最大層間変形角分布を示し、最大応答値の確率特性を定量的に評価した。豊田ら⁸⁾は設計用地震動を大きく上回る地震動に対する超高層 RC 造建物の多質点系モデルによる応答評価の簡易手法を提案している。これらの研究では最大層間変形角の分布形状に関して言及しておらず地震動特性と層間変形角分布の関係を検討した研究は少ない。大地震時の超高層 RC 造建物を対象とした最大層間変形角の高さ分布の推定は大地震後の非構造部材を含む損傷程度の把握、さらにはその後の

補修を計画する上で重要な情報となる。

本研究では超高層 RC 造建物の設計用地震応答解析モデルのデータを分析し質量、剛性、耐力等の非線形特性を含めた高さ分布を調べる。東北地方太平洋沖地震時に建物の最下階で得られた観測波を入力地震動として地震応答解析を行い、最大層間変形角の分布性状を検討する。またパルス波及び定常波を用いた基礎的な検討から、地震波の周期特性と最大層間変形角の高さ分布の関係を調べる。

2. 対象建物概要及び地震応答解析モデルの分析

地震応答解析の対象とする建物は関東に建つ建物 A, B, C, E の 4 棟と関西に建つ建物 I, J, L, N の 4 棟であり、いずれも RC 造のラーメン構造である⁹⁾。これらの建物の概要を表 1 に示す。建物 C を除く全ての建物の最上階と最下階で、東北地方太平洋沖地震時の観測記録が得られている。図 1 に示す固有周期と設計用ベースシア係数の関係は $C_B=0.166/T_0^{0.5}$ の曲線とほぼ整合する。

各建物の設計図書に基づき、耐震設計時の地震応答解析モデルを分析する。図 2 に示す骨格曲線は、3 次元立体フレームモデルの pushover 解析から得られた荷重と層間変位の関係を面積等価のルールでトリリニア化し作成されている。「ひび割れ時」「降伏時」の耐力は、梁の多くがひび割れ、もしくは降伏した状態での値を示す。表 1 中の BS, S モデルは耐震設計時に用いられた一軸の多質点系モデルであり、それぞれ曲げせん断モデル、せん断モデルを示す。建物毎に階高及び軒高が異なるため、それぞれの建物の軒高を 1, GL を 0 と

¹⁾ 東京理科大学理工学部建築学科
(〒278-8510 千葉県野田市山崎 2643)

²⁾ 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士 (工学)
³⁾ 東京大学工学系研究科建築学専攻 助教・博士 (工学)
⁴⁾ 都市再生機構

¹⁾ Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology, Tokyo Univ. of Science

²⁾ Prof., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.
³⁾ Assist. Prof., Univ. of Tokyo, Dr. Eng.
⁴⁾ Urban Renaissance Agency

して基準化し、以降、高さ分布の縦軸は基準高さを示す。

単位面積当たりの質量(M/A)分布を図3に示す。質量分布は各階床面積で基準化すると全体的に同様の値を示し1.2t/m²程度となった。初期せん断剛性(k1)、第二せん断剛性と初期せん断剛性の比(k2/k1)、降伏時の割線剛性と初期せん断剛性の比(α)を図4に示す。以下X方向Y方向の差はほとんど見られなかったため、X方向のみを示す。初期せん断剛性は建物によってばらつきが大きい、BSモデルの建物A,B,J,NがSモデルに比べて大きい。第二せん断剛性比は0.2~0.4の範囲で広がり、初期剛性の大きいBSモデルは小さく、初期剛性が小さい建物では比較的大きい値を示している。そのため初期せん断剛性に比べ第二せん断剛性では建物によるばらつきが小さくなっている。降伏時の割線剛性比についても概ね同様の傾向が見られ、0.3~0.5程度となっている。第三せん断剛性については示していないが全層一律でk1の1/100としている建物やpushover解析から評価し、k1の1/10程度としている建物が多い。

次に耐力分布について分析する。図5にひび割れ時耐力(Qc)、降伏耐力(Qy)を示す。それらをその層よりも上部の総重量で除した層せん断力係数(Qc、Qy/ΣMG)を図6に示す。また各層の耐力を設計用

ん断力(Qe)で基準化したものを図7に示す。図5のひび割れ耐力は建物によって多少のばらつきが見られるが、どの建物でも高層で小さく下層部で大きくなる傾向が見られた。降伏耐力については質量の大きい建物Aでのみ大きな値を示しているがその他の建物ではばらつきは少ない。層せん断力係数についてはひび割れ時、降伏時ともに建物によるばらつきは少なく、ベースシア係数としてはひび割れ時が0.06、降伏時が0.2程度となった。設計用層せん断力で基準化したそれぞれの耐力は建物による大きな差はなく、ひび割れ時が0.45程度となり降伏時が1.4~1.7にまとまった。

ひび割れ時、降伏時のせん断変形角分布(γc、γy)を図8に示す。ひび割れ時のせん断変形角は(0.3~1.0)/1000前後に、降伏時は(4~8)/1000前後にあり、耐力に比べばらつきはやや大きい。またひび割れ時のせん断変形角についてはSモデルの建物では高層で大きくなり、BSモデルでは高層で小さくなっている。部材の非線形化によって生じる変形を全てせん断変形としているため、降伏時ではこの傾向は見られず建物のばらつきは小さい。設計用せん断力で基準化した層間変形角1/100rad.時の骨格曲線面積を図9に示す。これらはほぼ同じ範囲にまとまっており、1/100rad.までのエネルギーは概ね整合している。

表1 対象建物概要

建物	階数	軒高(m)	設計固有周期X, Y (s)	基準階面積(m ²)	竣工年	振動解析モデル
A	30	95.9	1.58, 1.7	1064	1999.8	BSモデル
B	25	74.9	1.19, 1.33	758	1995.4	BSモデル
C	30	88.35	1.98, 2.02	807	1989.4	Sモデル
E	33	103.8	2.12, 2.15	959	2000.12	Sモデル
I	33	108.45	1.59, 1.59	764	1999.3	Sモデル
J	37	111.65	2.06, 2.06	722	1999.7	BSモデル
L	43	135.68	2.78, 2.73	939	1999.2	Sモデル
N	31	92.5	1.61, 1.67	1007	1989.11	BSモデル

図7 設計用層せん断力で基準化した層せん断耐力分布

図8 層間せん断変形角分布

図9 設計用せん断力で基準化した層間変形角 1/100rad.時の骨格曲線面積

(a) 1次刺激関数

(b) 2次刺激関数

(c) 3次刺激関数

図10 刺激関数

図11 1次刺激関数の層間変形角

上記の質量、初期剛性を用いて固有値解析を行い、刺激関数および、その層間変形角を検討する。図10に1~3次までの刺激関数、図11にそれぞれの建物の軒高で基準化した1次刺激関数の層間変形角を示す。刺激関数については建物間のばらつきはほとんど見られず、1次刺激関数の層間変形角についてもすべての建物で概同様の傾向を示し、中層部で大きくなる。以上より、建物毎に多少のばらつきが見られるものの、質量、骨格曲線のエネルギー等は基準化することによりほぼ同等の特性を有すること、初期剛性より得られる刺激関数については地震応答解析モデル間で大きな差はないことが分かる。

3. 東北地方太平洋沖地震時の観測波を用いた地震応答解析

地震動応答解析に基づき2011年東北地方太平洋沖地震（以降、本震と称す）時の最大層間変形角の高さ方向の分布性状について検討する。応答解析は多質点系モデルを用い、モデルは2章でまとめたデータを使用した。地盤条件は全て基礎固定で行い、武田モデルを復元力特性とした非線形解析を行った。減衰は瞬間剛性比例型とし既往のシミュレーション解析²³⁾を参考に初期1次固有周期に対して減

図12 最下階で得られた本震時観測波の速度応答スペクトル(X方向)

衰定数を1%とした。図12に建物A, B, C, Eの最下階で得られた本震時観測波の速度応答スペクトルを示す。建物Cでは1階の観測記録が欠測しているが北堀ら³⁾が同建物で1階の記録を再現しており、その波を使用した。建物A, B, C, Eを対象に各建物の観測波を

図13 本震時における最大層間変形角

入力波とした応答解析を行う。図 13 に解析から得られた最大層間変形角及び本震時の観測記録から得られた平均層間変形角⁹⁾を示す。中間層の観測記録があるケースでは、2、3 段の平均層間変形角が示されているが、その大小関係の傾向は解析結果と整合する。建物 E の Y 方向では観測に比べて過大評価となっているが、同建物を対象とした既往の詳細なシミュレーション解析¹⁰⁾においても同様の傾向が示されている。建物によって最大層間変形角の分布形状は異なり、例えば建物 A は低層部で大きく建物 C は中高層部で大きい。この 2 棟については山本ら²⁾、北堀ら³⁾が本震時の詳細なシミュレーション解析を行っている。それぞれの解析では地盤の相互作用の影響を考慮するためスウェーロッキングモデルで解析しているが、層間変形角分布は観測及び設計用地震応答解析モデルに基づく基礎固定での解析と同様の傾向を示す。このことから層間変形角の分布性状を考察する際には基礎固定モデルによる解析でも可能と言える。

以上を踏まえ以降、基礎固定モデルを用いて最大層間変形角の分布性状を異なる傾向を示した建物 A、C を対象に検討する。本震時に建物 A、C の最下階で得られた観測波を建物 8 棟に入力し、応答解析を行った。図 14 に観測された最下階の加速度波形及び時刻歴上で周波数特性を表すウェーブレット変換を示す。図 15 に応答解析から得られたそれぞれの最大層間変形角の高さ方向の分布を示す。建物 A

の観測波入力時ではすべての建物で低層から中層部にかけて層間変形角が大きく、建物 C の観測波入力時では一部の建物では下層階で大きくなっているものの全体的に中層から高層部で大きくなる傾向が見られた。このことから最大層間変形角分布は入力地震波の影響により変化することが分かる。

筆者らは 3.11 本震時において、最大層間変形角は 1 次モードの影響を大きく受け、高次モードの影響は少ないことを報告している¹¹⁾。また建物 A については本震時の立体フレーム解析を行い、最大層間変形角の高さ分布は 1 次モードの影響を多く受け、主要動後半の 120~150 秒の区間に低層部で大きくなることを示した¹²⁾。図 14 のウェーブレット変換から建物 A の観測波において 120~150 秒の時間帯で長周期成分が卓越しており、長周期成分の影響から最大層間変形角が低層部で大きくなった可能性が考えられる。また、建物 C の観測波では 80 秒付近で短周期成分が卓越しており、その影響により最大層間変形角が中高層部で大きくなったと予測できる。そこで図 14 の矢印に示すように、建物 A 観測波の長周期成分の少ない 125 秒までの時間領域と建物 C の 100 秒以降の長周期成分が多く含まれている時間領域の波を切り出して、それを入力波として応答解析を行う。図 16 に建物 A、C の観測波を特定時間のみ入力した時の 8 棟の最大層間変形角分布を示す。建物 C 観測波入力時では建物 L のみ

図 14 入力波時刻歴加速度波形及びウェーブレット変換

図 15 同一観測波入力時の最大層間変形角分布

図 16 特定時間領域のみの観測波入力時の最大層間変形角分布

答が大きく全体の傾向が見えにくくなるため除外した。建物 A 観測波 120 秒までを入力した結果は全時間を入力した時に比べ、最大層間変形角が最大となる層が高くなり、全体的に中層から高層で大きくなる傾向が見られた。しかし一部の固有周期が短い建物では低層部で大きくなっており、100 秒付近に見られる 2 秒程度の周期成分の影響を受けたと考えられる。長周期成分が多い建物 C 観測波 100 秒以降入力時は下層部で大きくなった。しかし $1/800\text{rad}$ 程度と値が小さい。これは建物 A と異なり、切り出した長周期成分が 4 秒程度と非常に長い周期であることが影響していると考えられる。長周期成分による最大層間変形角の膨らみが小さいため、観測波全体を入力した場合に低層部の膨らみは顕著に表れなかったものと考えられる。

4. 地震波周期特性と最大層間変形角分布の関係について

3 章の結果を踏まえ、単純なパルス波及び定常波を用いてより詳細に地震波の周期特性と最大層間変形角分布の関係を分析する。パルス波については中心周期を設定した Ricker 波を速度波形とみなし、それを微分したものを加速度波形とし入力した¹³⁾。定常波には Sin 波を用い、初めと終わりに 5 波のテーパをつけ波数を 20 波とした。波数については 20 波以上を入力しても応答に差が見られなかった。これらの入力地震動の設定周期、振幅をパラメータとして応答解析を行う。入力波の設定周期 T_p は建物の 1 次固有周期 T_0 の 1 倍、1.5 倍、2 倍とし、振幅 $A_{\max}$ については最大で最大層間変形角が多質点系モデルでも十分評価できる $1/100\text{rad}$ 程度となるように調整した。なお、1 次固有周期 T_0 より短い設定周期の入力地震動についても検討を行ったが、 $T_p > T_0$ のケースに比べ最大層間変形角の値が小さく、入力する地震動の設定振幅レベルを大きくする必要があるため、今回は除外した。図 17 に設定周期 $T_p=2$ 秒、振幅 $A_{\max}=1\text{cm/s}^2$ のパルス波及び定常波を示す。まずパルス波を入力地震動として建物 A を対象に線形、非線形両解析を行った。図 18 に線形解析、図 19 に非線形解析で得られた最大層間変形角分布を示す。なお、入力波の振幅 $A_{\max}$ は 10cm/s^2 刻みで変化させた。線形解析では地震波の周期特性によって最大層間変形角の分布形状に多少の変化は見られるものの明瞭な差は見られない。非線形解析では建物の 1 次固有周期 1 倍の設定周期では高層部で最大層間変形角が大きくなり、1.5 倍では中層部、2 倍では低層部で大きくなる傾向が見られた。また設定周期 1 倍に比べて 1.5 倍、2 倍の長周期よりの地震動を入力した時は比較的小さい振幅でも応答値が大きくなる

傾向が見られる。これはパルス波とは違い同レベルの波が一度に複数回入力されるため非線形化がより進むことが原因と考えられる。

(a) パルス波加速度波形

(b) 定常波加速度波形

図 17 入力地震動

図 18 線形解析におけるパルス波入力時の最大層間変形角分布 (建物 A)

図 19 非線形解析におけるパルス波入力時の最大層間変形角分布 (建物 A)

ことが分かる。これは地震応答により非線形化が進み剛性が低下することで固有周期が伸びるため、設定周期 2 倍の地震に伸びた固有周期が近づいたことが原因と考えられる。

次に最大層間変形角がどの高さで大きくなっているかをより鮮明にするため、高さ方向の連続する 3 点の層間変形角の平均値が最も大きくなる点を調べた。結果を図 20 に示す。この検討では 3.11 本震時に異なる傾向を示した建物 C についても同様の傾向が見られるのかを確認し、また定常波入力時についても分析した。三角の点は線形時の結果を示す。入力地震動の

日本建築センターで作成された BCJ-L2 波入力時の結果を同図にひし形の点で示した。BCJ-L2 波入力時は高層部で最大層間変形角が大きくなっており、地震波に含まれる短周期成分が影響したと考えられる。

以上のことから最大層間変形角分布はパルス波、定常波に依らず、建物の 1 次固有周期に対して 1 倍程度の周期特性の波を入力すると高層部で大きくなり、2 倍程度の周期特性を持つ波を入力すると低層部で大きくなると言える。しかし長周期成分の大きい定常波では小さい振幅でも応答が大きくなるため、周期特性が長周期よりの定常波が入力された場合にはパルス波に比べて低層部で最大層間変形角は大きくなりやすいと考えられる。

5. まとめ

既存の超高層 RC 造建物の設計時の地震応答解析モデルを分析した。また、2011 年東北地方太平洋沖地震時の観測波および卓越周期を設定したパルス波、定常波を用いて、地震波と最大層間変形角の分布の関係性を調べた。得られた知見を以下に示す。

- 1) 質量、層せん断耐力、骨格曲線のエネルギー等は基準化することによりほぼ同等の特性を有すること、初期剛性より得られる刺激関数については、地震応答解析モデル間で大きな差はないことが分かった。
- 2) 地震応答解析モデルに基づき基礎固定モデルで東北地方太平洋沖地震時の建物 A、C の観測波を入力地震動として複数建物で応答解析を行った。その結果、最大層間変形角が建物 A 観測波では低層部で大きく、建物 C 観測波では中高層部で大きくなる傾向を示した。このことから最大層間変形角分布は入力地震波の特性により変化し、特に入力地震動に長周期成分を多く含む場合は、低層部で最大層間変形角が大きくなる傾向が分かった。
- 3) 周期特性、振幅をパラメータとしたパルス波、定常波を用いて応答解析を行った。その結果、線形解析では周期特性の違いによる層間変形角の分布性状の変化は見られないことが分かった。非線形解析においてパルス波、定常波に依らず建物の 1 次固有周期の 1 倍の周期特性を持つ地震動入力時では最大層間変形角は高層部で大きくなり、2 倍の周期特性を持つ地震動を入力時は低層部で大きくなる傾向が見られた。

謝辞

本検討で利用した強震記録データは、都市再生機構技術研究所と鴻池組、戸田建設、前田建設工業、各社との共同観測により得られたものであります。UR 研究会の諸氏にはご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。本研究は科研費基盤研究(C)No. 25420589(代表者:永野正行)の助成を受けました。

参考文献

- 1) 片山喜隆・他: 2011 年東北地方太平洋沖地震による水戸市に建つ超高層免震建物の地震観測記録(その 2)シミュレーション結果, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 189-196, 2012.9

図 20 非線形解析における最大層間変形角の最大値分布

- 2) 山本健史・他: 軟弱地盤に建つ超高層 RC 造集合住宅の地震応答評価と被害との対応, 日本建築学会技術報告集, Vol.42, pp447-451, 2013.6
- 3) 北堀隆司・他: 2011 年東北地方太平洋沖地震時に 1 階の地震記録が欠測した超高層集合住宅の地震応答解析, 日本建築学会技術報告集, Vol.46, pp911-916, 2014.10
- 4) 野路利幸・他: 超高層住宅の構造設計情報の調査・分析(その 2), 日本建築学会北陸支部研究報告集, pp29-32, 2007. 7
- 5) 和泉信之: 第 5 章 適用事例, 超高強度コンクリート技術の現状, 2007 年日本建築学会大会構造部門パネルディスカッション資料, pp48-53, 2007.8
- 6) 芳村学・他: 耐震フレーム構造の地震時変形性状, コンクリート工学年次論文報告集, 12-2 1990, pp. 143-148
- 7) 秋葉健・他: 高層建築物の地震応答値の確率特性, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.149-152, 2002.2
- 8) 豊田真士・他: 超高層 RC 建築物の簡易地震応答評価に関する基礎研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.69-72, 2012.5
- 9) 永野正行・他: 2011 年東北地方太平洋沖地震時の強震記録に基づく関東・関西地域に建つ超高層集合住宅の動特性, 日本地震工学会論文集, 第 12 巻, 第 4 号, pp. 65-79, 2012.9
- 10) 井川望・他: 2011 年東北地方太平洋沖地震における超高層集合住宅の地震応答評価, 日本建築学会技術報告集, Vol. 40, pp.859-864, 2012. 10
- 11) 山根義康・他: 2011 年東北地方太平洋沖地震時における超高層集合住宅の室内被害の分析と建物応答との対応, 日本建築学会技術報告集, Vol. 44, pp.67-72, 2014. 2
- 12) 野木淑裕・他: 東北地方太平洋沖地震を経験した超高層集合住宅の損傷推定とその後の耐震性能評価, 日本建築学会技術報告集, Vol. 44, pp.67-72, 2014.2
- 13) 小山哲央・他: パルス状の地震波の単純化と等価線形化法に基づく弾塑性応答特性の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 253-256, 2011

[2015 年 3 月 16 日原稿受理 2015 年 7 月 27 日採用決定]