

コンクリート橋脚の被害の特徴

フェロー会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科	岡村 甫	Hajime OKAMURA
正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科	前川 宏一	Koichi MAEKAWA
正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科	小沢 一雅	Kazumasa OZAWA
学生会員 東京大学大学院	大内 雅博	Masahiro OUCHI

まえがき

阪神大震災によって多くのコンクリート構造物が潰滅的な被害を受けた。その実状を明らかにし、今後の耐震設計や既設構造物の補強に役立てることは、コンクリート研究者の最低限の義務である。今回の被害状況を直視することがその第一歩となる。前川と小沢は震災3日後に現地調査を行い、大内も現地に赴いた。岡村は土木学会第3次調査団の一員として3日間現地調査に参加し、長滝、東原、堀井、久田の諸先生方と行動を共にした。その際貴重な議論を交わすことができたことに感謝したい。なお、調査は、被害を受けた構造物だ

けでなく、被害を受けなかったものにも着目して行った。本報告は、山陽新幹線、阪神高速神戸線、湾岸線およびハーバーハイウェイの一部について調査した結果に基づいて、コンクリート橋脚の被害の特徴を述べたものである。

ラーメン高架橋の被害の特徴

山陽新幹線は、中間ばりを有する3径間連続ラーメン高架橋(写真-1)が最も一般的な構造であるが、著しい被害を受けていた。最も被害の著しいのは、上りまたは中間ばりの直下で発生したせん断ひびわれが発達し、コンクリートが剥落して自重に耐えられなくなり、破壊した位置が



写真-1 中間ばりを有するラーメン高架橋



写真-2 上部が橋軸直角方向北側に落下



写真-3 中間ばりを有しないラーメン高架橋曲げ降伏後のせん断ひびわれ

ら上の部分が橋軸直角方向北側にずれて崩壊したと推定されるものである(写真-2, 図-1)。柱の曲げモーメントを低減するために設けた中間ばりが, 柱の細長比を小さくしてせん断耐力と曲げ

耐力の比を小さくし, せん断破壊から崩壊に導いたものと思われる。

中間ばりのない場合には, 柱の上端ハッチ直下で曲げ降伏を起こしたものと, 曲げ降伏後にせん断ひびわれが生じたもの(写真-3)がそれぞれ相当数見受けられたが, 崩壊した例はなかった。また, 被害のほとんどないものも多かった。中間ばりがないので, 柱の細長比が大きく, 曲げ降伏後もせん断抵抗に余裕があったためと思われる。

ラーメン橋台は, 道路を横断する場合などスパンの大きい箇所に用いられている PC 単純桁などを支えると同時に, 自らも列車荷重を担っており, 高さの高いはりが設けられていた(写真-4)。そのため, 中間ばりを設けた場合と同様に, 柱の細長比が小さくなっていた。調査した区間にある 4 カ所で崩壊し, いずれも PC 桁が落橋していた。はり直下で柱にせん断ひびわれが生じて発達し, PC 桁を支えきれなくなって, PC 桁の軸方向にずれて傾き(写真-5), 落橋したという過程をたどったと推定される。

単柱式橋脚の被害の特徴

阪神高速神戸線では, 単柱式の円形橋脚(写真-6)が最も一般的であった。橋脚の下端付近で, 橋軸直角方向に水平ひびわれが発生したもの, さらに進んで鉄筋の降伏が認められるもの, 2 段配筋の内側鉄筋の段落とし位置において, 軸方向鉄筋が引張り降伏して伸び出し, 橋脚が逆方向に変位した時に, それらの鉄筋が圧縮力を受けて座屈

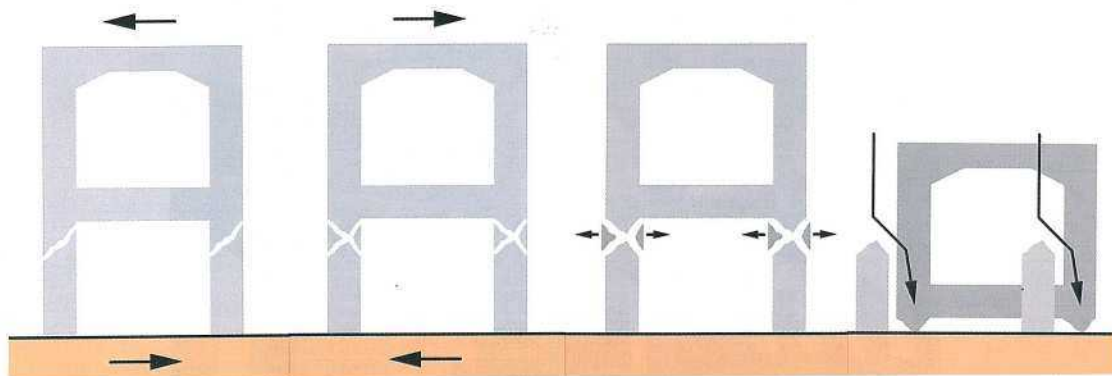


図-1 ラーメン高架橋の崩壊過程

し、かぶりコンクリートを剝落させるとともに、定着が不十分な帯鉄筋がばらばらになったもの（図-2）がいずれも数多く見受けられたが、ほとんど被害が認められないものも存在していた。しかし、崩壊した例は見受けられなかった。この形式は、比較的細長比が大きく、曲げ抵抗に比してせん断抵抗が大きいため、曲げ降伏をした後に相当大きな変形を生じても、崩壊には至らなかったものと思われる。

段落とし位置の近くで、外側の鉄筋の半分がガ



写真-4 ラーメン橋台（高さの高いはり）

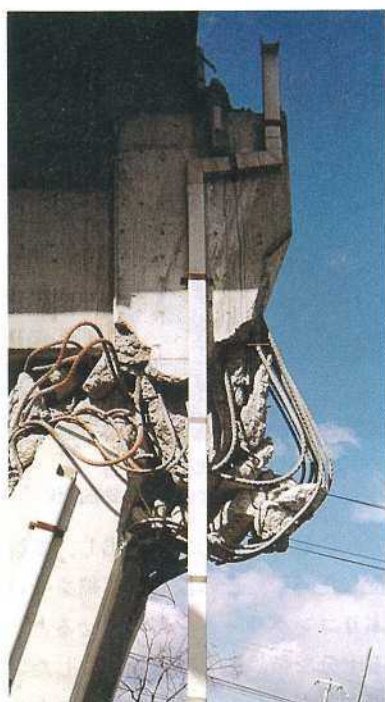


写真-5 ラーメン橋台支承直下のせん断破壊
PC 桁は落下

ス圧接継手となっている場合が多かったが、ガス圧接継手の多くは鉄筋が十分降伏する前に圧接位置で破断し、圧接していない鉄筋のように座屈していなかった（写真-7）。

道路を横断する場合などスパンの大きい場所には、円形よりも断面の大きい矩形断面の単柱式橋脚が用いられていた。被害の状況は、円形断面の場合とほぼ同様であるが、被害の程度は大きく、せん断ひびわれが発生したもの（写真-8）や、せん断破壊して崩壊したもの（写真-9）も見受けられた。柱の断面に比して長さが相対的に短いと、せん断破壊を誘発する可能性が高くなるのである。

ハーバーハイウェイにも単柱式矩形橋脚が用いられている。その被害の状況は阪神高速神戸線の場合とほぼ同様であったが、被害の程度は小さく、被害が認められないものが最も多かった（写真-10）。高さが高いか軸方向鉄筋比が小さいために、曲げ抵抗に比してせん断抵抗が大きくなり、曲げ降伏をした後に相当大きな変形を生じても、崩壊には至らなかったものと思われる。

以上を要約すると、単柱式橋脚では細長比が小さいほど被害が大きく、その中にはせん断破壊して崩壊したものもあった。細長比が大きい場合には、鉄筋が引張降伏した後に圧縮により座屈してかぶりコンクリートを剝落させ、降伏変位よりも相当に大きな変位を生じたものも多かったが、せん断破壊には至らず、崩壊した例もなかったのである。このことは、過大な地震に対して、構造物



写真-6 単柱式円形橋脚

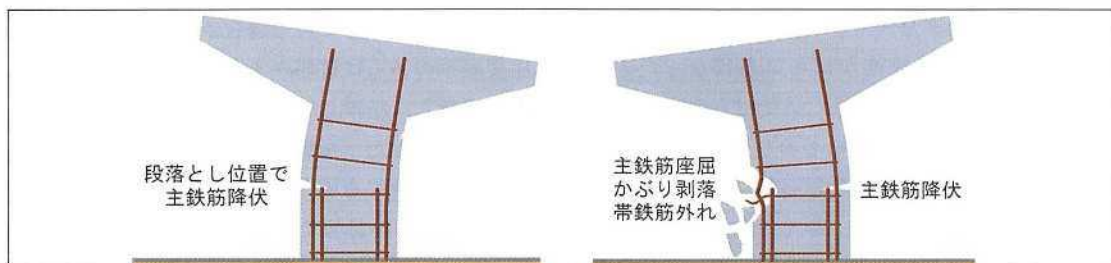


図-2 鉄筋の局部座屈に至る過程



写真-7 圧接継手の破断
破断していないものは局部座屈



写真-9 単柱式矩形橋脚の崩壊

の靱性によってエネルギーを吸収し、崩壊にまで至らせないためには、せん断破壊に対して十分な余裕を持たせるという、現在の耐震設計法の方が正しいことを確認するものである。

小判型および壁式橋脚の被害の特徴

山陽新幹線武庫川橋梁はPC 桁を小判型橋脚で支えている構造である（写真-11）。橋脚の中程の水平打継目の約 30 cm 上で鉄筋が段落としされていた。すべての橋脚において、鉄筋の段落とし



写真-8 矩形断面の橋脚
せん断びわれ



写真-10 単柱式橋脚の被害
段落とし部での鉄筋降伏

部で軸方向鉄筋が降伏して伸び出し、橋脚が反対側に変位した時に、その鉄筋が圧縮を受けて座屈し、かぶりコンクリートを剥落させるとともに、定着が不十分な帯鉄筋をばらばらにしたと思われる状況であった。しかし、崩壊に至ったものはなかった。



写真-11 武庫川橋梁の小判型橋脚

小判型および壁式橋脚の特徴は、コンクリート断面に比して軸方向鉄筋量が少なく、曲げ抵抗に比してせん断抵抗力が大きいことであって、曲げ降伏をした後に、相当大きな変形を生じて崩壊に至らなかったものと思われる。

ハーバーハイウェイにも、多くはないが壁式橋脚があり、ほぼ同様の被害が認められた。ただし、第二摩耶大橋の橋脚には、奇妙なひびわれが発生していた（写真-12）。鋼桁はこの橋脚上で固定支承となっており、支承は橋脚にしっかりと固定されていた。桁は東隣の支承あたりから北側に大きく曲線を描いており、東隣の可動支承上で南側の桁は支承上にあったが、北側の桁は支承から外れて北側に数10cm移動していた。その結果、橋脚上面には北側桁の支承から水平力が北向に作用し、そこから曲げひびわれが発生して、下に向かって伸展し、最後に北に曲がったものと思われる。

写真-12 第二摩耶大橋の橋脚
奇妙なひびわれ

相当に多い帯鉄筋の存在によって橋脚の崩壊は免れ、したがって落橋しなかったものと思われる。このような力は、設計では考慮されていないものであり、この経験を今後に生かす道を慎重に検討する必要がある。

単柱(壁)式二層ラーメン橋脚の被害の特徴

ハーバーハイウェイには、この種の橋脚が多く用いられていた（写真-13）。ラーメンに取りつくやや下側で北側または南側の連続鉄筋が降伏したもの、さらに反対側に変位した時にその鉄筋が圧縮を受けて座屈してかぶりコンクリートを剥落させたもの（写真-14）、この状態が橋脚の全周に広がり定着が不十分な帯鉄筋をばらばらにするとともに鉄筋の座屈が顕著になったもの（写真-15）などがいずれも相当数認められた。なお、被害のほとんどないものもかなりの数存在していた。

上部のラーメン構造は橋軸直角方向には強く、被害が認められなかった。また、この形式の構造で崩壊した例はなかった。この形式の橋脚は、コンクリート断面が比較的大きく、曲げ抵抗に比してせん断抵抗力が大きいために、曲げ降伏をした後に相当大きな変形を生じて崩壊に至らなかったものと思われる。

損傷を受けた箇所では、2段配筋の内側の鉄筋が段落としされていた。この位置で鉄筋を止めるのは、施工上からは好都合であろうが、この構造を2次的に見ると適当ではないことは明らかである。また、その近傍で外側の鉄筋の半分がガス圧接継手となっており、単柱式橋脚と同様に、ガ



写真-13 単柱(壁)式二層ラーメン橋脚

ス圧接継手の多くは圧接位置で破断したと思われる、一般に座屈してはいなかった。

同様な形式の鋼製の橋脚もあり、ほとんどが被害を受けていなかった。なお、柱の下から1/3程の位置で、北側の鋼板が局部座屈していたもの一例を確認した。たまたまこの前後にある同形式のRC橋脚には被害が認められなかったのが印象的であった。

ラーメン橋脚の被害の特徴

山陽新幹線では、ラーメン橋脚がPC桁を支えるところに用いられており、周りの高架橋が著しい被害を受けていたにもかかわらず、4橋脚すべてがほとんど被害を受けていなかった（写真—16）。阪神高速道路神戸線にも、出入口など幅員が大きい場所にこの形式の橋脚が用いられていた。また、湾岸線やハーバーハイウェイにもこの形式の橋脚が多く用いられていた。今回の地震に



写真—14 曲げ降伏後の鉄筋の局部座屈



写真—15 全周に拡がった鉄筋の局部座屈

よって、これらの橋脚がいずれも被害をほとんど受けなかったことは事実である。

この構造形式は、橋軸方向には地震力が最も厳しい荷重であるが、橋軸直角方向は上部構造を支えるのが最も厳しく、地震に対しては余裕のある設計となっていたと思われる。今回の地震動が橋軸ほぼ直角方向に作用したために、コンクリート橋脚のみならず鋼橋脚も被害を受けなかったものと思われる。南北方向の高架橋も一部ではあるが存在しており、そこではラーメン橋脚も単柱式橋脚と同様な被害を受けており、このことを裏付けている。

ビルツ橋脚の崩壊

ビルツ橋脚は上部構造と一体となった構造である（写真—17）。全部で17脚が連続して配置されていたが、すべて橋軸直角方向北側に倒壊していた。すべてが倒壊した場合には、その観察によって倒壊の過程を明らかにすることは難しいので、非線形の地震応答解析などを行って検討した（参考資料2）。その結果、この橋脚も、単柱式橋脚と同様の過程で倒壊に至ったと推定されたのである。

鋼橋脚との比較

同じ構造形式の場合には、鋼構造とRC構造とで被害の程度に本質的な相違はなかったといえる。すなわち、単柱式橋脚の場合、一般部では局部座屈を生じているものが見られる程度で、崩壊した例はなかった。一方、桁自重が大きいため断



写真—16 PC桁を支える健全なラーメン橋脚



写真17 ビルツ橋脚の倒壊

面を大きくした橋脚には、鋼製の場合にも崩壊している例が見受けられた（写真18）。この例は、出入路を含む3本の桁の荷重を1本の横桁で受け、これを鋼橋脚と2本のRC橋脚で支えていたが、真中の鋼橋脚が崩壊したのである。

ラーメン橋脚の場合、RC構造と同様に、ほとんど被害を受けていない。ハーバーハイウェイにおいて、溶接部に沿った水平亀裂と柱の局部座屈が一部に見られた程度である。「ラーメン橋脚の被害の特徴」の章で述べたように、今回の地震動が橋軸ほぼ直角方向に作用したことがその主たる理由と思われる。

鉛直地震動の影響について

鉛直地震動によって、桁が支承から外れやすくなったことは容易に想像できる。しかし、橋脚を上下方向の力のみで崩壊させることはきわめて困難である。すなわち、桁自重や活荷重等による常時荷重に比べて、鉛直地震動によって作用する力は最大で上部構造の自重程度であり、コンクリートの圧縮に対する安全余裕度を考えると、崩壊は到底考えられないのである。非線形地震応答解析の結果から見ても、鉛直地震動の影響は小さい（参考資料2）。しかし、全くその影響がないわけではなく、鉛直地震動が大きければ構造物の被害の程度が幾分大きくなることは確かである。

橋脚が対称に造られていなかったものを除いて、倒壊あるいは崩壊したほとんどすべての橋脚が橋軸直角方向北側に倒れていたことが、今回の



写真18 崩壊した鋼橋脚

被害の大きな特徴である。このことが地震動の特性であることは確かであるが、鉛直地震動の影響である可能性もある。

まとめ

（1） 今回の地震によって、コンクリート橋脚の多くが、鉄筋の降伏する以上の力を受けており、今回の地震が、静的水平震度が0.2程度で許容応力以内に納まる程度の大きさのものでなかったことは確実である。そして、せん断破壊後に崩壊した橋脚が数多く見受けられた。しかし、せん断破壊を起こさなかったものの大多数は崩壊に至ってはいない。曲げ降伏変位を相当に越えた変位を受けた場合でも、せん断破壊に対して十分な余裕があれば、崩壊に至らなかったことが確認されたのである。このことは、せん断破壊に対して十分な余裕を持たせることで靱性を持たせ、大きな地震による崩壊を防ぐという、最新の耐震設計法の考え方が正しいことを示す。最新の基準によって設計され、施工の良いコンクリート橋脚は、今回程度の地震動に対しても崩壊を免れる可能性は十分にあると思われる。

（2） コンクリート橋脚における構造細目については、現行の土木学会コンクリート標準示方書の規定（参考資料1）で基本的に問題はないと思われるが、鉄筋の継手位置については具体的に規定すべきであろう。なお、桁から橋脚に伝わる力について、桁が支承からはずれた場合についても考慮しておくことが望まれる。また、構造細目に

について、設計者にわかりやすいマニュアルを作成する必要がある。

(3) 被害を受けた構造物の被災状況を調査すると、鉄筋の段落とし位置の選択、水平打継目、鉄筋のガス圧接継手、帯鉄筋の定着などの施工が、構造物の安全性よりも経済性を重んじて行われたとの印象が深い。高度成長期に施工された構造物のみならず、比較的最近施工されたものにも見られたのである。このことが被害を大きくした原因とは必ずしも考えられないが、今後検討すべき事項である。

(4) 今後の詳細な調査研究によって、今回の構造物が受けた地震動の大きさと被害との関係を明らかにし、設計に想定すべき地震動の大きさ、被災後の供用性能に基づく限界状態、構造物の設計法などを検討する必要がある。その検討の第一歩として、ビルツ橋脚を模擬した矩形断面橋脚について、2次元の動的非線形解析（文献1）を行い、入力地震動、鉛直地震動および構造系の影響を検討した結果の一例を参考資料2に示す。

参考文献

- 1) C.M. Song and K. Maekawa, "Two-Dimensional Dynamic Non-Linear Finite Element Analysis of RC Shear Walls", コンクリート工学年次論文報告集, 1990

参考資料1. 土木学会コンクリート標準示方書（昭和61年以降）の耐震構造細目

(1) 耐震にとって重要な部材では、帯鉄筋比を0.2%以上とするとともに、せん断力に対する安全率を、曲げモーメントのそれの1.2倍とし、部材接合部から柱幅の高さの範囲では、さらにその1.25倍とする。

(2) 帯鉄筋の端部は135°以上折り曲げて、内部のコンクリートに十分定着するか、あるいは連続したらせん鉄筋形式とする。

(3) 引張主鉄筋の引張部定着、いわゆる段落としは、同一断面では全引張主鉄筋の1/2以下とし、計算上不要となる点から部材の有効高さを延長し、そこから定着長以上を延ばす必要がある。その間の

設計せん断耐力は、設計せん断力の1.5倍以上としなければならない。

(4) 鉄筋の継手位置は、できるだけ応力の大きい断面を避けるものとする。

参考資料2. ビルツ橋を模擬した断面の解析

ビルツ橋の構造を模擬した有限要素分割（図-3）では、上部構造と橋脚とが剛結されており、上部構造の慣性回転モーメントと慣性上下動が橋脚上部に直接作用する。断面形状は要素幅の異なる矩形断面の集合とし、躯体を構成する要素には高次要素を使用した。橋脚とフーチング間には、主鉄筋の抜け出しを考慮するための接合要素を配置した。鉄筋の接合および定着は完全であることを仮定しており、主鉄筋の段落としは要素ごとに定義される鉄筋比の急変として表される。材料強度は想定される上限値、すなわち、コンクリートの圧縮強度30 MPa、鉄筋の降伏点400 MPaとした。

対象構造物の地震被害には、構造特性と地震波の特性の両者が深く関与する。実際に構造物に入力された地震波を特定することは難しいので、第一ステップとして、大きな水平加速度が記録された神戸気象台発表の地震波（NS成分最大818 gal、鉛直成分最大332 gal）を用いた。水平および鉛直入力加速度はフーチング底面に作用させた。解析には、多方向にひびわれを含む鉄筋コンクリート要素の交番繰り返し荷重下での構成則を用いている。したがって、履歴減衰や地震以後の残留変形、上部構造のロッキングや

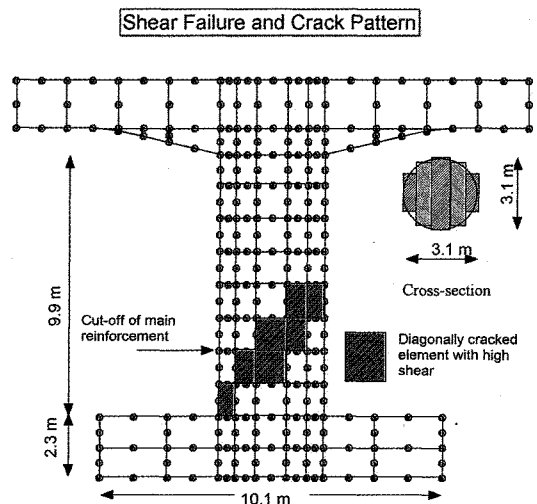
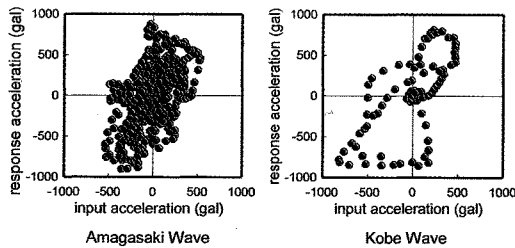


図-3 要素分割とせん断破壊の進展



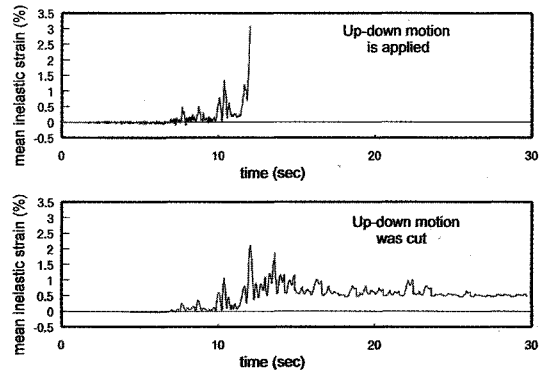
図—4 入力加速度と応答加速度の関係

鉛直動に伴う軸力の変動が復元力特性に及ぼす影響を、合理的に扱うことが可能である。なお、破壊基準は鉄筋コンクリート要素ごとに規定されており、破壊モードが予測可能である。

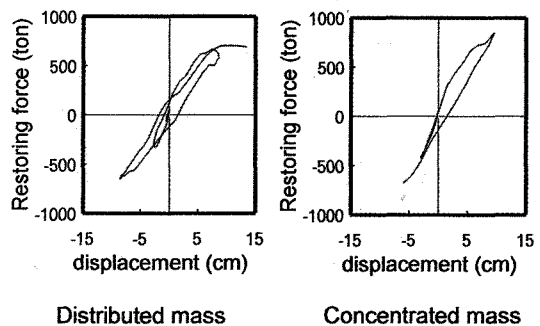
入力水平加速度と橋脚天端での応答水平加速度との関係によれば、上部構造の応答加速度が約 900 gal に到達して終局に至っている (図—4)。主鉄筋が降伏した後に、開口したひびわれにそったせん断ひずみが破壊基準を越えた要素が連続して発生し、破壊に至っている (図—3)。倒壊の引き金は、せん断破壊に伴う上載重量の保持能力の消失と推測される。

今回の地震の特徴として、相対的に大きな鉛直振動が観測されたことである。そこで、大きな鉛直加速度が観測された尼崎市で得られた地震波 (鉛直最大 326 gal, 水平最大 269 gal) を 2 倍に増幅した波を用いた検討も行った。神戸気象台の地震波に比較して水平入力加速度は小さいものの、この場合も応答最大加速度は約 950 gal に到達し、同様にせん断破壊に至っている。しかし、入力加速度と応答加速度との関係は両者で大きく異なる結果となった (図—4)。神戸気象台の波は継続時間が短く、地震開始から最大加速度に至る時間が短いことが主な原因と思われる。

鉛直地震動の影響を検討する目的で、前記 2 つの地震波の鉛直成分を除いた解析を行った。神戸気象台の地震波では、鉛直地震動は応答にはほとんど影響を及ぼしていない。しかし、尼崎の地震波を 2 倍に拡大した例では、鉛直地震動を考慮した場合、約 12 秒で主として鉄筋の降伏とひびわれ開口変形に依存する平均非弾性ひずみがピークを迎えて破壊に至った。これに対して、鉛直成分をゼロとした場合は破壊に至らず、地震以後に約 0.5% の平均非弾性ひずみが残留するに止まった (図—5)。この解析結果は、



図—5 鉛直地震動の影響



図—6 上部構造の回転慣性の影響

鉛直地震動が支配的ではないものの、最大鉛直加速度が 650 gal にもなると、水平動との連成において無視できないことを示している。

上部構造と下部構造が剛結され、しかも上部構造の張出部に大きな質量が加わっているがために、水平変位によって導入される上部構造の回転慣性力が、橋脚に対して端モーメントとして作用する。同様に、鉄筋の降伏やひびわれ開口による橋脚軸方向の変位が、上部構造の鉛直方向の慣性力を発生させ、入力鉛直地震動とともに軸力の変動要因となる。この連成振動がピルツ橋の応答に大きく影響している可能性があるとの指摘もあったので、上部構造の質量を橋脚直上に集中させた解析を実施して比較した。

その結果、復元力特性における内部曲線には上部構造の質量分布の差が現れてくるが、いずれもほぼ同時刻に破壊に至っている (図—6)。ロッキングの影響は無視できないが、支配的要因とはなっていない。