

構造設計学と神戸の地震

長 尚¹⁾

1. はじめに

土木構造物の設計学を日頃研究している者の一人として、今回の神戸の地震による構造物の被害の様相は想像を絶するものであった。

筆者自身は以前から「安全に絶対はない」と3つの理由を挙げて言っていた(長, 1993)。近代科学が発達しているとはいうものの、特に自然の営みに関しては学問が知らないことの方がむしろ多い。つまり未知要因の存在が1つ目の理由である。2つ目として人間のミスに代表されるような不確定要因がある。3つ目としては一般にはなかなか認めて頂けないのであるが、残念ながら人間のどんな活動にも経済性の制約があり、安全問題も例外ではない。そこで、もし関東大震災級の地震が起きれば、多くの新しい災害とそれによる新しい知見を得るのは間違いないと指摘してきた。

このようなことを言っていた筆者でも、今回の被害は想像を絶するものと言わざるを得ない。これまで日本においてこんなに沢山の土木構造物がこれ程までの壊滅的被害を受けたことがなかったからである。日本にはなかったかも知れないが、アメリカにはあったのではないかと良く言われる。しかし例えば1989年のロマプリータ(サンフランシスコ)地震で崩壊した高架橋の設計地震力は日本の数分の1(耐震工学委員会, 1990)であり、日本とは比較できない要素があったのである。

さて「関東大震災にも耐えられる」という、今回脆くも崩れた神話は、次のような経過から生まれたものと推測している。まず設計地震力の設定の経緯については各種の説があるようであるが、「大地震は関東大震災クラスがほぼ最大で、その時に発生した最大加速度は数百 gal と推定されるが、設計地震力を計算する水平加速度を $g/3$ ($1g=980$ gal), 鉛

直加速度を $g/6$ とすれば(土木学会, 1950), 大きな被害は出ないであろう」と被災直後おおまかに判断されたと考えられる。その後水平加速度の標準を $g/5$ とし, 最大値が $g/3$ 程度になるようにしてある。このようにして決まった設計地震力ではあったが, 諸外国に比べて格段に大きく, しかもこれを用いて設計されたものに被害が殆どなかったこともあって, 神話が確固たるもの(?)として独り歩きしてきたと言えよう。

2. 解明すべき基本的な点

この原稿は地震発生から3ヵ月半近くを経過した4月下旬に書いているが, 次に示すように, 基本的な点がまだ殆ど解明されていない。

(1) 今回の被害をもたらした揺れはどんな点が異常だったと専門的な観点から言えるのか。

少なくとも記録されている加速度からは, これまで経験したこともない程の異常なものとは言えない。1978年の宮城県沖地震では東北大学工学部建物の9階で1,000 gal を記録(土木学会誌, 1978)しているし, 1993年の釧路沖地震では700 gal 以上を記録(釧路気象台登録番号 HK005)している。また昨年のアメリカのノースリッジ地震の際でも2gを越す大きな地震応答を記録した建物は被害を受けていない(土木学会誌, 1994)。今回の記録の最大はほぼ0.8gで, 記録が取られていない所でこれを越すとしても, 加速度だけからは特に異常に大きい揺れとは言えない。

また共振, 速度, 縦揺れの同時発生等の要因がこれまでと異なっていると言われているが, 説得力ある説明はまだなされていない。確かに速度が異常に大きいようである。衝撃エネルギーは質量と速度の2乗の積に比例するから, 今回の破壊に大きな関係

1) 信州大学工学部社会開発工学科: 〒380 長野市若里500

キーワード: 地震, 構造物, 設計, 破壊, 安全性

があることは間違いないであろう。

いずれにしてもこれまでなかったような壊滅的な被害をもたらしたことに對して、また逆にこれまで大きな加速度応答があっても被害がなかったことに對して、揺れの面からの科学的説明ができなければ、全ての議論は説得力を失うと思う。

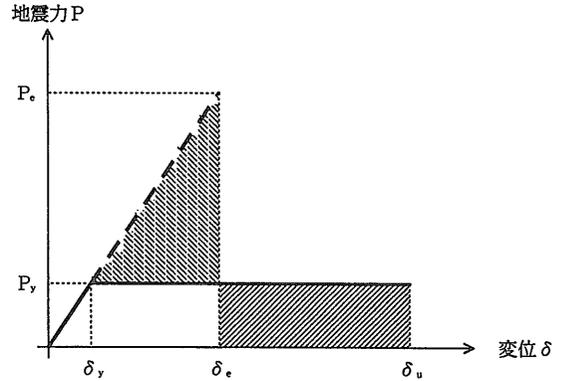
この点に関して以下私見を述べてみたい。

地震の加速度(したがって瞬間的な力の発生)もさることながら、今回の最大の特徴の1つは周期が非常に長いことである。このことについては、地震発生直後から注目し、指摘もしてきた(長, 1995)のであるが、東原紘道(1995)も次のように述べている。「…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。…応答スペクトル計算によっても、近年の大震災(米国の Northridge 地震や釧路沖地震など)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。」

周期の差によって構造物は極端に違った反応を示すように思う。構造物の破壊は、構造物を構成している材料であるコンクリートとか鉄筋のひずみ(もっと正確に言うとひずみエネルギー)が限界に達して起きる。材料の伸び縮みにはある程度時間がかかるから、加速度が大きく、したがって力が大きくても、短周期の場合、ひずみはその最大に達する前に、力が早く減少する。結局長周期の場合と違って、破壊限界に達しにくくなると考えられる。

力と変位を掛けたものがエネルギーで、やはり破壊はエネルギーで議論すべきである。ごく最近の構造物の設計基準では、構造部材のエネルギー吸収能力を帯鉄筋によって高めるようになってきている。この基準においてはニューマークのエネルギー一定則(町田, 1986)という、弾性挙動と等しいエネルギー吸収能力(じん性=ねばり)が前提となつて、設計地震力と実際の地震力との関連がつけられている。

第1図は地震力と構造物の変位の関係を模式的に示したものである。実線の斜線部は弾性的挙動を、水平線部は塑性的挙動(右端で破壊)を示している。通常じん性率(構造物のねばりを数値的に表現するもの)は降伏開始時の変位(δ_y)に対する破壊時の最大変位(δ_u)の比($\mu = \delta_u / \delta_y$)で定義される。構造物が吸収するエネルギーは図において、変位したまでの2直線の面積に当る。したがって、実線で示す2直線と横軸で囲まれる面積が構造物が破壊せ



第1図 地震力, 変位, エネルギーの関係。

ずに吸収できる最大のエネルギーである。もし地震のエネルギーがこれよりも小さいと構造物は破壊しないが、これを超えると破壊してしまうことになる。

さてニューマークはエネルギー一定則と言われる法則を提唱した。これは地震力が降伏地震力(P_y)を越えても、構造物を弾性体と仮定した時のエネルギー(実線と破線を結んだ線と横軸間の面積)が構造物が吸収できる最大のエネルギーと同じになるような地震力(P_e)まで耐えるというものである。これは次のように表される。

$$P_e = P_y \sqrt{2\mu - 1}$$

この式は第1図において、斜線を付した部分の面積が等しいという条件である次の式から得られる。

$$\left(\mu - \frac{P_e}{P_y}\right) \delta_y P_y = \frac{1}{2} \left(\frac{P_e}{P_y} - 1\right) \delta_y (P_e - P_y)$$

例えば、 P_y が0.3gによる降伏設計地震力とした場合に、じん性率が5だとすると、 P_e は0.9gによる地震力となる。このようにじん性率が大きいと、降伏設計地震力の3倍もの地震力に耐えることになる。

破壊をエネルギーで議論するという点で、このような扱いは評価できる。しかし第1図における破線は仮想的なもので、実際にこのような挙動を構造物がする訳ではない。したがって地震エネルギーが原点から実線と破線を結んだ線と横軸間の面積であるという保証はない。地震の周期によっては、大きな荷重の持続時間が長くなり、この面積以上のエネルギーとなり、結果として吸収能力を越えてしま

う。このような場合には、この法則に基づくものよりもっとじん性を向上させなければならなくなるのではなからうか。今回の地震の被害状況ではこの法則がほぼ成立していたと言われるが、壊滅的被害を受けたものは、あるいはこの法則が成り立っていないのではないかと考えられる。逆に、周期によってはエネルギーがこの法則に基づくものを下回ったりする筈である。そうでないと、これまで大きな加速度でも被害がなかったことについての説明がつかない。

また作用する力が静的ではなく、急激な場合には、力や応力に見合う変形とかひずみが限界に達するのは、曲げより、せん断の方が先なのではないだろうか。このように考えないと、本来曲げ破壊が先行しそうなものまで曲げ破壊を伴わずに、せん断破壊だけが起きていることの説明ができないように思う。このような場合には、じん性率だけと関連させて耐震性を議論して良いのか疑問がある。

(2) 学者・専門家は見込み違いをしていたのか。

「最新の基準で設計されたものは比較的致命的な被害を受けていないから、大幅な基準の見直しをしなくて良い」というような見解を述べる学者・専門家がいますが、疑問である。予想を上回る被害だったに違いないと思う。最初にも述べたように、地震をうかつにも、見くびり、傲慢になっていたと言って良いと思う。そうでなければ、前項で述べたようなじん性を考慮するように基準を改正した時に、それまでのものがとても危険であると真剣に警告されていた筈だし、またアメリカ西海岸での地震の被害調査をした専門家が、同じような地震(新基準でもとても追いつかないような大きな加速度を記録している!)があっても日本では大丈夫だと言えなかった筈である。

勿論どんな場合でも大丈夫だとは思っていなかったとしても、最大級の地震の影響はほぼこの程度であろうとした判断が誤っていたことは間違いないと思う。このような反省がまず関係者になければならぬであろう。

(3) 各種の破壊形態をどう説明できるのか。

今回構造部材(主に柱とか橋脚)の破壊形態は、鉄筋コンクリートでは、曲げ破壊とせん断破壊の2種類に、鋼では座屈と水平破断の2種類に、それぞれ大別されるように思う。これらの破壊について

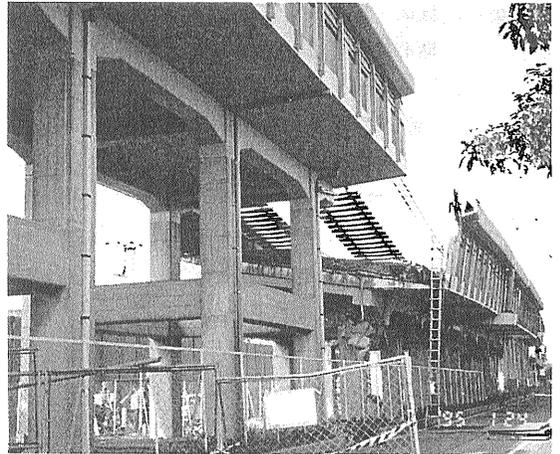


写真1 新幹線の高架橋の被害と無被害の対照。

は、前述の(1)項を踏まえた上で、そのメカニズムと共に数値的に説明できなければならないが、まだそれが十分になされていないように思う。

なお鉄筋コンクリート柱の帯鉄筋の重要性が一般の人にも認識されたが、その働きについて私見を簡単に述べておく。帯鉄筋の主なじん性向上効果は、コンクリートのせん断に伴う体積膨張(ダイレタンシー)を帯鉄筋が拘束し、膨張が抑えられてすべりにくくなって、急激に起きるといった特性を持つせん断破壊を起こしにくくするために生まれる。

(4) 同じ構造物がほんのわずかの位置の違いで決定的な違いを見せているのは何故か。

現地踏査に出掛ける前のある期待を持っていた。それは被害を受けていないものから、今後の対策に関する何らかのヒントが得られるのではないかということであった。勿論それが無かった訳ではない。しかし極めて異常な力を受けて崩壊したと思われる構造物があり、それと全く同じ構造物がすぐ隣ではほぼ健全で、大きな被害は極めて狭い帯状に繋がっていた。ある区間全滅とか、徐々に被害が軽微になるといった様相は全く見られなかった。例えば阪急神戸線の夙川、西宮北口間の高架橋のように、線路直角方向の2本の柱のうち北側の柱が壊滅的被害を受けて桁が落下しているにも拘らず、南側はこれ程のダメージを受けていなかった。また柱のせん断破壊で落ちた新幹線の高架橋の前後の高架橋は殆ど健全のままであった(写真1に示す例は尼崎市食満付近)。したがって構造物自身の耐震性の差もさるこ

とながら、極めて異常な力の発生は地盤とか断層に関連して、極めて局部的なものではないか、地震動の大きさはほんの僅かな位置の違いで極端に変わるのではないか(極めて異常な揺れが稲妻状に何本か走った)という印象を強く受けた。だとすれば被害を受けなかった構造物から、必ずしもヒントは得られないことになる。いずれにしても、極めて異常な揺れをしたのはごく限られた、局部的な何本かの線に近い一帯であり、その他の所は大変なものであったことは事実だが、この一帯とはかなり違った揺れであったと考えなければならぬように思う。

したがって、比較的健全なものから普遍的な結論を出すにはかなりの限界があるという目で分析をしないと、とんでもない結論を出してしまう危険性がある。またかなり広い地域で同じ揺れだったと思いついた議論には注意する必要がある、統計解析は特にこの点に留意して行われなければならない。

(5) このような地震はどの程度の頻度で起き、果たしてこれこそが最大級と言えるのか。

前述したように、これまで筆者を含めて関係者は、関東大震災でこれ位のものだろうと推定したものが最大級かそれに近いと思いついてきた。しかしそれを遥かに越す影響を与える地震があることが現実に示された。ひょっとして、関東大震災とか福井地震等で今回程度の揺れが局部的にはあったのかも知れないと考える方が妥当なのかも知れない。だとするとある地点では数千年に一回のことで、日本全体では、かなりの頻度で今回程度の地震が発生するとしなければならなくなる。また今回ののがほぼ最大級と言えるのか、あるいは今回と違った揺れがあるのではないかという疑問もある。頻度は極めて小さいが、今回を越すものとか別な被害をもたらすものがあるとした方が自然のようにも思える。この問題は今後の対応を考える上で重要なポイントになるので、地震の専門家から教示を得たいと思う。

以上に挙げたように、肝心な点が未解明の状態である。そのような中で、現在なされている議論の多くは、ある側面だけから、シナリオ、ストーリーが組み立てられているように思う。結果としてそれらの中の一部は最終的に確認されるかもしれないが、少なくとも現段階では、全体をトータルで見た場合の整合性に欠けているように思う。学者・専門家はもっと謙虚な姿勢で、知らないことの方が多く、

“学問が欲しい”のは実は学者・専門家自身であるということ素直に認めなければならない。一方ジャーナリズムはある種の意図で、都合の良い学者の言い分または発言の一部だけとか都合の良い事実だけで結論を出して、決めつけないで欲しい。今はお互いに事実をそれぞれの立場で冷静に見つめ、できるだけ客観的で、科学的な検討をする姿勢が極めて大事である。完全に客観的になることはできないのが人間の性であるが、できるだけそのように努力することが肝要である。何かを言う場合には、精一杯客観的にかつ科学的に検討し、しかも可能な限り数値的裏付けを持った上でしなければならない。

このような状況にある現段階では、一般の方々も学者・専門家に性急な結論と対応策を催促しないで欲しい。また関係者も「現行基準を見直す必要はない」と言ったり、逆に「今回の地震に余裕を持って耐えられる基準だ」と安易に提示したりしないで欲しい。現状では応急復旧に限って基準を作成し、その後のきちんとした議論で見直しをするという対処しかないように思う。

ここで施工不良について触れておきたい。筆者も現地踏査で多くの例を目の当たりにした。これは被害を増大させた要因ではあるし、また保守費や寿命にも大きく関係する。技術者、プロの良心、責任感から、施工不良の問題を真正面から取り上げて再発防止に真剣に取り組まなければならない。そのような義務が我々関係者にあることは論を俟たない。しかし各種の検討から、施工不良が破壊の主因とは言えないと思う。もしこれが主因だとして片付けたら、またかなりの被害を繰り返すことになるという危惧の方が遥かに大きい。誤った結論を性急に出してはならない。

例えば、ある先生は新幹線のラーメン高架橋の破壊はコンクリートの打継目の施工不良が主原因だとされ、「地震による水平力に対してコンクリートは全く抵抗力がなく、この部分から高架橋が破壊されることになった」とされているが、そうではない。この先生のご指摘のように「施工当時から形成されていた柱の接合不良面」があった所でも、水平破断はしていない。水平破断したのであれば、主鉄筋も破断しなければならないが破断していない。たとえコンクリートに抵抗力がなくても、鉄筋には抵抗力はあるから、「この部分から高架橋が破壊」してい

ない。破壊の形態は鉛直に対して15度～35度の角度をもつ斜め方向のすべりによる、せん断破壊である。このせん断破壊が進行してコンクリートが飛散した結果、水平不良面が露呈したのである。また打継目に関係しない所での破壊も沢山あり、打継目の施工不良が多くの破壊の主原因とはなりえない。このように技術的な観点からこの先生の説は成り立たない。

3. 今後の対応

今回の厳粛な経験で、最大級の地震の影響の評価について大幅に見直されることは間違いないであろう。基本的には現在の基準で十分で、大幅な見直しは不要という見解もあるが、まずそういうことにはならないと思う。

さて見直しをして基準を改めれば、すぐ今回のような破壊が避けられるようになるかと言えば、そうではない。全てについて今回のような地震を想定して補強し、建設するには、大変な経費と時間を必要とし、現実問題として不可能であろう。大したコストアップにならないという見方が一部にあるようである。できればそう願いたい、そうならない可能性の方が遥かに高い。そこで今回のような千年に1回起きる異常な地震にまで耐えるような基準は作っても現実が伴わないという考え方もある。しかし先にも述べたように、日本全体ではかなりの頻度でこのような地震の発生があり得るかも知れないので、今回の地震を対象に考えた基準を設定し、やれる範囲内でやるしか他に道はないと思う。安全のレベルはこうあるべきだからということだけで、すぐそうなるというものではないのである。残念ながら、あるべきレベルよりかなり低いレベルを結果として強いられるのである。このことを私はこの10年近く訴え続けてきたが、孤立無援という事情もあって、殆ど理解されていない。

今後は専門家そして関係当事者も社会からの反発を恐れずに正直に事実を言い、社会もそれを材料にして過度の要求とか反対をしないというように、成熟した社会環境を構築しなければならない。冒頭で述べたように、未知、不確定、経済性の制約という要因を安全問題は必ず持っているのに、「不明なこととか危険要因が少しでもあればやってはなら

ない」というように、議論を入口でシャットアウトするようなことを一般社会、特にジャーナリズムはしないで頂きたい。安全問題に携わる関係当事者、ジャーナリズム、一般社会はそれぞれ互いにこれまでの態度を反省した上で、社会全体でどう対処するかを冷静に議論しなければならない。これまで設計基準などはその道の学者・専門家に任せておけば、安心だとされていた。実はそのところが間違っていたのである。学者・専門家に限らず、誰も絶対安全を保証できないのである。それなのに学者・専門家ができるかと安易に言い、世間もそれを信じさせられていたのである。

こうした大反省にたつて、技術的な点はともかく、構造物の設計の理念については、一般社会の同意を得て、その基本的な方向を決めるべきである。念のために、構造物の設計基準の設定と適用に関して、筆者個人の考えの骨子を述べておく。

まず今回程度の地震でも致命的な被害を受けないような水準の設計基準を作成する。今回を越すものもあり得るであろうが、その場合はある程度の覚悟をせざるを得ないと思う。例えば致命的な被害を受けないような水準ではなく、もっと高い水準で、補修の必要がないようにすべきだという考えもあると思う。しかし現実問題としてそれは不可能であろう。致命的な被害を受けないような水準を目標にすることすら、非常に困難を伴うのである。次に今回のような地震が予想される活断層の位置とその緊急度合について、その道の専門家の客観的な議論によって示して貰う。この専門家の判断を参考にして、このような活断層沿いの重要な構造物に、この水準の基準を可能な範囲で順次適用する。なお今回の現象が全体的確に解明されるとは限らないから、新しい基準そのものにも限界があることを付言しておく。

今述べた設計基準の水準の問題とは別に、重要な土木構造物は地下に建設する(これとて万全ではないが、相対的にはリスクは減少する)こと、いざという時の冗長度(余裕度)の高い構造とすること、なるべくトップヘビーな構造を避けること等の配慮が必要であろう。

今回の地震で鉄筋コンクリート構造物の被害が目立ったが、その原因は、絶対量が多いということもあるが、コンクリートは重くて脆いという、鋼に比

べて二重のハンディがあるからである。だからと言って「コンクリート構造物は避ける」ということになってはならない。コンクリート構造物は鋼に比べて剛性が高く、低公害であり、経済的であるという長所は無視できないし、脆いというハンディは克服できる(帯鉄筋とか繊維補強で)と思うからである。

4. あとがき

先に述べたように、肝心なことがまだはっきりしていないので、今回の大地震を対象にして、具体的に数値で安全性と経済性の絡みをまだ議論できない訳であるが、ごく大ざっぱなことを敢えて示してみよう。

今回の被害総額は10兆円前後だと言われているが、諸々の要因を考慮し、かなり多めに評価して、この倍の20兆円とする。このような地震が日本で例えば20年に1度の頻度で起きるとする(かなり多めの想定であろう)と、年間平均1兆円の負担になる。また関東大震災が再来すると被害額は200兆円近くに達すると見積もられている。これが100年に1度起きるとすると、年間平均約2兆円の負担になる。一方平成6年度の建設投資額は約82兆円で、年平均被害額の1~2兆円はこれの1.2~2.4%に当たる。

またここで述べたような基準の見直しによって、建設費が建設投資額ベースで例えば25%増加する(かなり控え目な想定だと思う)とし、見直し基準を全てに適用するものとすれば、新しく建設するものについての年間の投資額増分は約20兆円(国内総生産500兆円の約4%)となる。既存の構造物の補強も必要で、これに仮に倍の年間40兆円かけるとしても、補強の方がコスト高になるから、25%の倍の50%相当の費用が必要だとすれば、対象がN年分の投資額相当の場合、補強完了にN年かかることになる。このようにかなり長い期間をかけて補強する場合でも、年間の費用増は総額60兆円にもなる。投資額をそのままとすれば整備率は今の4分の1以下ということになる。ちなみに、見直しの水準を高めて無被害を目指す(それでもリスクは残る)として、その場合のコスト増が仮に100%だとすると、年間の費用増は総額240兆円にもなる。

経済効率優先の総期待費用最小化原則に基づく設計思想というものがあり、これに筆者は必ずしも賛成していないが、かと言って安全のためなら経済の原則を無視して良いと言えないことが、これらの概算的数字からも言えると思う。

ところで前述したように、緊急度合の高い活断層沿いの重要な構造物に限って見直し基準を適用するものとし、その対象が全体の5%だとすると、先の試算に基づけば、年間3兆円の出費を必要とする。この程度なら現実的な対応ができそうであるが、それでも大変な負担であり、事業主体だけの責任で賄えないであろうから、これをどのような形で負担するかを議論しなければならないであろう。

今回図らずも、「安全に絶対はない」ことが厳粛な事実として示された。人知を遙かに越える自然の営みに比べて、人間の社会活動の限界(知恵, 財力, 社会, 政治等の結果としての)の余りの低さに、呆然とせざるを得ない。しかし諦める訳にはいかない。ここで述べたようなことで、現実的な対応をして、リスクをできるだけ少なくするしか方法はない。筆者は以前から、首都移転, 機能分散, 事故・災害強制保険制度の創設等を提言しているが、今回の大地震を契機に、その方向の動きが出ることを強く期待する。

文 献

- 長 尚(1993): 事故・災害に関する基礎的考察, 土木学会論文集, 462/VI-18, 121-130.
- 長 尚(1995): 兵庫県南部地震を検証. 建設通信新聞1月24日号.
- 土木学会(1950): 日本土木史大正元年~昭和15年, 683-687.
- 土木学会(1978): 「1978年宮城県沖地震」被害報告(第一報). 土木学会誌, 8, 82p.
- 東原紘道(1995): 地震工学. 土木学会阪神大震災震災調査第二次報告会資料, 103p.
- 町田篤彦(1986): 鉄筋コンクリート構造物の耐震設計法に関する研究の現状. 土木学会論文集, 366/V-4, 1-11.
- 大町達夫(1994): 1994年ノースリッジ地震の概要. 土木学会誌, 6, 4p.
- 耐震工学委員会(1990): ロマブリータ地震災害報告. 土木学会論文集, 422/I-4, 20-33.

CHOU Takashi (1995): The Kobe Earthquake from the point of view of structural design.

〈受付/受理: 1995年4月28日/5月8日〉