

建築物の耐震設計と活断層

名古屋大学 福和伸夫

1. はじめに

一昨年来、国の地震調査研究の成果が相次いで公表され、中京圏の地震防災を取り巻く環境が大きく変化してきた。これらの調査結果によれば、今世紀前半には東海地震・東南海地震・南海地震の3地震が独立もしくは連動して発生し、東京以西の地域が高い確率で強い揺れに遭遇する。南海トラフでの地震は震源域が広く震源からの距離が離れているため、長周期成分が卓越した長時間の揺れが予想される。さらに、南海トラフでの巨大地震の発生の前後には、内陸での活断層による地震も頻発することが指摘されており、兵庫県南部地震の時のような震度7の強い揺れを局所的に蒙る地点が何箇所か発生することが懸念される。

本論では、このような周辺環境の中で、人命と財産を守る建築物の耐震設計について考えてみる。最初に、最近の地震に係る調査動向を簡単にレビューし、その後に、兵庫県南部地震における被害から得られた建築耐震設計上の課題、観測記録に基づく建築物の地震応答特性の特徴について述べた後、建築技術者を中心に進めている濃尾平野の地下構造モデルの作成と強震動予測の試みについて紹介する。

2. 中京圏を取り巻く最近の地震調査

一昨年来の国における地震調査研究の推移は、表1に示すようにまとめることができる。21世紀を迎え中央省庁の再編が行われると同時に、大きなうねりが始まった。中央防災会議の所管が国土庁から内閣府に移管され、1月に開催された第1回中央防災会議で、小泉首相から、「東海地震については、大規模地震対策特別措置法の成立以来四半世紀が経過しており、その間の観測体制の高密度化・高精度化や観測データの蓄積、新たな学術的知見等を踏まえて地震対策

の充実強化について検討すること」と言った指示事項が出された。

これに基づいて、東海地震に関する専門調査会が設置され、その後、想定震源域の見直し、予測震度分布の公表へと続き、東海地震対策専門調査会の審議を経て地震防災対策強化地域の見直しが行われた。震源域が西に50kmほど移動したことにより、静岡から東三河地区での震度が6強以上になり、名古屋市内にも一部震度6弱の地域が広がった(図1)¹⁾。このため、強化地域は従前の6県167市町村から8都県263市町村に拡大された(図2)¹⁾。大都市名古屋を含む広域が強化地域に指定されたこともあり、警戒宣言発令時の帰宅困難者の問題など、大都市特有の問題が指摘されている。

東南海地震・南海地震については、文部科学省が所管する地震調査研究推進本部から、長期評価が示され、東南海地震については今後30年間の発生確率は50%、50年間の発生確率は90%と言う結果が示された。また、東海地震に関する専門調査会において、東南海・南海地震の検討の必要性について強い指摘があったことから、中央防災会議の下にも、東南海・南海地震等に関する専門調査会が設置され、震度予測、被害予測などが実施されつつある。また、2002年7月には、東南海地震・南海地震に係る地震防災の推進に関する特別措置法が公布された。

このような動きを受けて、中京圏での地震に対する関心も急速に高まってきた。愛知県は、2002年1月に東海地震・東南海地震等被害予測調査検討委員会を設置し、2003年には被害予測結果を公表する予定になっている。図3は中日新聞の「東海地震」に係る報道数の変化を示したものであり、社会の関心の変化を反映した結果を示している。

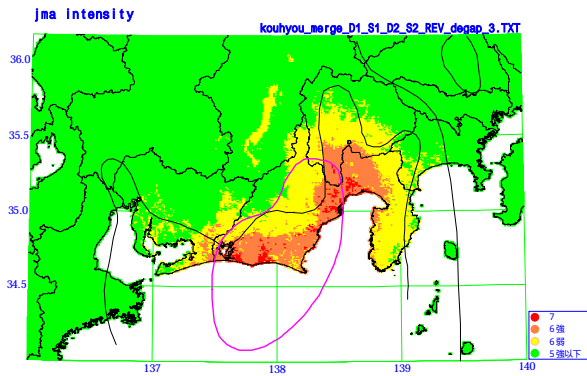


図1 東海地震の想定震度¹⁾

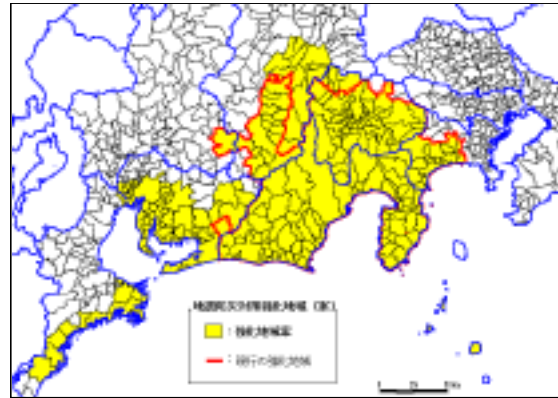


図2 地震防災対策強化地域¹⁾

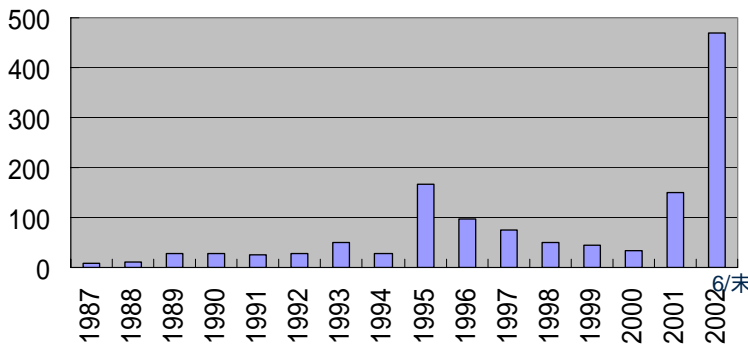


図3 中日新聞の「東海地震」記事数(2002年6月時点)

鈴鹿東縁断層帯

Mが最大7.5程度。発生時期については、最新の活動時期が十分特定できないため判断できない。

岐阜 - 一宮断層帯

活断層ではないと判断される。

養老 - 桑名 - 四日市断層帯

M8程度の地震が発生すると推定される。本評価で得られた地震

発生の長期確率には幅があるが(30年確率: ほぼ0% - 0.6%)、その最大値をとると、本断層帯は、今後30年の間に地震が発生する可能性が、我が国の主な活断層の中ではやや高いグループに属することになる。

伊勢湾断層帯

断層帯主部: 断層帯主部北部では、M7.2程度の地震が発生すると推定される(30年確率: ほぼ0%)。断層帯主部南部では、M6.8程度の地震が発生すると推定される(30年確率: ほぼ0% - 0.002%)。また、北部、南部が同時に活動する場合はM7.5程度の地震が発生する可能性もある。

白子 - 野間断層: M7.0程度の地震が発生すると推定される。将来このような地震が発生する長期確率には幅があるが(30年確率: ほぼ0% - 0.002%)、その最大値をとると、本断層帯は今後30年の間に地震が発生する可能性が、我が国の活断層の中ではやや高いグループに属することになる。

表 - 1 過去2年の当地の地震に係る国の動向

H13/1/10	岐阜 一宮断層帯の評価(推本)
H13/1/26	小泉首相の指示(第1回中央防災会議)
H13/3/14	第1回東海地震に関する専門調査会
H13/6/28	東海地震の想定震源域見直し(第2回中防)
H13/9/27	東南海地震・南海地震の長期評価(地震調査研究推進本部)
H13/10/3	第1回東南海地震・南海地震に関する専門調査会
H13/11/14	養老 桑名 四日市断層帯の評価(推本)
H13/12/18	東海地震の震度分布公表(第3回中防)
H13/12/7	東南海地震・南海地震の震度予測公表(推本)
H14/3/4	第1回東海地震対策専門調査会
H14/4/23	東海地震の強化地域の修正(第4回中防)
H14/5/8	伊勢湾断層帯の評価(推本)
H14/7/10	伊那谷断層帯の評価(推本)
H14/7/26	東南海地震・南海地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法公布
H14/8/29	東海地震の被害予測結果(揺れによる建物被害等)の中間発表

東海地震を始めとする南海トラフでの地震への関心が高くなったため、活断層の議論がかすみがちであるが、地震調査研究推進本部から、継続的に主要活断層の長期評価が示されている。中京圏周辺の活断層の評価結果は、要約すると下記の通りである²⁾。

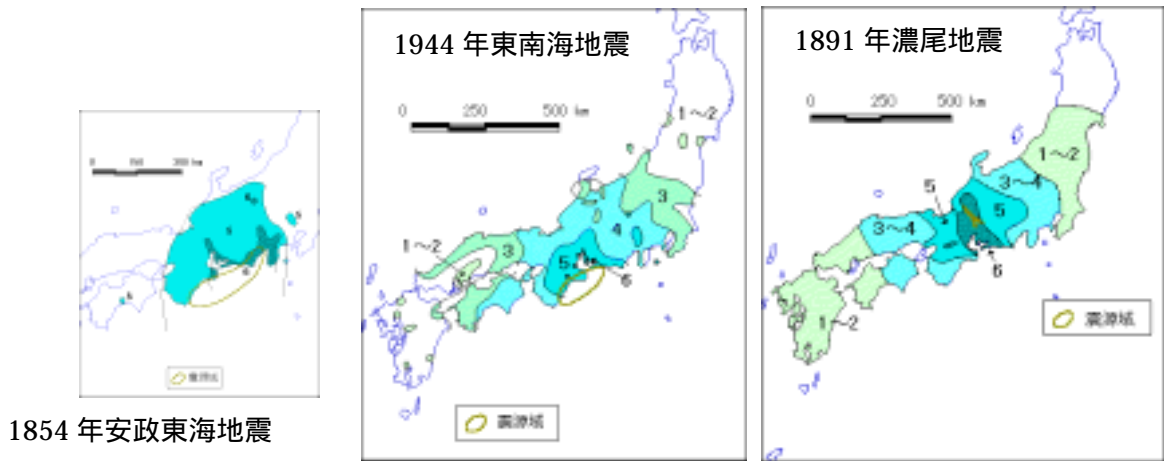


図3 安政東海地震、南海地震、濃尾地震の震度分布³⁾

伊那谷断層帯

境界断層が単独で活動すると、マグニチュード7.7程度の地震が発生すると推定される(30年確率: ほぼ0% - 6%)。前縁断層が単独で活動する場合は、マグニチュード7.8程度の地震が発生すると推定される(30年確率: ほぼ0% - 7%)。

境界断層と前縁断層が一つの断層帯として同時に活動すると、マグニチュード8.0程度の地震が発生すると推定される。境界断層と前縁断層が同時に活動する場合の長期確率は、それぞれが単独で活動する場合の長期確率を超えることはないと考えられる。本評価で得られた地震発生長期確率にはいずれも幅があるが、その最大値をとると、境界断層及び前縁断層ともに、今後30年の間に地震が発生する可能性が、我が国の活断層の中では高いグループに属することになる。

このように、伊那谷断層を除くと、その発生確率は必ずしも高いものではない。ちなみに兵庫県南部地震が発生した時点での30年発生確率は0.4~8%であるとされている。

しかし、中京圏では、過去にM8クラスの1891年濃尾地震や1586年天正地震などの大規模活断層による地震に加え、1945年三河地震のよう



図4 濃尾地震、三河地震、兵庫県南部地震の震度7地域⁴⁾

に、活動前には断層の存在が知られていなかった「予め震源を特定できない地震」が発生している。また、厚く堆積平野に覆われている平野では、活断層の有無を特定することも困難であることが予想される。

このような地震環境の中で、建築物の耐震設計で想定すべき地震像をどのように考えるべきかは、耐震設計の性能設計化や、建築主への説明責任が尊ばれる現況では、極めて重要となる。ちなみに、活断層の活動による断層近傍の揺れの強さは震源域が比較的離れている南海トラフでの巨大地震の揺れの強さに比べ遙かに大きい。図3のように南海トラフの巨大地震での揺れは広域に広がるが、震源からの距離があるため揺れの強さは内陸の活断層の方が優る。図4に示すように、濃尾地震・三河地震の震度7のエリアは、兵庫県南部地震の震度7のエリアよりも広域であったことは覚えておきたい。

3. 兵庫県南部地震における建築物被害の特徴

1995年兵庫県南部地震における建物被害から建築物の耐震性の現状を考えてみる。

(1) 戸建て住宅の被害

図5に兵庫県南部地震における戸建住宅の被害状況の建築年による差を示す⁵⁾。耐震性の低い建物には共通点がある。まず、古い家屋の耐震性の低さである。この原因としては、古い耐震基準による耐震性能の低さ(耐震部材の不足)に加え、家屋の老朽化による腐朽や蟻害による耐震性能の低下が考えられる。これに加えて、重い屋根、上下階の壁量バランスの悪さ、平面的な壁の配置の悪さ、柱・梁接合部などの接合金物の不足、軟弱地盤・液状化地盤などでの基礎の剛性・強度不足、揺れの強さ、などが被害発生要因として考えられる。図6に示すように、建物に作用する力は建物質量と揺れの強さの積($f = m$ 、 f :慣性力、 m :質量、 α :加速度)であり、揺れの強い地盤上の重い屋根の建物では柱・壁に大きな力が作用する。このため、耐震部材が不足すると被害が増大する。また、上下階で壁量の差が大きいと、上下の剛性バランスが崩れ、剛性の小さな階に変形が集中し、さらに、変形が集中した層の変形性能や接合部強度が不十分だと、崩落しやすくなる。平面的にも壁が偏在すると、剛性の中心が偏るため、建物全体が捩れやすくなり、端部の柱の変形が大きくなる。

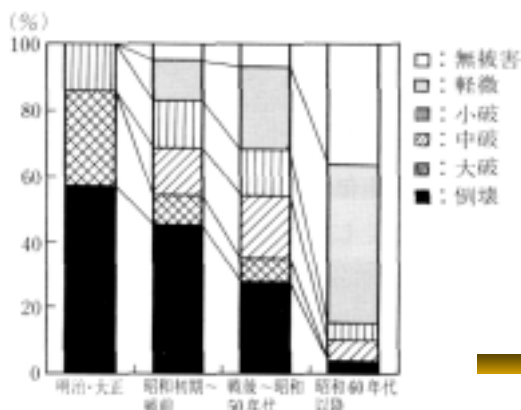


図5 兵庫県南部地震における戸建住宅の年代別被害率⁵⁾

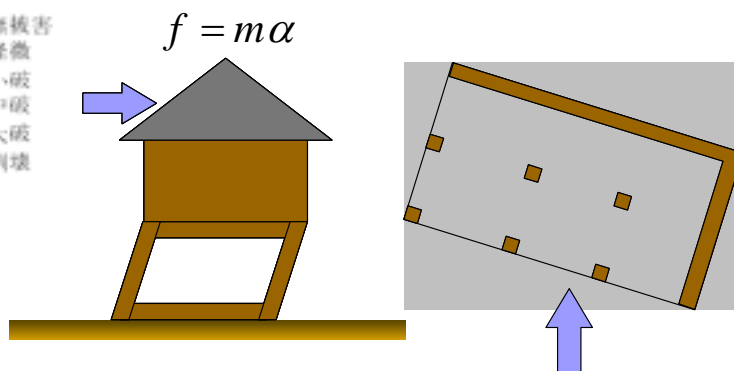
(2) 鉄筋コンクリート造と鉄骨造の被害

RC(鉄筋コンクリート)造建物やS(鉄骨)造建物も戸建住宅と共通の問題点を抱えている。1階が駐車場や商店街で2階以上が住戸の共同住宅となるピロティ的な建物では、1階と上階との剛性のバランスが悪くなり、1階に変形が集中する。1階の柱のせん断補強筋(帯筋)が不足して変形能力(靱性=粘り)が不十分だと1階が崩落することになる。

一方、鉄骨造建物では接合部の被害が目立った。本来鉄骨部材は粘り強く抵抗する性質を持っているが、柱と梁や、柱と基礎との間の接合部に十分な強度がないと、肝心の鉄骨の良さが失われてしまう。神戸における低層鉄骨建物の多くが、接合部破断で崩壊していたことは、施工管理の重要性を感じさせる。

10階程度の中層の事務所ビルでは、中間階の1層が崩落するという、破壊形式が注目された。その典型が、神戸市役所旧庁舎である。新耐震設計法が導入された1981年より前の建物では、上階の建物応答が大きくなるという、建物内の応答増幅効果の考慮が不十分だった。このため、柱の断面寸法を変化させた特定の階などで耐力が不足し中間階に損傷が集中した。

次に、RC建物の建築年や建物高さによる被害率の差異を見てみる。図7は震災の帯の中(震度7地域に相当)に存在したRC建物の構造的な被害率を示したものある⁶⁾。わが国では、1950



(a) 重い屋根と上下階剛性バランス (b) 壁の偏在による捩れ
図6 被害の出やすい建物

年の建築基準法制定以降、1971年と1981年の2度、耐震基準が大きく改訂されている。このため、2つの年代での被害率の差異が顕著である。ただし、建築年による耐震性の差異よりも、建物階数による耐震性の差の方が大きい。

図7の結果は技術的な矛盾を示している。現行の耐震基準は、300～400ガル程度の地表の揺れに対して終局強度設計（ある程度の構造的損傷を許容し人命を守る設計）するという最低基準であるにも拘らず、低層建物の被害は震度7の1000ガルを超える揺れを経験しても数%以下に留まっている。これは、設計時に考慮していなかった種々の余力が被害を軽減したと理解できる。図から判断すると、大企業や防災拠点に多い10階建て程度の建物の実力は低層建物のそれに比べ相当低い可能性がある。

建物階数による被害率の違いの原因としては、神戸の地震動が10階建程度の建物にとって厳しい1秒付近の周期成分を多く含んでいたことに加え、低層建物の方が設計時に考慮しない雑壁の量が多いこと、低層建物の場合には地盤に比べて建物の剛性が相対的に堅いので、地盤が変形し建物変形が抑制されることなどが考えられる。後者は建物と地盤との動的相互作用と呼ばれる効果⁷⁾の一つである。

(3) 長周期建物の被害

長周期の建物の代表は高層建物と免震建物である。高層ビルに関しては、芦屋浜の高層住宅でメガフレームの柱に脆性破壊による亀裂が発生したとの報告がある。厚肉断面の鉄骨部材に脆性的破断が生じたことは、同時期に建設された他地域の高層建物の安全性を考えるとショッキングである。しかし、他には高層ビルの大きな被害の報告は無い。神戸地区では周期1秒程度の数波のパルスのみが卓越したため、共振が避けられたことが幸いした。

ただし、強震記録が唯一公表されている大阪市内の超高層建物の応答は高層ビルの安全性の検討に対して注意を喚起している⁸⁾。図8に示

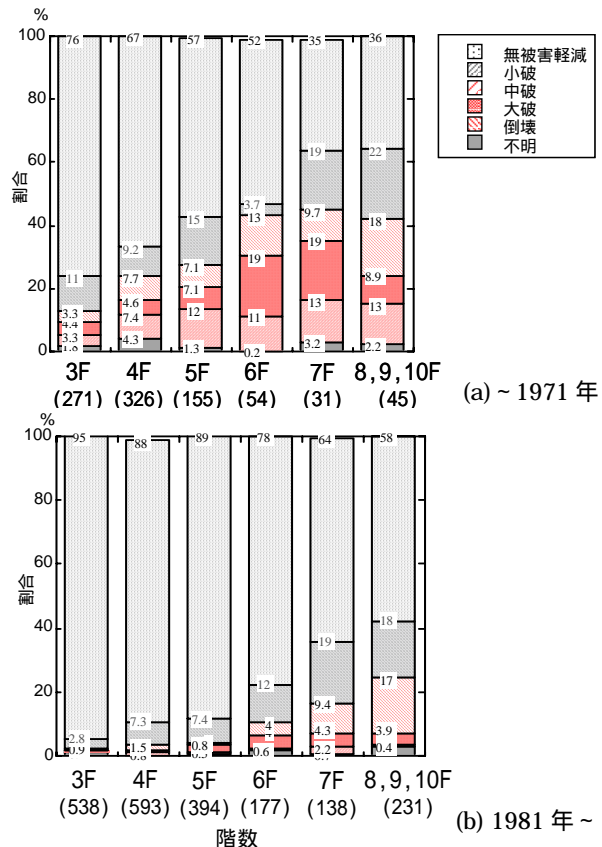


図7 震災の帯でのRC建物の被害率⁶⁾

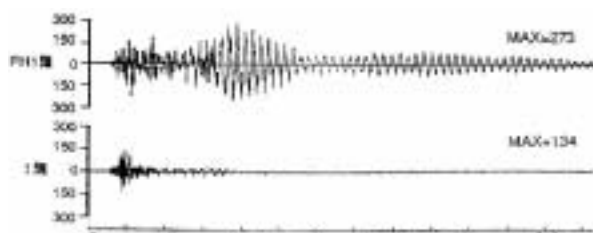


図8 大阪の高層ビルの強震記録⁸⁾

すように、震源から離れた大阪では継続時間が伸び、大阪平野のやや長周期卓越周期を含んでくる。この例では、地盤の卓越周期と建物の固有周期とが同調して、主要動終了後に揺れが増幅し長時間揺れ続けた。このように、地盤震動と建物とが選択的に共振すると、減衰の小さな高層建物の場合、予期せぬ応答を示す恐れがあるので、耐震設計上留意すべきである。

震災の帯の外ではあるが、神戸には2棟の免震建物が有った。強震観測もされており、その結果が報告されており、免震の有効性が示された⁹⁾。このとき以降、免震建物が急増し、最近では免震戸建住宅も増えてきた。

4. 建築物の地震時応答

筆者らは、中低層建物の振動挙動を理解することを目的に、名古屋大学東山キャンパス内の建物を中心に強震観測や常時微動計測を実施してきた。一例として、図9に10階建SRC造建物の建物 - 地盤系の観測記録を示す(1997年愛知県東部地震、M5.8)。図のように、地盤の中で揺れが増幅しながら地表に達し、建物に入力する際に、揺れが小さくなった後、建物内で再び揺れが増幅する。このことから、地盤の増幅効果と建物の応答特性の重要性が理解できる。

図10に、震源が比較的離れた地震(2001年静岡県中部地震、M4.8)と、近い地震(2001年愛知県西部地震、M4.1)について、10階建SRC造建物、10階建S造建物、6階建SRC造建物、4階建RC造建物、3階建RC造建物の建物屋階と基礎の建物短辺方向の加速度応答を比較する。これらの建物は名大内に立地し、地盤条件は概ね等しい。各図から以下のような知見が得られる。

RC系の建物応答を比較すると、建物階数による振動特性の差が明瞭に見られる。建物高さが低いと固有振動数が高くなり、地盤と建物との相互作用の影響(振動数低下と逸散減衰増大)が大きくなって、応答が減じられる。

同一高さの建物でも構造種別(10階建のS造とSRC造)による応答特性の差から、構造によ

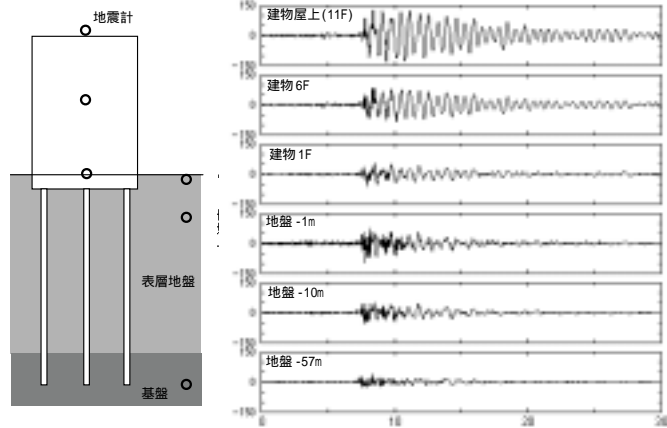
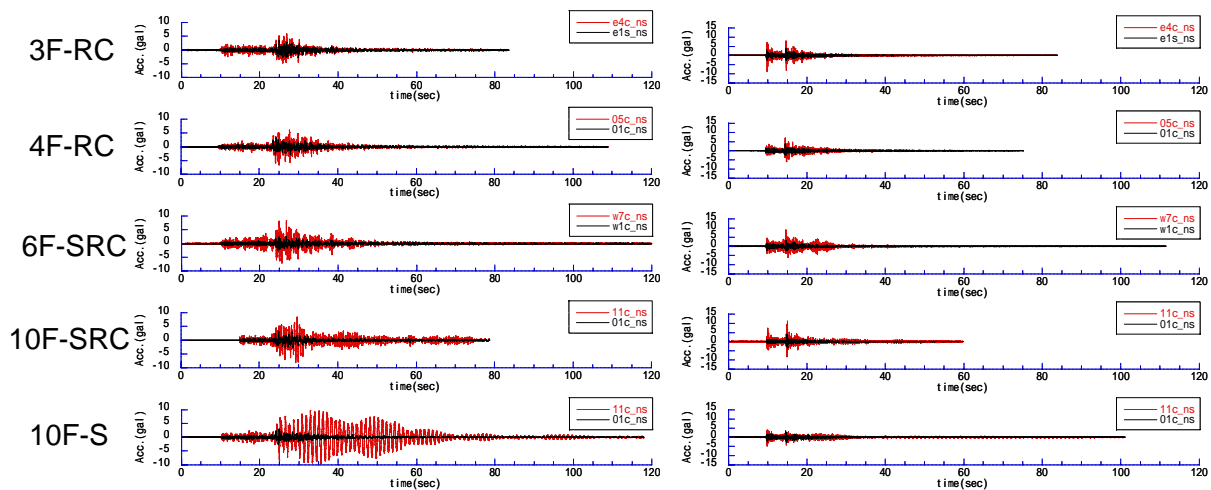


図9 名古屋大学内の建物・地盤系の地震時応答

る建物剛性(固有振動数)の違い(RC造の2次部材の寄与の大きさなどが原因)、相互作用の影響度合いの違いが与えるS造の減衰の小ささ(1%以下)などが指摘できる。

入力と建物の振動数が近接すると顕著な応答増幅が認められる。特に、低減衰の建物の場合には、継続時間の長い地震動に対して、共振による応答増幅が顕著である。

これらの結果は、兵庫県南部地震における中低層RC造建物の被害が微小にとどまったことと関連する。すなわち、低層であれば、建物が地盤に比べて相対的に堅くなり、地盤の変形が卓越し、建物が剛体的に挙動するため、動的相互作用効果が顕著になり上部構造の応答が抑制される⁷⁾。さらに、一般に低層の建物ほど構造的に耐力を見込まない2次部材の寄与が大きくな



(a)2001年静岡県中部地震(M4.8) (c)2001年愛知県西部地震(M4.1)
図10 名大内の5つの建物の地震時応答(黒:基礎、赤:屋上階)

る。このため、耐力的な余力が増す。図 11 に筆者が簡単に試算した典型的な学校校舎建物の応答（ベースシア係数 = 建物の平均的な水平応答震度に相当）を示す。図中には、相互作用の考慮の有無による応答の差を示している（兵庫県南部地震では、建物短辺方向の地動が卓越したので、黒実線と青点線を比較すればよい）。図から、動的相互作用の考慮により、応答が大きく減じられることが分かる。従前の一般的な耐震設計では相互作用効果は考慮されていなかったため、設計時の余力の一つであったと考えられる。

図 12 は鉄骨建物を対象に、建物高さとの固有周期・減衰定数との間を実測結果に基づいてまとめたものである¹⁰⁾。低層になると等価的な建物剛性が増大して建物が短周期化し、地下逸散減衰による減衰増大効果が認められる。

建物の固有周期と入力地動の卓越周期の近接による共振現象は、建物の応答を大きく増幅させる。建物の地震時応答性状は、建物と地動の周期の近接度合い、減衰の大小や、入力地動の継続時間により大きく影響を受ける。簡単な例

として、Sin 波を地動として入力した時の 1 質点 1 自由度系の応答を、Sin 波の繰返し数 (n)、建物周期 (T) と入力周期 (T_0) の比 (T/T_0)、減衰定数 (h) をパラメータとして求める。応答波形を図 13 に、最大応答値を図 14 に示す。図から、共振時の応答性状が、減衰定数と波の繰返し数に大きく依存することが分かる。 $n\pi h$ の値が十分に小さい時の共振時応答増幅度は、

$$\frac{1}{2h} \left(1 - \frac{\exp(2n\pi h)}{\sqrt{1-h^2}} \cos 2n\pi \sqrt{1-h^2} \right) \approx \frac{1}{2h} (1 - \exp(2n\pi h)) \approx n\pi(1-n\pi h)$$

で与えられるので、半波パルスの場合には減衰定数によらず 1.57 倍となる。これに対して繰返し数が増加すると $1/2h$ 倍に増幅され増幅度は減衰定数に支配される。例えば、定常状態に達するのに要する波の数の目安として、90%に増幅 ($0.9/2h$) するのに必要な波の数を求めると $0.37/h$ となる。このことから、減衰の大きい免震建物の場合には共振周期よりやや周期の短いパルスの入力に対する応答が、減衰の小さい

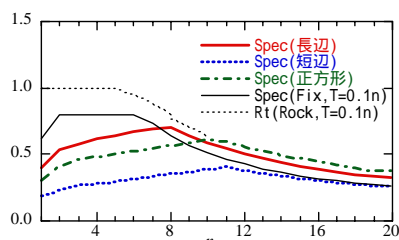
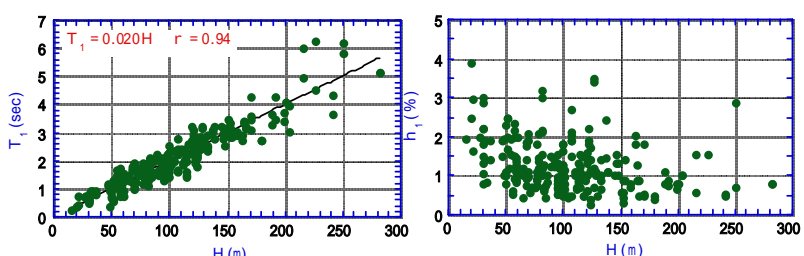


図 11 建物ベースシア係数に及ぼす相互作用効果
(横軸：階数、縦軸：ベースシア係数)



(a) 固有周期 (b) 減衰定数
図 12 鉄骨建物の建物高さとの固有周期・減衰定数との関係

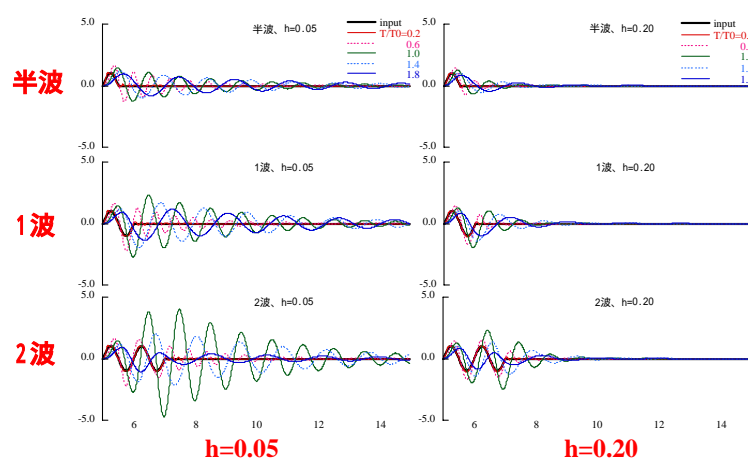


図 13 入力サイン波の周期比、波の数と応答との関係

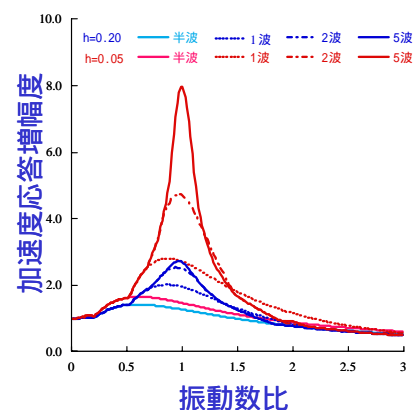


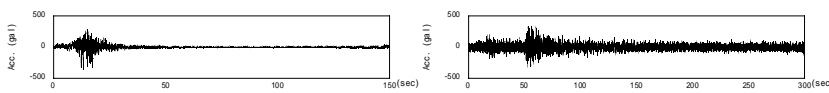
図 14 Sin 波入力時の波の数と減衰定数による応答増幅度の違い
(横軸は建物振動数に対する入力振動数比)

高層建物の場合には継続時間の長い波に対する共振応答の問題が重要になることが分かる。例えば、減衰定数が1%で周期5秒の建物の場合、共振振幅の9割に育つのに185秒も要する。すなわち、同じ最大地動を与える入力波でも、減衰の大きい免震建物では活断層近傍のパルス的な波が、減衰の小さい超高層建物では巨大地震による継続時間の長い波がクリティカルとなる。

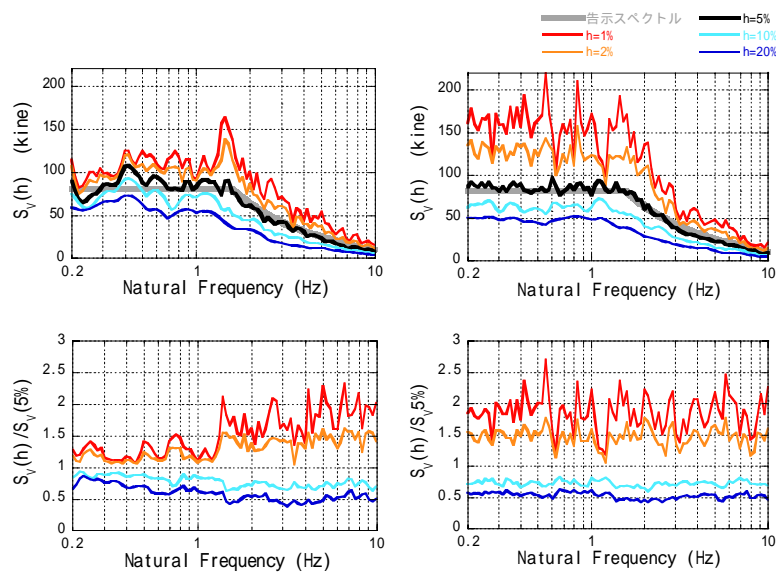
図15に、国土交通省告示で定められた解放工学的基盤での地震動加速度応答スペクトルをターゲットスペクトルとして、兵庫県南部地震・神戸海洋気象台のNS方向の位相特性と、鳥取県西部地震での海部郡飛鳥村の応答波形の位相特性を用いて作成した加速度波形を示す。図16に2つの波形に対する相対速度応答スペクトルと、5%速度応答スペクトルに対する減衰定数 h の速度応答スペクトルの比を示す。図から、継続時間の長短によって、建物応答の減衰依存性が大きく異なることが分かる。

最近では、建物の振動特性を制御した制震構造や免震構造が増えてきた。制震構造は、建物に減衰を付与する装置を付加したものであり、高層建物の応答抑制のために用いられる場合が多い。これに対して、免震構造は、比較的剛な建物の下に免震装置を設置し、長周期化と減衰付与を与えるものである。何れも建物の振動特性を人為的に設定するものであり、地震動の3要素である強さ、周期特性、継続時間の適切な把握が必要である。

堆積平野の震動特性の一例として、図17に2000年鳥取県西部地震による強震記録のH/Vスペクトルから求めた名古屋市域の卓越周期分布を、図18に2000年三重県南部地震時の震源から名古屋に至る速度波形の走時を示す。図より、濃尾平野の基盤の傾動による地盤周期の変化と、堆積平野内に波動がトラップされることによる継続時間の伸長が明瞭に認められ、長周期構造物の応答性状への影響の大きさが分かる。



(a)兵庫県南部地震・JMA神戸 (b)鳥取県西部地震・飛鳥村
図15 2種類の位相特性を有する告示スペクトル適合波



(a)兵庫県南部地震・JMA神戸 (b)鳥取県西部地震・飛鳥村
図16 2種類の位相特性を有する告示スペクトル適合波の相対速度応答スペクトル(上)と5%速度応答スペクトルに対する減衰定数 h の速度応答スペクトル比(下)

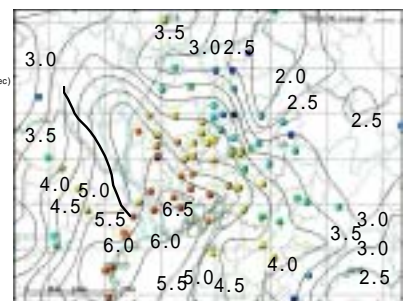


図17 鳥取県西部地震の強震記録H/Vスペクトルから求めた濃尾平野の卓越周期

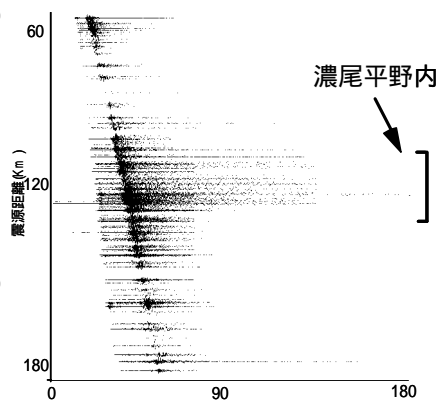


図18 三重県中部地震時の速度応答波形の走時

5. 濃尾平野の3次元地下構造モデルの作成と 主要な活断層に対する強震動予測

兵庫県南部地震以降、濃尾平野周辺では、活断層調査や堆積平野地下構造調査が精力的に行われてきた。現在、愛知県では濃尾平野地下構造調査の総合解析の一環として、3次元地下構造モデルの策定と強震動評価を行っている。また、東海地震・東南海地震・養老-桑名-四日市断層などに対する地震被害予測調査の一環としての強震動評価も行いつつある。

一方、1998年の建築基準法改正により、性能規定型の耐震設計法が導入され、建築界において、地域共通の地震動策定に対する要望が高まった。このため1999年に建築技術者が出資して愛知県設計用入力地震動研究協議会を設立し、名古屋市内の強震動評価を行ってきた¹¹⁻¹²⁾。

本節では、愛知県設計用入力地震動研究協議会において実施した活動の中から、濃尾平野周辺の主要活断層の断層モデルの策定、濃尾平野の3次元地下構造モデルの策定、並びに、3次元差分法と統計的グリーン関数法とのハイブリッド法による強震動評価結果についてその概要を紹介する。詳細は文献¹¹⁻¹⁴⁾を参照されたい。

まず、想定地震の選定に当たっては、名古屋市周辺において過去に発生した主な被害地震と活断層をリストアップし、名古屋市周辺の地震活動の特徴を下記のように大別した。

A: 1944年東南海地震(M7.9)などフィリピン海プレートの沈込み帯で発生する巨大地震

B: 1891年濃尾地震(M8.0)など内陸活断層の活動による大規模な地震

C: 1945年三河地震(M6.8)のような内陸の浅い所で発生する中規模地震

D: フィリピン海プレートの上面もしくはその内部で発生する中規模地震や詳細不明の地震

つぎに確率論的想定地震¹⁵⁾の考え方に基づいて名古屋地区に影響の大きい想定地震を複数選定した。西暦2000年から100年間の地震ハザードへの寄与度を指標として、個々の活断層や

地震活動度の順位付けをして想定地震を選定した。その結果、名古屋地域への影響の大きさも考慮して、

(1) フィリピン海プレートの沈込み帯で発生する巨大地震として東海・東南海連動型の地震

(2) 特定の活断層の活動に起因する地震として、養老-桑名断層系、伊勢湾断層(内海断層も含む)、猿投山北断層に起因する3地震(図19)

(3) 活断層の存在が知られていないところでも発生する可能性のある地殻内地震

を想定した。本論は、活断層を主題としているので、(2)についてのみ紹介する。

強震動評価に当たっては、断層破壊の非一様性を考慮するため、断層パラメータとして、巨視的パラメータと微視的パラメータを設置した。表2に代表的な巨視的断層パラメータを、図19内に対象断層のアスペリティ配置と破壊開始点を示す。詳細は文献¹¹⁻¹²⁾を参照されたい。

強震動予測にはハイブリッド合成法を用い、長周期地震動は3次元有限差分法¹⁶⁾で、短周期地震動は統計的グリーン関数法¹⁷⁾で工学的基盤面での波形を求め、両者を2.5秒の接続周期で重ね合わせた。その上で表層の1次元増幅特性を考慮した。計算フローを図20に示す。

地震動の計算地点は図21に示す9地点であり、震動性状の異なる7ブロックに分散配置した。ブロックAnとAsは新第三紀層が露頭している名古屋市東部の丘陵地、ブロックBは名古屋市中心部の洪積台、ブロックCは沖積層で覆われた三角州、ブロックD、E、Fは、名古屋市西部から南部にかけての埋立地である。

地盤モデルの策定に当たっては、濃尾平野で実施されている反射法探査・屈折法探査・微動アレイ調査・深層ボーリング・重力探査・浅層ボーリング・強震記録・単点微動記録などの各種データを図22のように適切に組み合わせて¹³⁾、図23に示す基盤形状を有する3次元地下構造モデルを作成した。

得られた地表応答波形の一例を図24に、解放

工学的基盤面における周期 2.5 秒以上の長周期成分の波動伝播のスナップショットを図 25 に示す¹⁴⁾。図から断層破壊の初期の段階では、ディレクティビティ効果を持ちながら同心円上に波動が伝播し、その後、堆積平野の構造の影響を受けて伝播性状が変化し、平野内に波動がトラップされて行く様子が分かる。CHC 地点の応答波形を見ると、同一地点であっても、断層位置や破壊性状によって経時特性に大きな差異が認められる。図 26～27 には猿投山北断層に対応する平野内の応答波形と水平面内の粒子軌跡を示す（解放工学的基盤の 2.5 秒以上の長周期成分）¹⁴⁾。堆積層の厚い地点での波動トラップによる継続時間の伸長や、基盤形状変化に伴う波動伝播方向の変化などが読みとれ、堆積地盤の 3 次元的構造モデルの重要性が分かる。

6. まとめ

拙稿では、最初に、名古屋圏を取り巻く最近の地震に関わる動向をまとめ、社会の地震防災に対する関心の高まりと、強震動予測に対する期待について紹介した。次に、兵庫県南部地震における建築物被害から明らかになった我々の耐震性能の把握度について分析し、残された課題が多々あることを指摘した。さらに、強震観測や簡単な応答解析から得られる建築物の応答性状の特徴について分析し、建築物の特性（周期と減衰）に応じた強震動特性（強さ・周期・継続時間）の評価の必要性について指摘した。その上で、名古屋圏の強震動予測の試みの一つとして、愛知県設計用入力地震動研究協議会において実施した強震動評価について、3 つの活断層に対する強震動評価結果を紹介した。

近年、南海トラフでの巨大地震や活断層の長期評価が公表され、地震に対する関心が高まっている。兵庫県南部地震を契機として強震動予測の知見は著しく向上したが、その予測精度は、基礎データの不足もあり、未だ倍半分と言ったレベルにあり、物作りに直結させるには時期尚早である。過去の震害経験に基づいて作り上げ

てきた耐震技術も、中身が十分に解明されていないわけではない。科学的知見の進展と過去からの物作りの技術を繋いでいくには、地道な研究を通して両者のギャップを埋めていく必要があり、現状は、高度な工学的判断も必要とされている。技術を過信することなく真摯な態度で自然災害に強い町作りを進めていきたい。

参考文献

- 1) 内閣府の防災情報のホームページより引用、<http://www.bousai.go.jp/>
- 2) 地震調査研究推進本部のホームページより引用、<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>
- 3) 地震調査研究推進本部：日本の地震活動 - 被害地震から見た地域別の特徴 - < 追補版 >、<http://www.hp1039.jishin.go.jp/eqchr/eqchrfrm.htm>
- 4) 武村雅之：震度 7 の揺れは地盤で決まる - 明治以降の地震被害から -、サイスマ、pp.5-7、2002
- 5) 鹿島都市防災研究会編：建築防災シリーズ 2 建築物の地震被害、鹿島出版会、1996
- 6) 日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告、建築編 1 鉄筋コンクリート建築物、1997
- 7) 日本建築学会編：入門建物と地盤との動的相互作用、1996
- 8) 斎藤知生、横田治彦、辻英一、浮田高志：地震応答記録からの建物振動特性の評価、日本建築学会大会学術講演会梗概集 B-2、pp.721-722、1997
- 9) 伊澤清治、中澤俊幸：大震災と免震建築、MENSIN、pp.18-24、1955
- 10) 日本建築学会編：建築物の減衰、2000
- 11) 福和伸夫、久保哲夫、飯吉勝巳、大西稔、佐藤俊明他：愛知県名古屋市を対象とした設計用地震動の策定 その 1～7、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.81-94、2001
- 12) 愛知県設計用入力地震動研究協議会：愛知県設計用入力地震動の作成 - 想定地震による強震動予測 - 報告書、2002
- 13) 福和伸夫、佐藤俊明、早川崇、池田善考、野崎京三：濃尾平野の地盤調査とそのモデル化、月刊地球号外 37 号、pp.108-118、海洋出版、2002
- 14) 早川崇：名古屋市における強震動予測事例 - 濃尾平野の 3 次元堆積盆地モデルの作成と適用 -、第 29 回地盤震動シンポジウム、日本建築学会、2002
- 15) 亀田弘行、石川裕、奥村俊彦、中島正人：確率論的想定地震の概念と応用、土木学会論文集、第 577 号、I-41、pp.75-87、1997
- 16) A. Pitark: 3D Elastic Finite-Difference Modeling of Seismic Motion Using Staggered Grids with Nonuniform Spacing, Bull. Seism. Soc. Am., 89, 54-68, 1999
- 17) 壇一男、渡辺基史、佐藤俊明、宮腰淳一、佐藤智美：統計的グリーン関数法による 1923 年関東地震 (MJMA7.9) の広域強震動評価、日本建築学会構造系論文報告集、第 530 号、pp.53-62、2002

表2 想定地震の主要パラメータ

	想定濃尾平野西縁地震	想定伊勢湾地震	想定猿投山北地震		
モーメントマグニチュード M_w	7.2	7.1	6.7		
気象庁マグニチュード M_J	7.7	7.5	7.0		
地震モーメント M_0 [dyne-cm]	8.1×10^{26}	4.7×10^{26}	1.2×10^{26}		
短周期レベル A [dyne-cm/s ²]	2.3×10^{26}	1.9×10^{26}	1.2×10^{26}		
	北断層	南断層	北断層	南断層	
断層長さ L [km]	28	20	25	14	21
断層幅 W [km]	16	16	16	16	14
平均すべり量 D [m]	3.2	2.7	2.4	1.8	1.2
滑り方向 [deg]	270 (逆断層)同左		270 (逆断層)同左		350 (右横ずれ断層)

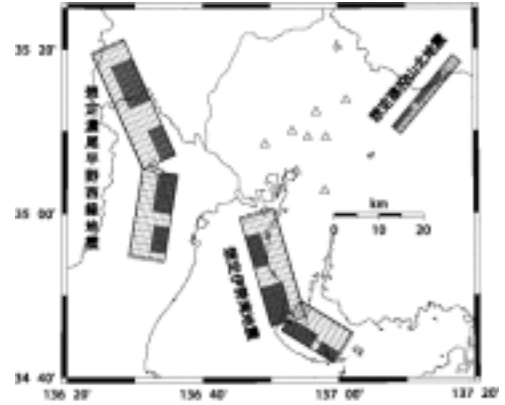


図19 活断層による想定地震

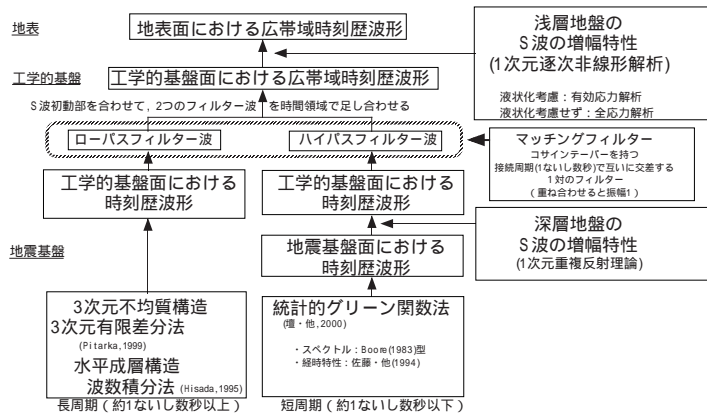


図20 広帯域ハイブリッド法による強震動計算のフロー

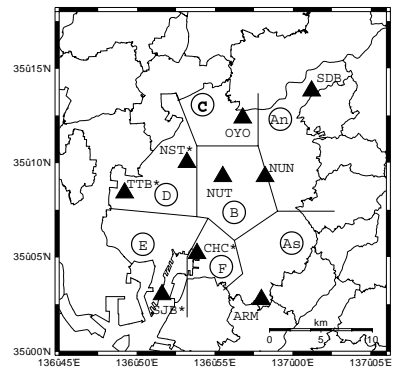


図21 地域のブロック化と地震動の算定地点

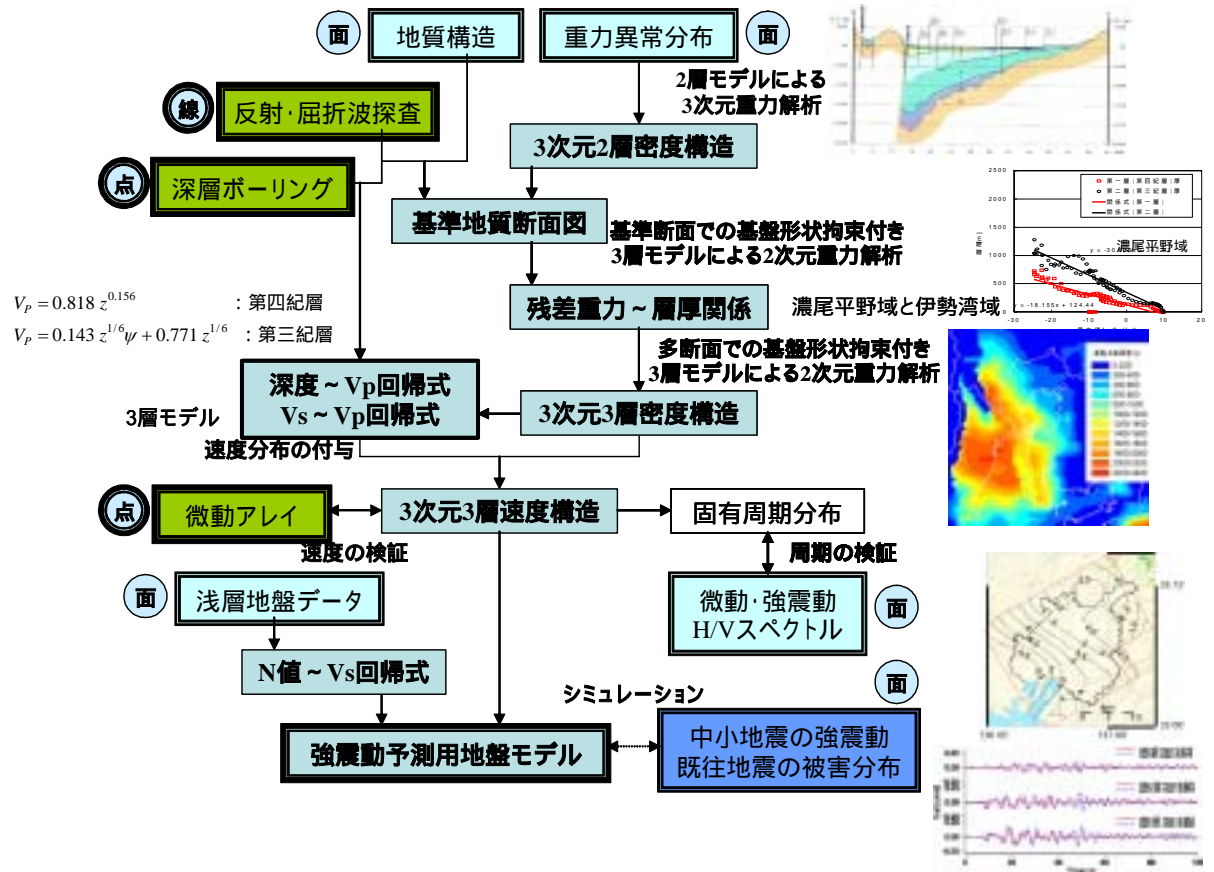


図22 地盤のモデル化のフロー図

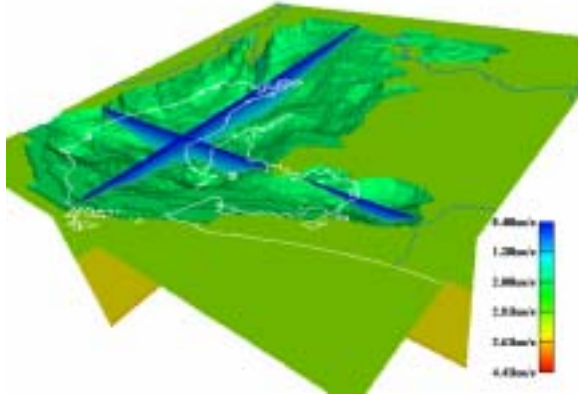


図 23 濃尾平野の地震基盤面のアイソメ

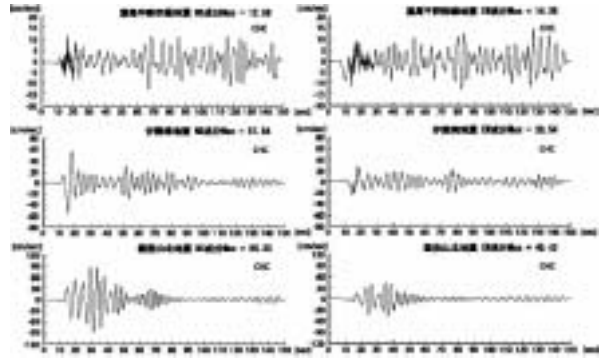
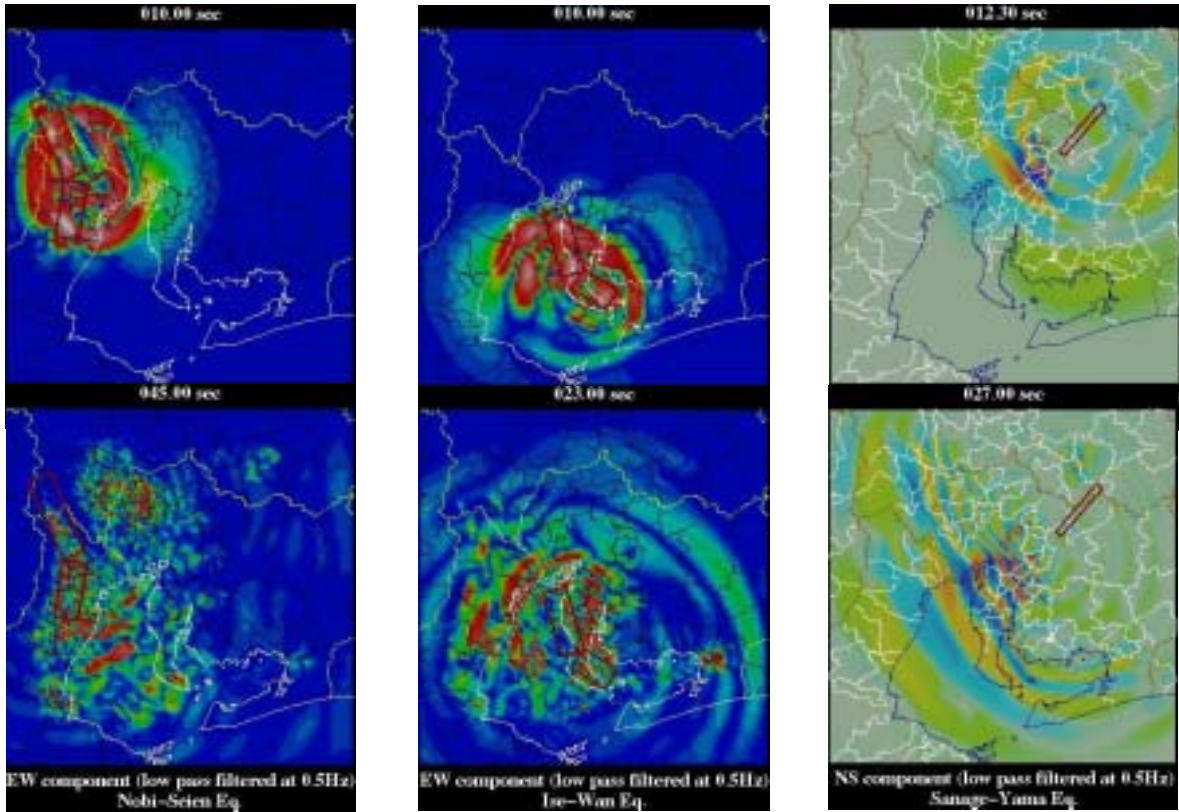


図 24 CHC 地点での地表地震動
(上から想定濃尾平野西縁断層、想定伊勢湾断層、
想定猿投山北断層、左 NS 成分・右 EW 成分)



想定濃尾平野西縁地震

想定伊勢湾地震

想定猿投山北地震

図 25 代表時刻での工学的基盤面応答のスナップショット (2.5 秒以上の長周期成分)

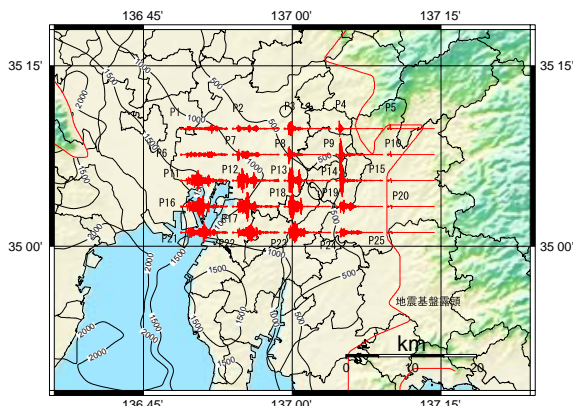


図 26 想定猿投山北地震の速度波形 NS 成分

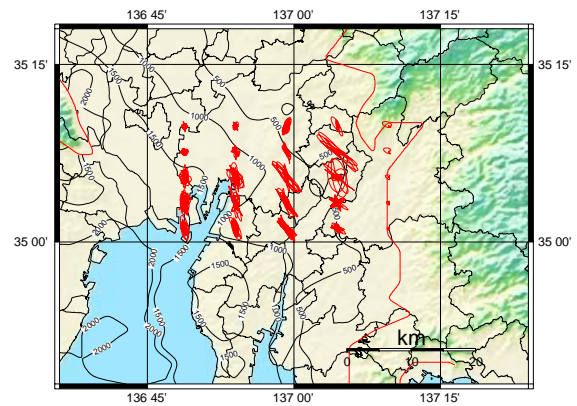


図 27 想定猿投山北地震の水平面の粒子