

## 5章 今後の課題

### 5.1 シンポジウムの議論

1999年7月8日、当レベル2地震動研究小委員会の主催によるシンポジウム「レベル2設計地震動：現状と展望」が同学会図書館講堂にて開催された。土木学会では、1995年兵庫県南部地震による深刻な被害に鑑みて、社会基盤施設の耐震設計のあり方に関して2度にわたって提言を行っている。その第2次提言(土木学会耐震基準等に関する提言集、1996)では、「地域ごとに脅威となる活断層を同定するとともに、その震源メカニズムを想定することにより設計用入力地震動(レベル2地震動)を定めることを基本とする」となっている。しかし、実際にレベル2地震動を設定する立場の実務者からは、これらの提言だけでは、レベル2の定義や意味合いが曖昧で困るとの指摘が少なくなかった。

レベル2地震動の概念や評価方法を一層明確化するために、第3次提言を最終目標とする土木建造物の耐震設計法特別委員会作業グループ(WG1)(委員長：大町達夫)と調査研究を主眼としたレベル2地震動研究小委員会(委員長：大町達夫)が設置され、両委員会が協力して、調査検討を行ってきた。その検討結果の報告および一般発表、特別講演、パネルディスカッションが午前9:30から午後5:00まで、6時間半にわたって行われ、参加者は定員を上回る125名に達し盛況であった。

午前のセッションはWG1の特別委員会報告とし、特別委員会の活動と成果の概要：大町達夫委員長(東京工業大学)、対象とすべき地震の選定：石川裕(清水建設)、震源断層を想定した地震動の評価：江尻讓嗣(大林組、レベル2地震動の下限基準：武村雅之(鹿島建設)、M6.5地震による震源近傍地震動の検討：江尻讓嗣(前述)の各委員が報告を行い、討議を行った。特別委員会報告の主な論点としては、

1)地点ごとに対象とする地震を選定し、地点固有の特性を反映させた地震動を評価することを原則とすること(source specific, path effect, site specific)

2) 頻度より強度の要件を優先させてレベル2地震動を設定することを基本としたこと、3)マグニチュードM6.5程度の直下地震による地震動をレベル2地震動の下限として設定していること、の3項目であった。とりわけ新たな項目は「レベル2地震動の下限基準」についての提案である。地表面に活断層として痕跡を残さない地震の規模としてM6.5で線引きを行った。M6.5の根拠として地殻内地震の発生層(コンラッド面以浅)の地殻構造的な理由、被害地震の規模の分類等を示した。

討議において、会場から「地震の規模が小さくても、繰り返し被災を受けた場合、地表面に傷跡を残すのではないか」との質問を受け、歴史地震には例外的なものもあるが、M6.5を境に現象が変わることも重要な事実である。そもそも地表面に残る痕跡の同定の精度をあげること、痕跡と地震の実体である地下にある震源断層との関係を明らかにすることなど基本的な課題も残されており、今後の研究の進展が望まれるとの意見が出された。

上記2)に関しては、「設計が費用対効果を含めた意思決定を伴う行為である以上、設計用地震動としてのレベル2地震動と頻度との関係を明示することを避けて通ることはできないのではないか」という意見がだされた。また、これに関連して、「地震危険度を確率論的に評価する立場からだけでなく、設計者（受け手）も交えた頻度に関する議論の場が必要」との指摘がなされた。

また、「地震動評価に必要なパラメータの現実的な値とは何か、結果のばらつきを設計者はどう扱えばいいのか、それらについてすでに検討しているか、あるいは今後検討する予定はあるのか」との質問があり、ばらつきの検討事例が紹介されるとともに、パラメータの設定の標準化にむけて今後多くの努力が傾注されるべきとの回答が示された。

さらに、「米国の vision2000 では4つの地震荷重レベルを設定しているが、今後の性能規定化の流れに対応してレベル1とレベル2の間にもさらにレベルを考えることはあるのか」との質問に対し、今回はまずレベル2を明確にすることが主眼であり、現段階では2段階設計を念頭に置いているとの回答があった。また、今回の提案と建築学会等におけるレベル2との整合性について質疑があり、これについては今後の課題であるという認識で一致した。

午後の一般発表では、計測震度を指標とした全国の地震危険度解析：奥村俊彦(清水建設)、日本全国の地震危険度に関する統計的検討：安中正(東電設計)、将来発生する地震動の理論的予測方法の提案：赤尾嘉彦(赤尾地震工学研究所)、震源断層の破壊過程に基づく入力地震動の位相スペクトルの推定：山下典彦(神戸市立工業高等専門学校)、観測波を用いたレベル2地震動の位相特性のモデル化：室野剛隆(鉄道総合技術研究所)の5編の発表に基づき議論した。一般発表の主旨は、当該分野への関心が強い方々と意見や関連情報を交換し、重要な判断や意志決定の根拠などを共有することで、今後の課題発掘や技術高度化等の面で有益であるとの見地からのものである。一般発表は、大別して統計・確率論的観点からの2編と断層モデルに基づく地震動策定技術の3編に分けられる。前者の講演に対し、会場から「地震発生頻度の決定は、設計者として判断するのは困難ではないか」との意見を受け、確率論的地震危険度評価の現状の議論が行われた。また、この問題に関しては、どの機関が決定するかは対象構造物により異なり、設計においての再現期間を確率論的議論として位置づける重要性の社会的啓蒙が必要と結論づけた。後者の講演に対し、会場から「モーメント・レート関数をグリーン関数とする一般的な手法に対し、同関数から基盤入射波の位相スペクトルをモデル化する目的」および「位相特性のモデル化の必要性」に議論が集中した。

また、設計の実務を視野に入れた設計基準改訂の関係者による特別講演をお願いした。講演者は、港湾構造物の新しい耐震基準：山本修司(運輸省港湾技術研究所)、鉄道施設における改訂基準のレベル2地震動への対応：西村昭彦(鉄道総合技術研究所)の各氏であり、基準策定のバックグラウンドとなった検討事項も含め、ご講演いただいた。港湾施設においては、レベル2地震動は、耐震強化施設に対してのみ限定されるものであり、港湾施設が災害時にはたす役割、レベル2地震動の設定に地域防災計画の考慮が必要であることの指摘があった。鉄道施設においては、構造物の損傷程度に基づく性能を設定しており、実質的な最低基準であるスペクトルIから、活断層や伝搬経路を考慮した詳細な地震動評価手法に基づくスペクトルIIIまで、複数の方法による地震動の設定が可能であることに重点を置いて講演いただいた。

パネルディスカッションは、WG1の講演者および特別講演の両氏にパネリストとして参加

いただいた。討議内容は、1)地球物理からパラメータを決定できるか、2)当該解析における信頼性（バラツキ）の問題、3)下限基準と現行の設計スペクトルとの関係、4)地震の発生頻度も含めた確率論手法の考え方、5)地震動と構造物の応答特性の関係、6)レベル2地震動における地域別係数の必要性等が議論された。1)に関しては、兵庫県南部地震以降活断層調査が数多く行われているが、その多くは活動履歴の把握に主眼が置かれている。今後は地震動予測の各種断層パラメータの設定にも活用し得るよう、必要な情報を使う側が整理して活断層調査に反映させる必要がある。実際には強震記録を地震動策定シミュレーションへの適合を重ね、最も起こりやすいケース、組み合わせを考えることが重要である。2)に関しては、過去の地震の中で平均的なもの、つまり最も起こりそうな地震動とは何かを検討していくことである。これまでに発生した地震の詳細なパラメータについては、まださほど多くの事例が集まっているわけではないが、これらに基づいて統計的な性質を把握する試みはなされており、これらが参考になると思われる。3)に関しては、今回の下限基準のスペクトルを包絡したものは日本建築センターの工学基盤でのレベル2地震動に相当している。4)に関しては、入力（荷重）の設定だけの問題ではなく、設計のクライテリアとの兼ね合いで決めるものであり、入射波、地表面応答、構造物応答、リスクの個々の問題に関し、分類し整理していく必要がある。5)に関しては、報告書では「同一地点でも構造物によって対象地震が異なることがある」としているが、構造物によって変える必要があるかとの会場の質問に、周期が比較的狭い幅にある鉄道構造物では、変える必要はないとの考えもあるが、液状化のように継続時間の影響が強いものも存在する。6)に関しては、レベル2地震動に地域係数が必要か、またそれはレベル1と同じものでよいのか、特別委員会の報告書では下限基準は全国一律となっているが、地域差は設ける必要がないのか、との意見があったが、当委員会での下限値はある地点でのsite specificを含む例示であり、検討する地点でのsite specificを含む下限値である必要がある。

なお、シンポジウムを通じて明らかになった残された課題は、今後、当委員会で整理し、委員一丸となって工学的手法の確立に貢献していくことでシンポジウムを締め括った。

(大角恒雄)

## 5.2 最近の地震で見られた現象

台湾・集集地震は、1999年8月17日に発生したトルコ・コジャエリ地震の約一ヶ月後、1999年9月21日に発生した。この地震による被害は極めて甚大であり、家屋の倒壊棟数およそ七千数百棟をはじめとする多数の土木・建築構造物被害、さらに死傷者10000人余に及ぶ人的被害をもたらした。集集地震の地震規模は、他の地震と共通の評価指標であるモーメントマグニチュード(Mw)で表すと7.4-7.6であり、トルコ・コジャエリ地震の7.4、兵庫県南部地震の6.9より大きな値となっている。また、この地震では、台湾全土で700地点を越える高密度に配置された強震観測網の70%の観測点で強震記録が得られ、被災機構また震源機構の解明への貢献が大きく期待されている。

集集地震による被害は断層変位に起因する被害と地震動の特性に起因する被害の2つに分けられる。前者の被害形態は今後の我が国における耐震設計において断層変位に対する配慮が必要であることを示している。後者の地震動についても、我が国における設計基準類を見直す契機となった1995年兵庫県南部地震と地震発生機構が異なることからその特徴と被害の関係を明らかにすることは重要であるといえる。ここでは、集集地震における断層変位また地震動の特徴と被害の関係、さらにその課題について、土木学会の現地調査、及び調査団によりとりまとめられた調査報告書<sup>1)</sup>をふまえて示す。

### 5.2.1 断層変位と被害の関係

台湾を取り巻くプレートは、ユーラシアプレートに東からフィリピン海プレートが沈み込む形状となっている。集集地震はユーラシアプレートが沈み込む際のプレート境界の変動に起因して、図-5.2.1に示す車籠埔断層（北は大甲溪を基点とし南の濁水溪までの断層）が動いたことにより発生したとされている。この断層系は逆断層系であり、東側の地殻が約30度の角度で西側へ乗り上げる、つまり車籠埔断層の東側の地盤（上盤側）が上昇する形状となっている。地表に表れた地盤の上昇量は最大値は約6.5m、平均すると1-4mであり、顕著な事例を石岡ダム右岸の7m程度の段差を伴う被害に見ることができる(写真-5.2.1)。

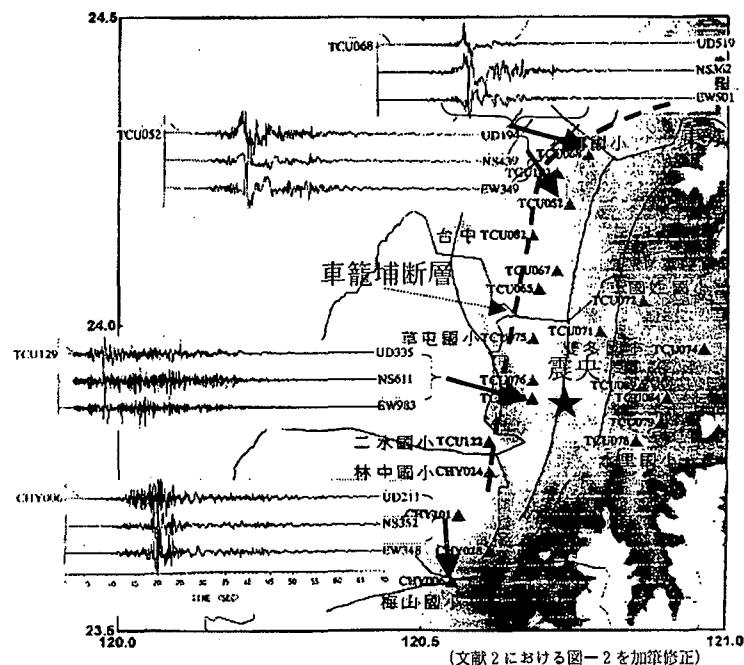


図-5.2.1 断層位置及び震央の南北位置における加速度時刻歴

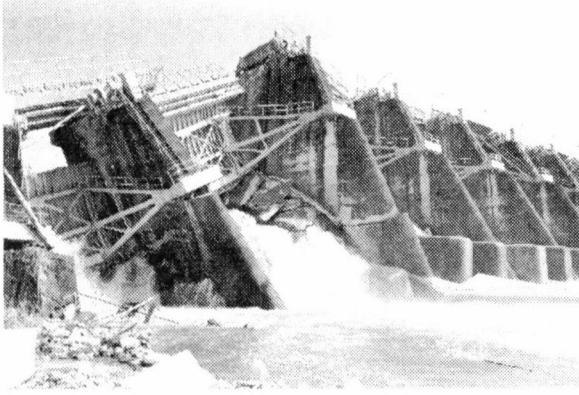


写真-5.2.1 断層変位による石岡ダム<sup>2)</sup>の損傷

これら橋梁は台湾の現行設計基準では比較的地震危険度が低いとされる第2区に属しており、設計用応答加速度は0.23gで設計されている。

### (1)交通施設の被害

断層変位に起因して被災したと推定される橋梁の被災形態は次の2つに大別する事ができる。

- ①断層変位位置に橋脚等の構造物が存在し被災した
- ②断層変位に伴う周辺地盤の変状により被災した

①の事例として石岡ダム下流に位置する碑豊橋の被災状況を示す。碑豊橋の右側に見られる滝は2-3mの段差を伴う断層が河川を横断することにより生じ、その断層の延長上にあるアバットの变形により床版が落下している(写真-5.2.2)。他の床版や橋脚には損傷が殆ど見られないことから、断層に起因する損傷であると推測されている。

②の事例として烏溪橋の被災状況を示す。烏溪橋は上下2橋からなり、P2及びP3橋脚の間に断層に起因する1.5m程度の段差(写真-5.2.3)及び水平方向のずれに起因し、1つの橋では橋脚に破壊は生じたものの桁の落下は生じていない。一方、他の橋は橋脚の損傷は他の橋に比べ軽微であったが、桁の落下が生じていた。これら2つの橋脚の被害形態の差異を明らかにすることは、今後断層変位に対する橋梁構造物の構造的対処を考える上で重要であることが指摘<sup>3)</sup>されている。



写真-5.2.2 碑豊橋の被害

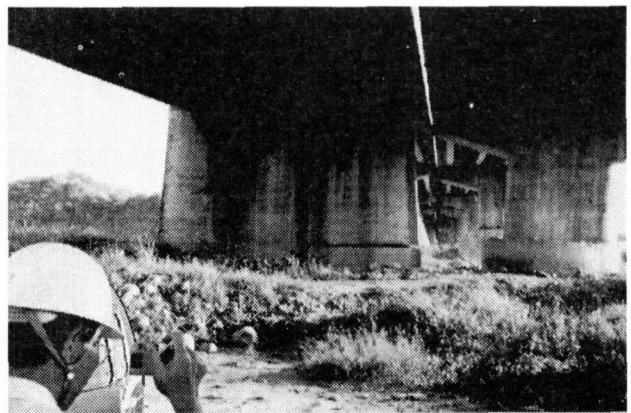


写真-5.2.3 烏溪橋におけるP2及びP3橋脚間に生じた地盤の段差

次に、道路部の被害は主に断層変位に起因する段差、及び斜面崩壊に起因する道路部の崩壊や寸断による

ものであった。特に断層の北部では段差も大きく、救援のための物資輸送が可能な道路が寸断され、救援が遅れたことなどが報告されている。また、台湾は斜面傾斜が約 $20^{\circ}$ 以上を有する地域の面積が国土面積の53%を占め、1000haを越す地滑り地が存在することが従来より指摘されている。集集地震においても、概ね震央より60kmの範囲内の山地に総土量が3億 $m^3$ 程度大規模地滑りを含む多数の地滑りや斜面崩壊が発生していた。それらに起因して、多数の道路の崩壊や寸断が生じていた。

(by Konagai)

## (2)トンネルの被害

トンネルの被害としては、断層変位に起因する被害として石岡ダムと豊原浄水場を結ぶ導水路トンネルの破壊(写真-5.2.4)、NATM工法による鉄道トンネルである三義第一トンネルの覆工コンクリートの陥落や軌道変状などが生じていた。道路トンネルについては、台湾中部における東西を結ぶ重要な道路である中部横貫公路をはじめ調査可能な道路において坑口周辺地山の崩壊や坑口部に損傷は認められたものの、その損傷は軽微であった。



写真-5.2.4 断層変位による導水路トンネルの破壊<sup>2)</sup>

## 5.2.2.地震動特性の特徴と被害の関係

まず、観測された記録の特徴を把握するため、震源近傍及び車籠埔断層の北側及び南側の4地点で観測された加速度記録の時刻歴波形をUD,NS,EW成分について図-5.2.1に合わせて示す。震央に近い観測点(TCU129)は集集の西方約13.2kmに位置し、各成分の最大加速度(gal)はEW成分が983.0、NS成分が610.7、UD成分が335.0となっている。この波形には、短周期成分の卓越、継続時間の比較的長い傾向が認められる。一方、震央より南側の観測点(CHY006;震央距離65.4km)では、短周期成分が卓越しているという点では震央近傍と共通であるが、継続時間が短いことが認められる。また、震央より北側の2つの観測点(TCU052;震央距離39.2km、TCU068;震央距離47.6km)では、震央からの距離が長くなるにしたがって長周期側へ卓越振動数が移動している傾向が認められる。特にTCU068の記録はパルス的な波形になっていることが分かる。以下に、地震動特性の特徴と地震被害の関係を示す。

①震源近傍で1Gを超える記録が観測され、断層の上盤側(断層より東側)の地震動が下盤側より大きい：

図-5.2.2に示す最大加速度(EW成分)の分布に認められる様に、同程度の最大加速度を有する範囲が強度の高い地域の東側に広がりを持っている。これら地域は断層の上盤側に位置している。また、それら地域内の集落である集集、中寮、國姓、埔里で低層のRC建物(写真-1)を始め、家屋などに多くの被害が生じていた。

②長周期成分の強度が大きい：

震央より約30km程度北側に位置する台中市にある国立中興大学の構内で観測された記録の水平成分に関する加速度及び速度応答スペクトル( $h=5\%$ ;水平2成分の合成スペクトル)を図-5.2.3に示す。図中には1995年兵庫県南部地震において、ポートアイランドの地中GL-83mで観測された記録のスペクトル特性も合わせて示した。両記録の最大加速度は、国立中興大学のEW成分が359.4galとポートアイランドの記録の約5割程度の値となっているが、周期2.0秒以上の長周期領域にて加速度及び速度応答スペクトルとも国立中興大学の記録が大きな値となっている。台中港における糖蜜タンク、長大斜張橋である集集大橋の被害はこの様な地

(Provided by Prof.Loh)

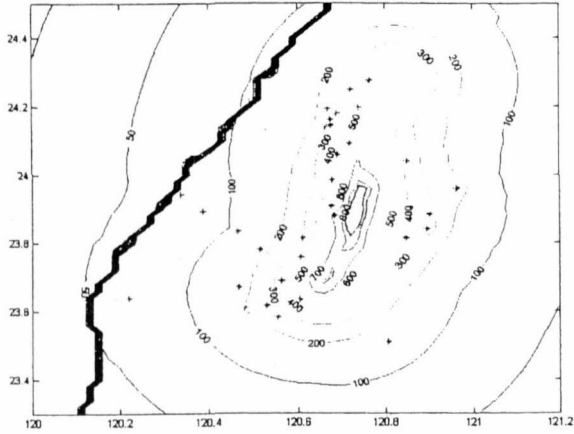
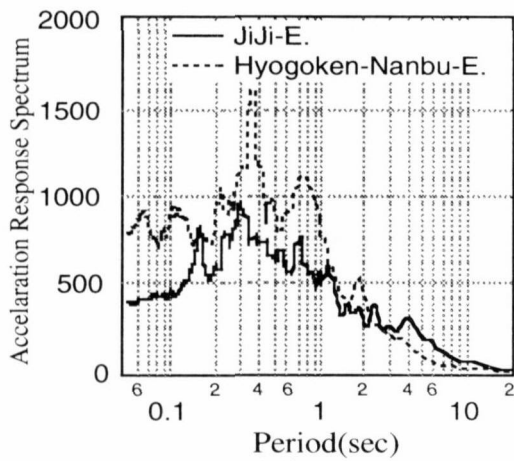


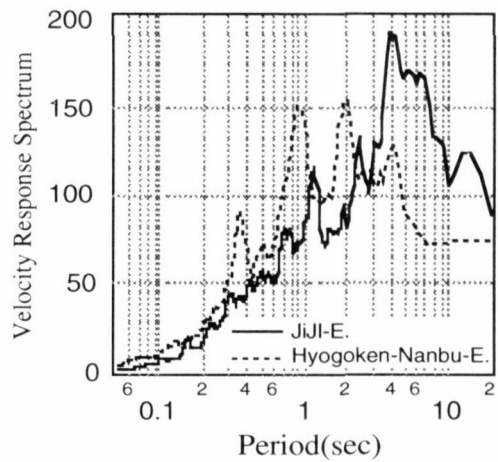
図-5.2.2 地表における最大加速度分布(EW成分)



写真-5.2.5 中寮における低層RC建物の被害



a) 加速度応答スペクトル



b) 速度応答スペクトル

図-5.2.3 加速度・速度応答スペクトルの比較(h=5%)

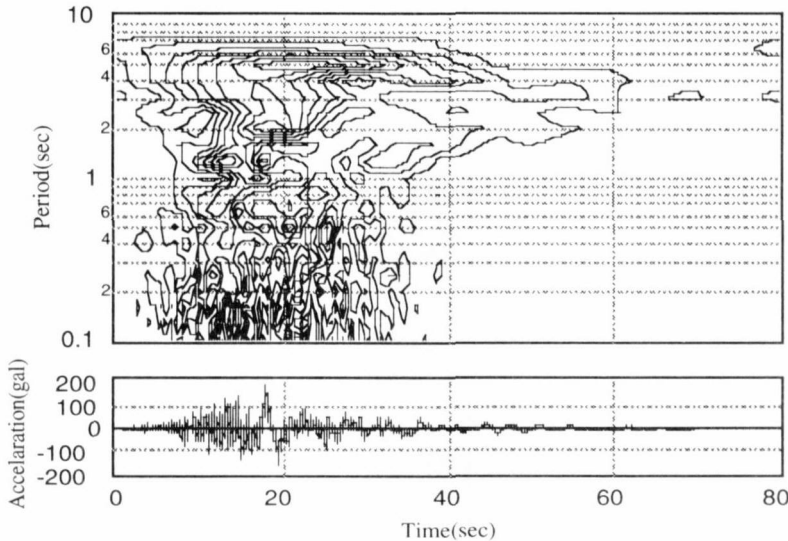


図-5.2.4 国立中興大学で観測された上下動成分の非定常スペクトル

震動の長周期成分の影響に起因して生じたものと推定される。さらに、国立中興大学の構内で観測された上下動の記録の非定常スペクトルを図-5.2.4に示す。これより、周期4.0秒から6.0秒にて、分散性波動の影響と考えられる非定常性が強く認められることが分かる。

これらの特徴は我が国で生じた同様な震源機構を有する地震，例えば岩手県内陸北部地震(1998)<sup>4)</sup>における地震動特性にも認められている。集集地震と同様な震源機構を有する地震動を評価する上で，その様な既往の地震に対する分析も合わせて行うことが重要であると考ええる。

### 5.2.3 地震動特性に関する工学的課題

先に示した地震動の特徴は，地震規模の大きな逆断層系の震源機構を有する地震の一般的な特性と言えるものである。それら以外で地震被害と関連性を有していると考えられる地震動特性を課題として以下に示す。

#### (I)断層近傍の地震動特性:

断層変位により被災したと推定されている碑豊橋,烏溪橋等には震動による顕著な被害が認められていないが，断層近傍に位置する豊原上水場のフラットスラブ構造を有する配水池において，柱が天井版を突き抜け，天井版が落下するという被害が生じていた。構造物の震動特性との関係で地震動の特性を評価する必要があることは言うまでもないことであるが，これらの被害は断層近傍では地盤変状のみならず地震動特性の評価も重要であることを示唆しているものと考えられる。

#### (II)台中港における液状化と地震動特性:

台中港内では強震記録が得られていないものの周辺での観測記録より，地表での最大加速度が100-150gal程度の地盤震動が生じていたものと推定されている。地盤の液状化また岸壁の変状などの被災機構を解明する上で，従来の実体波に対する被害形態のみならず先に示した分散性波動の係わりなども検討の必要があると考える。

最後に，国立中興大学構内での観測記録は林其璋教授の提供によるものであり，記して感謝の意を表します。

(中村 晋，大角恒雄)

#### 引用・参考文献

- 1)土木学会編，THE 1999 JI-JI EARTHQUAKE, TAIWAN -Investigation into Damage to Civil Engineering Structures-,1999.12
- 2)中村晋,大角恒雄,1999年台湾・集集(Ji-Ji)地震被害調査速報,土木学会誌,pp.91-94,1999.12
- 3)運上茂樹,烏溪橋の被害(1999年9月21日台湾集集地震)に関する一考察、第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集,1999.12
- 4)S.Nakamura et al,Damage due to Northern Iwate Prefecture Earthquake,September 3,1998,Earthquake Geotechnical Engineering, Vol.2,pp.785-790,1999



### 5.3 強震動予測の高精向上にむけて

構造物の設計用入力地震動評価には、将来建設サイトに来るべき強震動を予測し、その結果をベースに考える必要があるということは、万人が認めるところである。このため、そのような考え方はある種の理想型として以前から工学者の頭の中にもあったと思われる。しかしながら、肝心の将来発生すべき地震の想定や、それによる強震動の評価に関する学問のレベルがそれに追いつかず、設計サイドからの評価過程の簡便さの要求も相まって、過去の数少ない経験を参考に、いわゆる工学的判断が多用されてきたのが現実である。

一方、1995年兵庫県南部地震以後、内陸の地殻内で発生する地震の驚異が再認識され、被害の主たる原因となる強震動の解明および予測の重要性が指摘されるとともに、従来の設計用入力地震動の評価法に疑問が投げかけられ、より理想型に近い形の評価が追求されつつある〔たとえば、香川・他(1998)、科学技術庁(2000a)〕。

しかしながら、強震動予測のレベルは、近年急速に向上しているとは言え、多くの問題点を今なお、抱えていることも事実である。ここでは、活断層に起因する地震に対する強震動評価の現状の問題点を列挙し、強震動予測に関する研究の今後の方向性としていたい。

一般に、強震動の予測には、どこでどのような地震が発生するかということと発生した場合にどこにどのような震動がもたらされるかということが必要である。前者に対しては、現在の地震活動や地震の発生機構に関する研究をベースに、歴史地震研究や活断層調査研究の成果を総合的に判断する必要がある〔島崎邦彦(1995)〕。一方、後者に対しては、震源が特定された場合にその周辺地域の地下構造のモデル化ならびに詳細な震源モデルの設定が必要である〔香川・他(1998)〕。

#### (1)活断層調査と成果の活用

兵庫県南部地震以後、地質調査所が中心となって、全国の主要活断層に対して調査が行われている。また、科学技術庁の地震調査研究交付金制度の発足により、活断層調査は地方自治体においても行われつつある〔杉山(1996)〕。

活断層調査の成果を地震防災上の観点からここでは2つの要素に分けて考える。一つは、活断層の空間的分布に基づく大地震の発生位置の予測、もう一つは活動履歴に基づく大地震の時間的発生予測の問題である。

活断層の分布はすでに活断層研究会(1987)が全国の活断層についてまとめている。しかしながら、そこでは、地震の規模が小さく、地表に痕跡を残さないものを除いても、以下の2点について見落としがある可能性がある。一つは平野の堆積層下に伏在する活断層である。過去の例でも、1948年の福井地震( $M=7.1$ )のように死者4000人近くを出した大地震であるにも係わらず、発生場所が福井平野の下であったために、発生後地殻変動データ等から地震断層の位置が確認されているが、発生前に活断層を確認することはできなかった。このようなケースは他の平野でもあるかもしれない。このような点を考慮し、東京、名古屋、大阪の3大都市圏で反射法や重力探査さらには高密度のボーリング等を行って活断層の探索をしようとする計画が進められつつある。

もう一つの問題は活動度が低い活断層の取扱である。地表に地震の痕跡として活断層が残るの

は、自然の侵食等のスピードを地震による変動が上回る場合である。その意味で変位速度が小さい活断層程発見しにくくなる。活断層は、平均変位速度によって活動度の高いものから順に、A、B、Cと分類されている〔活断層研究会(1987)〕。明治以後の被害地震の中でも1945年の三河地震( $M=6.8$ )で地震断層が現れた深溝断層はC級の活断層で活動度は低いと言われている。また、1927年の北丹後地震( $M=7.3$ )で地震断層が現れた郷村断層もB-C級で活動度はそれほど高くない〔活断層研究会(1987)〕。いずれの地震でも2000人以上の人命が失われており、活動度が低い断層の取り扱いには、今後とも注意が必要である。

2つ目の課題は大地震の時間的発生予測である。地震の時間的発生予測を含む長期予測の1つの大きな柱は活断層の活動履歴の調査である。地震発生の長期予測をする根底には、地震は特定の断層で、同じような規模と同じような時間間隔をもって発生するという固有地震説と呼ばれる考え方があり〔鹿島都市防災研究会(1996)・島崎邦彦1995〕。しかしながら、最近の調査結果は、地震の発生様式がそれほど単純でないことを示している。例えば兵庫県南部地震後に行われた六甲断層系のトレンチ調査結果もこのことを物語っている。

兵庫県南部地震を起こした六甲断層系の1つ前の活動は、調査の結果1596年の慶長伏見地震( $M=7.5$ )に対応すると推定された〔栗田・他(1996)〕。しかしながら、その際に活動した断層のセグメントの大半は今回とは異なっている。六甲断層系のように、幾つかの断層が併走し、さらにその端で、他の断層系(例えば有馬-高槻構造線)に接している場合に、次の活動で何処が、何時動くかを予測するのは非常に難しいことのように思われる。また、今回の地震の神戸側の断層のように地下深部のみが活動した場合、活動履歴をどのように調査するか。地表に現れていない部分の活動履歴を調べる方法は未だ確立されていないのが現状である。

つまり、調査が進めば進ほど、固有地震説からはずれる例が多数発見されている。このような例も含めて、地震発生様式を説明できるモデルの確立が望まれる。

一方、1997年3月に日本地震学会主催で行われた大地震の長期予測に関するシンポジウムや学会会議地震予知小委員会と日本地震学会の共催で行われた地震予知シンポジウムでも地震発生様式に関する様々な問題が議論されている〔日本地震学会(1997)、平田(1997)、日本学術会議・日本地震学会(1997)〕。その中で、地震発生の予測に関する根本的な問題は、地震発生の物理、つまり何故地震が発生するかがよく分かっていないこと、また地震が発生するにいたるまでに、地殻全体にどのようにして歪が蓄積されているかの把握ができていないこと等が改めて指摘された。前者については岩石実験等基礎的研究を通じたすべりの研究が現在進行中であり、後者についてはGPS観測等により数年間で日本列島全体の変形の様子を検出しようという試みがスタートしている。これらの研究の成果は、近い将来、地震発生様式の解明に多いに役立つことが期待される。

## (2) 地震動予測の現状と課題

ある地点に来るべき地震動を予測するためには、3つのハードルを超える必要がある。一つは対象とする地震の震源モデルの作成、二番目は震源から地震動評価地点までの地下構造のモデル化、三番目は数値計算法の開発および数値計算の実行である。どの一つのハードルでも超えることが出来なければ、地震動予測は成り立たない。

第三ハードルの数値計算に関しては、近年の計算法の進展と電子計算機の進歩によって、着実にハードルは低くなっているし[たとえば瀬野(1991)]、第二ハードルについても最近全国的に関心が高まりつつある[科学技術庁(2000b)]。ところが震源モデルの作成については、第二、第三のハードルのように、簡単に高さを減じることはなかなか難しい。この原因は、将来起こる地震の震源過程を予測するという困難な問題を含んでいるからである。此の点について現状をまず整理する。

#### a. 震源のモデル化

評価の対象とする地震が決まった時、その震源をモデル化する必要がある。地震は地下における断層(震源断層)により引き起こされるもので、震源モデルの作成はその断層のモデル化に他ならない。モデルを構成するパラメータは、一般に走行 $\theta$ 、傾斜角 $\delta$ 、食い違い方向 $\lambda$ 等、断層のタイプを決めるパラメータと、断層の長さ $L$ 、幅 $W$ 、すべり量 $D$ 等、断層の規模を決めるパラメータ(断層パラメータ)に分類される。

対象とする地震と同じ場所で、過去に同様の地震が発生している場合には、その地震に対するパラメータを参考に、対象地震のパラメータを決めることができる[佐藤(1989)]。一方で、日本で近代地震学が始まって約100年しか経っていないため、それ以前の地震やそれ以後でも十分なデータが無い地震については、断層パラメータが評価されていないものが沢山ある。

しかしながら日本では地震活動が大変高く、中小規模地震は頻繁に発生している。これらの地震は近代的な地震観測網で短期間に多数観測することができる。このため先に述べたように断層タイプの地域性はかなりよく分かっている[萩原(1991)]。また、内陸については、活断層調査も精力的に行われており、これらの結果も断層タイプの地域性を知る上で重要な役割を果たしている[活断層研究会(1987)]。

断層のタイプが決まると次に決めるべきは、その規模である。先に述べたように普通は対象地震のもう一つ前に発生した地震の断層パラメータが分かっていることが少なく、例えばその地震が歴史上発生した地震であれば、マグニチュード $M$ 、活断層に発生が予測されているとすれば、活断層のデータから断層の長さ $L$ や時にはすべり量 $D$ が推定されている程度である。

実際の地震に対し、断層パラメータが相互に何等関係なくバラバラであるとすれば、地震の震源特性には何等規則性がないことになってしまい、地震動の予測はさらに困難になる。しかしながら、幸いにしてこれらのパラメータ間には平均的に一定の規則性があることが見いだされている[佐藤(1989)、Geller(1976)、武村(1998)]。いわゆる断層パラメータの相似則がそれに対応し、相似則の仮定をもとにすれば、1つの断層パラメータから、全てのパラメータを経験的に推定することが可能である。

ここまでで述べたモデルは断層すべりを均質に捉えたモデルである。このようなモデルは、長周期領域の地震動の評価に対しては有効であるが、工学的に重要なやや長周期領域や短周期領域ではさらに複雑な断層のモデル化が必要である。その事は、過去の地震に対し地震動や地殻変動のデータから求められる断層面上の食い違い分布からも良く分かる。1995年兵庫県南部地震では2ないし3個所のすべりの大きい部分があり時間的なすべりの変動も詳しく分かっている[たとえば

鹿島都市防災研究会(1996)、Yoshida and Kouketsu(1996)]。

このように、過去の地震についてはそのデータに応じてすべり分布やその時間的変化を詳しく評価できるが、来るべき地震に対し、予めすべり分布を予測することは困難である。この点については今のところ過去の地震の結果から統計的にすべり分布が検討されはじめたり、活断層の形状から破壊開始点の推定が試みられはじめた段階 [たとえば科学技術庁(2000a)] で、将来に渡り、それらの予測が可能になるかならないかの見通しはまだ立っていない。従って現状ではすべり分布等を色々変えて、評価される地震動がどの程度変動するかを見ることが次善の策と考えられる。

Takeo and Kanamori(1997)は1923年の関東地震に対して、すでに分かっている断層タイプと断層規模を決める5つのパラメータを固定して、断層のすべり分布と破壊の進み方を様々に変動させて、東京における地震動を評価し、評価結果に約10倍の幅が生じることを示している。今後の地震学の進歩によって、将来同じように関東地震が発生した場合、どのようなケースが最も起こり得るかの検討が進くことも予想されるが、当面は予測に関しかなりのバラツキを覚悟する必要がある。

#### b.過去の被害地震に対する経験とその活用

設計用入力地震動の設定にあたり、上記のような現状を極端に言えば、経験的に有りそうも無いほど大きな地震動レベルを設定しても、これを超える地震動が来る可能性をゼロとは断定できないということである。一方、設計用入力地震動のレベルは、人間の社会活動の中で位置づけられるものであり、たとえそのレベルが将来起こる地震の全ての可能性を包絡し、将来の地震に対し完璧なものであっても、人間生活や社会活動を著しく阻害するものであっては意味が無い。つまり、設計用入力地震動のレベルは社会的コンセンサスの上に成り立つものであるという点も考える必要がある。

地震学の分野からこのような社会的コンセンサスを考える時、支えになるのは、やはり過去に起こった地震に対する経験ではないだろうか。先に述べた関東地震の例で言えば1923年の大正関東地震や時には1703年の元禄関東地震の経験が重要な規準となる。また六甲断層系では、いうまでも無く1995年の兵庫県南部地震の経験が規準になる。一方、過去に同じような地震の経験がない場所では、異なる地域で発生した同様のタイプの地震から導き出された経験則が重要な意味を持つかもしれない。つまり、断層モデルによる地震動予測の不確定さを補う上で過去の地震による被害の経験の重要性は、より大きなものとなってきたと言える。

武村・他(1998)は、明治以後に発生し、死者1000人以上を出した内陸の浅発地震と死者は1000人以下でもマグニチュード $M$ が7以上で地表に地震断層を残したかまたは断層の位置が推定されている地震に対し、震度VIIの空間的な分布を調べ次のような結論を得ている。

- ①震源断層のある領域が平野や盆地の下またはそれらに接している場合、震度VIIの領域は、平野・盆地に大きく広がり、時には平野全体が震度VIIとなることもある。これに対して山地では、断層を挟み最大で幅10km程度しか震度VIIにはならないし、鳥取地震や兵庫県南部地震のように、時には断層直上でも震度VIIにならないケースもある。
- ②震源近傍での震動の卓越方向は、横ずれ、縦ずれを問わず断層走行と直交方向になる場合が多

い。この震動が震源近傍での被害を大きくする重要な要因と考えられる。

③逆断層の場合の上盤で地震動が下盤より大きくなることや、破壊伝播方向で地震動が大きくなる効果は、地盤の影響に比べそれ程強くない。前者は三河地震で、後者は兵庫県南部地震でそれらしい傾向が見えるが、両地震とも地盤構造の影響の方がより顕著に現れている。

このように、過去の被害地震の調査結果だけからでも震源断層の位置が決まれば、およそこの地域が震度VIIの強震動に見舞われ、どの向きの震動が強くなるかが推定できる。

更に詳細な地震動予測をする場合は、断層モデルを用いた予測計算が必要になることは言うまでもないが、その場合でも計算の信頼性を高めるためには、過去の被害地震のシミュレーションは欠かせない。そのためには、過去の被害地震に対して残された地震記録を有効に活用し、震源過程の解明を行うこと[たとえば武村・浜田(1996)]や地震が発生した地域の地下構造の調査[たとえば阪神地域活断層調査委員会(1996)]が必要である。つまり、過去の地震被害の記録や観測記録は、断層モデルによる計算結果の不確定さを補う重要な役割をもつことを再認識し、地震関連のデータを確実に後世にバトンタッチできるようなシステム造りが急務である [科学技術庁(2000a)]。強震動予測において経験的方法と理論的方法の優劣を議論することがよく行われるが、その前に、両者の協力無くしては、説得力のある地震動予測は決してできないことを理解すべきである。

#### c.地下構造探査の重要性

兵庫県南部地震は、我々に改めて強震動に対する地盤構造の影響の大きさを見せつけた[たとえば, Takemura and Tsuji(1995)]。神戸では、地下の震源断層が存在すると考えられている六甲断層系を挟み北側の花崗岩が分布する地域では被害が少なく、南側での堆積層の厚い地域はいわゆる震災の帯と呼ばれ大きな被害を出した。また海岸線に沿う埋め立て地域では表層の軟弱層の液状化が主な原因となって地震動の振幅が押さえられ住家の全壊等の被害が軽減されたと言われている [たとえば時松・他(1997)]。

地震後、行われた詳細な地下構造探査[たとえば阪神地域活断層調査委員会(1996)]の結果はこれらの強震記録の差を見事に説明している。永野・他(1997)は、断層に直交する複数の異なる断面を地下構造探査の結果に基づきモデル化し2次元FEMの解析を行い、神戸地域での地震基盤相当での地震動を求めている。その結果、震源の影響が異なるにも係わらず、場所に関係なく、速度で50-60cm/s、加速度で400gal程度の強震動であったことが推定されている。川瀬・林(1996)は、同様の解析を神戸海洋気象台の強震記録を用いてさらに西方の三宮の断面で行っているが、この場合も地震基盤での加速度、速度はほぼ同様の結果を与えている。これに対し、大阪層群上部での加速度、速度の分布を求めると、場所により結果が大きく異なり、いわゆる震災の帯に対応した部分に地震動のピークが生じることがわかる。つまり大阪層群は高層ビル等各種建造物の支持層となるいわゆる工学的基盤であるが、強震動の大きさを左右する地盤の影響としては、これ以深の地層の影響も無視できないことを示している。

以上の結果は、地震動に対する地盤の影響を詳細に評価しようとする場合、少なくとも地震基盤相当の地層までの地下構造探査が必要なことを示している。同様に飛田・他(1997)は、1994年三陸はるか沖地震の際の八戸での複数の異なる地盤条件で得られた強震記録を説明するため、地震

基盤までの地下構造を考慮した解析を行って、一定の成果を納めている。またTakemura *et al.*(1991)は、 $V_s$ が約3km/sの花崗岩層を基準に様々な堆積層上での地盤の増幅率を調べている。いずれも弾性範囲の結果であるが、1-5Hzの周波数帯で、 $V_s=1000-1600\text{m/s}$ の中生代から古第三紀層で1-3倍、 $V_s=500-800\text{m/s}$ の新第三紀層で2.5-10倍、 $V_s$ が約450m/sの更新世の地層で4-15倍、 $V_s$ が約200m/sの完新世で20倍程度の増幅率を求めている。地震基盤までの深い堆積層の影響は、やや長周期地震動との関連で議論されることが多い[たとえば山中(1990)]が、1Hz以上の高周波成分にも無視できない影響があることが分かる。

地震基盤までの地下構造探査は、最近まで関東平野および大阪平野等一部の地域でしか実施されていなかった[たとえば、岩田(1996)、山中(1990)]。わが国では人口の大半が堆積平野上に密集しており、堆積平野の地下構造探査は伏在断層の調査とともに地震動予測の第一歩として必要不可欠なものである。幸い、1998年より、全国的に堆積平野の地下構造調査のプロジェクトが動き出した[科学技術庁(2000b)]。このプロジェクトの進展が大いに期待される。

設計用入力地震動を考える上での基本事項として強震動予測の現状と将来の方向性を考えた。地震発生の予測については、発生場所の情報は現状でも活用性が高いが、発生時期についてはその精度が低く慎重な取扱いが必要である。その原因の大本は地震発生の物理が未解明であることと日本列島に対する歪の蓄積過程に対する情報が不足していることが上げられる。

一方、震動の予測については、先ず、予測精度を高めるために地震基盤までの地下構造探査を進める必要がある。特に人口密集地帯である堆積平野下の探査は伏在断層の調査も含め早急に実施すべきである。しかしながら、ここでも震源に関連し、現状、来るべき地震の震源過程を予測しなければならないという困難な問題がある。このため、予測結果の大きなばらつきは避け難い。

このような場合、過去の被害地震に対する経験は有用である。できれば理論的に想定される様々なケースの計算結果を用いて経験や経験則から導き出される結果を解釈し、それらに基づいて強震動レベルを設定する。このことは、学問的にも社会的にも合理的な強震動予測を実現するための最も確実な方法であると思われる。もちろん、将来、地震の震源についての問題等が解決されれば、天気予報で実施されているような数値予報により、あまり経験に頼らず、地震危険度予測を行うことも可能になるかもしれない。しかしながらその道のりはまだ長そうである。

(武村雅之)

#### 参考文献

粟田泰夫・寒川旭・杉山雄一，1996，有馬－高槻－六甲断層帯のセグメント分布と1596年慶長伏見地震・1995年兵庫県南部地震，日本地震学会講演予稿集，No.2，A45.

Geller, R, 1976, Scaling Relation for Earthquake Source Parameters and Magnitudes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 66, 1501-1523.

萩原尊禮編，1991，日本列島の地震－地震工学と地震地体構造，鹿島出版会，215 pp.

平田直，1997，大地震の長期予測はどこまで可能か？，日本地震学会シンポジウム報告，日本地震学会広報紙ないふる，No.2，1-2.

- 岩田友孝, 1996, 大阪盆地の地下構造と地震動, 第24回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, 5-20.
- 阪神地域活断層調査委員会, 1996, 阪神・淡路地域活断層調査報告書 (平成8年3月)
- 鹿島都市防災研究会編著, 1996, 大地震と都市災害, 都市・建築防災シリーズ, 鹿島出版会, 128pp.
- 科学技術庁, 2000a, 第1回地震調査研究と地震防災工学の連携ワークショップ-地震動予測地図の作成に向けて そのあるべき姿と地震防災工学への反映, 82pp.
- 科学技術庁, 2000b, 第1回地下構造調査成果報告会予稿集, 85pp.
- 香川敬生・入倉孝次郎・武村雅之, 1998, 強震動予測の現状と将来の展望, 地震, 51, 339-354.
- 活断層研究会, 1987, 新編日本の活断層, 東京大学出版会, 437pp.
- 川瀬博・林康裕, 1996, 兵庫県南部地震時の神戸市中央区での基盤波の逆算とそれに基づく強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 480, 67-76.
- 額縁一起, 1991, 不整形地盤における地震動, 土木学会論文集, I-17, 1-18.
- 永野正行・加藤研一・大野晋・古山田耕司, 1997, 反射法結果に基づく2次元モデルを用いた神戸市灘地域の強震動シミュレーション解析, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, 1, 77-80.
- 日本地震学会, 1997, 大地震の長期予測はどこまで可能か?, 日本地震学会シンポジウム.
- 日本学術会議地震学研連・日本地震学会, 1997, 地震予知研究シンポジウム資料集.
- 佐藤良輔編, 1989, 日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会.
- 島崎邦彦, 1995, 古地震を探る, 古地震研究と地震予知, 古今書院, 36-52.
- 杉山雄一, 1996, 地質調査所の活断層調査・研究方針と大学の活断層研究に望むもの, 活断層研究, 15, 106-108.
- 武村雅之・諸井孝文・八代和彦, 1998, 明治以後の内陸浅発地震の被害から見た強震動の特徴-震度VIIの発生条件, 地震, 50, 485-505.
- 武村雅之, 1998, 日本列島における地殻内地震のスケーリング則-地震断層の影響および地震被害との関連, 地震, 51, 211-228.
- Takemura, M., and K. Kato, T. Ikeura, and E. Shima, 1991, Site amplification of S-waves from strong motion records in special relation to surface geology, *J. Phys. Earth*, 39, 537-552.
- 武村雅之・浜田信生, 1996, 近地観測点における1923年関東地震によるP波波形の特徴, 地震, 49, 141-168.

Takemura, M., and Y. Tsuji, 1995, Strong motion distribution in Kobe area due to the 1995 Southern Hyogo Earthquake(M=7.2) in Japan as inferred from the topple rate of tombstones, *J. Phys. Earth*, 43, 747-753.

Takeo, M., and H. Kanamori, 1997, Simulation of long-period ground motion near a large earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87, 140-156.

飛田潤・杉村義広・柴慶治, 1997, 三陸はるか沖地震と十勝沖地震の震源特性, 三陸はるか沖地震の被害と耐震設計, 日本建築学会, 13-32.

時松孝次・新井洋・浅香美治, 1997, 微動観測から推定した神戸市住吉地区の深部S波速度構造と地震動特性, 日本建築学会構造系論文集, 491, 37-46.

泊次郎, 1996, 大震災以後の地震科学と社会, シンポジウム兵庫県南部地震後の地震科学: これからの震災低減に向けて, 地球惑星科学関連学会予稿集, 68.

山中浩明, 1990, 関東平野の深い地盤とやや長周期地震動, 第18回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, 27-36.

Yoshida, S. and K. Koketsu, B. Shibasaki, T. Sagiya, T. Kato, and Y. Yoshida, 1996, Joint Inversion of Near- and Far-Field Waveforms and Geodetic Data for the Rupture Process of the 1995 Kobe Earthquake, *J. Phys. Earth*, 44, 437-454.