

大地震での揺れと建物の耐震対策



特集2
ハイテク推進
セミナー

大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 建築工学部門
教授 宮本 裕司氏

1. はじめに

関西圏では南海トラフ巨大地震や上町断層帯地震の発生が危惧されており、このような大地震での被害をできるだけ軽減する対策が急がれている。特に大阪は軟弱な沖積地盤の狭い土地に様々な建造物や地下街が建設され、交通網やライフラインが縦横無尽に張り巡らされている(図-1)。災害に強い強靱な都市・地域を目指すためには、一つ一つの建物や施設や住宅の被害を如何に最小に抑えるかが重要となる。

建物の耐震対策においては、従来は建物単体の強度や変形量に主眼がおかれていた。しかし、1995年阪神・淡路大震災や2011年東日本大震災、また2016年熊本地震を教訓に、震源メカニズムの違いによる地震の揺れや建設地点の地盤の揺れの違いも評価し、耐震設計をより精密にすることの重要性が改めて認識された。さらに、大阪では2018年に大阪府北部を震源とする地震が発生した。マグニチュードは予想される巨大地震に比べかなり小さかったため、建造物が大破するような被害はなかったものの、耐震性が低い住宅やビルまた交通網・ライフラインに被害が発生し、日常の生活が幾日か途絶えた。一方、免震化や耐震改修された建造物に被害はほとんどなく、その効果が検証された地震でもあった。このような過去の地震から何を学び、いつ起こって

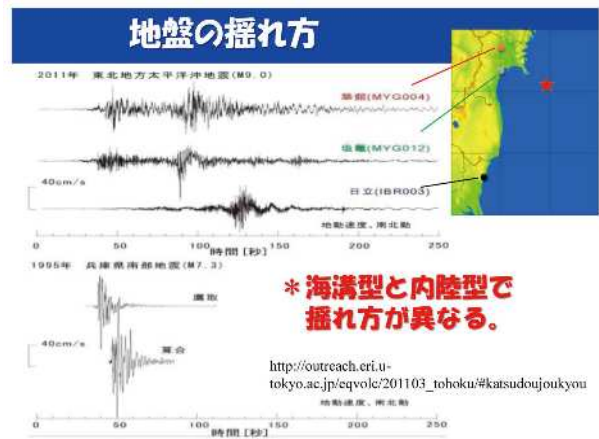


図-2 二つの大震災での地盤の揺れ

もおかしくない南海トラフ巨大地震や上町断層帯地震に如何に備えるかについて考える。

2. 過去の地震被害から学ぶ

平成の30年間に、日本は数多くの大地震に見舞われた。とりわけ1995年阪神・淡路大震災と、その16年後に発生した2011年東日本大震災では、活断層型と海溝型の異なるタイプの地震の揺れ(図-2)で、日本は人的、社会的、経済的に甚大な被害を受



図-1 大阪の地盤と活断層



講師 宮本 裕司氏

けた。二つの大震災で目のあたりにした地震現象や被害の様相は、構造設計者の頭の中にはあったが日本では起こりえないと考えていた事象であった。そのため、二つの大震災はそれぞれの時代において、地震工学と耐震工学に多くの教訓と課題を与えた。

阪神・淡路大震災では、大都市直下の活断層地震の激しい揺れで、多くの住宅や建築物が倒壊し、社会インフラとライフラインも壊滅的な被害を受けた。そして、それらの被害が狭い範囲に集中した「震災の帯」が形成された。湾岸地域では大規模に発生した液状化で杭基礎が大破し、多くの建物は機能を失い取り壊された。これらの被害は、これまでの設計用地震動の考え方を見直す機会を与え、そして、震源特性と地盤特性を取り入れて建設地点の強震動を予測し、それを設計用地震動の一つにしようとする考えが進んだ。さらに、建物の応答低減技術の開発や構造性能に基づく設計クライテリアの必要性を知らしめた。また、既存建物の耐震改修を促進させ、地域・都市の地震防災を住民自らで考える土壌を養成した。

特に、1980年代から開発が始まり実用化し始めていた免・制震技術は、それぞれ紆余曲折はあったが、阪神・淡路大震災を契機として一段と研究が進むことになった。そして耐震性能を向上させる新技術として多くの建築物に実装された。その技術は耐震を上回り安全、安心を与える売り物として、大規模建築物や超高層ビルから戸建て住宅までに普及し、一般の人々にも広く認知されるようになった。

東日本大震災は、このような免・制震構造の成熟感が漂う中で発生した。巨大津波を受けた東北地方の災害は、8年が経過した今も大きな痕跡を残し、その復興は令和の時代に引き継がれた。一方、建築物の被害は広範囲にわたったが、地震規模のわりに致命的となった建物の数はそれほど多くなく、急速に数を増やしていた免・制震建物は応答低減の効果を発揮した。しかし、海溝型地震の震源域から発した地震波が、東京、名古屋、大阪の深くて軟らかい沖積地盤内で増幅し、超高層ビルを繰り返し揺する長周期地震動の恐怖を見せつけた。震源から700Kmも離れた大阪では、超高層ビルの52階で両振幅最大3mの揺れが10分以上続いた。また地形や地質が異なることで、地表の揺れの大きさが大きく異なる地震動が観測された (図-3)。

2011年東日本大震災での大阪の揺れ

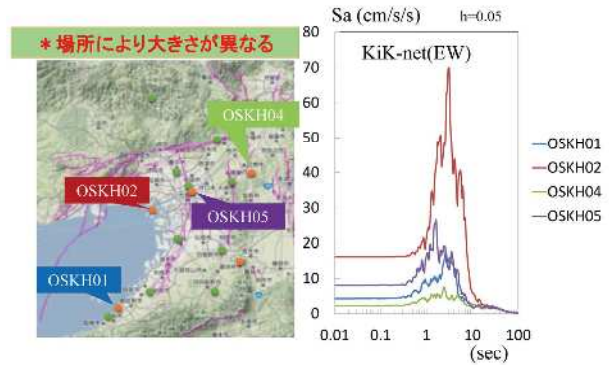


図-3 東日本大震災での大阪地盤の揺れ

熊本地震では、震源となった活断層近傍の益城町や西原村で多数の木造住宅が壊滅した。この両地区で震度7を計測した強震記録は、これまでの想定を遥かに超える長周期パルスの揺れが、現実に発生することを改めて認識させた。また、震度7の地震が立て続けに起こったために、1度目の揺れで耐震性が大幅に低下し、2度目の揺れで倒壊した家屋も多くあった。免震構造においては、阿蘇市内に建つ医療施設の免震層の変形が、両振幅で90 cm (片振幅46 cm) に達し、擁壁と衝突するクリアランスに近づく大きな変形を示した。

このように過去の被害地震のたびに、我々の想定を超えた地震の揺れと建物被害を経験した。地震予知が不可能な現在、過去の地震情報をもとに、想定した震源から発生した地震波が深い地盤内を伝播し、表層の軟弱な地盤内で増幅する特性を数学・物理モデルによって予測し、建物の耐震対策や都市・地域の地震防災に適用していくが必要となる (図-4)。特に、大阪平野の複雑な地形や地質、また過去の地

地震と被害

* 被害は震源×地盤×建物によって決まる
地盤は地形×地質×地歴の3つの地が重要

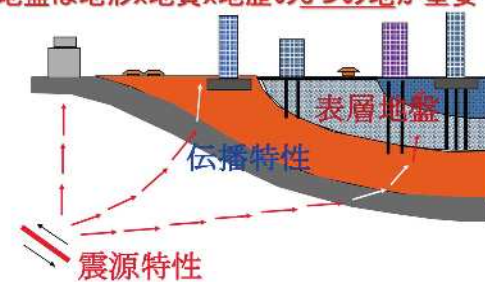


図-4 地震と地盤の揺れと被害

盤の歴史を理解して、建物の地震対策における地盤の揺れを考えることが大切となる。

3. 2018年大阪府北部の地震

2018年6月18日午前7時58分頃に発生した大阪府北部の地震では、震源に近い地域で最大震度6弱の強い揺れを経験した。地震規模はマグニチュード6.1と小さかったこともあり、強い揺れの範囲は限られたが、それでも人的被害として死者4人、住家の被害は全壊12棟、半壊273棟、一部破損41,459棟、公共建物の被害は675棟（消防庁2018.7.29現在）であった（図-5）。



図-5 2018年大阪府北部地震の揺れの大きさ

震央に近い高槻市、茨木市、枚方市は、特に住家被害が集中し、地震後には青いビニールシートで屋根を覆った住家を多数確認できた。また、近畿都市圏の交通網の寸断や電気、水道、都市ガスなどのライフラインの停止で、地域住民の日常生活に多大な影響をもたらした。関東に比べ地震が少ない近畿では、大阪府下で初めて震度6弱を計測した地震であった。発生が懸念される南海トラフ巨大地震や都市直下地震での甚大な都市型災害の予測と対策を行ううえで大変貴重な地震となった。

震度6弱を計測した震央に近い高槻市のK-NET高槻（OSK002）の観測点の地表での最大加速度は、NS方向で521Gal、EW方向で794Gal、UD方向で238Galであった。K-NET高槻での地震動は過去の活断層地震での強震動に比べ、継続時間が短く、0.3秒付近の短周期領域に卓越周期がある地震動であり、それより長周期側でのパワーが極めて小さかった。

免震建物については、設計用の地震動レベルに比較して小さい地震であったが、地震時の免震装置の稼働状況や地震後の免震建物としての機能を調査し、今後の耐震設計に活かす貴重な機会であった。震央に近い消防施設や医療施設の防災拠点では、外観、内部とも目立った損傷はほとんどなく、免震建物と外構との境界で免震層が動いた痕跡（玄関入口部のエキスパンションのずれ等）が認められた程度であった。また床上の事務機器の移動などがあったが、設備機器や書棚、家具の転倒や机上のパソコン等の電子機器の落下もなかった。医療施設でエレベータの停止や断水が一時あったが、地震後直ちに救援、救助活動や救急医療を行うことができ、防災拠点としての建物機能を維持できた。今回の地震では震度4～6弱を観測した地域に、免震改修された建造物が建設されていた。そのうちの2つの建物の状況は次のようなものであった。

3.1 大阪市中央公会堂

大阪市北区の中之島に建つ歴史的建築物である大阪市中央公会堂は、震度6弱の揺れを経験した。この公会堂は1918年（大正7年）に竣工したが、1999年に度重なる改修などにより創建時の意匠が損なわれ、老朽化が進んだことから保存・再生工事に着手し、2002年9月に基礎免震を採用した免震レトロフィットとして改修された（図-6）。地震後の被害状況は、公会堂関係者で直ちに調査されており、エレベータは5基中3基が自動停止したが、次の日の朝には復旧した。また、免震層ドライエリアの出屋根が接触により一部破損したが、煉瓦造の外



図-6 免震改修された大阪市中央公会堂

大阪市中央公会堂

- ・外構ドライエリア出屋根の損傷程度
- ・エレベータ自動停止



エレベータ停止の告知



葺き(片振幅で北西32mm、南東24mm)

復元した文化財の天井材、
シャンデリア、ステンドグラス等の損傷無し



図-7 地震後の大阪市中央公会堂

壁や創建当時を再生した内装や復元改修した文化財の天井材、シャンデリア、ステンドグラスなどはほとんど無被害であった (図-7)。

3.2 通天閣

大阪市浪速区に建つ高さ 108m の鉄骨造の展望タワーである通天閣は、震度 4 の揺れを経験した。建設後 60 年が経った 2 代目通天閣は、2015 年に脚部上部を切断して免震装置を設置し免震改修された。地震時の状況は、エレベータは自動停止したが営業前の時刻であったため来場者への影響はなく、展望階の商品が棚から数個落下した程度であった (図-8)。

通天閣では地下階と屋上階で地震観測が行われていた。加速度記録の最大値は、屋上階の水平 2 方向では地下階に比べ 72%~87% に低減した。改修前後のモデルを用いて求めた加速度と相対変位の最大応答値分布の比較から、改修前の最大加速度分布では入力地震動の特性から 3 次モードが卓越した形状

通天閣 (2015年免震改修) 震度4

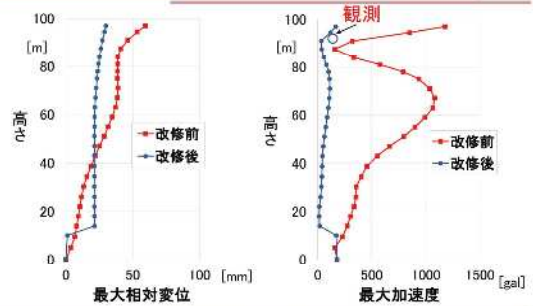
- ・鉄骨造一部RC造、高さ108m
- ・天然ゴム、オイルダンパ

(国の登録有形文化財)



図-8 免震改修した通天閣

免震効果(NS成分)



免震効果の確認
上部構造の相対変位と加速度応答の大幅な低減

図-9 通天閣の免震効果

となり、中層部や上層部で 1000Gal を超えている。一方、改修後では、最大加速度値は 200Gal 以下となり、大きな低減効果が確認できた (図-9)。

4. 最大級の地震への備えと耐震対策

大阪では南海トラフ巨大地震の切迫度が増し、大都市直下での活断層による地震の発生も危惧されている中 (図-10)、免・制震構造は建築物の被害軽減を実現する主要な技術として期待されている。しかし、過去の被害地震で効果を発揮した免・制震構造であっても、南海トラフの連動によって起こった巨大地震では、超高層ビルや免震建物、また、大型のインフラ建造物は発生した長周期地震動と共振して大振幅の揺れが長時間続き、その機能が喪失する可能性がある。また、直下地震による長周期パルス地震動に対して、制震建物では制震ダンパーの減衰性能の限界から、応答低減の効果をあまり期待できず、損傷を免れないこともありうる。免震建物では免震

大阪の想定地震



図-10 大阪で想定すべき地震

クリアランスを超える免震層の変形によって周辺の擁壁と衝突し、上部構造ならびに設備やIT機器が損傷することも起こりうる。

このように設計用地震動を遥かに超える最大級の地震動に対して、耐震部材の断面性能を高めることや、ダンパーの設置数を増やすことで対策を施すこととなるが、現状の技術では免・制震建物といえども損傷を小さく抑えることができないのが現実である。しかし、被害を最小限に抑えて都市機能や事業継続を維持するためや、また安全で安心な建物を増やすためには、やはり一つ一つの建物の耐震性を高めておくことが得策で、建物への初期投資による事前対策が重要となる(図-11)。さらに、建物モニタリングとITとの組み合わせによる早期被災度判定で復旧を早める仕組みを準備しておくなど事前の備えが必要となる。免・制震技術については、より一層の高性能化と、さらに進んで、現在の免・制震技術を超える次世代型の技術の開発を目指し、建物への実装を早めることが重要となる。

初期投資と事業の早期復旧

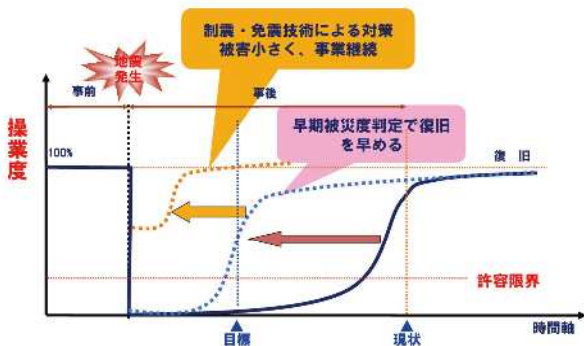


図-11 建物への投資と地震後の事業復旧

5. まとめ

巨大地震への対策が急がれる今、地震に強い都市、街づくりを進めて行くためには、やはり一つ一つの建造物の耐震性を高めることが何事においても重要

となる。過去の被害を顧みると、建物の被害軽減策は、建設地点の「地震の揺れと地盤の揺れと建物の揺れ」を取り入れて行くべきことを物語っている。現状の耐震設計はこのような考え方を取り込んできではいるが、来たる巨大地震での揺れの大きさには未だ及んでいない。そのため、初期の投資を惜しまず、現状のハードとソフトの技術を効率良く組み合わせた事前、事中、事後の対策を早急に備える必要がある(図-12)。

地震に強い建物を目指すには！

④建物への投資を優先できるか？
(耐震改修、免震、制震)

③建物はどのように揺れるのか？
(大きさ、揺れ方、揺れの時間)

②地盤の影響は？3つの地
(地形、深部・表層地盤、液状化、盛土・切土)

①想定する地震のタイプ、大きさ、震源距離？
(海溝型、活断層型、長周期、パルス波)

図-12 地震に強い建物を目指す

参考文献

- 1) 宮本裕司：地震を学び揺れに備えるー地震に強い都市を目指してー、生産と技術 大阪大学生産技術研究会編集 社団法人生産技術振興協会、Vol.70 No.2 別冊、pp.51～53、2018年4月
- 2) 宮本裕司：(特別寄稿) 2018年6月18日大阪北部地震での免震建物調査、日本免震構造協会「MENSIN」No.102、pp.30～36、2018年10月
- 3) 宮本裕司：平成から令和へー建築構造が受け継ぐものはー、日本免震構造協会「MENSIN」巻頭言、No.105、2019年7月