

道路・鉄道(その2)グループ報告

調査メンバー：長 尚 (信州大学工学部；構造設計学)
中川真治 (信州大学工学部；交通計画)

1. 調査対象地域、施設の概況

(1月23日～25日に行われた鉄道建設公団の調査に随行した。その時の調査も含む。)
山陽新幹線 (六甲トンネル入口以東約8km、西明石駅付近約4km)
JR 在来線 (住吉～六甲道間)
神戸高速鉄道 (元町～高速長田間)
阪急電鉄 (夙川～西宮北口間)
阪神電鉄 (石屋川車両基地付近)
阪神高速神戸線、国道43号線 (西宮市内約3km、深江～岩屋間)
名神高速道路 (武庫川橋梁付近約4km)
中国自動車道 (宝塚市売布付近)

2. 被害状況

山陽新幹線、JR 在来線、阪急電鉄

☆鉄筋コンクリートラーメン高架橋の柱のせん断破壊による桁・スラブの落下

☆鉄筋コンクリートラーメン高架橋・橋台の柱のせん断破壊

☆鉄筋コンクリート橋脚のせん断破壊

☆鉄筋コンクリートラーメン高架橋の曲げ破壊

☆鉄筋コンクリート・PC単純桁のずれによる落下

神戸高速鉄道

☆PC単純桁のずれによる落下

☆PC単純桁のずれ

☆鉄筋コンクリートラーメン橋台の柱のせん断破壊

☆地下駅の鉄筋コンクリート柱のせん断破壊とこれに伴う道路の陥没

☆地下の鉄筋コンクリート柱のせん断破壊と曲げ破壊

☆地下の鉄筋コンクリート柱の曲げ破壊

☆鋳鋼管のせん断による水平破断

☆沓の破損、桁の沓からの外れ

阪神電鉄石屋川車両基地

☆鉄筋コンクリート1層ラーメン高架方式の車両基地の柱のせん断破壊による桁・スラブの落下

阪神高速神戸線

☆鉄筋コンクリート橋脚のせん断破壊

☆鉄筋コンクリート橋脚の曲げ破壊

☆単純桁のずれによる落下

☆沓の破損、桁の沓からの外れ

名神高速道路

☆桁落下

☆鉄筋コンクリート壁式橋脚のせん断破壊

- ☆桁の沈下・損傷
- 中国自動車道
- ☆鉄筋コンクリート橋脚のせん断破壊
- ☆鉄筋コンクリート橋脚の曲げ破壊
- ☆鉄筋コンクリート橋脚の傾斜
- ☆桁の沈下・損傷
- ☆桁の沓からの外れ

3. 鉄筋コンクリート柱、橋脚のせん断破壊について

ここでは今回の破壊の中で、そのメカニズムが説明しにくい、鉄筋コンクリート柱、橋脚のせん断破壊（建物の下層、中間層の潰れも同じ）についての私見を述べる。

写真-1は新幹線の鉄筋コンクリートラーメン高架橋の柱がせん断破壊している例で、これが更に進行して、ずれ面が滑ると写真-2のような状態となり、もっとひどいものは柱が完全に崩壊してしまっている。写真-3は新幹線の武庫川の鉄筋コンクリート橋脚のせん断破壊例、写真4、5は神戸高速鉄道の大開駅（地下）の鉄筋コンクリート柱のせん断破壊例である。このようなせん断破壊は柱、橋脚の上下方向の位置を問わない（ただし柱の上下端に近いものが数としては多い）で、鉛直方向から15度～35度傾いた方向で起きている。

コンクリートの破壊はモールの破壊説に基づく破壊曲線を用いて説明できる。これによるとコンクリートの破壊はせん断破壊と引張破壊の2種類である。コンクリートのテストピースの圧縮試験では側方圧のない状態でのせん断破壊時の、加えた力に直角の面の圧縮応力度を圧縮強度としているのである。帯鉄筋があると、垂直力の作用によりコンクリートが側方に膨張しようとする（ポアッソン比とダイランシーで説明できる）のを帯鉄筋が拘束するために側方圧が生じ、応力状態が破壊曲線内になり、破壊するためにはさらに垂直力を増やす必要が生じる。これが垂直力の耐荷力を増進させる帯鉄筋の効果である。

ところで通常の状態では、柱の応力状態は圧縮強度レベルの応力度より遥かに低い。地震時にかなりのせん断応力度が働くとしても、垂直力でせん断破壊するためには、圧縮強度近くの応力度になるような大きな垂直力が必要となる。概算してみて、上下方向の異常な力は、支えている重量の5倍以上、場合によっては10倍にも達するという結果が出た。これは余りにも異常過ぎる。今回の地震の上下方向の加速度がたとえ1gだとしても、2倍にしかならず、5～10倍は説明できないからである。

今回の地震のように、異常な水平力が（コンビニエンス・ストアのビデオ記録では揺れが回転しているし、鉄道総研で行われた記録に基づく変位解析でも回転しているから、ねじりモーメントも）作用すると、コンクリートの中には引張破壊応力度付近の応力度状態がせん断応力度を伴って発生する。その場合は、極端にコンクリートのずれ抵抗力が弱くなり（破壊曲線が急激に下がって）、X状にせん断破壊する可能性が生まれ、その面も鉛直方向からある角度を持つことがモールの応力円から理論的に説明できる。またこれに上下方向の力が加わると、ずれ面の方向が鉛直方向に近くなることもモールの応力円を用いて説明できる。このメカニズムによると、せん断強度の一番低い所（強度は一樣ではない）で起きるので、結果として柱のどの位置でも起こり得る。ただしずれる位置として柱の上下端に近いものが数としては多いのは、曲げによる引張応力度の発生が絡んでいるからだと考えられる。



写真-1 矢印の先の柱がこの方向の面でせん断破壊している。



写真-2 写真-1の状態が進行してずれ落ちた状態



写真-4 矢印の先の柱がこの方向の面でせん断破壊している。



写真-3 矢印の先の橋脚がこの方向の面でせん断破壊している。



写真-5 写真-4の状態が進行してずれ落ちた状態

新幹線の高架橋について、ざっと数値的に試算してみると、このような現象が起きるために必要な異常な水平力は、加速度で言うと2g程度で（力の集中で結果としてそうなる場合もあるし、ねじりや衝撃が加わると2g相当以下でも）、ずれの面の方向も実際（鉛

直方向から15度～35度傾いた方向) とほぼ一致した。

なおこのようなせん断破壊に対する帯鉄筋の効果は次のように説明できる。コンクリートがある面ですれるためには体積膨張(ダイランシー)が必要で、これを帯鉄筋が拘束する。そのためにずれにくくなる。このことを破壊曲線によって説明すると次のようになる。帯鉄筋の拘束により圧縮応力度が水平方向に発生し、全体としての応力度を圧縮側に寄せ、応力状態を破壊曲線に近付きにくくする。つまり壊れにくくして、急激に起きるせん断破壊を起きにくくするから、結果としてじん性が増すのである。

本来このせん断破壊に関する説明は破壊曲線を用いてきちんと説明すべきであるが(図-1に概念図だけ示した)、それをするだけの時間的な余裕が今はない。いずれ別に発表するつもりなので御容赦願いたい。なお私自身はまだ確認していないが、ずれ面が鉛直から45度より水平に近い場合も若干あるようである。これは引張軸力が働いた可能性がある。

さてこのような説明に対して若干問題点がない訳ではない。

その一つは、鉄筋の存在によるせん断破壊抵抗の問題である。鉛直方向から15度～35度傾いた方向のせん断に対して有効な鉄筋はこれと直角方向のものであるが、そのような鉄筋はない。柱の主鉄筋はずれ方向に対して角度が薄く、その効果は余り期待できない。また場合によっては鉄筋の周囲が鉄筋に平行にずれ、これが全体として斜め方向に繋がることも考えられる。帯鉄筋は比較的効果的だが、量が非常に少ない。このようなことから、ここで説明したよ

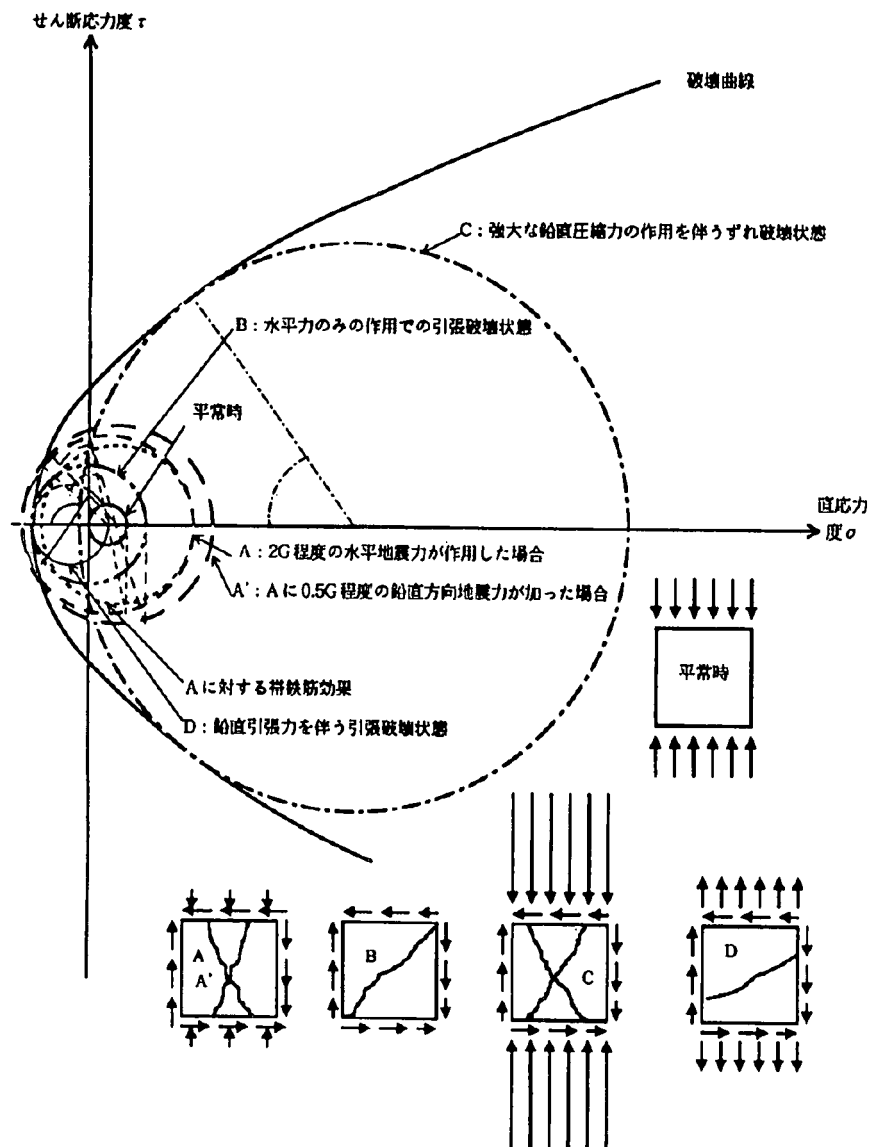


図-1 コンクリートのせん断破壊の説明(概念図)

うなせん断破壊に対して鉄筋は十分働かないのではないかと考えられる。なお現在帯鉄筋の計算に用いられている式は、基本的には斜め引張に対するもので、ここで述べたようなせん断破壊を直接に対象としたものではない。この際帯鉄筋の算定式について再検討する必要があるように思う。

もう一つは、曲げの影響を受けたせん断破壊も沢山見受けられるにしても、曲げ破壊が先行しそうなものまで、何故せん断破壊が起きるのかという問題である。これまで力と応力でせん断破壊を説明してきたが、正確に言うと、力や応力に見合う変形とかひずみにコンクリートが達して破壊したと考えるべきである。曲げ破壊とせん断破壊の根本的な違いは、前者はかなり構造物が変位しなければ起きないが、後者は余り変位しなくても急激に起きる点にある。したがって、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、せん断の方が先だと考えられる。柱の途中でせん断破壊が起きると、そこで地震エネルギーは破壊エネルギーや音エネルギーで消費されて、下まで力は伝わらなくなる。そうすれば、大きな曲げモーメントも生じなくなり、曲げ破壊は起きにくくなると考えられる。また曲げ破壊に必要な変位を起こす前に逆な力が作用して曲げ破壊が起きないことになることも考えられる。

以上のようなメカニズムだとすると、この状態を実験室の静的な試験で確認することはかなり難しい。その意味で土木学会の第2次調査団の団長中村英夫会長が述べた「研究室の実験でもそのような破壊を再現しようもない程の…」という表現は問題の本質を見据えた名言のように思う。

なおどちらかと言うと、細い柱の方が完全にずれ落ちたケースが多いように見受けられる。この原因は太いものに比べてせん断抵抗が相対的に小さいことにあると考えられる。阪神高速の一本足の高架橋では、せん断破壊と曲げ破壊が同時に起きているように見える。この橋脚の断面は比較的大きく、せん断抵抗が大きいため下までエネルギーがかなり伝わったのかも知れない。あるいは一部のものがせん断破壊してずれて落ち、それがその他を道連れにしたのかも知れない。目撃者の証言によると、東端が地震で落ち、その他はその後これに引きづられて次々に倒れたそうである。そうすると、東端はせん断破壊しており、その他は曲げ破壊が主因となっていることが説明できる。

最後に、ここでは鉄筋コンクリート柱、橋脚のせん断破壊について考察しているのであって、曲げ破壊がなかったということをお断りしておく。勿論条件によっては、曲げ破壊と考えられるものも見受けられる。

4. 復旧状況

山陽新幹線、JR在来線、神戸高速鉄道（地上部）

落下した桁・スラブで利用できるものは利用し、柱も利用可能な部分は利用し、必要に応じて新しい鉄筋で接合し、鉄板で巻いて注入する方針のようである。また柱・はり等の比較的軽微な亀裂に樹脂モルタルを注入中のものもあった。利用不可能なものは新しく造り直す作業が進行していた。

名神高速道路、中国自動車道

桁を持ち上げ、沓を補修し、橋脚は鉄板をあてて注入する方針と見受けた。

以上の補修は、いずれも緊急でやむを得ない状況では許せる限度一杯の措置であると考えられるが、供用開始日程が優先した無理な復旧行程にならないようにして頂きたい。また十分な技術者を配置できない状況での復旧作業であるから、施工管理に可能な限りの配慮を望みたい。

なお応急復旧であるから、仮復旧後、必要に応じて適切な措置が必要であろう。

5. 問題点とこれからの対応に関する私見

今回の阪神大震災について、学者・専門家とジャーナリズムが色々な見解を述べ、議

論を展開しているのは当然としても、安易な決めつけ、思い込み、期待（思いたい気持ち）からの議論が多過ぎるように思う。結果として、間違った結論が独り歩きし、今後の対応が見当違いな方向に走ることを極めて憂慮する。

まずお互いに、予見、予断、期待などを極力排除し、事実をできるだけ冷静に見つめることである。そうすれば、どんな立場にある者でも、俄かに説得力のある説明ができない事実と直面したり、納得できない説明を沢山聞かされていることに気付く筈である。

俄かに説明ができない主なものを私なりに次に挙げ、若干のコメントを述べたい。

①今回の異常さの原因は何か？

現象としては局部的な何本かの線に近い一帯が、想像を絶する揺れをし、それに絡んだ構造物が大きな被害を受けたように推定される。では想像を絶する揺れを科学的にどのように説明できるというのだろうか。従来、構造物に影響を与えるものとして、力したがって地震の加速度と共振に関連した周期が注目されてきた。今回はこれだけでは説明できないので、速度とか縦揺れの同時発生等が言われているが、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。したがって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があることは間違いないであろう。もう一つの側面として、私は個人的に、以前から周期が関係する（共振との絡みからではない）と思っている。いずれにしても、この最大の問題点がはっきりしないのに、学者・専門家が色々な現象とか対策について結論的な見解を述べるのは拙速に過ぎるように思う。

②学者・専門家は見込み違いをしていたのか？

「新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、これには3つの点で問題がある。

④今の段階で「新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」と果たして言い切れるのか。

⑥「新基準で設計されたものの被害」は果たして予想していたようなものだったのか。

⑦日頃からこのようなことが起きると一般の人に説明していたのか。

私の印象では、いずれもノーと言わざるを得ない。学者・専門家も想像を絶する揺れだったに違いないと思う。関東大震災の評価を間違えていたのかも知れないが、もう1つの原因はこれまでかなりの加速度（今回程度の）が日本国内で観測されていても、被害が軽微（少なくとも土木構造物では）であったため、地震の影響の評価をどういう形で設計に反映させ、取り入れるか（ある特定の力の作用として扱い、殆どダメージを受けないようにするかある程度のダメージは許すか、またどの場所のどんな構造物を対象とするか等）は別として、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。

勿論私を含めて、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ないであろう。

なお私は以前から関係者が余りに安全ですよと言いつける、もっと正直に言うべきであると主張しているが、事実が起きてから、実は致命的なことに至らないように配慮していたと言う（本当に自信を持ってそう言えるのか？）のはまやかしかだと受取られても仕方がないであろう。

③各種の破壊形状を科学的にどう説明できるのか？

今回大規模な土木構造物に様々な破壊形状が現れているが、中でも専門的に説明しにくいのが鉄筋コンクリートの柱、橋脚のせん断破壊であろう。私はあるメカニズムについて検討すべきであると世に問うている（3項で説明）が、これの解明が急務である。

④帯鉄筋は何故じん性を向上させるのか？

帯鉄筋がコンクリートのじん性を向上させる（急激に起こるせん断破壊を起りにくくする）のは事実である。しかし一般の人には意外かも知れないが、その理論の解明はこれまで十分に行われていない。今回せん断破壊のメカニズムを説明する段階で、私はある程度明確にできたと思っている。いずれにしても、帯鉄筋を多く入れればじん性が増すというような定性的な説明ではなく、帯鉄筋をどれだけ入れればどのような現象にどれだけ効果があるかをはっきり説明できなければならない。

⑤同じ構造物が僅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のは、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、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。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ないように思う。

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。つまり今回被害を受けた全地域が同じ揺れの地震力を受けたとして扱うのは極めて危険であり、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。被害がないか軽微で済んだものがあるからということで、軽々にある種の結論を出したり、大幅な基準の見直しはしなくて良いと軽率に言ってはならない。

⑥このような地震はどの程度の頻度で起き、果たしてこれが最大級と言えるのか？

これまで私を含めて関係者は、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込んでいた。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を示された。ひょっとして、関東大震災とか福井地震等で今回程度の地震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も、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、今回を越すものがあるとした方が自然のようにも思える。

さて、今回様々な施工ミス、施工不良が指摘され、私自身も現地踏査でその多くを目の当たりにしてきた。こうしたことについては、日頃から個人的には指摘していたし、今回の災害の主原因かどうかの議論とは別に、技術者は謙虚に大反省しなければならない。「施工ミス、施工不良がないとは言えません。しかしそれが破壊の主因ではありません。」という高飛車な説明は、やはり不遜で、一般の人に対する説得力に欠けるどころか、却って不信感を抱かれると思う。心からの反省と今後の取り組みへの決意を表明した上

で、冷静に個々の施工不良が破壊の主因かどうかの議論をしなければならない。

例えば“新幹線高架橋の柱のコンクリートの打継ぎ目の施工不良が崩壊の原因だ”という意見もある。しかし破壊の形状からと簡単な数値的な計算から、打継ぎ目の施工不良が今回のような新幹線の柱のずれ破壊の原因だという結論は出てこない。またずれ破壊が全て打継ぎ目付近で起きている訳でもない。ただこれを指摘された方はコンクリートの施工方法の問題点について、日頃から指摘されており、今回施工不良が白日のもとに晒されて、ついそのような発言になったことと思う。しかし事実はやはり正確に、冷静に、かつ科学的に分析されなければならない。

勿論施工不良が原因で破壊したものが全くないとは言いきれないであろう。しかし施工がきちんとされていれば、こんな致命的な被害が出なかったとはとても言えそうにない。施工不良が破壊の主因であれば、設計は間違っていなかったことになるから対応も容易なのだが、それだけで済ませたら、またかなりの被害を繰り返す危惧の方が遥かに大きい。誤った結論を感情的に出してはならない。

いずれにしても、様々な未解明な問題があるような状況では、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「今回の地震に余裕を持って耐えられる基準」を安易に提示しないで欲しい。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。

最後に今後の対応に絡む根本問題について触れておく。

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。先にも触れたように、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。大変な経費と時間を要し、全てについて今回のような地震を想定して補強し、建設することは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。

それはともかく、この際社会全体がこのことを冷静に受け止めなければならない。そのためには、学者・専門家が正直に事実を言うことが大前提である。その上で、社会全体でどう対処するかを議論しなければならない。これまでは、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。実はそここ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。

今回図らずも、安全は絶対ではないことが厳粛な事実として示された。人知を遥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。現実的な対応をして、リスクをできるだけ少なくすることしか方法はないのである。