

地震被害低減に向けた耐震技術

技術解説

宮本 裕 司*

Seismic technology for a structure to mitigate earthquake damage

Key Words : earthquake damage, seismic technology, soil-structure interaction,
structure response

1. はじめに

神戸を中心に甚大な被害をもたらした 1995 年兵庫県南部地震以降、日本各地で被害地震が連続して発生している。これらの地震は、あらためて日本列島が大地震の活動期に入っていることを印象づけた。東京、大阪、名古屋の大都市圏には、幸いにして大きな被害をもたらす地震は発生していない。しかし、政府の中央防災会議では、近い将来に大都市圏で発生する可能性のある大地震に対して想像を超える人的、物的な被害を警告している¹⁾。それに備え、被害を最小限に抑えるよう、個人、地域、行政、企業それぞれのレベルで地震に強い社会を構築することが緊急の課題となっている。

そのような中で、建築物一つ一つがもつ耐震性を高めて、災害に脆弱な都市の防災力を向上させることが必要となる。建築物の耐震性については、地震被害が発生するごとにその原因を解明する研究が行われ、その成果は耐震設計の法規や指針の改定に反映されてきている。しかし、将来発生する大地震の地盤の揺れの大きさを予測し、建築物へ入力される地震動の性状を正確に把握することや、また建築物がどのように揺れ、崩壊していくかについては、明らかになっているとは言い難い。

ここでは、最近の耐震工学に関するトピックを解説し、今後の課題と展望について述べる。

2. 想定される地震と被害

大阪エリアについては、政府の中央防災会議では、

南海トラフ沿いの海溝型の地震として東南海・南海地震（図-1）と、大阪都心部を走る上町断層帯による活断層の地震（図-2）の被害想定を行っている¹⁾。建築物の被害は、東南海・南海地震では広域にわたって発生し、いわゆる長周期地震動による波長が長く、継続時間の長い揺れによって、超高層や免震建物のような長周期域に固有周期をもつ建物が繰り返し大きく変形するとしている。上町断層の地震では、マグニチュード 7.6 の大地震で大阪府を中心に、死者が最大約 4 万 2000 人、全壊建物約 97 万棟とする被害想定をまとめている。この大きな原因として、揺れやすい地盤の上に、古い木造住宅が密集する地域が多いことが挙げられている。これらの想定値は、東京首都直下地震（想定死者数 1 万 2000 人）を上回り、国がこれまで行ってきた想定では最悪の被害である。

また、近畿、中部地方ではマグニチュード 7 級の活断層による直下地震によって、東大寺、清水寺な

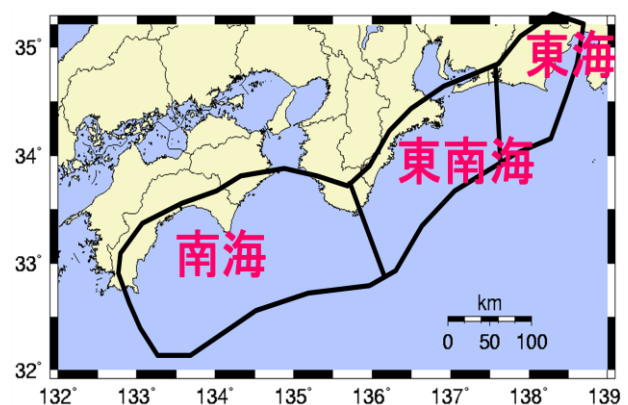


図 - 1 南海トラフでの震源域

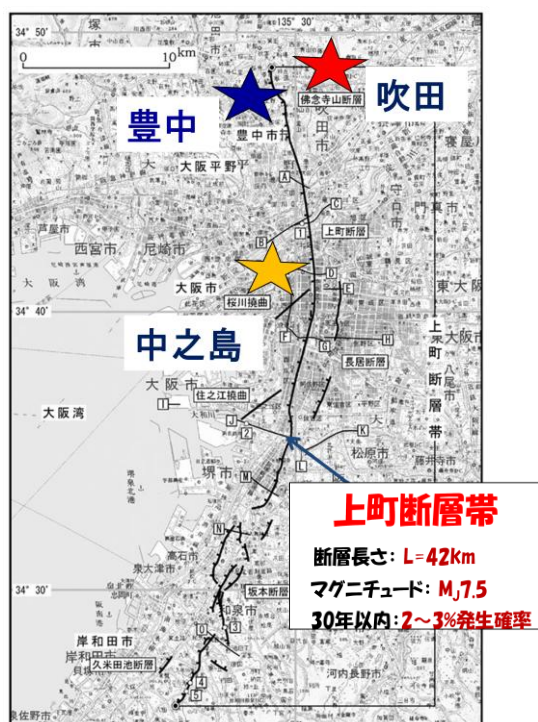


図-2 上町断層と大阪大学の施設の位置

(中央防災会議による図に加筆)

ど国宝 113 件を含む 580 件の国の重要文化財建造物に倒壊か焼失の恐れがあるとする被害想定を行っている。このように、大阪エリアの耐震性を高めるためには、近い将来発生する地震に対して、古い建造物から最近の超高層や免震建物にいたる各種構造形式をもつ建築物の地震時挙動を正確に評価する技術を高度化し、社会全体の被害低減を目指す必要がある。

3. 大阪エリアの表層地盤の揺れ

地震の被害は、地盤の良し悪しによってその程度が異なってくる。このことは、過去の地震被害をみても明らかである。大阪エリアの地盤状況は、北部に千里丘陵と呼ばれる丘陵地がある。東西方向には上町台地によって二分される大阪平野（大阪盆地・河内盆地）があり、平野を流れる河川の流域には沖積低地がある。また、大阪湾沿岸部には埋め立て地がある。このような地盤構造の違いが地震時の揺れにどのような影響を与えるかを、大阪大学の施設が建つ地点についてみる。

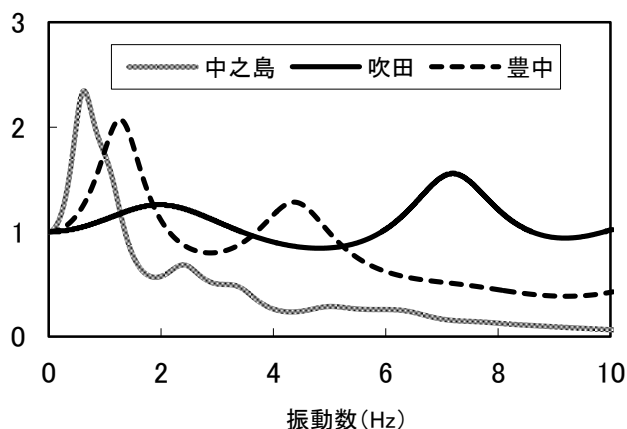


図-3 大阪3地点での表層地盤の増幅倍率

図-2 に示すように大阪大学の吹田キャンパス、豊中キャンパスは、それぞれ上町断層を挟んだ東西に位置している。吹田地点は上町台地の丘陵地の洪積地盤上に建設されているが、豊中地点は洪積地盤の上に深さ数mの沖積層が堆積している。一方、中之島地点は、北側を堂島川、南側を土佐堀川の両河川に挟まれた中州（中之島）に位置し、深さ約 30 mに及ぶ軟弱な沖積層がある。また、3つの地点とも上町断層のごく近傍に位置しており、この断層が動くと震度6強～7の極めて大きな揺れが予想されている場所である。

図-3 は、それぞれの地点の工学的基盤位置（ほぼ洪積地盤に相当）から地表までの地震動の増幅倍率について横軸を振動数で示している。洪積地盤上にある吹田地点では地震動の増幅は小さいが、豊中地点では表層地盤の共振現象により、特定の振動数で著しく増幅する。中之島地点では、軟弱で深い表層地盤の非線形化によって、卓越振動数が長周期化し、長周期域でパワーのもつ地震動となることがわかる。さらに、地盤の液状化が発生すると、地盤変位も大きくなり、建築物の被害だけでなくライフラインにも大きな被害が発生することとなる。

このように、地盤の揺れは、表層地盤の条件によって大きく影響されるため、建設地点の地盤調査を丹念に行い、それに基づいて地震動の大きさを評価し、耐震検討を行う必要がある。さらに、活断層に

よる地震では、断層の破壊過程（破壊開始点や破壊方向）の違いによっても、3地点での揺れの大きさや揺れ方も異なってくる。

4. 地震時の建物の揺れ

4.1 地盤と建物の揺れ

地盤内での地震動の増幅は、先述のように地盤条件によって異なるが、建物の応答も地盤の影響を大きく受ける。図-4は、大地震時に地盤と基礎-建物系で生じる現象を模式的に示している。地震時には建物が震動することによる慣性の相互作用（Inertial interaction）と、地震動が建物に入力する際に基礎の拘束効果により生じる入力相互作用（Kinematic interaction）が発生する²⁾。慣性の相互作用は、地盤との連成効果により建物の固有周期の長周期化と、地盤への逸散減衰の増加として現われる。入力の相互作用は、基礎の存在によって上部構造への入力動が地表面の地震動と異なってくることである。このような現象は地盤-建物の動的相互作用と呼ばれており、建物の応答性状を評価するうえで重要な役割を及ぼす。その影響度は、地盤の硬軟、上部構造の剛柔、基礎の形式や基礎の埋め込み深さに応じて変化する。さらに、動的相互作用は、大地震時には図-4に示したように表層地盤の非線形性によるサイト・ノンリニアリティ（Site nonlinearity）と、基礎と近傍地盤との剥離、滑り、浮上りによるローカル・ノンリニアリティ（Local nonlinearity）、そして基礎構造や上部構造の損傷によるストラクチャ・ノンリニアリティ（Structure nonlinearity）の影響を受ける。

このため、大地震時には基礎と地盤との間での力の伝達メカニズムが急変し、建物の応答性状も複雑となる。したがって、建物の被害程度を正確に予測するためには、個々の建設地点の地盤と建物との非線形領域での動的相互作用の究明が課題となる。

4.2 地震動と超高層の揺れ

次に、高層建物の地震観測例を示し、地震動と建

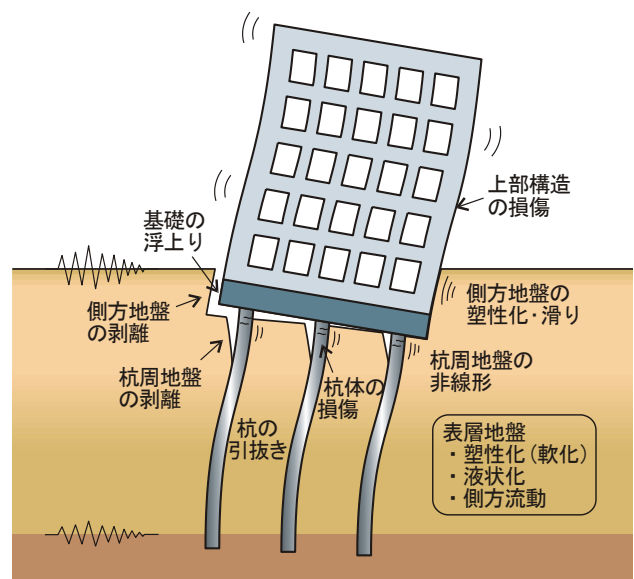
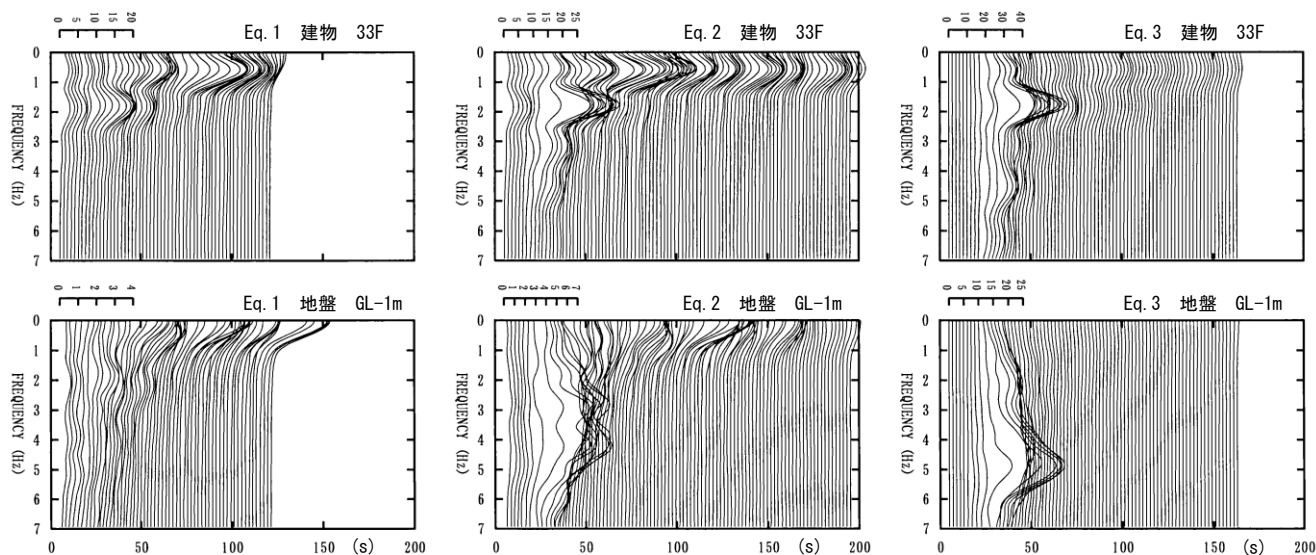
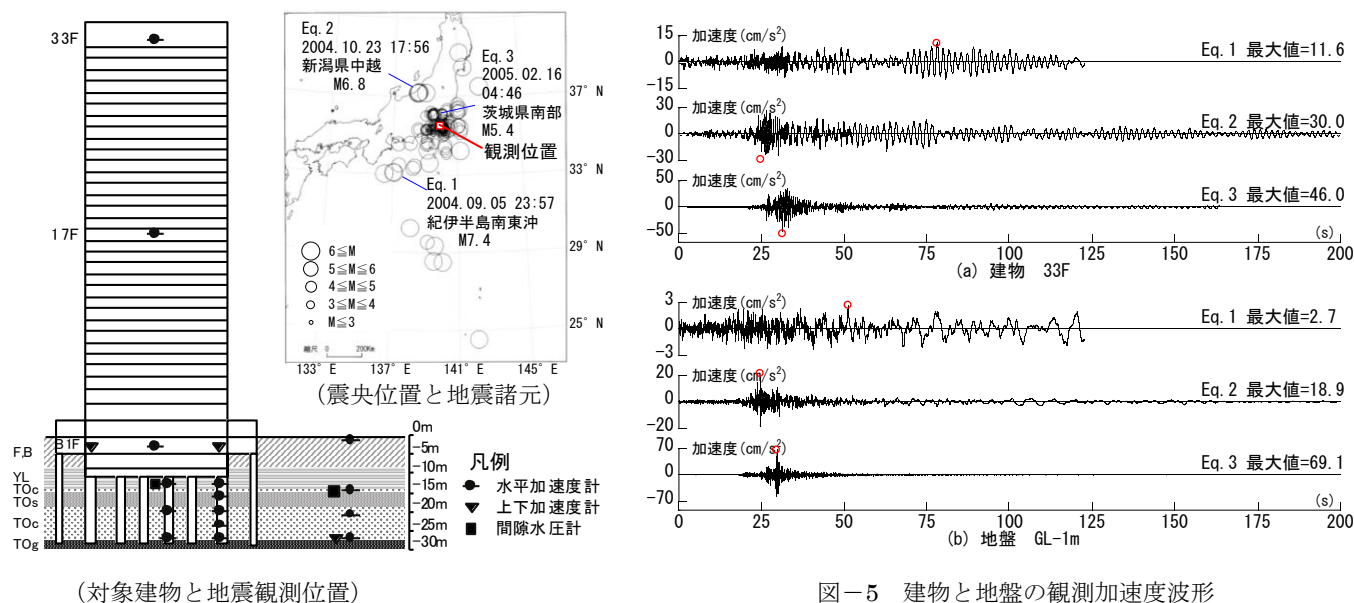


図-4 大地震時の地盤と建物の非線形挙動

物の揺れの関係について示す³⁾。対象建物は地上33階、地下2階のRC造の東京湾沿岸に建つ高層建物であり、高さは約100mである。基礎は地下連壁と群杭から成る複合基礎である。観測例として震源位置が異なる3地震（Eq1～Eq.3）の分析結果を示す。図-5は3地震による建物（33F）と地盤（GL-1m）の加速度波形、図-6はランニングフリースペクトルである。震源距離が長いEq.1地震の地盤の加速度波形は、波の前半の主要動部で短周期成分が目立つが、後続波では1Hz以下の長周期成分が支配的となる。建物の応答は、この入力地震動の特性を反映して最初は建物の2次振動モードでの揺れとなるが、波形の後半では1次振動モードの揺れが支配的となり、最大応答値が生じている。また、震源が遠いEq.2地震でも、後続の長周期成分の入力により継続時間が長い揺れとなっている。一方、震源が近いEq.3地震では地盤の加速度波形は4～6Hzの短周期成分が支配的で、建物応答も長周期成分の振幅は小さく2Hz付近の短周期成分の揺れが支配的である。

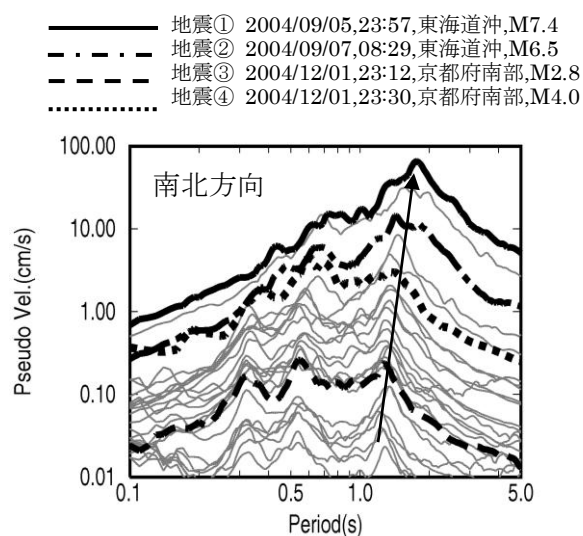
以上の観測例から、震源が遠く離れた地震であっても、大地震が発生した場合は長周期成分を含む地震動が震源から伝播して超高層のような長周期建



物を励起し、継続時間の長い大きな揺れとなること
がわかる。この対策として、最近の超高層ビルでは、
建物の応答を制御する制震システム⁴⁾を備えている
建物が多くなっている。

4.3 伝統木造建築の揺れ

過去の地震では多くの文化財建造物が被害を受
けている。神社仏閣などの伝統木造建築では、歴史
的な文化財の保護や参拝者の安全確保の観点から、
耐震性能を高めることが重要となる。関西エリアに
多く点在する重要文化財を災害から守るため、伝統
木造建築の耐震改修の研究が精力的に進められて



いる。

図-7は、京都市内に建つお寺の本堂で観測された地震動の応答スペクトルを示している⁵⁾。伝統木造建築では小さい地震であっても架構の接合部や組物が非線形化し、固有周期の長周期化が顕著となる。また、耐震性を弱めているものとして、重い瓦屋根や、土壁等の偏った配置によって励起される偏揺れする振動モードがある。したがって、このような伝統木造の特徴的な挙動を精度良く解析するため、図-8に示すような三次元強非線形挙動をシミュレーションできる解析技術の開発と、それを用いて、最適な耐震補強法を提案することが重要となっている。

5. おわりに

あるアンケート調査によると、最近の度重なる地震災害の発生に、「自分の身にも地震災害が起こるかもしれない」と不安を感じる人は実に9割にも達しているが、その約6割の人が地震対策の必要性を感じつつも、「特に何もしていない」という結果が報告されている。地震に強い街づくりを進めるには、先ずは一人一人ができる範囲で、家具や我が家の耐震化を進めることが必要である。さらに社会全体の防災力の向上を目指すためには、一つ一つの建築物の耐震化を地道に促進することが望まれている。

そのためには、ここで紹介したような地震の揺れを知り、揺れに備え、揺れから守る対地震技術の高度化と社会への適用が必要となる。

謝 辞

ここで紹介しました研究事例の一部は、著者が鹿島建設(株)と(株)小堀鐸二研究所に在籍中に研究発表したものです。関係各位に記して謝意を表します。

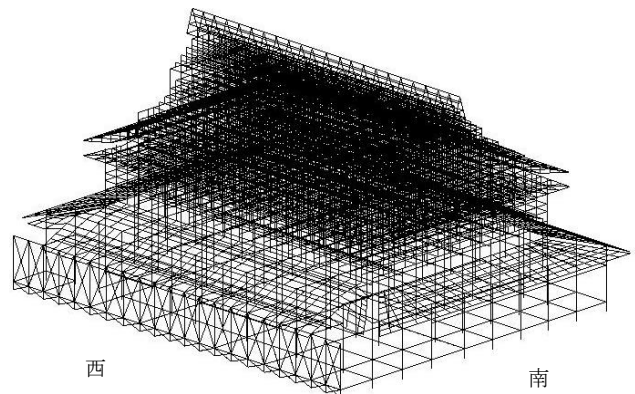


図-8 三次元フレーム解析モデル

参考文献

- 1) 中央防災会議：「東南海、南海地震等に関する専門調査会」－東南海、南海地震について－、－中部圏・近畿圏内陸直下の地震について－
- 2) 宮本裕司：地震時における非線形相互作用と建物応答、第8回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム－非線形相互作用の解明と設計への組み込み－、2006年12月
- 3) 安達直人、渡辺哲史ほか：入力地震動の違いによる高層建物の地震応答特性（その1～2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、2005年9月
- 4) 小堀鐸二：制震構造－理論と実際－、鹿島出版会、2004
- 5) 宮本裕司、渡辺哲史、鈴木祥之：東本願寺御影堂の地震観測記録の分析とシミュレーション解析（その1～2）、日本地震工学会・大会-2007、2007年11月



*Yuji MIYAMOTO

1956年3月生

京都大学工学部建築学科（1979年）

現在、大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 建築部門
教授 工学博士 専門 地震工学、耐震工学、地震防災
TEL: 06-6879-7634
FAX: 06-6879-7634.
E-mail: miyamoto@arch.eng.osaka-u.ac.jp