

ユーザーからの深部地盤構造解明への期待

ふくわ のぶ お
福和 伸夫*

1. はじめに

ユーザーの立場で深部地盤構造の解明に対する期待について小文をまとめよとのことであるので、まず、筆者のユーザーとしての立場を明確にしておきたい。筆者は、建築屋であり、建物の構造の問題を主として扱っている。構造屋にもいろいろいるが、筆者は耐震屋とか地震防災屋といったカテゴリーに入る。もともと民間建設会社に勤務していたこともあり、建物や地盤の揺れに関する何でも屋として過ごしてきたが、建物と地盤との力のやりとり（構造物と地盤との動的相互作用）に関わる研究に携わる機会が多かった。民間時代は主として原子力発電施設（建物の固有振動数が高く岩盤立地）の耐震設計に関する研究開発に従事していたため、深部地盤との接点はなかったが、建物と地盤との接点にいたために、建築構造屋としては地盤との繋がりが多い方であった。その後、大学に異動して以降、地域の地震防災や建築物の設計評定に携わる機会が増え、深部地盤との接点広がった。地方大学の地域社会における役割は大きく、地域の防災行政との関わりも大きくなる。また、筆者の所属する先端技術共同研究センターは大学における産・官・学の共同研究の推進母体でもあり、多くの方々と接点をもって地域の地震災害対策や建築物の対地震設計に関わっている。

そこで、本論では、民間経験をもった地震防災屋・建築構造耐震屋である大学人が、名古屋という地方人として、地域の地震被害想定や免震構造物の評定業務に携わる中で、深部地盤構造について日頃感じていることを述べてみたい。

2. 地盤の揺れ

我が国の大都市はいずれも規模の大きな堆積平野に位置しているため、基盤岩の上に厚い堆積物が乗っており、最表層には沖積地盤が堆積している場合が多い。このため、堆積地盤による地震動の増幅特性を適切に評価することが地震動予測においてきわめて重要となる。基盤岩に至る深

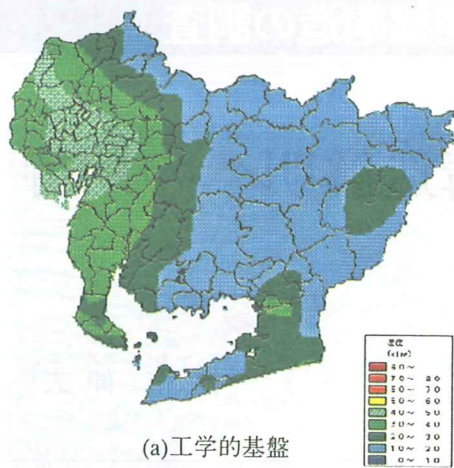
部地盤構造は平野全体の震動性状に、表層の微地形などは局所的な地震動増幅特性に関係するため、いずれも適切に考慮する必要がある。図1は愛知県を対象に基盤岩（地震基盤）に同一の強さの揺れを与えたときの第三紀層上面相当（工学的基盤）位置と地表位置の速度応答を示したものである¹⁾。工学的基盤位置の揺れが、より深部の地盤構造によって変動しており、さらに、表層地盤の増幅特性が加味されて地表の揺れが決まっているようすが良く分かる（図は愛知県庁が震度6強程度の揺れになるときの愛知県内の揺れの分布）。

一般に、大規模な堆積平野では、地下数十メートル程度以浅の表層地盤は1秒程度以下の振動性状に、地震基盤相当まで達する深部地盤は周期数秒程度以上のやや長周期域の振動性状に關与する。図2は図1の揺れに対する愛知県内の卓越周期分布を重複反射解析で求めたものである¹⁾。愛知県西部の濃尾平野部は濃尾傾動地塊により西部ほど基盤深度が深いので、図2(a)の地震基盤以浅の周期も西部ほど長周期化している。図1(a)に示した工学的基盤での揺れが地震基盤深さの深い位置で大きいことは、深部地盤の重要性を示している。また、図2(b)の工学的基盤以浅の周期は沖積層厚さとの関連が強く、濃尾平野、岡崎平野、豊橋平野で長周期かつ揺れが増幅されている。

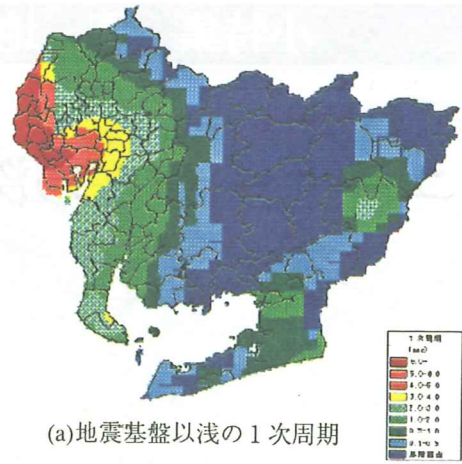
図3は、1998年4月に養老断層上で発生した岐阜・三重県境の地震(M5.4)における揺れを濃尾平野の東西断面上に示したものであり、左からEW方向・上下方向の速度波形、フーリエスペクトル、微動と地震動のH/Vスペクトルを表している²⁾。深部地盤と表層地盤の両者の特性が混在して応答波形に現れているようすが良く分かる。当該地震の地震動H/Vスペクトルから求めたやや長周期の卓越周期分布を図4に示す。この分布は常時微動³⁾から求めたやや長周期域の周期分布(図5)と良く対応しており、地震基盤深さとの相関も高い。

また、濃尾平野の特徴の一つは、西縁の養老山地との境界に深さ2kmにも及ぶ基盤段差が存在していることであり、兵庫県南部地震における「震災の帯」と同様の局所的な地震動増幅地域の存在が懸念される。1998年養老の地震では養老山地のやや東側の濃尾平野内で液状化が発生したとの報道(岐阜新聞:1998年4月23日)もある。そこで、仮

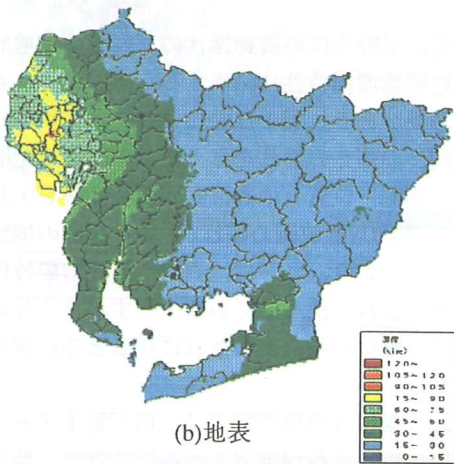
* 名古屋大学先端技術共同研究センター教授



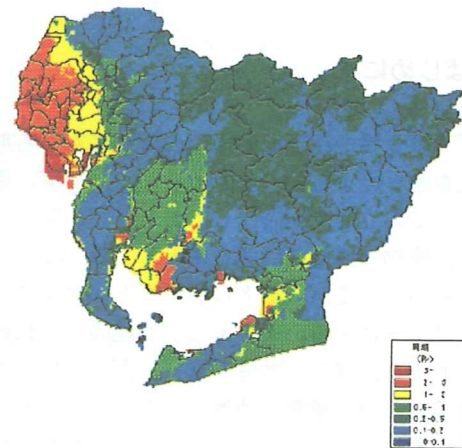
(a)工学的基盤



(a)地震基盤以浅の1次周期



(b)地表



(b)工学的基盤以浅の1次周期

図1 地震基盤への一様入射波に対する工学的基盤と地表の速度応答 (愛知県庁が震度6強相当を想定)¹⁾

図2 地盤の固有周期 (図1の揺れを想定)¹⁾

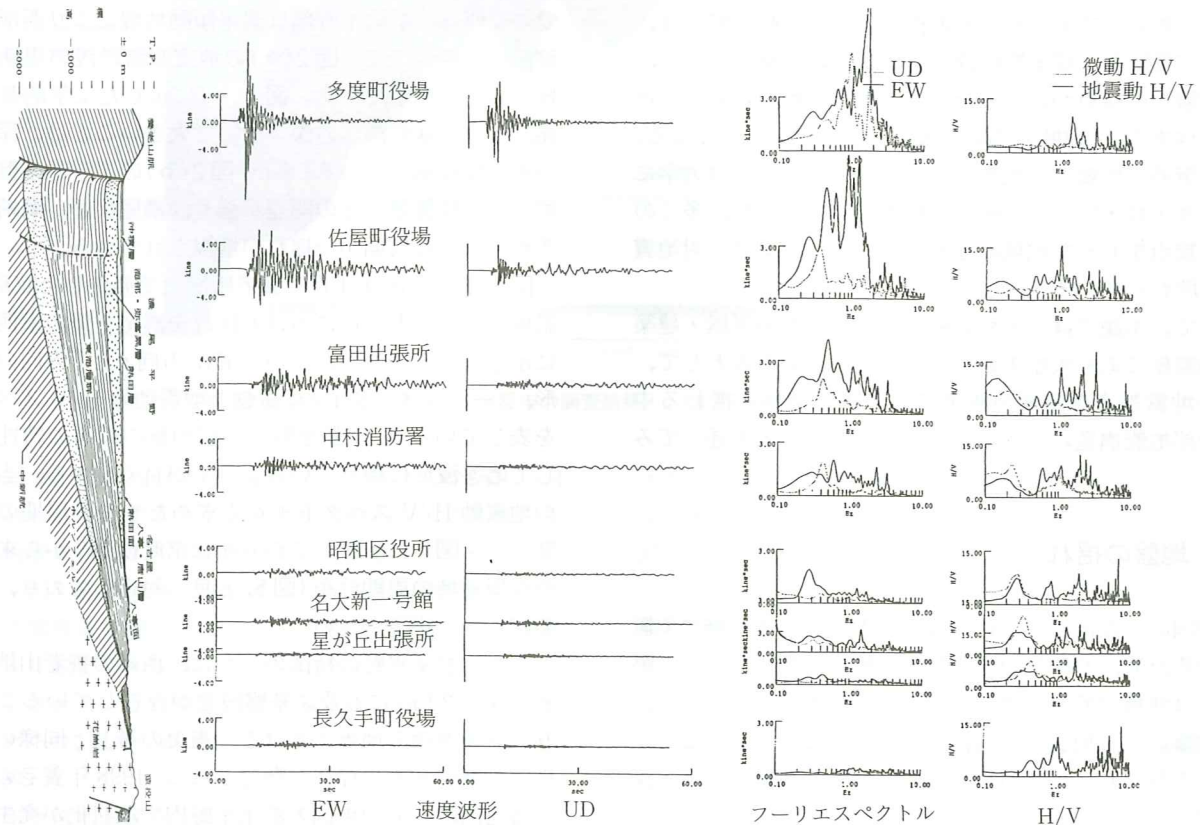


図3 1998年養老の地震における濃尾平野東西断面の水平・上下速度波形, フーリエスペクトル, H/V スペクトル²⁾

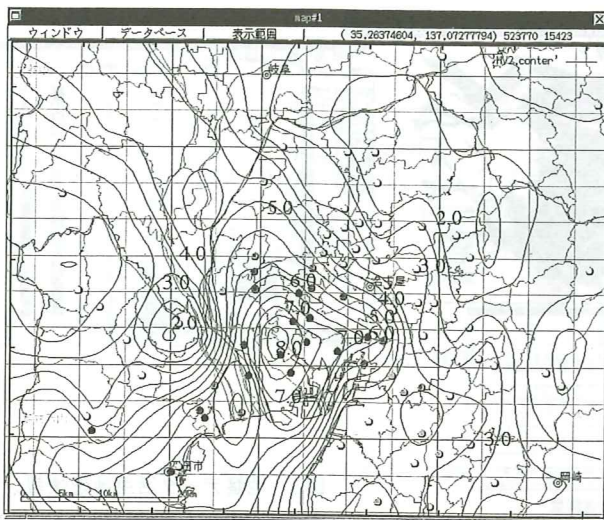


図4 地震動の主要動のH/Vスペクトルから求めた周期²⁾(1998年4月22日養老の地震M5.4)

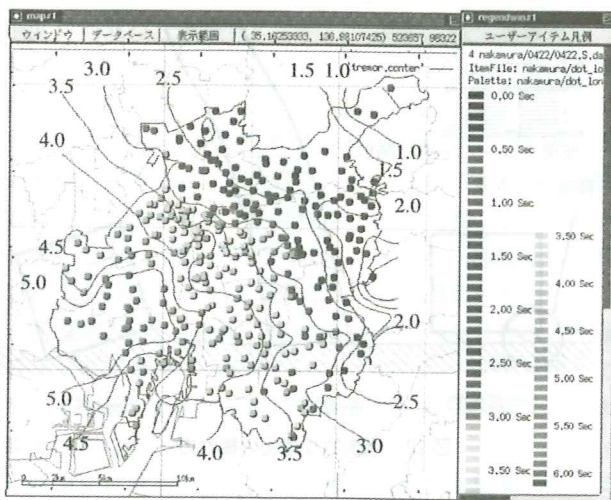
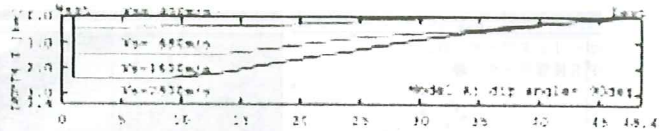


図5 常時微動のH/Vスペクトルによるやや長周期の周期分布³⁾

想的に図6(a)のような2次元地盤モデルを想定し、(b)に示す震源パラメータを用いて工学的基盤位置相当の解放基盤応答を求めた⁴⁾。図6(c)のように養老断層から平野部に入った所に局所的に地盤応答が大きくなる場所が存在している。この場所は、1891年濃尾地震において、岐阜測候所長の井口竜太郎氏が震裂波動線と称した3つの帯状強震域の一つに近接している。したがって、今後、震裂波動線の生成と深部地盤構造との関連を明確にしていく必要がある。特に堆積平野端部の段差形状を正確に把握することが重要であろう。

参考までに、図7に1999年8月21日和歌山の地震(M5.5)におけるS波初動の到達時刻をコンター図として示すが、養老断層位置で到達時刻が急変しており、厚い堆積層の存在が地震波の伝播特性に与える影響がビジュアルに理解できる。

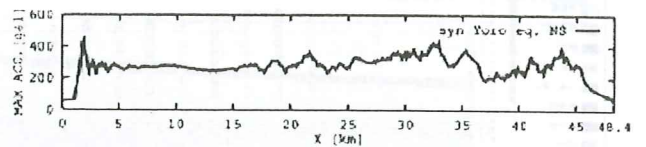
濃尾平野という堆積平野をホームグラウンドにして地震防災や耐震設計に携わる中で、深部地盤の適切な評価が地震動を予測するうえできわめて重要であることを痛感させられる。しかし、濃尾平野の探査状況は図8⁵⁾に示すように、何本かの温泉ボーリング、爆破による3測線の屈折法探査結果、重力探査結果などがある程度であり、関東平野の調



(a)濃尾平野の東西断面モデル

Strike	Dip	Rake	Length	Width	Seismic Moment
N333 E	90	90	30km	20km	2.96E+26 dyne*cm
Magnitude	Rise Time	Rupture Type	S wave vel.	Rupture Vel.	
6.8	3.0 sec	radial	3.3 km/s	2.5 km/s	

(b) 仮想養老地震の震源パラメータ



(c) 東海層群上面での加速度応答

図6 仮想養老地震に対する最大加速度予測結果⁴⁾

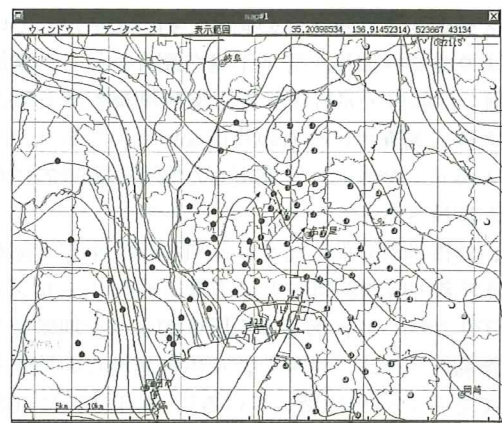


図7 S波到達時刻のコンター図(間隔は1秒:1999年8月21日和歌山の地震M5.5)

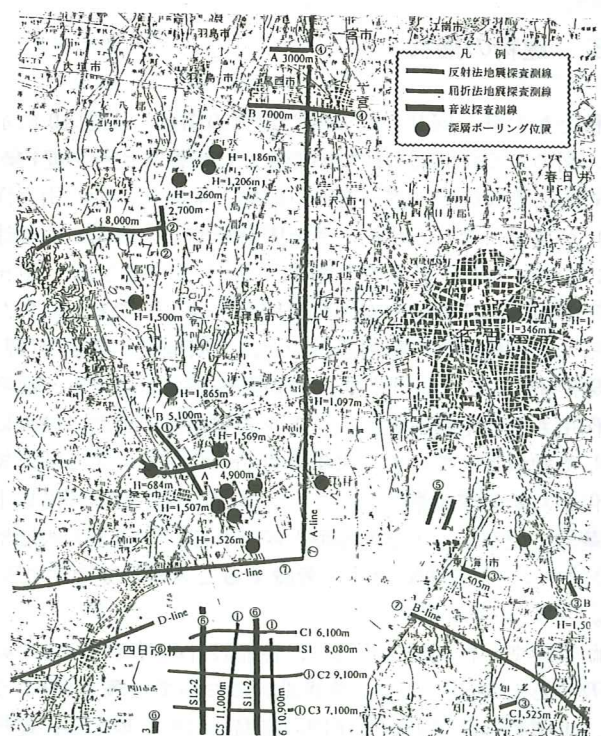


図8 濃尾平野の既往深部地盤調査⁵⁾

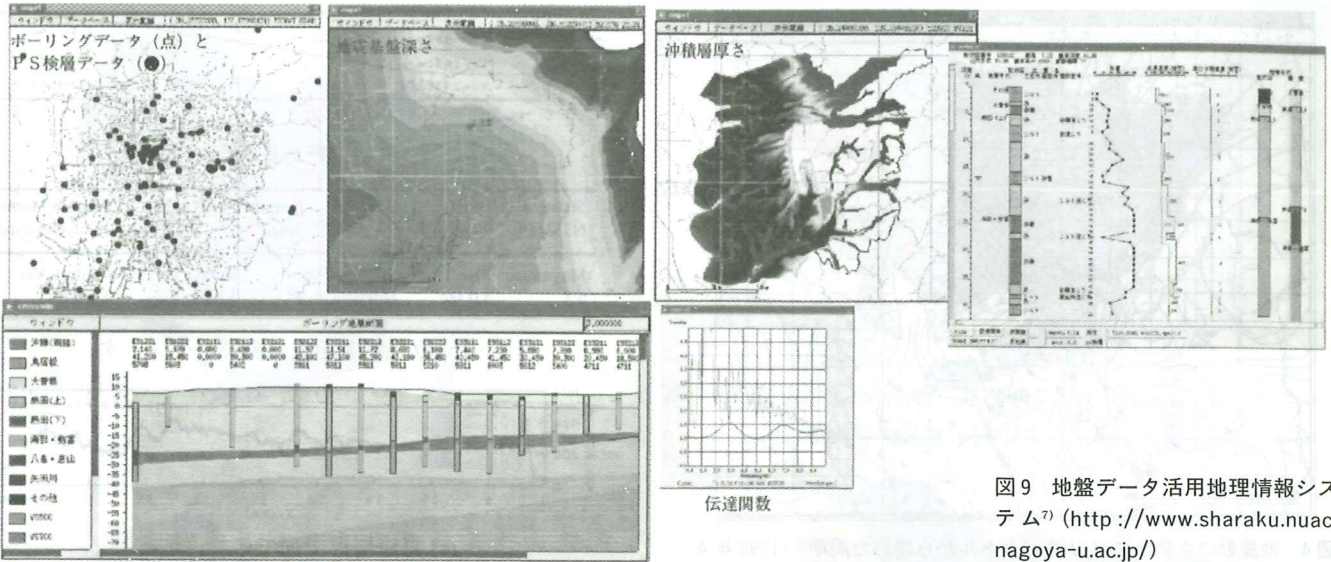


図9 地盤データ活用地理情報システム⁷⁾ (<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/>)

査状況と比較すると量・質の両面で相当に不足している。本年度より愛知県濃尾平野地下構造調査委員会が発足し、2年計画で反射法・屈折法探査、深井戸調査が実施されるが、この種の調査は民の力の及ばないものであり、国や自治体が主導して今後共より充実した調査が継続的になされることが期待される。

なお、浅部地盤に関しては、土質工学会中部支部が編纂した「最新名古屋地盤図」⁹⁾により早くからボーリングデータの電子化が図られ、著者らも図9のような地盤モデリング地理情報システムを開発し、市内任意地点の地盤モデルが推定できるレベルに達している⁷⁾。本年3月には名古屋市環境保全局が名古屋市内25000本のボーリングデータのデータベース化を行い、GIS上でデータ利用できるシステムを完成させている。

3. 建物の揺れ

私たちの身の回りの代表的な建物の揺れ方を図10に示す。図のように低層の建物の場合には地盤に比べて建物が相対的に剛なので地盤の変形（建物と地盤との動的相互作用）が重要になる。建物高さとの関係を鉄骨建物について整理した結果を図11に示すが⁹⁾、高さ20~30m以下の中低層建物の1次固有周期は1秒以下である。したがって、一般建物の耐震設計では、表層地盤が重要な役割を果たす。このため現行の耐震設計規準においても、建物に作用させる地震荷重の大きさを表層地盤の地盤の硬軟に応じて増減させている。来年6月からスタートする性能規定化した新耐震規準においても、基礎の支持基盤程度以上の基盤（便宜上、工学的基盤と呼ばれる）から上の表層地盤について地盤増幅特性を考慮することが予定されている。

耐震規準の性能規定化後は、性能設計の考え方が徐々に普及すると考えられる。性能設計においては表1⁹⁾のように、地震動強さに応じて建物の損傷レベルを規定し、建物の耐震性能を建築主と設計者が明示的に合意することが基

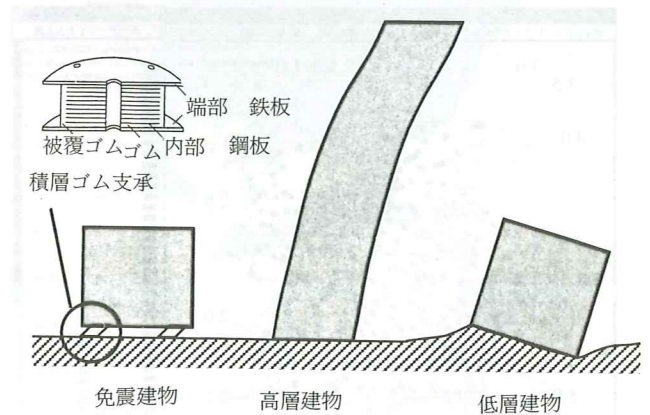


図10 代表的な建物の揺れ方

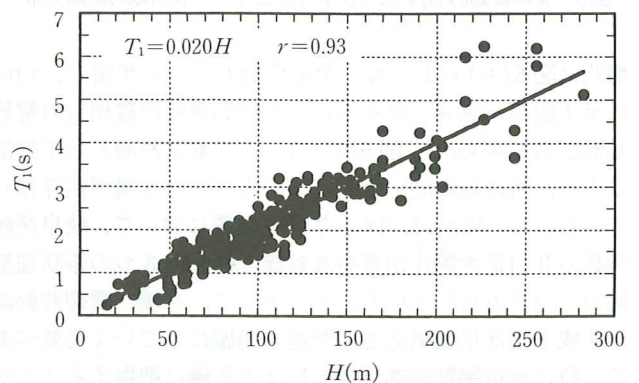


図11 鉄骨造建物の建物高さとの固有周期の関係⁹⁾

表1 耐震メニュー案⁹⁾

		地震の強さ					
		D	C	B	A	S	
耐震等級	耐震5級	無被害	軽損	中損		大破・崩壊	
	耐震4級	無被害		軽損	中損	大破・崩壊	
	耐震3級	無被害		軽損	中損	大破・崩壊	
	耐震2級	無被害			軽損	中損	大破・崩壊
	耐震1級	無被害				軽損	中損

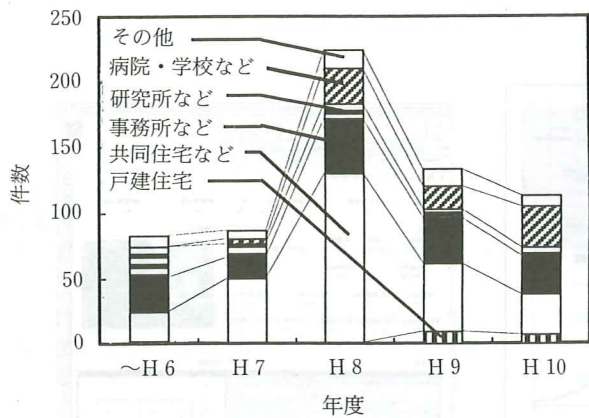


図12 免震建物の評定件数の推移

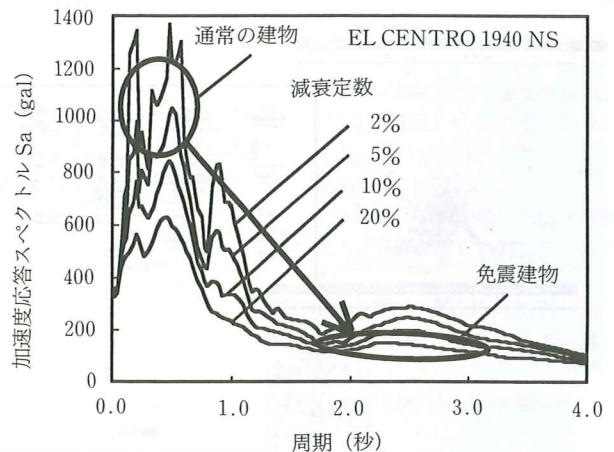


図13 免震建物の応答加速度低減の原理

本となる。この際には、想定すべき地震動強さを建設地点ごとに設計者が設定することが基本となり、地域の地震活動度や地盤特性を適切に考慮して地震荷重を求めることが設計の根幹となる。このため、建設サイトの地盤探査がきわめて重要となる。

一方、100 m を超える高層建物の場合には、図10のように地盤の影響は減じられ建物変形が支配的となり、建物の固有周期も数秒オーダーになる。このため、深部地盤までを含めた地盤周期が重要になる。一般に、高層建物は減衰能が小さいため一度揺れ始めると揺れが止まりにくいという問題があり、地震動のやや長周期成分との共振の問題は設計上重要なポイントとなる。このため、深部地盤までをモデル化した地盤増幅特性の検討や、制震装置などによる減衰性能の向上が試みられている。

同様に長周期の建物である免震構造物も急増してきている。現在は、免震建物を建設するには(財)日本建築センターの免震構造評定による設計審査が必要である。図12は免震建物の評定件数の推移を示したものである。平成6年までの約10年間にわずか82棟であったのが、兵庫県南部地震の年だけでほぼ同数、翌年は一挙に前年の2.6倍になっている。用途の内訳を見ると集合住宅が全体の4割を占め特に8年度は6割近い。一方9~10年度は不況を反映して総数が減少しているが、ほとんどが集合住宅の減であり、事務所や官庁・病院・学校等は横ばいとなっている。建物規模は拡大しており、床面積5000 m²以上の割合が6年以前の26%から10年度には57%まで増加している。

免震建物では、水平剛性の小さい積層ゴム(図10参照)をダンパーと組み合わせて建物基礎下に設置し、建物周期を長周期化すると共に減衰能を増し、図13の加速度応答スペクトルに示すように建物応答加速度を大きく低減させる。したがって、免震はもともと硬質地盤に建てられる短周期の低層建物に適するが、最近では軒高60 mを超える高層免震建物や軟弱地盤に立地する免震建物も現れている。この場合には、入力地震動評価における地盤特性の適切な評価、特に深部地盤に関連するやや長周期域の地震動評価の精度が重要となる。

また、既存建物の耐震改修の一手法として、既存建物基礎の下に免震装置を設置する工法も実用化されている。免

震レトロフィットとも呼ばれており、当初は歴史的建造物の保存手法として導入された。この方法は、コストと工期を減じつつ、場合によっては上部建物を使用しながら耐震改修を行うことも可能という利点を持ち、都市部の既存不適格建物の耐震改修にあたって有力な手法として注目されている。一方で、住まいの安全に対する関心から戸建住宅の免震化への要求は高く、免震住宅も建設されるようになってきた。戸建住宅の場合、その軽量さ故に、長周期化するためには一般建物とは異なった免震機構を採用することが必要である。本年9月からは免震住宅の一般評定への道も開かれ、今後、免震住宅が急増することが予想される。

このように、その優れたポテンシャル故に免震建物の普及は急であるが、その設計には建物振動特性の把握と建設地点の特性を考慮した入力地震動の設定が重要である。高層建物や免震建物が多く存在する関東・大阪・濃尾平野はいずれも周期数秒以上のやや長周期域の地盤周期をもっている。名古屋市の場合も、図5に示したように高層建物や免震建物が集中する中心部の地盤の卓越周期は3~5秒であり、これらの長周期建物と共振しやすい周期域である。したがって、高層建物や免震建物の普及のためにも、大規模平野の深部地盤構造の解明が不可欠である。

4. 揺れのデータの公開

前述したように、建築構造物の耐震設計では性能評価に基づく設計が指向されつつあり、地域特性を踏まえた地震荷重の評価の必要性が高まり、地盤震動性状把握の重要度が増している。地盤特性を踏まえた地震動評価には、地域ごとに地盤・地震動・常時微動などのデータベース化を図り、インターネットなどを介して一般設計者がこれらのデータを利用できるようにすることが有益であり、この種の環境整備が今後の耐震安全性に大きく寄与すると考えられる。以下には、筆者らが行っている観測記録のウェブ公開について簡単に紹介する。

1995年兵庫県南部地震を契機として、数多くの機関により膨大な数の強震計が設置され、現時点では全国に5,000を超える強震計が設置されていると言われている¹⁰⁾。東海

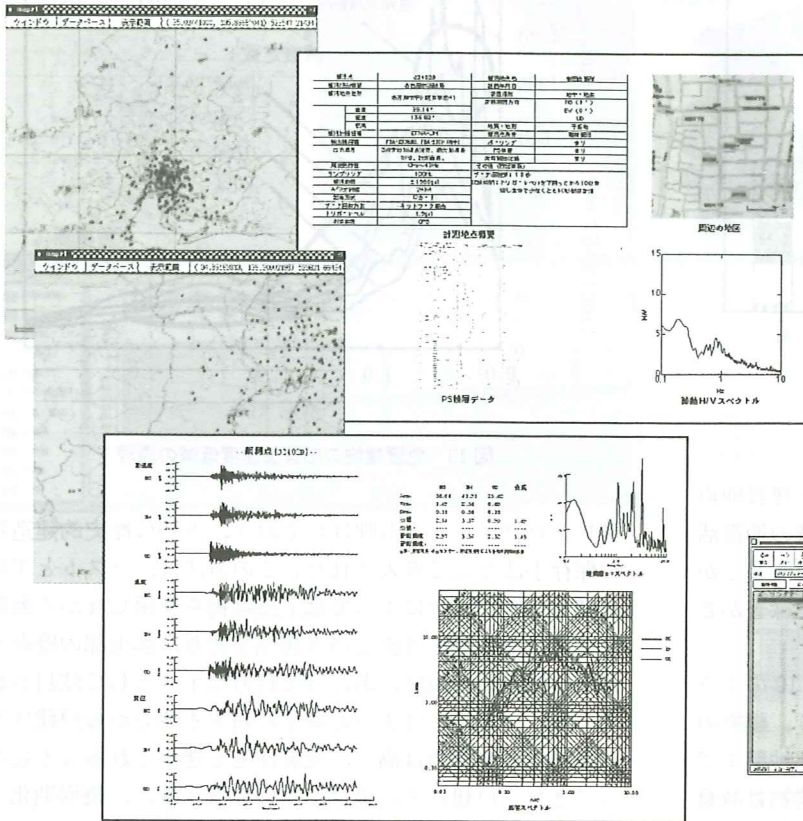


図14 名震研で収集した強震記録のウェブによる公開

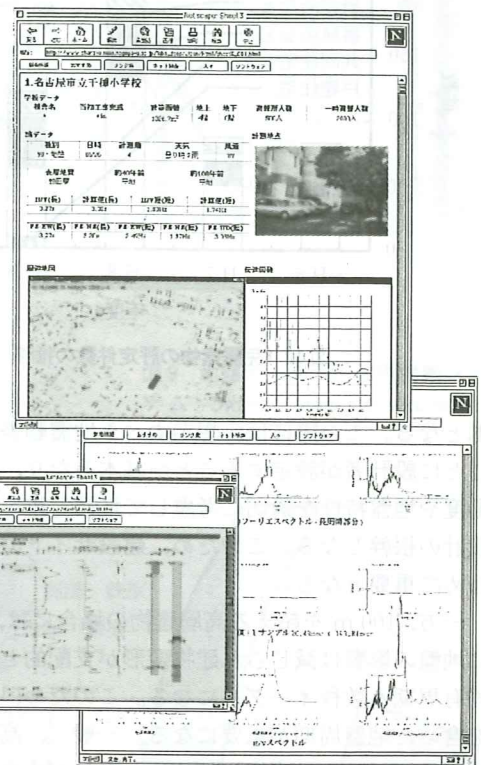


図15 名古屋市内の常時微動観測結果のウェブによる公開

地域においても、東海3県に約500点、名古屋市内に約60点の観測点が存在し、1998年4月22日に発生した三重・岐阜県境の地震(M5.4、養老断層上で発生。以後養老の地震と呼ぶ)ではほぼ全点で観測記録が得られている。この地震を契機として、地域の強震観測の現状を把握し、記録の散逸を防ぎデータの共有化・データベース化を推進することを目的として、半公的な観測機関(愛知県・名古屋市・中電・東邦ガス・愛工大・名大)からなる「名古屋地域強震観測研究会(名震研)」を発足させ、約1年をかけて観測状況の調査やデータの収集を行い、収集記録をウェブ上に公開することを試みている。図14は収集記録のウェブ公開例である²⁾。東海3県下には平均的に60km²に1地点程度の密度で強震観測点が存在し、名古屋市内はこの10倍程度の密度となっている。ただし、岐阜県のシステムは波形記録ができないシステムのため最大値情報のみが見える。なお、図3、4、7に示した結果は収集記録の分析例であるが、これらの図は多点の記録があって始めて作成できるものである。

また、著者らは、図5に示したように市内341地点で常時微動計測を実施してきており、観測点近傍のボーリングデータや推定地盤速度構造によるS波増幅特性と共に、微動測定結果の生波形、平均フーリエスペクトル、H/Vスペクトルをウェブページ上で公開している(図15)。ちなみに計測点密度は概ね1km²に1カ所である。さらに、図9に示したように、名古屋市域の種々の地盤データを相互活用できるインターネットGISを作成し、現時点での最良の地

盤モデルを一般の方に利用して貰えるような環境を作り始めている³⁾。以上の結果、名古屋市内であれば、2~3km以内に1カ所は強震観測記録を、500m以内に1カ所は微動記録を参照することができ、既存地盤データと合わせることで、地盤震動性状を震動観測データと地盤データの両面から推定できる環境が整いつつある。

広大な堆積平野の深部地盤の解明のためには、深井戸や反射・屈折法のような点や線状の詳細な調査に加え、強震観測データや常時微動データといった実際の揺れのデータ、重力異常や既存ボーリングデータなどの面的なデータによって空間的に補完していくことが必要であり、ここに示したような既存データの活用システムは、深部地盤解明にも役立つものと考えている。また、今後解明されて行くであろう深部地盤データも、ウェブ公開などを通して広く技術者が使えるようにしていく必要がある。

5. まとめ

地盤データの一人のユーザーとして、深部地盤の解明に関わる事柄を紹介させて頂いた。濃尾平野という規模の大きな堆積平野の地震防災を考えたり、高層建物や免震建物などの長周期構造物の設計に関わる機会が少なからずある者としては、深部地盤の形状が地表地震動分布に与える影響や、やや長周期域の地震動特性への影響は、無視し得ないことであり、深部地盤構造の解明が早急に行われることを期待する。深部地盤の調査は国や地方自治体などの公的

機関にしかできないことであり、国民共有の財産の一つとして調査が実施されていくことを願っている。また同時に、S波速度構造の有効な調査方法の開発や、基盤構造の急変位置での精度の高い検層方法が確立されることを望んでいる。

参考文献

- 1) 愛知県：地盤に対応した建築物の地震被害低減策検討調査報告書, 1999.
- 2) 福和伸夫, 飛田潤, 中野優, 中村仁, 堀啓輔：地域における強震観測の実態分析と活性化の試み～1998年養老の地震に対する名古屋地域強震観測研究会の取り組み～, 第4回都市直下地震災害総合シンポジウム, 1999.
- 3) 西阪理永, 福和伸夫, 高橋広人, 寺本道彦, 植田三月, 飛田潤：常時微動計測に基づく名古屋市地盤の震動特性に関する研究, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 835-840, 1998.
- 4) 田中清和, 栗本修, 福和伸夫, 西阪理永：濃尾平野の深部不整形構造が地震動増幅特性に及ぼす影響, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 863-868, 1998.
- 5) 馬場干児, 松澤宏, 安江勝夫, 野崎京三：濃尾地域の深部地盤構造把握の必要性和展望, 「都市地震防災地盤図」に関するシンポジウム, 全国地質調査業協会連合会, pp. 85-115, 1999.
- 6) 土質工学会中部支部：最新名古屋地盤図, 1988.
- 7) 福和伸夫, 荒川政知, 小出栄治, 石田栄介：GISを用いた既存地盤資料を活用した都市域の動的地盤モデル構築, 日本建築学会技術報告集, 第9号, pp. 249-254, 1999.
- 8) 佐武直紀, 荒川利治, 須田健一, 佐々木淳, 森田高市, 小野潤一郎：実測データに基づく鉄骨造建物の減衰評価, 第10回日本地震工学シンポジウム, p. 2449-2454, 1998.
- 9) 日本建築学会編：地震から暮らしを守る町づくり 大震災から学んだ74の提言, 彰国社, 1998.
- 10) 翠川三郎：阪神大震災以降の地震調査研究の動き, 第5回地震防災シンポジウム, pp. 3-8, 1998.

平成12年度入学生募集

全国地質調査業協会連合会が後援する地質調査技士を養成する
伝統と実績の専門学校

卒業生550余名が全国の地質業界で活躍中

土木地質工学科（2年制）

地質調査技士（実務経験2年で取得）

応募資格 高卒男女（見込とも）

願書受付（10月1日～3月31日）

学校推薦・企業推薦・一般入試

建設大臣指定

学校法人 明倫館

国土建設学院



〔〒187-0044〕東京都小平市喜平町2-1-1 電話 042-321-6909（入学相談室）

●JR中央線「国分寺」駅から西武多摩湖線「一橋学園」駅南口下車徒歩7分 <http://www.meirinkan.ac.jp/kokudo/>