

(21) 兵庫県南部地震における土木構造物の衝撃的破壊の事例

Some Instances of Impulsive Failure Mode in Civil Engineering Structures
by Hyogoken-Nanbu Earthquake

園田恵一郎*, 小林治俊**

Keiichiro SONODA and Harutoshi KOBAYASHI

*工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科(〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

**工博 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科(〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

キーワード: 兵庫県南部地震, 土木構造物, 衝撃的破壊

(Hyogoken-Nanbu earthquake, structures, impulsive failure mode)

1. はじめに

兵庫県南部地震において土木および建築構造物に衝撃破壊あるいは衝撃的破壊現象が見られたことは多くの人達によって指摘されている。しかしながら、何をもって衝撃破壊あるいは衝撃的破壊と呼んでいるのかは人によってさまざまであり、衝撃破壊なる用語が明確な定義に基づいて用いられているわけでもない。

ところで典型的な衝撃破壊現象とは、2物体の衝突に伴う破壊現象であり、衝突体から受けた応力波が非衝突体の内部に伝播し、境界において反射や屈折を繰り返し、内部に発生する圧縮および引張応力またはせん断応力によって非衝突体である物体または構造物が破壊する現象である。一般に、柱のような棒状の部材では、軸方向力によって破壊する(縦)衝撃問題と曲げモーメントやせん断力により破壊する横衝撃問題が考えられるが、ここでは鉛直衝撃破壊と見られる現象に着目している。もちろん今回の地震に見舞われた土木構造物においては、いろいろな破壊形式が見られるが、本報告は上述の視点に立って、地震の初期の鉛直衝撃破壊が引き金になったと思われる土木構造物の破壊現象について論究したい。

2. 衝撃引張・圧縮破壊を起こし易い構造形状

一般的に、衝撃力は物体の衝突によって発生するので、衝突体が柔らかければ、それだけ衝撃力は弱まってしまふ。したがって、軟弱な地盤の上に乗っている構造物は大きな衝撃力を受けにくい。今回の地震で、基礎工が比較的しっかりしていて、RC杭や鋼管杭などで堅固な支持地盤に定着させた構造物ほどかえって衝撃破壊を起こしたことは頷けられる。

一方、今回の地震で、鉄筋コンクリート柱が壊滅的な破壊を起こしたことが特徴である。図-1に示すように、高架橋のように基礎工の面積に比して柱断面積の小さい構造物では、基礎工に入射したある大きさの圧縮応力波は柱部で増幅され、さらに上部で反射して引張波として戻ってくるので、脆性材料であるコンクリートは柱部で破壊し易い。また、上部構造物の重量が大きいと上端での反射率が大きくなり、それだけ柱の圧縮破壊を助長することになる。したがって、基礎工の重量と面積が大きく、かつ上部工の重量が大きい構造で、柱断面が小さい構造ほど衝撃引張・圧縮破壊を起こし易いと言える。

3. 土木構造物における衝撃破壊と見られる現象

(1) 道路高架橋RC柱の水平輪切りひび割れ

写真-1, 2に見られるような柱軸に垂直に入ったひび割れは全周にほぼ水平に入っており、軸引張力によるひび割れと考えられる。このようなひび割れが水平加速度に基づく交番曲げで入ったという考えもあるが、子細に調べると、水平の輪切りひび割れは柱の上部を含む全域で入っており(図-2参照)、曲げによるものとは考えにくい。それでは鉛直加速度で入ったものなのか? 通常の高架橋では自重による柱断面の応力は10数~20 kgf/cm²程度であるので、もし地震形に記録されているような周期が0.2秒から数秒程度の鉛直地動でコンクリートにひび割れを生じさせるには重力加速度の2.5倍以上の鉛直加速度を必要とするが、このような大きな鉛直加速度は記録されていない。すなわち、地震計で記録されているような水平加速度や鉛直加速度では説明できない現象であり、立ち上がりの急な衝撃的な圧縮力が基礎地盤から入射され、上端での反射(反射率が負)の影響あるいは縦振動の影響によって軸引張力が発生したものと推定される。また、写真-3は比較的地盤の堅固な地域での柱下端部のひび割れ損傷と浮き上がり現象を示しており、この種の浮き上がり現象も鉛直衝撃力の証拠の一つと考えられる。

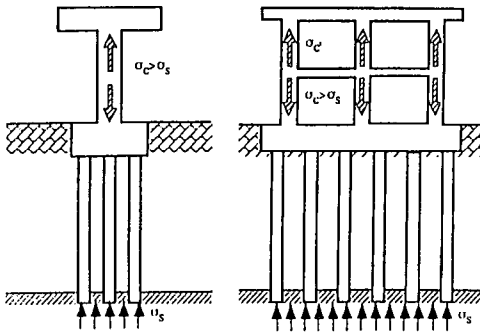


図-1 鉛直衝撃破壊を起こし易い構造形状

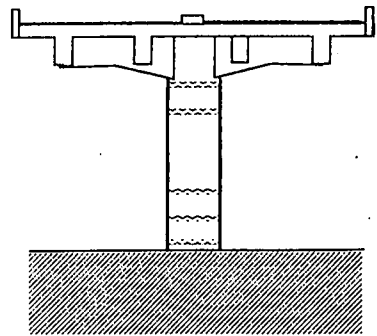


図-2 水平輪切りひび割れの模式図

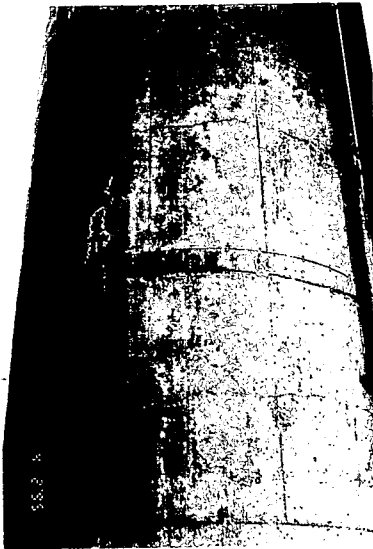


写真-1 高架橋RC柱の水平輪切りひび割れ

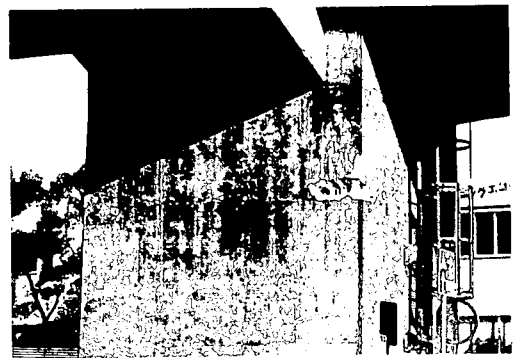


写真-2 高架橋RC柱の軸引張による破壊

(2) 道路および鉄道高架橋RC柱における圧縮破壊あるいは引張・圧縮複合破壊

写真-4, 5, 6に見られる破壊現象が何によってもたらされたものなのか? 水平加速度による交番曲げあるいは交番せん断による破壊であろうという説もあるが、破壊部分が局所的に集中しており、その位置が柱下端であったり、柱中間部であったり、柱上端部であったり一定していないこと、さらに写真-5の長方形断面でも

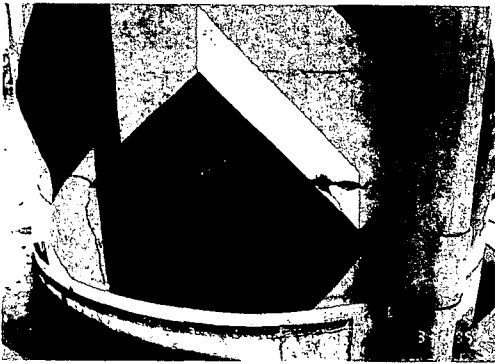


写真-3 橋脚下端の浮き上がりと水平輪切りひび割れ

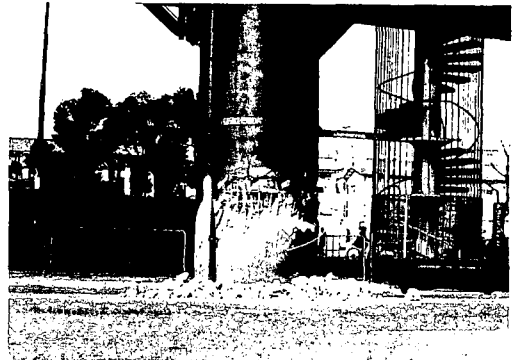


写真-4 圧縮破壊あるいは引張・圧縮複合破壊と思われる現象-その1

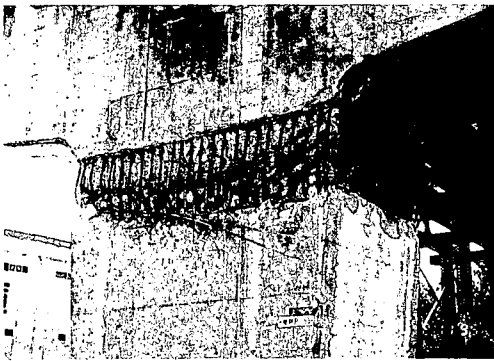


写真-5 同-その2



写真-6 同-その3

破壊が全周にわたっていることより、交番曲げによる破壊とは考えにくい。一方、1本柱の高架橋は構造的にはトップヘビーな片持ちばり構造であるので、せん断破壊より曲げ破壊が先行し易いと考えられる。また、ラーメン構造のRC高架橋では、破壊が柱のみに集中しており、はり部の破壊が少ないのも特徴である。一般的に、棒状構造物の衝撃圧縮破壊は局所的に集中する現象であるので、上述の現象は衝撃圧縮破壊または引張・圧縮複合破壊の現象と推察される。

(3) 道路高架橋の鋼製橋脚の座屈

写真-7, 8は軸圧縮による橋脚鋼製柱の典型的な座屈現象である。写真-7の鋼管円柱の座屈位置は鋼板の板厚の変化点であり、最も薄い板厚部分の最下部である。この構造では、上部に重量の大きい上部工(2重デッキ鋼桁)がトップヘビーであるので、曲げの影響を受け易いと思われるが、座屈後の柱には曲げ変形は全く見られない。なお、別の場所でも類似の鋼製柱の座屈が多く見られるが、上部工が偏心載荷しているものには曲げ変形がみられるが、大きな水平変形を受け曲げ崩壊至ったものは見あたらない。一般的に考えて、この鋼製柱が水平力による曲げによって塑性座屈したならば、曲げ剛性が大きく低下し(塑性座屈後は不安定になるので)、最大水平力の作用方向に大きく変形し、上部工の自重による付加曲げモーメントによってさらに変形が増加し、倒壊に至るか倒壊に至らずとも相当大きな変形が発生すると思われるが、そのように説明できる現象は見あたらない。

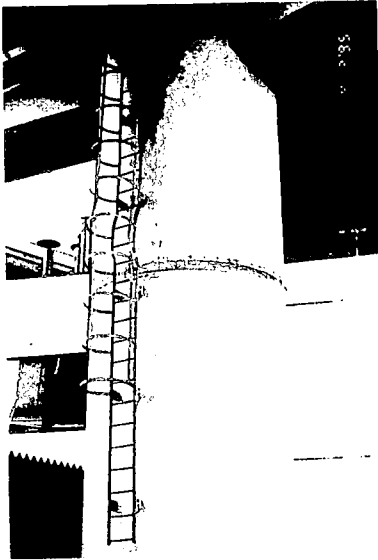


写真-7 鋼管円柱の座屈



写真-8 鋼管角柱の座屈

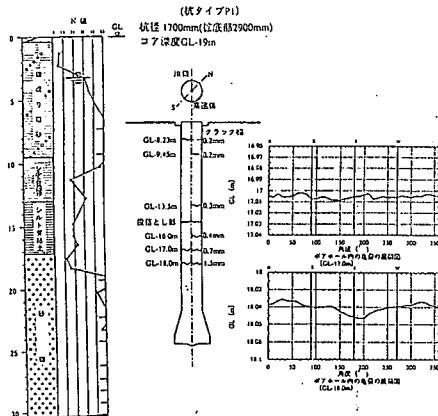


図-3 上載荷重の無い場所打ち杭のひび割れ損傷

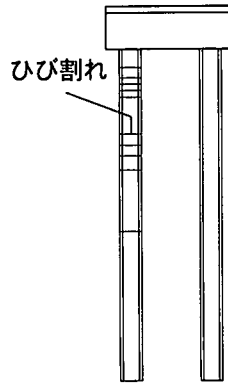


図-4 場所打ち杭のひび割れの模式図

(4) 上載荷重の無い場所打ちRC杭のひび割れ損傷

建設途上でまだ頂板や上部工の無い単独の場所打ちRC杭が今回の地震でひび割れ損傷を受けた。その一例を図-3に示す。この杭は上端が自由であるので、下端から入射した圧縮応力は上端で反射(反射率 $= -1$)で引張応力波となって戻り、その引張応力がコンクリートの引張強度を越えたために起こったものと推察される。

5) 道路高架橋の場所打ち杭のでの水平輪切りひび割れ

図-4には、柱が大きな被害を受けた高架橋の基礎である場所打ち杭のひび割れの模式図である。ひび割れは杭の上端に集中する傾向が認められるが、杭の中央部や下部にもひび割れが見られる。ひび割れは杭断面に直角に入っており、(1)で述べたRC柱の水平輪切りひび割れと同種のもので、軸引張力によるものと推察される。これらが水平力による交番曲げひび割れとすれば、杭の曲げモーメントは杭頭では大きい、内部に行くにつれ

て急速に減衰してしまうので、杭の中間部や下部でのひび割れは説明できない。

(6) 煙突の引張破壊

写真-9のように煙突が中間部で破壊している。これは、(5)と同じ理由による衝撃引張破壊現象と推察される。

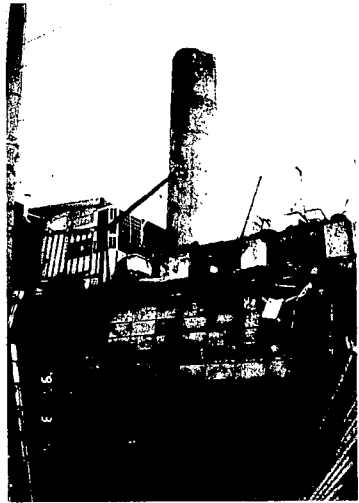


写真-9 煙突の引張破壊

(7) 鉄道高架橋の鑄鉄管柱の脆性破壊

写真-10、11は高架橋の鑄鉄管の軸引張による脆性破壊と思われる現象である。本高架橋での上部工の重量はそれほど大きくないように思われるので、柱下端（ヒンジ端）から入射した圧縮応力波が上端での反射、ならびに、その後の鉛直振動の影響を受けて引張破壊したものと考えられる。破壊した柱は橋軸方向には上、下端ともヒンジ構造になっているので、この柱は橋軸方向には曲げモーメントが発生しない。したがって、この柱が曲げ破壊するならば橋軸直角方向に変形するはずであるが、そのような傾向は認められない。

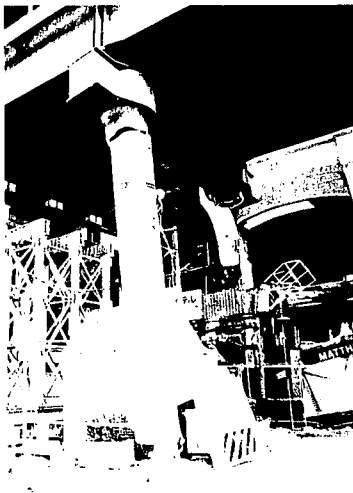


写真-10 橋脚鑄造管の脆性破壊

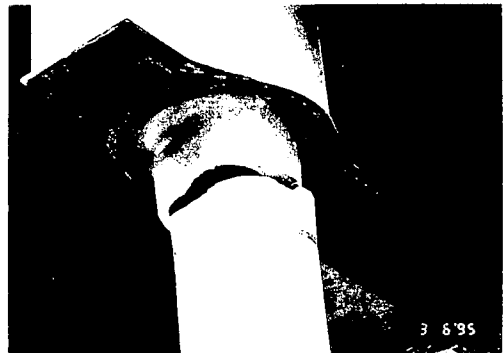


写真-11 左のクローズアップ

(8) 道路高架橋における上部工の支承の鉛直破壊

今回の地震による橋梁上部工の金属支承の破壊例は数多く見られる。もちろん水平力の作用による破壊と思われる事例も多くあるが、鉛直力（圧縮力または引張力）による破壊と思われる事例も多い。写真-12および写真-13は大阪市北区内の道路高架橋における支承およびそれを受けるコンクリート桁および上部の鋼桁の局部破壊の例を示している。地震計の記録によれば、この地域での最大水平および鉛直加速度は 200 gals 程度であり、破壊の大きさから見て、地震計の記録にない鉛直衝撃力が作用したものと考えられる。

(9) 地下鉄駅舎部の中間柱の破壊

写真-14, 図-5は神戸高速鉄道の大開駅の間中柱の破壊状況を示している。大破した駅舎の構造は1径間1層ラーメン形式であり、土被りは4.8mとなっている。大破したのは駅舎部のみであるが、隧道部の側壁にも大きなひび割れ損傷が見られる。駅部の底床版を支持する地盤は洪積層で比較的堅固であると聞いている。最初に述べたように、底床版が強固な地盤に支えられ底面積が広い程、下面から入射された圧縮波は断面の小さな柱部で増幅され、さらに上部荷重が大きければ大きいほど反射率が大きくなり、柱は圧縮破壊し易くなると考えられる。地盤を含めた3次元有限要素モデルによるシミュレーション解析では、自重による圧縮応力を除けば、圧縮応力も引張応力もほぼ同じ値になるので、応力の大きい柱部では圧縮破壊し、応力の比較的小さい隧道部では引張破壊したものと考えられる。

なお、われわれは被害が無かったと言われている隣接する新開地駅の間中柱を調べたところ、写真-15に見られるような水平輪切りひび割れを確認していることもつけ加えたい。(了)



写真-14 地下鉄大開駅の間中柱の破壊

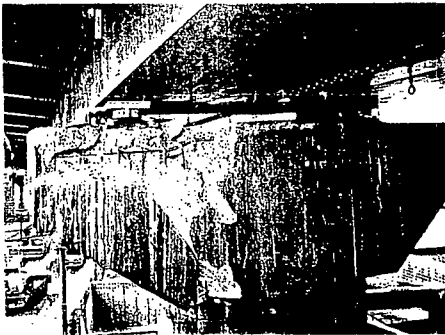


写真-12 橋梁脊を受けるコンクリート橋脚の破壊

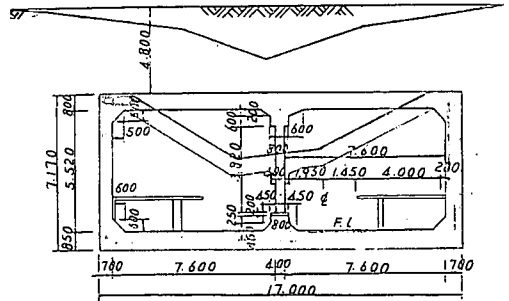


図-5 地下鉄大開駅のラーメン構造の破壊形状

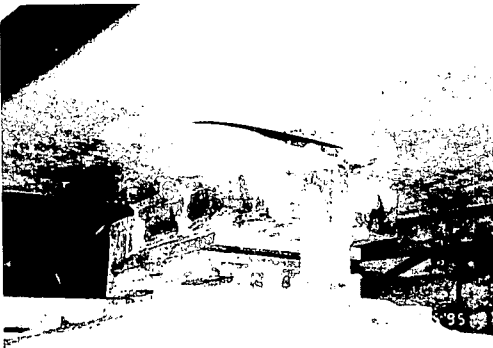


写真-13 脊で支えられた鋼桁の鉛直破壊

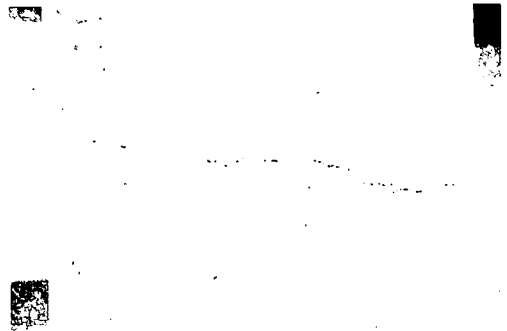


写真-15 地下鉄新開地駅の間中柱の引張破壊