

地震工学

東京大学地震研究所 東原紘道

1. まえがき

被害地震は、震源の運動→波動の放射→表層の地震波→建造物の応答→建造物の損傷→被害→対応、と連なる一連の時系列であって、地震工学はその全体像の把握をめざすものである。しかし、ここでは対応の段階には言及しない。今回の経験のうち都市計画に関係することがらについては別の機会に論じる予定である。

震源と被災地の距離が離れている場合には、震源から放射される波動と被災地に入射する波動との関連は弱く、震源過程または放射される波動に関する情報の多くは、被害の予測の直接の役にはたたない。これを前提に標準的耐震規定が組み立てられている。しかし、今回のような直下地震では、震源の性質と被害とが強い関係にあるので、それを正面に据えたアプローチが必要である。そのためにはまず、地殻運動に関する地球科学上の多様な事実と意見を相互に整合的に説明できるモデルを作り、次にこれを建造物の損傷に至るまでの過程の耐震工学上の事実と大きな矛盾なく統一することが必要である。ここに筆者の関心をおく。

地震直後でなければ消滅する重要な事実や現象の観察、復旧計画の策定（設計コードの点検等を含む）のための情報収集は、救援活動に次いで緊急度の高い重要な調査である。しかし、この目的は概ね第1次および第2次調査団によって達成されたものと考えられるから、第3次調査団の役目は、先行した調査の結果等を踏まえて、より本格的な解析を進めることである。そこでそのための手がかりを拾っておくことが現地調査の目的となる。ただし、この報告では、この現地調査以外で得られた知見も織り込んで、論点を整理することにしたい。これらの論点は今後の調査で結論を与えられ、あるいは修正されることになる。

2. 調査対象となる地域と施設の被害

(1) 今回の調査対象および主な被害の態様

- (a) J R 西日本・山陽新幹線 武庫川と六甲トンネル東入り口の間 [コンクリート高架橋橋脚の損傷]
- (b) J R 西日本・東海道本線 住吉駅と六甲道駅の間 [コンクリート高架橋橋脚の損傷]
- (c) 地下鉄・神戸高速鉄道 大開駅 [中央のコンクリート柱の損傷]
- (d) 名神高速道路 西宮料金所北側地域 [コンクリート橋脚の倒壊]
- (e) 中国自動車道 宝塚インターチェンジ北側地域 [コンクリート橋脚の損傷と沈下]
- (f) 阪神高速道路・湾岸線 摩耶大橋東端から J R 神戸駅南部までの間 [コンクリート橋脚の損傷、鋼橋脚の損傷、鋼桁の支承の損傷など]
- (g) 同 神戸線 都賀川以西 [コンクリート橋脚の損傷]
- (h) 灘区、東灘区および芦屋市の市街地 [コンクリート建物の損傷]
- (i) 仁川百合野町 [斜面の崩壊]

このうち、(e)を除く(a)から(h)までは、本調査団のコンクリート構造班に合流した。調査時および事後に、コンクリートの専門家の分析方法と結論づけを聞き、討論をすることにより、被害そのものの分析結果だけでなく、コンクリート構造についての最新の知識を得るためである。被災地域は、道路・鉄道のコンクリート高架構造が広く分布していて、しかも相当に被害を受けていることから、入力地震動の程度の比較考量の指標として最適なものである。この調査は筆者にとって得るところが大きく、地震研究所において理系の研究者との学際的な議論を日常事としている者として、土木工学内部の学際的研究の意義をあらためて認識させられた。

(2) その他の調査対象と主な被害の態様

なお本調査は筆者にとっては第2次調査にあたる。別の調査において、次の地域を調査した。そこでの知見も利用する。

- (a) 淡路島北部および明石海峡周辺地域 [家屋の損傷と軽微な地変]
- (b) J R 西日本・東海道本線 神戸駅周辺および三宮駅周辺 [土木・建築構造物の損傷]
- (c) 阪神電鉄 石屋川駅と新在家駅の間 [コンクリート橋脚の損傷]
- (d) J R 西日本・山陽新幹線 六甲トンネル [コンクリートの軽微な損傷]
- (e) 国道43号線 三宮と芦屋川の間 [コンクリート高架橋の損傷と家屋の損傷]

3. 被害の状況

(1) 事後観測網の展開状況

地震発生と同時に、全国の研究者たちは、地球物理・化学観測網を展開するとともに断層の調査を精力的に開始した。地震研究所(地震予知情報センター)は、専用のメールアドレスを設け、これら研究者間の情報交換を支援した。盛時には1日300に及ぶ学術情報が流通した。外国からの登録申請もかなりあった。メールの中味の一部が報道機関に流れ、不正確な報道になったとして情報提供を中断した機関も出るなど、新しい試みにつきもののトラブルはあったものの、研究者は分刻みで更新される最新の学術情報(各研究班の所在位置や交通事情なども含む)の補給を受けつつ行動することができた。(このシステムは画期的な可能性をもつもので、土木学会でも検討に値する。)

観測または調査項目は多岐にわたっているが、そのうち工学的に重要と思われるものについて以下に述べる。観測網として大規模なものは、地震観測とGPS測地である。このうち国立大学の観測点を図1に示す。地震観測の対象にはこの他に強震動がある。さらに多数の地質学者達によって地表および海底の活断層の探索が行われた。

(2) 対象地域の広域地殻活動

まず大域的な事実を確認しておく。一般的に言って大域的なデータの分解能(どこまで局所的な事実を語れるか)には大きな制約がある。例えば広域地殻変動は、工学的に重要な局地的地殻変動をほとんど規定できない。同様に大域的な震源メカニズムは、最大加速度などの工学的に重要な強震動特性をほとんど規定できない。しかし大域的な事実は安定している(存在する多くのデータが相互に背反しない)ので、すべての考察の基礎となる重要な情報である。

そのうち地表の変形データが量的に豊富である。このソースにはGPSデータおよび合成開口レーダー画像の干渉処理データがある。いずれも人工衛星からのマイクロ波を利用

しているものである。これによると次の事実がある：

- (a) 神戸市周辺では相対的に山側（北側）が隆起し、海側が沈降している。
- (b) 淡路島西岸では相対的に山側（南東側）が隆起し、海側が沈降している。

前者は、六甲山系生成のこれまでの歴史と調和的であり、後者は、野島断層の地表面でのずれの調査結果と調和的である。またいずれも、地下での断層を反映する重力分布とも整合的である。そこでこれを基礎事実と考えることができる。

（３）本震イベントと起震断層の同定

国際的に展開された広帯域地震計の記録の長周期成分を用いたCMT解析によれば、本震は3個の主要イベントに分離される。いずれもほぼ純粋な右横ずれであり上下成分は小さいとされる。しかし別に熟練した地震学者は、第2と第3のイベントの地震波から、震源運動が顕著な上下成分をもつことを読みとっているので、変位で見れば小さいものの加速度の大きな上下運動が生じていたと考えられる（これはCMT解析の分解能では捕捉できない）。

第1のイベント（モーメントマグニチュード6.8）は淡路島西岸の野島断層のすべりに対応するものと考えられている。第2、第3（モーメントマグニチュード6.3と6.4）は本州の断層運動と考えられるが、これらをいずれの断層に同定すべきかの情報を与えるだけの位置の精度はない。

特に大きな被害を与えた第3の断層運動の位置標定については、大きく二つの見解がある：

- (a) 既往の活断層群よりも海側（後述の激甚被災ベルト地帯の直下あたり）に、これまで認定されていなかった有力な断層が存在し（提言者に倣って神戸・西宮未確認断層と呼ぶ）、これが今回運動した。
- (b) 神戸市北方の六甲山系に存在する既知の断層系の運動である。

未確認断層の有無は、今後の都市計画に重要な違いをもたらすもので、検討を要する。地震予知連絡会は、(a)の神戸・西宮未確認断層が震源となった可能性を否定した。その主な根拠は、神戸大学でのGPS観測記録の水平移動が数cmしかなく、神戸・西宮未確認断層が（CMT解その他の地震学的資料が示す）1mオーダーのすべりをしたとすれば生じるであろう地表の変動量はこれと整合しないということのようである。また余震の震源がすべて既往の六甲断層系の位置に集中していることも論拠とされている〔図2〕。

しかし、地殻内のすべりによる地表面変位の計算には強い仮定が含まれており、断層面の曲率など3次元構造をもっと正確に把握する必要がある。余震の震源位置と断層位置の関係にも同じことが言えるので、工学の関心からすれば、未確認断層の仮説を棄却するのはなお危険であると考えられる。なお地質学者らは確実な証拠を得るために地盤の音波探査を計画している。

（４）構造線と余震分布

対象地域に次の3つの構造線（活断層系）を考えることができる〔図2参照〕。

- (a) 淡路島西岸の野島断層の線
- (b) 淡路島東岸の楠本断層－本州の会下山断層から六甲断層系（諏訪山断層、五助橋断層等）を結ぶ線

この二つは概ね平行である。また現在のところ情報が十分ではないが、今回の運動およ

び今後の活動に注目すべきものとして、

(c) 六甲断層系の北東端を画する有馬・高槻構造線 がある。

このうち(b)の線は、途中の海底でも断層が認められているから、連続な線であるのに対し、(a)は淡路島北端で切れていて、それ以上の北上の線は確認されていない。一般に断層の端部は応力の集中が予想され、複雑な地殻活動が予想されるところであるが、対象地域では、淡路島北端および宝塚市周辺がこれに該当する。

余震は深さ10 km前後の浅いものがほとんどであり、ほぼ上掲の(a)と(b)に沿っている。ただし、(b)沿いの余震は神戸市の兵庫区－東灘区に集中している。また宝塚市西部の狭い地域にも余震が多数発生している。

(5) 明石海峡の地殻活動

本章の(2)で述べたとおり、対象地域の広域地殻変動は表面に<そり>(warping)を生じているが、この鞍部(理論的には特異点)に当たる明石海峡の地域の地殻活動は以下のように活発であり、警戒が必要である：

(a) 兵庫県南部地震の本震そのものが発生した。

(b) 1916年11月にマグニチュード6.2の地震が発生した。

(c) 比較的大型の余震が淡路島北側で多数発生した。

(d) 明石海峡大橋の本州側基礎と淡路島側基礎が、1 m前後の水平移動および上下動を含む大きな相対運動をした。

明石海峡を上述の二つの断層線のオフセットと見る考えもある。これによると明石海峡の海底は張力場であるとの説が成り立つ。その証拠として正断層型の震源メカニズムを示す地震がここで発生していることがある。明石海峡の海底の断層については現在音波探査がなされている。(断層は確認できなかったとの報告も既にある。) このように、明石海峡は広域地殻変動の特異点であって複雑な応力場をなしており、今回の地殻運動も単純な平面断層のすべりでは現象の全体を説明することはできていない。これについては今後詳細な検討を進める予定である。

ところで淡路島北端(明石海峡大橋アンカレイジ周辺)では、明石海峡の基盤をなす和泉層群花崗岩が露出している。これのふるまいの計測をすることによって明石海峡の地殻活動をモニターできる可能性が高い。そこで筆者らは、まず緊急調査として高感度傾斜計による連続観測を開始した。現象の現れ方次第では、高精度の地震観測および測地を組み合わせた複合的な計測システムによって、地殻活動を常時監視することを考えなければならない。また明石海峡の地殻活動の将来予測の可能性を探ることを目的として地震研究所内の学際チームで討議を進めている。

(6) 北東部の地殻活動

コンクリート構造班と別動してここを調査したのは、上述(4)の理由からこの地域の地震運動が重要であると考えたためである。専門家による断層調査は現在進行しており、いずれ断層の精査の進展と共にこの地域の地震動の源泉が解明されるものと期待される。仁川百合野町の斜面崩壊と断層運動との関係もが浮かび上がる可能性もある。地震地質学的には、今回の地震に伴う断層運動が有馬・高槻構造線に沿う地殻応力にどのような影響を及ぼすかが議論されている。

この地域の調査の目的は2.(1)の(e)と(i)の観察にあったが、住宅の被害率の高さ

は予想外であった。ここでは中国自動車道の破壊の態様について述べる。被害は上記の有馬・高槻構造線の南側の、売布ガ丘（宝塚市）の南斜面で発生した。橋脚が橋軸方向（南東－北西）、特に南東向きの地動によってせん断破壊をした（桁の落下はなかった）。この損傷モードは橋脚高さが低いことから説明がつく。神戸市内で多く見られた曲げ破壊と違って、内部の鉄筋はほとんど損傷が見られなかった。この地域で破壊したのはこのごく狭い範囲に限られているが、これには、斜面による地震動の増幅および斜面そのものの移動が関与したものと考えられる。その理由は次のとおりである：

(a) 当該斜面は北上がりの大阪層群の斜面上に軟弱な礫・砂・粘土の段丘層がのっており、地震時に側方流動しやすいと考えられる。事実、側方流動に対応する残留変位をもった橋脚が見られた。

(b) 当該地点の300mほど南では、橋脚が沈下している。

なお、この地点は有馬・高槻構造線の分枝である清荒神断層（上述の五助橋断層の延長線上にもあたる）の直上であるので、地震時挙動についてはなお慎重な分析が必要である。

（7）強震動の特徴

神戸海洋気象台および神戸大学の強震計記録が早期に公表され、研究に資するところが大きかった。振幅が大きだけでなく、ゆっくりした運動であったことが今回の地震の特徴である。これは最大加速度が高々1G以下であったのに対し、最大速度が90cm/secを越えたことから予想されていた。応答スペクトル計算によっても、近年の大地震（米国のNorthridge地震や日本の釧路沖地震など）と比較すると、周期1秒以下では小さいのに1－2秒範囲では抜群に大きい。

いずれの記録においても、主要動の波形は6個程度の波からなる非常に単純なものである。水平南北成分が特に大きく、中でも南向きに二つの大きなピークがある。すなわち、北向き速度から南向き速度に一気に変化し、その速度変動は100cm/secに達しているのである。神戸大学の記録では二つのピークの大きさはほぼ同じであるが、気象台データでは第一のピークをなす二つの波の方が大きく、その速度変化は140cm/sec（北向き50cm/secから南向き90cm/secへ変化）に達している。この地動のむきは北→南→北→南と続くが、この第2波の北側最大変位と南向き最大加速度が同期しており、これが最大打撃力となったものと解される。コンクリート橋脚においては、この1サイクルで鉄筋が降伏・伸長→座屈の履歴を経験し、一気に断面抵抗力を喪失したと考えられる。

マスコミ等では大きな上下動加速度が報道されたが、これはデータ処理に疑問があり信頼できない。多くのデータはむしろ従来言われている水平動の半分程度という考えを支持している。なお以上の知見は、調査で同行したコンクリート構造班の分析所見と調和的である。ただその報告書の6.（3）では、多くの橋脚の倒壊方向の一致（北側）の原因を上下動の寄与に求めているが、その必要はないと考えられる。

このような特徴的な周波数特性の波動の発生メカニズムの解明は今後の課題である。特に、主要動の南北方向卓越が一般的に言えることであれば、東西方向に走る幹線交通路の高架構造等の設計にとって重要な価値がある。

（8）激甚被災ベルト地帯の存在

地質学者らの調査などで、激甚被害は神戸市須磨区から西宮市にかけての海岸沿いの幅約3kmのごく細長いベルト状地域に集中していることが報告され、これは気象庁による

震度7の地域認定で裏付けられた形になっている。問題はこの激甚被害の集中の原因をどう考えるかである。この被害の主要な原因については、既に述べた起震断層の位置論争に対応して次の二つの見解がある：

(a) 被災ベルト地帯の直下で神戸・西宮未確認断層が運動した。

(b) 被災ベルト地帯直下に特別な断層運動はなく、地盤構造と入射波動の関係から大きな増幅が生じた。

(b)の考えでは、被災ベルトの強震動は、地震波が伝播する過程で増幅されたと考える。この増幅現象は各地の余震の振幅比較によって確認されている。本震でも相当の増幅があったことは自然であるし、この増幅現象を数値計算で再現することも比較的容易である。ただしそれを以て増幅現象が説明されたとすることはむずかしい。それを再現できる条件が一意でないからである。増幅現象を再現できるパラメータの組み合わせは非常に多く、また組み合わせの微妙な違いが結果に大きな差をもたらす(モデルのパラメータ敏感性)から、その中から真実を取り出すのが困難なのである。

上記(a)と(b)のいずれの場合にも、地震動の特徴を定性的に整合的に説明できることが重要である。墓石の運動の詳細な調査には、直下断層の寄与を示唆するものもあるが、なお確定していない。

工学的には、東西方向のベルト地帯発生 of 因果関係の説明だけでは不十分である。それは、ベルト地帯内部の被害状況にもなおまだ模様が見られるからである。会下山断層西端部(夢野町-上沢通)、三宮周辺、JR六甲道-阪神電鉄新在家周辺、住吉川東側地域などにおいて特に被害の甚大な帯状地域が南北に走っている。これについては今後の課題としたい。

4. 被害の要因

(1) 防災対策の不足と警報システム

報道によれば、本地震の被災地(以下では簡単のために神戸地域と呼ぶ)では大地震に対する準備が不十分であったとされている。地元自治体の行政責任を指摘する声もある。たしかに神戸地域が有数の断層系が発達している地域であることはよく知られており、かつ地震の危険について警告を発する地質学者もいた。しかしこれを否定する見解もあり、結果として地震の危険性について有効な警告とはなりえなかった。(ここで"有効な"とは、地域の行政機関や住民が適切な水準の地震防災対策を講じる必要を認めるだけの説得力をもつことである。)

内陸部の活断層の地震の発生周期は一般に千年のオーダーを有しているから、例えば神戸地域のように、確実度Iの断層が多数存在しても、活動度がB級ということであれば、それだけでは地震発生 of 原理的な可能性を述べるだけで、どの程度に切迫したものであるかの情報を与えない。他方、地震活動や地殻変動のデータは、"特に大地震発生を疑わせるような異常な変化はない"とされるのが普通である。これまでに得られたデータに見る限り、この異常を事前に検出しようとする手法は無効であったようである。(今回の地震を予見したと言う研究者は、その予見 of 具体性のレベルとその推論を示す義務がある。)

大地震の短期予知を前兆現象の観測に求める試みは、一層精力的に進める必要がある。しかし、今回の地震は、都市計画その他の防災対策のためには、十年単位 of 中期的な予測

もまた極めて重要な価値をもつことを明らかにした。この種の警報は、警戒宣言を伴う直前の地震予知とは、自然科学的にも政策科学的にも異質なものであり、独自の方法論を見いだす必要がある。これについては今後、地震工学と土木計画学の共同研究が不可欠である。

地震学その他の地球科学的観測の方法で異常を監視する方法が当面有効でない以上、活断層の情報を精密にし、これを基礎にして地震対策をたてる必要がある。そのためには活断層とりわけ地下に隠れた重要な断層を高い分解能で検出できるテクノロジーの開発が必要である。地質学者による活断層調査は表面に表れたもののみを認識する。広域の測地や重力異常には、表層近くではあるが地下の情報が反映される。音波探査でも地下の不連続面を検出できる。安政江戸地震の元凶と目されている活断層は、東京の厚い沖積層の下にあって現在の技術水準では検出できないとされている。しかし、ボアホール観測技術は着実に進展している他、非破壊型のアクティブ弾性波探査技法などが研究されており、探査の空間分解能が大きく向上する可能性は大きい。

(2) 耐震設計の規定について

”日本の土木構造物は、1923 関東地震に耐える”という命題が一人歩きした、というより一人歩きしていたことが露呈した。事実上は、土木構造物はこの”想定関東地震レベル”より遙かに強い地震に耐えられるが、一方で、真実の関東地震の強震動もこの”想定地震レベル”よりかなり大きかったと考えられる。この意味で”想定関東地震レベル”という表現は実質を失っている。そこで耐震規定の性格を正しく見直す必要がある。

構造物の耐震設計の規定においては、まず想定する地震動に対する安全性の保証が最重要であるが、この想定地震動は真の関東地震に対応したものではない。次に真の関東地震に対応する”想定外の激震”環境での耐久性については、入力地震動のばらつき（統計学的に言えば極値分布のせいである）や破壊時の通性である構造物のパラメータ感性があるため、想定地震動への対応とは異なった考え方が必要である。これについては別に論じる予定である。

本報告書においてコンクリート構造班は、まとめ意見として、構造細目の重要性、さらにその基礎となる技術力の重要性を指摘している。筆者も概ね同意見であるが、ただ若干の意見を提起しておきたい。

- (a) 構造形式の選択の得失を、技術力一般に帰する前に整理する必要がある。
- (b) 構造細目についても、技術力への依存をへらし、フルプルーフ設計を増やす余地はないか。もちろん筆者も技術力の意義を重視し、技術格差の厳存を認めるものではあるが、知力と経験に加えて想像力が必要な激震時対応のできる技術力が量的に限られていることを深刻に考える必要がある。（例えば私見では鉄筋の段落としての処理には相当の問題がある）。
- (c) 部材間の強度バランスを激震時まで想定して検討する必要がある。（強すぎる落下防止装置が構造本体に大きな被害を与えたり、高い剛性の中間ばりが無事で橋脚本体が大被害を受けている。）

(3) 地下鉄

地下鉄の問題はほとんど手つかずで残っている。長田区を東西方向に走る地下鉄・神戸高速東西線の大開駅の構内中央のコンクリート柱の断面直角方向（南北方向）の破壊につ

いては現時点で因果関係が見つけられていない。一部に上下動の影響とする見解があったが、それで合理的な説明がつくのかどうかは疑問である。調査地点での破壊モードが、柱の上端または下端近傍の断面内曲げ-せん断破壊であることから、当初は天井の剛性不足および天井と側壁の結合部の剛性不足を疑ったが、他の地点では側壁自体が破壊しているとのことであり、簡単な説明ではすまないことになった。いずれにせよ異常に大きな地盤の変形が生じた可能性が高く、それを説明できる入射地震動を見つけることが必要である。

図 1
広域の事後観測態勢
(図はいずれも地震
研究所の吉井教授
の編集による)

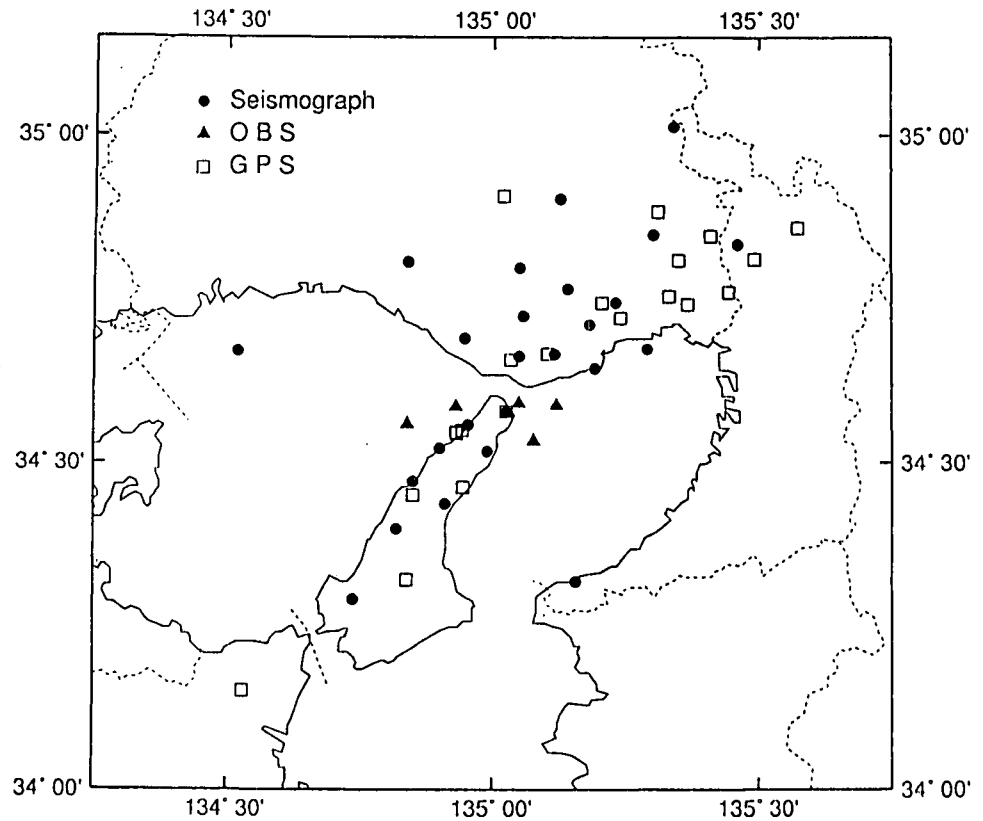


図 2 余震分布

