

阪神大震災における土木構造物の衝撃的破壊について

-地盤と構造物の相互作用の応力波伝播解析による検討-

On Impulsive Failure of Civil Engineering Structures in Hanshin-Awaji Earthquake (Kobe, 1995)

-Consideration by Stress Wave Propagation Analyses for Soil Foundation-Structures Interaction-

園田恵一郎

Keiichiro SONODA

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)

キーワード：兵庫県南部地震，衝撃载荷，波動，地盤と構造物の相互作用

(Hyogo-ken Nambu Earthquake, Impulsive Loading, Wave Propagation, Soil Foundation-Structure Interaction)

1. はじめに

筆者らは、兵庫県南部地震での土木構造物の破壊に対して上下地震動の影響が大きいとの確信の下に独自の調査・研究を進めてきた。今回の地震では、高架橋や地下鉄駅舎などの被害は柱部に集中していることが特徴である。本報告は、上下地震動による地盤と構造物の相互作用の問題に着目し、まず最初に、多層地盤内の応力伝播特性について論究し、ついで、基礎工に入射した応力波の柱部への集中現象を検討し、最後に、一例として、神戸高速鉄道大開駅を取り上げ、中間RC柱が鉛直(縦)衝撃によって破壊した可能性を検討したものである。

2. 阪神大震災での上、下地震動の記録について

各機関によって発表された最大鉛直速度および加速度の記録¹⁾からみると、神戸海洋気象台で最大速度40kine、最大加速度332galで、六甲台の神戸大学で最大速度33kine、最大加速度426galであった。神戸海洋気象台での最大水平速度90kine、最大水平加速度818galに比べると、これらの値は約1/2程度である。図1a),b)に示す神戸海洋気象台での地震動のスペクトル分布²⁾をみると、水平成分では卓越周期が1秒前後にあり、鉛直成分の卓越周期もほぼ同様の1秒前後にあることが分かる。また、図1c)に鉛直速度のピーク付近の記録波形を示すが、これらの図より、上下動の特性は水平動の特性とあまり変わらないように思われる。しかしながら、神戸海洋気象台測候課の春海孝氏は、地震当日、現業室で3人が当直勤務しており、『突き上げに続く横揺れに翻弄され、29kgもある気象観測ディスプレイが次々に床に落下した』と証言しており(神戸新聞社：神戸新聞の100日、プレジデント社、1995年11月、p.41)、また、同海洋気象台の前の自宅に居られた本田一子さんも、『地震当日、ドーンという爆発音と共にものすごい震動にびっくりし飛び起き、激しい揺れの中、階段を駆け降り玄関近くで、両親と揺れのおさまるのを待ちました』と証言している(日火ニュース(No.392, 1995年7月号)特集阪神・淡路大震災：日本火災海上保険(株)、p.46)。これらの証言から見ると地震計はその周波数特性により、地震の極く初期における高周波の上下動を捉えていない可能性も指摘できる。一般に長周期の地盤の速度は剛体としての運動に関連するが、極く短周期の速度は地盤の粗密波の粒子速度(particle velocity)と見なせるように思われる。いま、地下の深い地点より入射した平面波を仮定すれば、鉛直方向の粒子速度 v による弾性体内の鉛直方向の応力(σ_z)は次式によって与えられる。

$$\sigma_z = -C\rho v \quad (1)$$

ここに、 C は縦波の速度、 ρ は密度で、 $C\rho$ は特性インピーダンスと呼ばれている。例えば、地盤の弾性係数を

105 kg/cm²、ポアソン比を0.4、 $\rho=2.0t/m^3$ と仮定すれば、 $v=1$ kineで、 $\alpha_2=-0.66$ kg/cm²となり、もし前述の証言から推測される高周波の上下方向の速度があったならば、地盤内にかなりの大きさの鉛直圧縮応力が発生していた可能性も指摘できる。

3. 多層地盤の応力波伝播特性

最初に多層地盤内の基盤面に上下動を受けた場合に、各層の地盤にどのような鉛直応力が発生するかを検討する。基盤面が地表から十分深く反射の影響を受けないならば、基盤面の粒子速度 v と発生する応力との関係は式(1)で与えられる。しかしながら、通常の地震計が設置されているような地表面に近い位置での粒子速度は地表面での反射の影響を受け、粒子速度と応力との関係は式(1)で表すことができない。高架橋の橋脚などの土木構造物は、通常、杭基礎やケーソン基礎によって地盤の支持層に支えられている。したがって、表層地盤の中では比較的強固な構造物の支持層での発生応力の評価が後に検討する地盤と構造物の相互作用の問題の解明に重要になる。

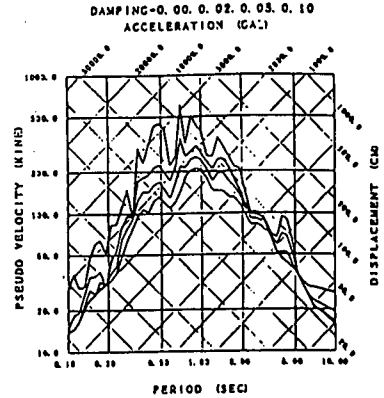
図2は多層地盤の一つのモデルで、表層部は軟弱な沖積地盤と構造物を支持する洪積地盤から成っており、基盤は比較的強固な岩盤層としている。いま、基盤の下部にある岩盤の十分深いある面で地震により鉛直方向の平面波を受けたものと仮定する。ここでは、衝撃的な上下動を対象として、次式(2)の変位 w と(3)の速度 \dot{w} で与えられるようなパルス的な変位波を対象とする。

$$w = \frac{T_0}{2\pi} v_0 \left[1 - \cos \frac{2\pi}{T_0} t \right], \quad (0 \leq t \leq T_0) \quad (2)$$

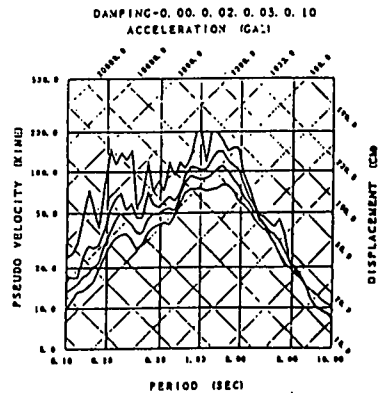
$$\dot{w} = v_0 \sin \frac{2\pi}{T_0} t, \quad (0 \leq t \leq T_0) \quad (3)$$

ここに、 v_0 は最大鉛直速度、 T_0 は周期(ここでは入力変位の継続時間でもある)、波長 $\lambda = cT_0$ (c は縦波の速度)になる。すなわち、入力面は時刻 t が T_0 までは正弦関数の速度を受け、それ以後は岩盤層の特性インピーダンス $C\rho$ に等しい粘性係数を有する境界面として取り扱っている。

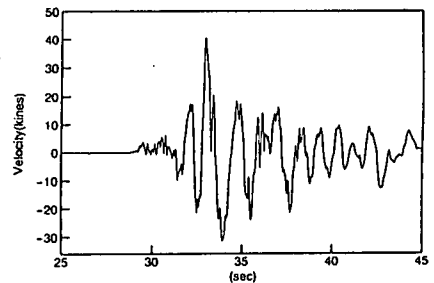
いま、図2における各層の層厚、密度および縦波の速度を、それぞれ $H_1=20m$, $\rho_1=1.6t/m^3$, $C_{p1}=362m/s$; $H_2=20m$, $\rho_2=2.0t/m^3$, $C_{p2}=1024m/s$; $H_3=20m$, $\rho_3=2.0t/m^3$, $C_{p3}=3240m/s$; $H_4=200m$, $\rho_4=2.0t/m^3$, $C_{p4}=3240m/s$ としたモデルでの、最大速度 $v_0=1$ kine、継続時間 $T_0=0.032$ secを入力したときの基盤層の中央③での鉛直応力と速度の時刻歴をそれぞれ図3a), b)に、また構造物の支持層である砂質土層中央②での鉛直応力と速度の時刻歴をそれぞれ図



a) 応答スペクトル図 (N-S 成分)



b) 応答スペクトル図 (U-D 成分)



c) 速度波形 (U-D 成分)

図1 神戸海洋気象台での地震記録¹⁾

3c), d)に示す。ここで用いた減衰定数(h)は要素剛性行列に比例するもので、減衰率(h)は減衰定数の $\sqrt{2} C_p$ に対する比に採っている。h=0.0, 0.1, 0.2と変化させたときの応答を見ると、基盤層および砂質土層の中央③、②では、鉛直応力も鉛直速度もほぼ同じ応答を示し、減衰率の影響はわずかに認められるのみである。また基盤層中央③では式(1)の関係をほぼ満足しているが、砂質土層中央②での鉛直応力は式(1)によるものより大きくなっている。一方、地表面の鉛直変位および速度の応答を見ると、図3e), f)に見られるように、減衰率の影響は大きく、h=0.0に比べてh=0.2の場合では、最大応答値が約半分に低下している。

つぎに、入力変位の継続時間(T_0)を変化させたときの砂質土中央②での鉛直応力の最大応答値の関係を示したものが図4である。図は最大圧縮および引張応力値を示しているが、最大圧縮応力は $T_0=0.016\sim 0.032\text{sec}$ 付近で発生し、最大引張応力は $T_0=0.064\text{sec}$ 付近で発生していることが分かる。多層弾性地盤の鉛直動の固有周期を近似的に

$$T_e = 4 \sum_i \frac{H_i}{C_i} \quad (4)$$

ここに、 H_i は層厚、 C_i は波速、として計算すれば、図2の4層モデルで $T_e=0.549\text{sec}$ 、このモデルの上部1層のみを考慮すれば、 $T_e=0.2\text{sec}$ となるので、 T_0 が T_e より大きくなれば、地盤内の鉛直応力は減少し、また T_0 が非常に小さくなっても応力波が基盤内で反射し、減衰の影響も大きくなって構造物の支持層である砂質土内の鉛直応力が減少することが分かる。すなわち、上下動を受けた多層地盤内では鉛直応力が卓越する周波数領域が存在するが、最大応力値は式(1)による算定値を若干上回る程度である。

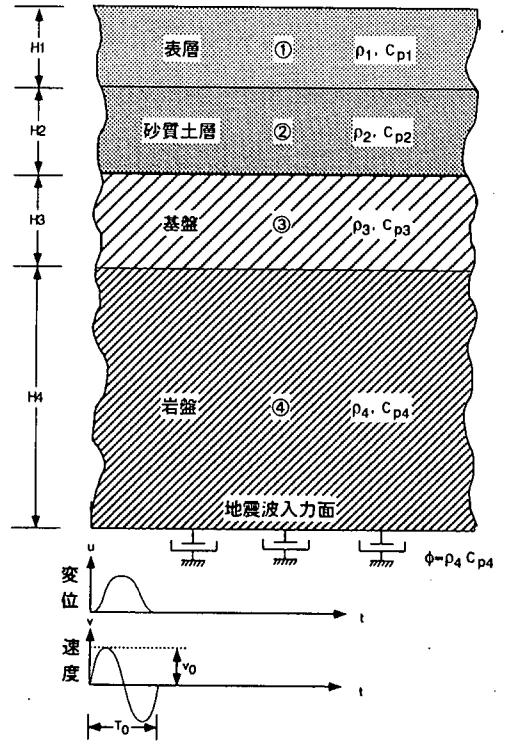


図2 多層地盤モデルとパルスの鉛直変位動

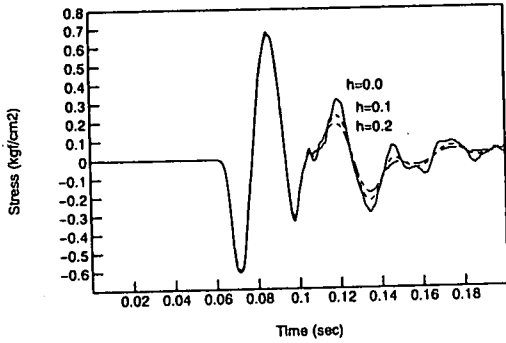
4. 橋脚の柱部への応力の集中現象の検討

高架橋の橋脚を模して極く単純化した図5の構造モデルを取り上げ、フーチング下面に入射した、図6に示す正弦半波パルス形の応力(1kgf/cm²)が柱部でどのように増幅するかを検討した。解析には3次元有限要素弾性モデルを用い、時間積分は陽解法によった。図7には柱中央部での鉛直応力に対する増幅率を示している。増幅率は入力周期 T_0 ($T_0/2$ は入力応力の継続時間でもある)に大きく依存しており、 $T_0=0.02\text{sec}$ 付近で最大の増幅率を示しており、柱とフーチングの面積比である9に近づいている。すなわち、入力周期と柱の伸縮運動の固有周期が一致すれば、1種の共振現象を起こし、上下から同じ圧力を受けたときの静的応力に近い応力が柱部に発生することが分かる。

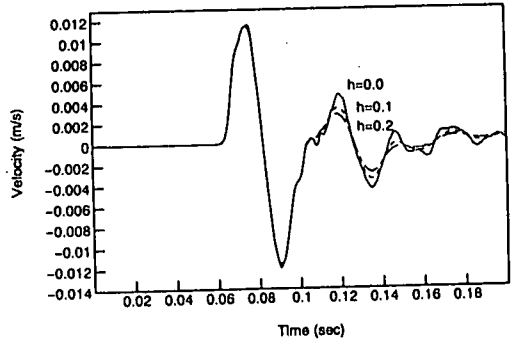
5. 大開駅中間RC柱での応力集中現象の検討

5.1 3次元有限要素モデル

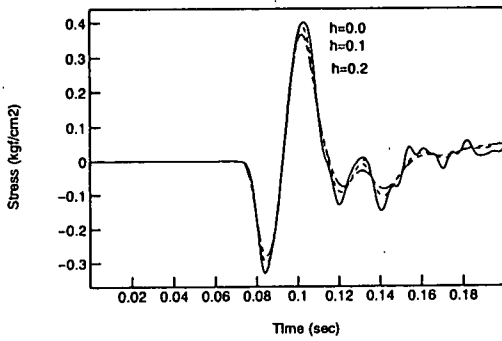
最初に、上下地震動によって、なぜ中間柱に被害が集中したのか？側壁部は中間柱に比べて被害が小さいのはなぜか？この問題を解くために、図8に示す中間柱の一つに着目した3次元有限要素モデルにおいて、底床版の底



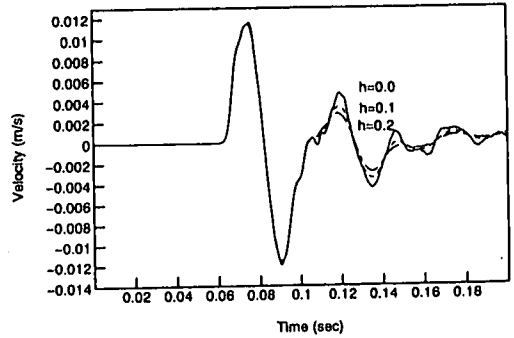
a) 基盤中央③の鉛直応力



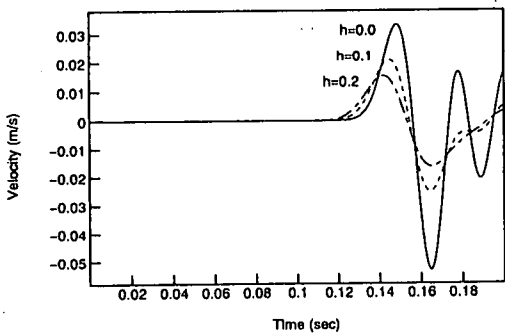
b) 基盤中央③の鉛直速度



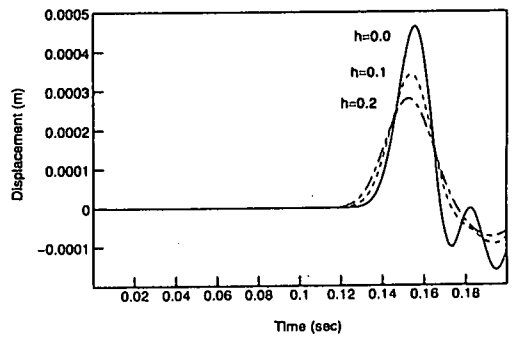
c) 砂質土中央②の鉛直応力



d) 砂質土中央②の鉛直速度



e) 地表面での鉛直速度



f) 地表面での鉛直変位

図3 多層弾性地盤での応力、速度、変位の応答($V_0=1$ kine、 $T_0=0.032$ sec)

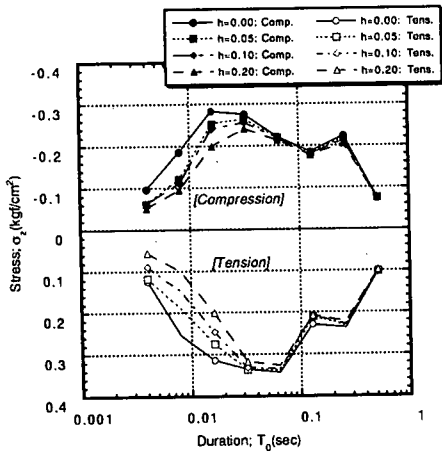


図4 砂質土中央②での鉛直応力の最大応答値 (Vo=1kine)

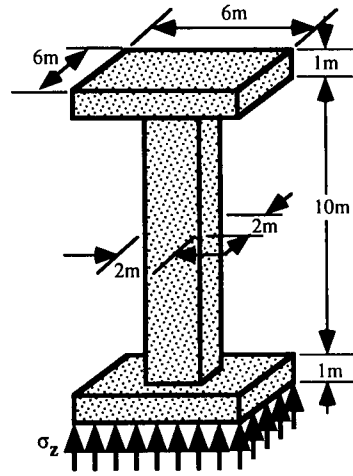


図5 橋脚モデル

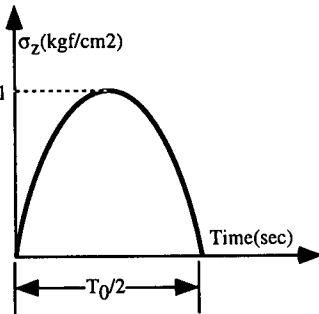


図6 正弦半波パルス形入射応力

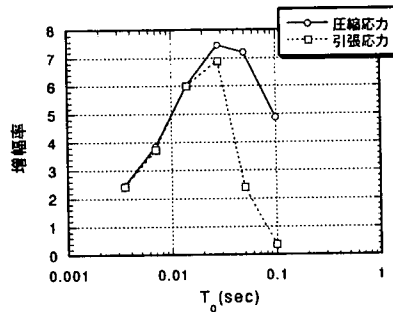


図7 橋脚柱部での鉛直応力の増幅率

面から入射された応力波が境界面で反射と屈折を繰り返し、柱部にどのように伝達されるかを調べる。トンネル軸方向の柱間隔は3.5mであり、解析の都合により着目柱と隣接柱の3本を含むモデルを考え、トンネル軸方向の境界面は上下に自由と仮定した。また、駅舎上部の土被りは4.8mもあり、上載土の影響が大きいと考えると図8のモデルではこれを考慮している。採用した材料定数は、上載土では弾性係数(E):400kgf/cm²、ポアソン比(ν):0.488、密度(ρ):1.6t/m³、ラーメン構造部ではE=3x10⁵kgf/cm²、ν=1/6、ρ=2.4t/m³である。

5.2 正弦半波パルス形荷重の入力による応答解析

図8のモデルの底床版の下面に、図6に示すような正弦半波の鉛直応力(最大値は1kgf/cm²)を入力したときに柱中間部での鉛直(軸方向)応力がどのような応答を示すかを検討した。図9は図6の入力応力波の周期(T₀)、T₀/2は荷重の継続時間でもある、と柱中間部の鉛直応力の最大応答値の関係を示している。T₀=0.1sec付近で最大応答を示しており、圧縮応力の方が引張応力より若干大きくなっている(ただし、自重による応力は考慮していない)。すなわち、周期が0.1secより小さくなると入力波は底床版や上床版の上下面での反射の影響を受けて柱部の応力は小さくなっており、また周期が0.1secよりかなり大きくなると、上載土を含めたラーメン構造が剛体としての

運動が支配し、柱部の応力が減少しているものと推察される。図10には、 $T_0=0.1\text{sec}$ のときの柱中央部の鉛直応力の時刻歴を示している。圧縮応力の最大値は約 85kgf/cm^2 であり、入力応力の約85倍に到達しており、その発生時刻はパルス荷重の作用時間内にあるが、引張応力の最大値は 60kgf/cm^2 (入力応力の60倍)で、その発生時刻はパルス荷重の終了後であることが分かる。また、時間の経過につれて自由振動を起こしており、その周期は約 0.049sec と読み取れる。入力応力の85倍という大きな圧縮応力の増幅率は中間柱の断面積に対する底床版の面積(ただし側壁への寄与分を引いたもの)の比に相当しており、入力応力の周期 0.1sec は固有周期の約2倍であることより、図5の橋脚モデルの場合と同様に、中間柱の応力集中現象は1種の共振現象とも考えられる。

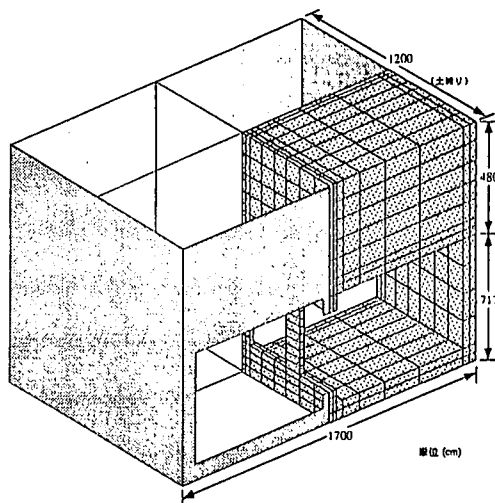


図8 3次元有限要素モデル

6. 多層地盤内での大開駅モデルの応答解析

6.1 地盤モデルと有限要素平面ひずみモデル

前節では、駅舎の3次元弾性モデルに対して、底床版下面からのパルス形入射応力波が柱部でどのように増幅されるかを検討したが、それでは地震時にどのような応力波が底床版下面に発生したを検討する必要がある。図12は大開駅の駅舎周辺の地盤図を示す。本駅舎は開削工法で建設されており、埋め戻し地盤は砂混じりの粘土層で柔らかいが、底床版の下部地盤はN値が60以上の比較的固い地盤である。図11には地盤各層のN値とPS検層によるP波とS波の速度が示されている。地盤は弾性体と仮定し、P波およびS波の速度より、各層の弾性係数(E)とポアソン比(ν)ならびに密度(ρ)を計算すれば以下ようになる。

- 上から 1層目: $E=952.3\text{kgf/cm}^2$, $\nu=0.488$, $\rho=1.6/\text{m}^3$
- 2層目: $E=1011.8\text{kgf/cm}^2$, $\nu=0.488$, $\rho=1.7/\text{m}^3$
- 3層目: $E=2643.8\text{kgf/cm}^2$, $\nu=0.487$, $\rho=1.8/\text{m}^3$
- 4層目: $E=1981.2\text{kgf/cm}^2$, $\nu=0.494$, $\rho=1.8/\text{m}^3$
- 5層目: $E=9671.8\text{kgf/cm}^2$, $\nu=0.481$, $\rho=2.0/\text{m}^3$

また、ラーメン躯体: $E=2.5 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$, $\nu=1/6$, $\rho=2.4/\text{m}^3$ 。

図12に有限要素モデルを示す。解析の都合上、トンネル断面方向の平面ひずみ問題とみなし、駅舎の中間柱は3.5m間隔で配置されているので、柱の断面積を3.5mで除した幅の壁として取り扱った。また地盤は水平面に無限に広がっているが、ここではラーメンの幅の

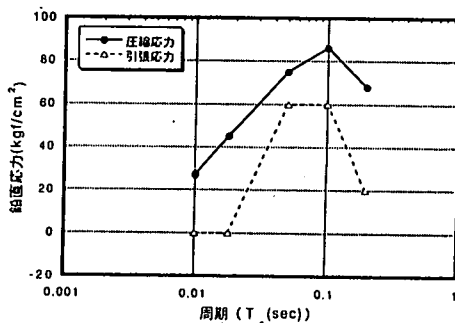


図9 柱中央部の鉛直応力の最大応答値と入力周期の関係

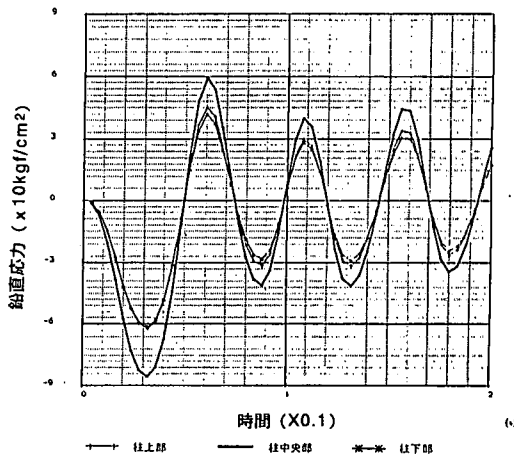


図10 中間RC柱の鉛直応力の時刻歴応答($T_0=0.1\text{sec}$)

20倍の幅を有する有限体として取り扱い、境界面は上下方向にのみ自由であると仮定した。

6.2 平面周期変位動による応答解析

最初に、地盤の5層目の下面に式(2), (3)で示した平面周期変位波(ただし、 $1 > T_0$ の領域にも適用)を入力したときの解析を行った。図13は入力 $v_0 = 1$ kineを導入したときの、柱中間部での鉛直(軸方向)応力の最大応答値と入力周期(T_0)との関係を示したものである。圧縮応力も引張応力もほぼ同じ値になっており、 $T_0 = 0.08$ secのときにいずれも最大応答値を示している。図14には図13の引張応力の応答に対する減衰率の影響を示している。ここでの減衰定数は質量マトリックスに比例したものを採用しており、減衰率(h)の T_0 に対する比で与えている。減衰率が大きくなるにつれて最大応答値は減少しているが、減衰率が顕著ではなく、 $h = 0.10$ のときでも最大応答値は40数 kg/cm^2 という大きな値になっている。図13、

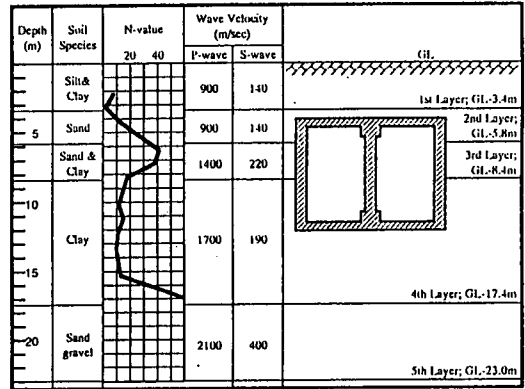


図11 周辺地盤のN値とP波およびS波の速度

図14には図13の引張応力の応答に対する減衰率の影響を示している。ここでの減衰定数は質量マトリックスに比例したものを採用しており、減衰率(h)の T_0 に対する比で与えている。減衰率が大きくなるにつれて最大応答値は減少しているが、減衰率が顕著ではなく、 $h = 0.10$ のときでも最大応答値は40数 kg/cm^2 という大きな値になっている。図13、

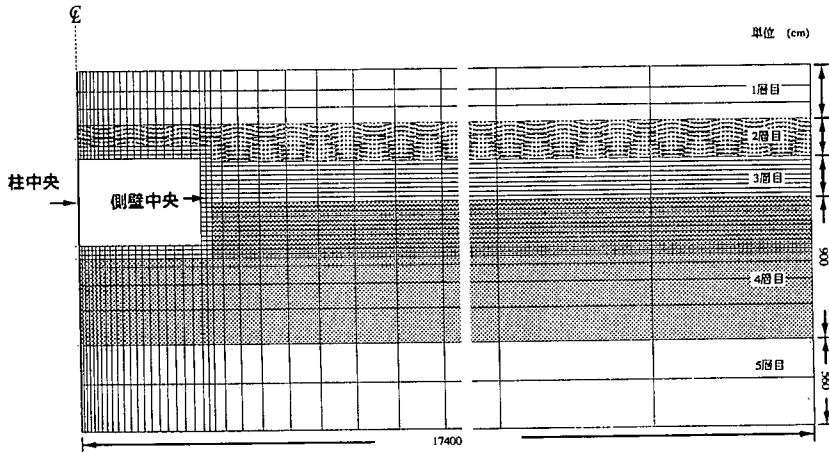


図12 平面ひずみ有限要素モデル

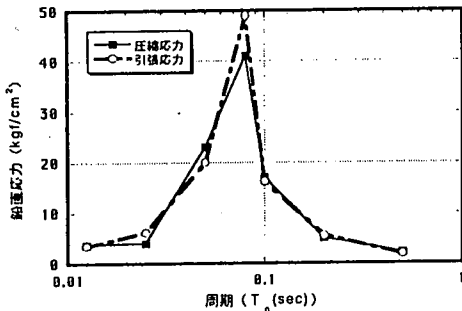


図13 柱中央部での鉛直応力の最大応答値と入力周期の関係

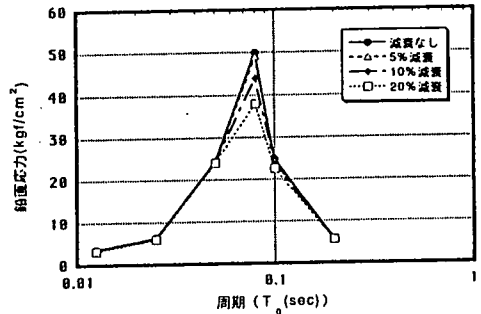


図14 柱中央部での鉛直引張応力の応答に対する減衰の影響

図14の一定の入力速度での増幅率の周波数依存性に比べて、図9の一定の入力応力時の柱中央部の鉛直応力の増幅率の周波数依存性の方が顕著であり、 $T_0=0.08\text{sec}$ から入力周期がはずれると急速に増幅率が減少していることが分かる。図15は $T_0=0.08\text{sec}$ のときの柱中央部と側壁中央部の鉛直応力の時刻歴応答を比較しているが、側壁の応力は柱の応力に比べて非常に小さいことが分かる。

つぎに、図12のモデルに対する固有値解析を行った結果を示す。図16には固有周期の大きいもの順に3次までのモードを示している。また、図17には駅舎部のないただ地盤だけでの同様に3次までのモードを示している。両図を比較すれば、駅舎の存在が地盤

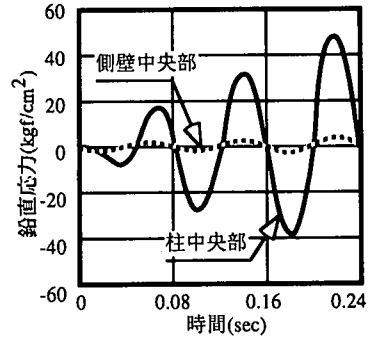


図15 $T_0=0.08\text{sec}$ での柱および側壁中央での鉛直応力の時刻応答歴



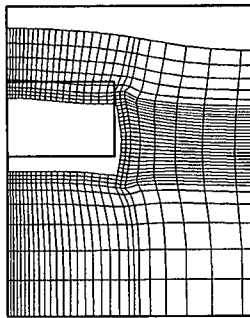
(a) 1次モード (周期0.692sec)



(b) 2次モード (周期0.377sec)



(c) 3次モード (周期0.280sec)



(d) 1次モードの拡大図

図16 駅舎を含む地盤での固有モードと固有周期



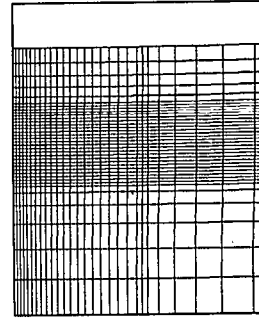
(a) 1次モード (周期0.705sec)



(b) 2次モード (周期0.385sec)



(c) 3次モード (周期0.286sec)



(d) 1次モードの拡大図

図17 駅舎のない地盤のみの固有モードと固有周期

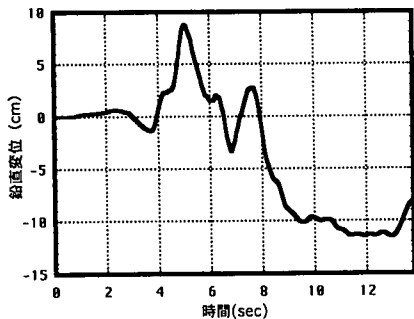


図18 神戸大学での地震波(鉛直変位成分)

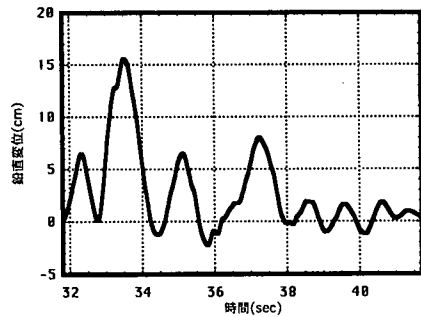


図19 神戸海洋気象台での地震波(鉛直変位成分)

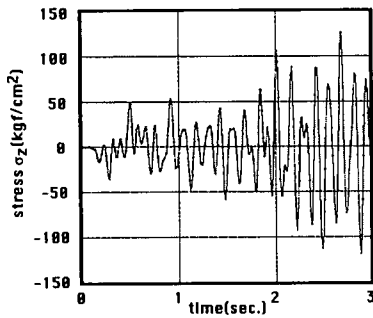


図20 神戸大学での地震波による
柱中央部応力の時刻応答歴

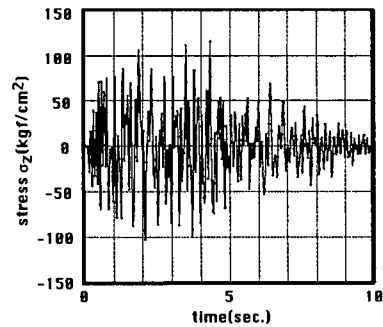


図21 神戸海洋気象台での地震波による
柱中央部応力の時刻応答歴

の伸縮運動を拘束していることが分かる。しかしながら、1次モードの周期が0.69sec、2次モードの周期が0.38secであるので、図13で最大応答を示した $T_0=0.08\text{sec}$ はそれらよりかなり小さく、柱部の鉛直応力の集中現象は上載土を含めたラーメン躯体の伸縮運動の固有周期に地盤の上下動の周期が一致した一種の共振現象とも考えられる。

6.3 実測地震上下動による応答解析

図18は六甲台の神戸大学で記録された地震波の上下変位成分である(速度記録波を積分したもの)。また、図19は神戸海洋気象台での加速度記録波の2回積分による上下変位成分である。これらの地震波はいずれも卓越周期は1秒前後であり、図13での柱の鉛直応力の最大応答周期より1オーダー長いものであるが、短周期も含んだ不規則波であるので、これらの変位波による応答解析を行って見た。解析モデルは図12と同じ平面ひずみ有限要素モデルであるが、底面からの反射の影響を少なくするために、第5層目の地盤の層厚を100mとし、その下面に図18および図19の上下変位動を入力した。減衰率 $h=0.05$ としたときの中間柱中央部の鉛直応力の時刻応答歴を図20および図21に示している。最大応答値は圧縮応力と引張応力ともほぼ同じで(ただし、自重による応力は考慮せず)、 120kgf/cm^2 程度になっている。本柱の自重応力は約 70kgf/cm^2 であり、それを加味しても最大圧縮応力は 200kgf/cm^2 にも到達していない。一般に高速載荷時のコンクリートの圧縮強度は静的強度より高くなると言われているので、図20および図21の結果からでは、大開駅の駅舎中間RC柱が今回の地震で引張破壊は起こしても、圧縮破

壊を起こしたとは言えない。

7. まとめ

- 1)多層地盤内の応力伝播特性を上下方向のパルス形の平面変位波の入射により1次元弾性解析を行った結果、地盤内に発生する鉛直応力が卓越する入力周期が認められた。
- 2)高架橋橋脚のモデルに対して正弦半波パルス形の鉛直応力を底面に入射した時に発生する柱部の鉛直応力は、入力周期が柱の固有周期に近づくと増幅され、最大増幅率は柱断面積に対するフーチング断面積に比に近づくことが判明した。
ついで、神戸高速鉄道大開駅の駅舎の3次元解析および周辺地盤を含む2次元解析を行った結果、以下の点が明らかになった。
- 3)底床版に単位の大きさの正弦半波パルス形の応力を入力したときの柱中央部の鉛直(軸方向)応力は入力周期が0.05~0.1secのときに最大応答を示し、最大応答値は入力値の85倍(圧縮応力)、60倍(引張応力)に到達する。
- 4)5層地盤の内部にある駅舎モデルにおいては、地盤下面からの正弦速度波に対応する平面鉛直変位波の入力の下での駅舎中間RC柱の鉛直応力は入力周期が0.08secと時に最大応答を示し、速度1kineの入力の下で約40kg/cm²になる。
- 5)六甲台の神戸大学および神戸海洋気象台での地震記録波による応答解析を行ったが、自重応力を加味しても中間RC柱の圧縮応力は200kg/cm²にも満たず、引張破壊はともかく圧縮破壊を起こしたとはいえない。
- 6)地震計には記録されていないが、もし周期が0.1秒前後の地震波で最大速度が10kineを越えるような上下動が存在していたならば、中間RC柱は引張破壊はもとより圧縮破壊も起こした可能性が指摘できる。

8. おわりに

本報は、筆者が土木構造物の破壊現場を何回も見てまわり、その観察の上に立って、高架橋や地下鉄駅舎を対象として、中間柱への応力集中現象および地盤と構造物の相互作用を2,3次元有限要素法を用いた弾性応力波伝播解析から検討した結果に基づいて作成したものであるが、モデルの妥当性、入力条件や地盤の非弾性特性などまだまだ検討すべき課題を残している。特に直下型地震における上、下動の高周波特性については、まだまだ不明な点が多く、今後の地震学の分野での研究成果に待つところが多い。最後に、本報が地震による土木構造物の衝撃破壊という従来ほとんど認識されなかった問題に対する今後の研究の一助になれば幸せとするところである。

参考文献

- 1)岩崎好規：1995年兵庫県南部地震動と京阪神の地盤、「阪神大震災」緊急合同報告会(資料集)、日本地質学会・日本応用地質学会・関西地質調査業協会・断層研究資料センター・大阪市立大学「阪神大震災」学術調査団、1995年3月。
- 2)廣戸徹夫、梅原俊夫、清水一二三、中村晋、江寄順一、末富岩雄：神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析、土木学会、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、pp.247-254,1996年1月。