

長周期地震動と免震構造



東京理科大学

北村 春幸

1 はじめに

長周期地震動が一般に知られるようになったのは、2003年十勝沖地震の際に、震源から160km以上離れた苫小牧で、スロッシング振動により巨大な石油タンクに火災が発生したことが契機になった。苫小牧は深い地盤構造が盆地形状を示す堆積盆地の縁にあり、長周期の表面波が盆地形状により増幅され、数分間に渡ってゆっくりとした大きなゆれが続く長周期地震動に襲われた。

この地震被害を受け、2004年1月18日(日)夜9時にNHKスペシャル「地震波が巨大構造物を襲う」が放送された。この番組のなかで、入倉孝次郎京都大学名誉教授により堆積盆地にある東京、大阪、名古屋などの大都市圏が東海・東南海・南海地震等の巨大地震に襲われると、数秒から十秒に卓越周期を持つ長周期地震動が発生し、数分から十分近くゆれ続けることが指摘された。入倉先生らが作成した想定南海地震による大阪管区気象台の模擬波(KK-OSA-NS)を用いた40階建て超高層ビルのシミュレーション解析を東京理科大学北村研究室が担当した。その検討の中で、これらの地域で想定される長周期地震動は、特定の範囲の固有周期を持つ超高層建物がこれまで設計に用いてきた地震動レベルに達するほどの大きさになることが予想された。さらに、地震応答解析から層間変形などの最大値は一般的な超高層建物の設計目標値を概ね満足するが、地震動継続時間が長いことから塑性化に至るような大きなゆれがこれまでの数倍から十倍も繰り返され、構造体のエネルギー吸収能力など累積値に対する新たな検討が必要なることを明らかにした。この番組は大きな反響を呼び、2004年度の科学技術映像祭で内閣総理大臣賞を受賞した¹⁾。

このような状況下で、土木学会と日本建築学会

は「巨大地震対応共同研究連絡会」を設立し、巨大地震による地震動の予測および既存構造物の耐震対策に関する共同調査研究を始めた。これに対応するために、建築学会では、「東海地震等巨大災害への対応特別調査委員会(秋山宏委員長)」^{2), 3)}を設置し、地震動・建築構造物・避難計画小委員会と9つのWGによる調査研究が2年間の予定で2004年4月から始まった。特別調査委員会は、当時の学会長の秋山宏委員長と構造委員長の西川孝夫構造物小委員会主査を中心に150名余りの委員が集められた。この委員会に建築構造物小委員会幹事として参加し、特に超高層建物と免震構造については研究室の研究テーマとして検討を始めた。

2 長周期地震動

巨大災害特別調査委員会の活動が4月にスタートして、8月には共同研究連絡会入倉地震動部会から関東地震の東京・横浜、東海地震の静岡、東海・東南海地震の名古屋、南海地震の大阪での第1次提供波が提示された。翌年には第2次提供波として、新たに東京・横浜における東海地震の想定波、東海・東南海地震の名古屋と南海地震の大阪の想定波が複数の地点で大量に追加された。これらの中から、13波が建物検討用地震動として選ばれた。これらの波形に2003年十勝沖地震におけるTOMAKOMAI 2003 NS波と、超高層建物の設計で用いられる標準波の中からEL CENTORO 1940 NS波とHACHINOHE 1968 EW波、告示波ART HACHI(位相特性：HACHINOHE 1968 EW)とART TOMA(位相特性：TOMAKOMAI 2003 NS)、直下地震のJMA KOBE 1995 NS波が建物の検討用地震動として採用された²⁾。

現行の超高層建物や免震建物の設計用地震動である標準波・告示波と比較することで長周期地震

動の影響を評価する。最大速度 $V_{max}=50\text{cm/s}$ で基準化した標準波は、速度応答スペクトルが $S_v=80\sim 120\text{cm/s}$ (以降全て $h=5\%$)を、エネルギースペクトルは $V_E=120\sim 180\text{cm/s}$ (以降全て $h=10\%$)を示すが、3秒以上の長周期領域では両者とも半分以下に小さくなる。また、JMA KOBE 1995 NS波は、1秒付近で大きなピーク値 $S_v=255\text{cm/s}$ 、 $V_E=363\text{cm/s}$ を持つが、2秒を超えると小さくなる。一方、東海・東南海・南海地震の提供波は地域ごとに特定の周期帯でピーク値を示すが、それ以外は速度応答スペクトルで標準波と同様の $S_v=80\sim 120\text{cm/s}$ 、エネルギースペクトルで標準波の1.5倍の概ね $V_E=180\sim 270\text{cm/s}$ に留まる。特定の周期帯におけるピーク値は、東京・横浜では土方らによる想定東海地震の品川KH-SNG-EW波と横浜KH-YKH-EW波の3秒付近で $S_v=150\text{cm/s}$ 、 $V_E=300\text{cm/s}$ 程度、名古屋では中部地方整備局による想定東海・東南海地震の三の丸C-SAN-EW波の3秒付近で $S_v=250\text{cm/s}$ 、 $V_E=550\text{cm/s}$ 程度、大阪では想釜江らによる想定南海地震の大阪管区気象台KK-OSA-NS波と西大阪KK-WOS-EW波の5秒付近で $S_v=150\text{cm/s}$ 、 $V_E=300\sim 400\text{cm/s}$ 程度、関口らによる想定南海地震の福島HS18-FKS-EW波とKiK-net此花HS18-OSKH02-NS波の7~8秒付近で $S_v=120\sim 150\text{cm/s}$ 、 $V_E=250\sim 300\text{cm/s}$ を示す。告示波のART HACHIとART TOMA(開放工学基盤の応答スペクトルの1.25倍、 $S_v=100\text{cm/s}$ 、 $h=5\%$)は、標準波の応答スペクトルの山谷を埋め、それぞれのピーク値を若干下回る程度の値に設定されている。これらのエネルギースペクトル V_E 値はART TOMA波では $V_E=270\sim 400\text{cm/s}$ と大きく、ART HACHI波の1.5倍程度であり、長周期地震動のピーク値の7割程度の値を示す。

1990年頃までは、固有周期が3秒以上の超高層建物や免震建物の設計では、標準波の応答スペクトルが3秒以上の周期領域で極端に小さくなることから、それを補うために標準波のレベルや模擬波の目標スペクトルをどのように設定するかが設計者により異なっていた。地震動の長周期成分は短周期成分ほど大きくなるとの思いもあったが、今回の検討から標準波の $S_v=80\sim 120\text{cm/s}$ のレベルを3秒

以上の周期領域でも確保する必要があることが明らかになった。

長周期地震動は、応答スペクトル S_v が標準波・告示波と同じ場合でもエネルギースペクトル V_E は数倍大きくなり、応答スペクトルの減衰関数($F(h)=S_{v,h}/S_{v,h=0}$)は標準波に比べて減衰による低減が大きくなる。この現象を説明するために、秋山先生は長周期地震動に対して単位地震動が一定間隔を保って数回起こるモデルを想定した。この思考モデルを用いると入力エネルギーの総量は単位地震動によるエネルギー入力の累積値になり、最大応答値は単位地震動による最大応答値が繰り返しまることになる。単位地震動を標準波とすることで、地震動の応答スペクトル S_v とエネルギースペクトル V_E の関係を標準波の減衰関数 $F(h)$ と反復数 f を用いて表すことができるようになった⁴⁾。

入倉地震動部会では、地震とサイトを特定して長周期地震動を波形で提供している。また、地震動とサイトを統一した複数の研究者による模擬波の作成や、断層、伝播経路や地下構造などのモデル化に関わるゆらぎを評価する検討が行われた。それらの検討から、作成された模擬波に対して卓越周期とそのピーク値の両方に倍半分程度のばらつきを見込む必要があることが明らかになった。従って、設計用入力地震動を規定する場合には、直接、模擬波を提示するのではなく、地震波と建物応答をつなぐエネルギースペクトルと応答スペクトルを用い、現在設計に用いられている入力地震動との対比から現行設計レベルの妥当性を検討することが、設計者にとって分かり易くコンセンサスが得られ易いと考えている。

この観点から長周期地震動を総合的に評価して、速度応答スペクトル S_v は標準波と同じ $S_v=80\sim 120\text{cm/s}$ ($h=5\%$)を想定する。一方、エネルギースペクトル V_E は標準波の1.5倍 $V_E=180\sim 270\text{cm/s}$ を、すなわち入力エネルギー E では2~4倍を想定する。ただし、名古屋の3~4秒、大阪の5秒と7~8秒の特定の周期帯では、速度応答スペクトルとエネルギースペクトルともに、さらに1.5倍の大きさを想定する。これらに加

地震動	標準波	長周期地震動	特定の周期帯
速度応答スペクトル	$80 \leq S_v \leq 120\text{cm/s}$	$80 \leq S_v \leq 120\text{cm/s}$	$120 \leq S_v \leq 180\text{cm/s}$
エネルギースペクトル	$120 \leq V_E \leq 180\text{cm/s}$	$180 \leq V_E \leq 270\text{cm/s}$	$270 \leq V_E \leq 400\text{cm/s}$

えて、兵庫県南部地震のような直下地震に対して1秒前後の周期帯に $S_p=120\sim 180\text{cm/s}$ 、 $V_E=180\sim 270\text{cm/s}$ を想定することを提案したい。

3 長周期地震動と免震構造

既存免震建物の耐震性能を評価するにあたって、日本建築センターのビルディングレターの性能評価シートに記載されている情報などをもとに、免震クリアランス、積層ゴムの限界変形、ダンパーの降伏せん断力係数、エネルギー吸収能力、上部構造の設計ベースシア係数などを分析した。この調査をもとに、免震建物の建設時期を適用免震部材ごとに分類し、一般化した免震建物モデルを作成した。1982年に多田英之・山口昭一により設計された八千代台免震住宅に始まる免震建物を1989年の学会・免震構造設計指針の刊行、1995年の阪神・淡路大震災、2000年の免震告示の制定を境に4期に分けて、分析・評価した⁵⁾。

積層ゴムの直径は、当初 $500\phi\sim 600\phi$ 程度の小さいものも多く使われていたが、1995年以降の第3期に入ると $700\phi\sim 900\phi$ へと大きなサイズのものが使われるようになり、限界変形も当初 $40\sim 50\text{cm}$ であったものが 60cm を上回るようになってきた。しかし、免震クリアランスは、時期に関係なく $40\text{cm}\sim 60\text{cm}$ に分布している。積層ゴムの平均面圧も当初 $5\sim 10\text{N/mm}^2$ であったものから3期以降は $10\sim 15\text{N/mm}^2$ へと高面圧化し、免震周期 T_f (積層ゴムのみの固有周期)も当初 $2\sim 3$ 秒であったものが、3期以降は $3\sim 4$ 秒へさらに 5 秒へと長周期化している。ダンパー量は、履歴ダンパーの降伏せん断力係数換算で概ね $0.02\sim 0.05$ に、上部構造の設計ベースシア係数は、概ね $0.1\sim 0.2$ の範囲に分布している。

免震部材は当初は地震挙動の明快さを目指して、天然ゴム系積層ゴムと鉛ダンパー、または高減衰系積層ゴムや鉛プラグ入り積層ゴムなど減衰機構を組み込んだ積層ゴムのみを単独で使うものが多かった。最近では、積層ゴムや滑り支承や転がり支承などの複数の支承と金属系の履歴ダンパーや粘性系のオイルダンパーなど複数のダンパーを組合せた複雑なものが多くなっている。告示で定められた地震荷重に対する応答値と部材の限界値を近づけることを目標に、例えば上部構造も全てのRC壁に耐震スリットを設けるなど、モデル化の容易な、計算を盲信する設計が増えている。構造体のみで

なく建物全体として免震構造のメリットを活かす設計を心懸けたいものである。

これまでの超高層建物の設計は、応力や変形などの最大応答値が限界値以下にあることを検証する、すなわち、最大値のみに着目した設計を行っており、それに適した地震波を標準波として採用してきた。短時間に最大値を発生させるに十分なエネルギーを入力することが、設計用地震動に対するエネルギー評価であった。免震構造も上部構造の応力や免震層の変形などの最大応答値の限界値に対する余裕度を検証してきた。ダンパーの検討では、最大値に加えて吸収エネルギー量や累積塑性変形を検証してきたが、あくまで標準波による入力エネルギーを基準にしてきた。

入力エネルギーが大きい長周期地震動に対する免震構造の耐震安全性をエネルギーの釣合に基づく応答予測法を用いて評価する。免震層の最大変形時のエネルギーの釣合は、積層ゴムの弾性歪エネルギーとダンパーの消費したエネルギーの和を入力エネルギーと等しいと置く。このとき、積層ゴムの弾性歪エネルギーは積層ゴムの負担せん断力と最大変形の積の $1/2$ 倍で表される。ダンパーの吸収エネルギーはダンパーの降伏せん断力と最大変形の積の $8f$ 倍で表される。これは、標準波では最大変形を振幅とする履歴ループの2回り分のエネルギーをダンパーが吸収することから導き出されたものである。 f は標準波の反復数であり、長周期地震動では $f=2\sim 4$ となる。免震構造はダンパーが降伏するまでは耐震構造と同様の1秒前後に初期周期を持つが、免震層の変形が大きくなるに従って実効周期が伸び $3\sim 5$ 秒の免震周期に近づく。従って、初期周期と免震周期の間に特定の周期帯を含む長周期地震動に対しては、免震構造はそのピークの影響を受けるものとして検討する必要がある。標準波の f 倍の入力エネルギーがあるとそれを吸収するためには免震層の最大変形が大きくなり、免震クリアランスと免震部材の限界変形に余裕が必要となる。地震終了時のエネルギーの釣合は、入力エネルギーとダンパーの消費したエネルギーを等しく置く。このとき、ダンパーの吸収エネルギーは降伏せん断力と累積塑性変形の積で表される。標準波の f 倍の入力エネルギーがあるとダンパーの累積塑性変形が f 倍になりダンパーのエネルギー吸収能力を再確認する必要がある。特に、温度依存性の大きい

ダンパーでは温度上昇が大きくなり減衰性能が低下する現象が現れるので、再評価の際にはこのことを考慮したい。

これらに対応すべく、日本建築センター免震審査委員会と免震構造協会では共同で検討を始めている。一つは長い時間に大量のエネルギーが入力する長周期地震動や兵庫県南部地震のような短時間に大きなエネルギーが入力する直下地震に対して、ダンパー機構がエネルギー吸収能力を保持することができるかを実大免震部材の動的繰り返し載荷実験により確かめることである。対象となるのは鉛プラグ入り積層ゴム、高減衰積層ゴム、弾性すべり支承や履歴ダンパーや粘性ダンパーなどである。設計者や製造者により実験が行われ始めており、これらの成果を導入することで免震構造の信頼性がさらに高まることが期待される。もう一つは、積層ゴムやダンパーなどの上下基礎へのアンカーを確実なディテールにすることである。免震部材のアンカーディテールが、施工の容易さを優先して本来の応力を基礎へ伝達する性能が不足するディテールを採用している例が多く見られるようになった。これらに対しても、免震構造協会が実験で確認したアンカー性能と施工品質の確保できる免震部材のアンカー部標準ディテールを作成して、設計者や施工者に広めるべく検討を始めている。普及するほど安易な設計や施工が横行することから、免震構造の高耐震性能に対する信頼を維持するためにも、引き続き研究・開発を持続する必要があると考える。

長周期地震動の特定の周期帯に含まれる免震構造は、標準波をもとに設定してきた免震クリアランスを免震層変位が上回る恐れがあることや、免震部材のエネルギー吸収能力が不足する恐れがあることがわかった。従って、そのような免震建物についてはあらためてサイト波に対する検討を行

う必要がある。免震構造の長周期地震動対策として、ダンパーを増設して最大変形や累積塑性変形の増加を抑制することを検討したい。

4 おわりに

2006年3月に巨大災害特別調査委員会を当初の予定通り2年間で終了し、その後は長周期地震動編集委員会に引き継がれた。9月9日の日本建築学会大会研究協議会で最終報告の概要が報告された。土木学会・日本建築学会共同提言「海溝型巨大地震による長周期地震動と土木・建築構造物の耐震性に関する共同提言」を作成し、11月20日午前10時から建築会館で記者会見が行われた。なお、最終報告書は2007年秋には学会の出版物として刊行される予定である。

巨大災害特別調査委員会で提示された課題は、今後とも学会の常設委員会に引き継がれ、多くの研究者や設計者のテーマとなり、対応策が研究開発されることが期待される。さらに、これらの成果を取り込んで個々の建物ごとに長周期地震動に対する耐震性能評価と必要に応じてその対策を立てることが望まれる。

【参考文献】

- 1) NHKスペシャル地震波プロジェクト：NHKスペシャル 地震波が巨大構造物を襲う 大地震が起きた時、あなたは大丈夫か、近代映画社、2004.9.10
- 2) 日本建築学会東海地震等巨大災害への対応特別調査委員会：巨大地震による長周期地震動の予測と既存建築物の耐震性と今後の課題、2006年度日本建築学会大会研究協議会、2006.9
- 3) 土木学会・日本建築学会巨大地震対応共同研究連絡会：共同提言、2006.11
- 4) 秋山宏、北村春幸：エネルギースペクトルと速度応答スペクトルの対応、日本建築学会構造系論文集、第608号、2006.10
- 5) 北村春幸、東野さやか、竹中康雄、田村和夫：長周期地震動による既存免震建物の耐震性能評価、日本建築学会技術報告集、第22号、2005.12