

川崎重工業（株） 正会員 西尾 研二

岡山大学環境理工学部 正会員 竹宮 宏和

1. まえがき

兵庫県南部地震は直下型と呼ばれ、土木、建築構造物に甚大な被害を生じさせた。それらの多くは、曲げやせん断破壊として破壊メカニズムが説明された。しかし、RC橋脚や煙突において、引張破壊現象以外では、説明が難しい破壊の痕跡も見られた。そこで、直下地震による衝撃的な縦揺れの中に地震計では感知できないほどの高振動数の地震波が存在していたのではないかと言われている。本研究は、衝撃的な破壊を起こしたと思われる高架橋のラケット型橋脚を対象に、衝撃的地震波の入力により引張破壊が発生する可能性をコンピュータシミュレーションにより検討したものである。

2. 解析モデルとシミュレーション手法

解析モデルとして、応力波の伝播に伴う衝撃的破壊が原因と思われるラケット型橋脚を図1に1/4モデルとして示す。このとき、橋脚の奥行き方向への幅は1/4モデルに対して、1(m)としている。また、橋脚上部には、橋脚が受け持つ桁の重量を考慮するために、400(t)と400(t)の合わせて800(t)を桁の載っている部分に付加している。ただし、図中では、その重量の1/4である値を示している。地盤のモデル化に際しては、3層構造の地盤を想定しており、それぞれ沖積層、洪積層および岩盤層としている。地盤の物性値、層厚は図中に示すとおりである。本研究では、岩盤層の下部から衝撃的な上下動を受けた場合を考える。仮想境界の設定において、側方については鉛直方向のみ自由度を与えた単純境界、底面については時刻t=0からt=Tまでは衝撃的地震力を受け、それ以後は、岩盤層の特性インピーダンスをもつ粘性境界として取り扱っている¹⁾。なお、図中の*印は観測点を表しており、応力については*印に近い積分点で評価している。

シミュレーション手法として、構造物、地盤とともに8節点アイソバラメトリック要素でモデル化する3次元有限要素法を用いて、Newmarkの数値積分法を採用し、時刻歴解析を行う。また、構造物、地盤内の応力は、剛性マトリックスを作成する際に用いる変位-応力変換マトリックスにより求められる。なお、体積積分については、ガウスの8点積分を用いている。

衝撃により生じた応力波は、特性インピーダンス ρc と粒子速度 v との積で表される。そこで、衝撃的地震力を“ドンと突き上げるような揺れ”という証言をもとに、図2に示すような地震力を想定する²⁾。

3. 数値解析結果に基づく考察

ラケット型橋脚において、point3に衝撃的な破壊が見られた。まず、入射応力である正弦1波の入力周期を変化させることにより、破壊箇所(point3)の最大応力(引張応力)、最小応力(圧縮応力)がどのような傾向を示すか数值シミュレーションにより求めた。図3に横軸を対数表示にして示す。なお、入射応力の振幅については、1(kN/m²)であることに注意したい。

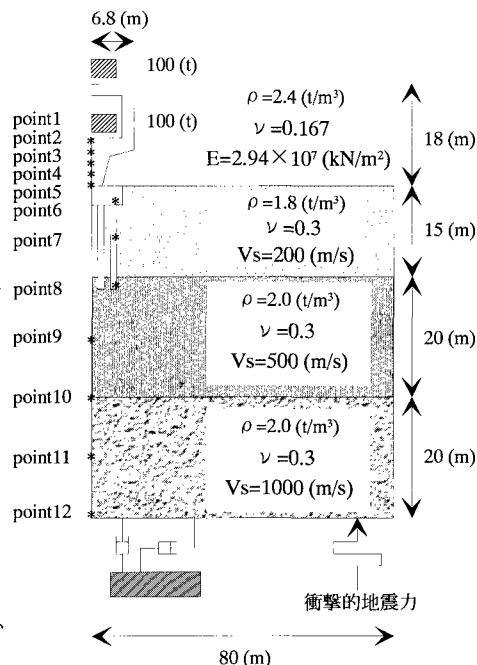


図1 ラケット型橋脚の解析モデル

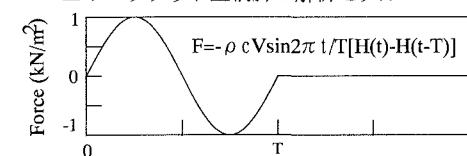
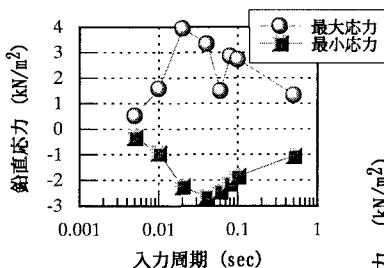
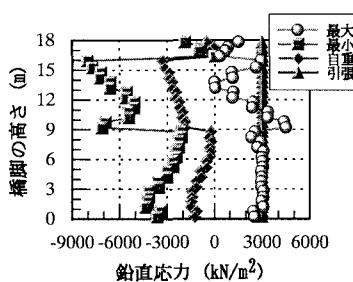
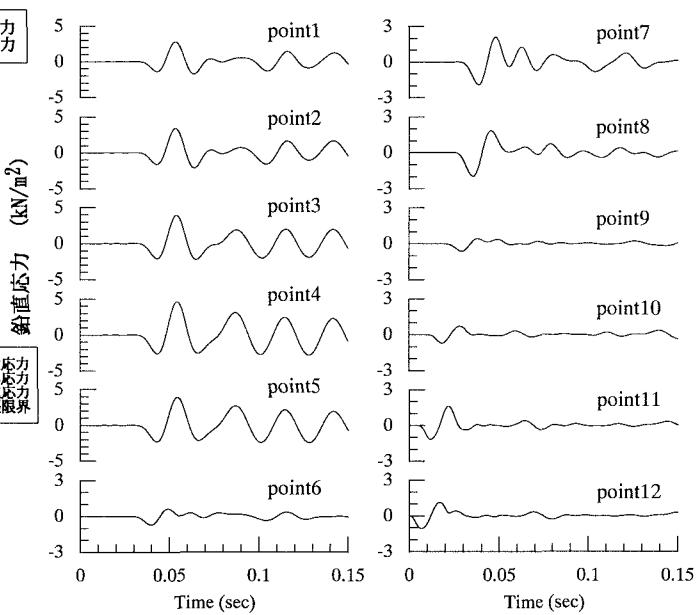


図2 衝撃的地震動図

図3 point3における入力周期と鉛直応力の関係($T=0.02\text{sec}$)図5 最大、最小鉛直応力の分布図($T=0.02\text{sec}$)図4 観測点における鉛直応力の時刻歴応答($T=0.02\text{sec}$)

張応力に着目すると、入力周期が0.02秒になるまで引張応力は増加し、それ以後は減少していることが読み取れる。また、引張応力の最大値については、 $3.94(\text{kN}/\text{m}^2)$ と增幅していることが分かる。次に、破壊箇所に最大引張応力を発生させる入力周期0.02秒に注目する。point1～point5における鉛直応力の時刻歴応答を図4に示す。ただし、正を引張応力、負を圧縮応力としている。いま、入射応力が正弦1波であることを考えれば、橋脚底面(point5)から入射した圧縮応力波が橋脚天端の自由境界条件のもとで反射し、後続の引張応力波と重なるとき、破壊箇所において最大引張応力を発生せることができる。図4の時刻歴応答をみると、上述した波動伝播の様子が現われている。ところで、入射応力の入力周期が長くなれば、力積は大きくなり、橋脚底面から入射される応力波も大きくなる。しかし、図3に示すように破壊箇所の引張応力を注目すると、0.02秒で最大値を示し、それ以後は減少する傾向が認められる。この理由として、入射応力の波長が長いと、橋脚内では、進行波と反射波の重ね合わせにより応力波が相殺されてしまうことが考えられる。次に、point6～point12における鉛直応力の時刻歴応答を図4に示す。図4から、杭下端(point8)から入射した応力波は増幅し、point7において大きな引張応力が生じていることが分かる。図5に入射速度30(kine)としたときの最大応力、最小応力、自重応力および引張限界を橋脚の高さに応じてプロットした図を示す。ただし、橋脚の引張限界を $3000(\text{kN}/\text{m}^2)$ と定めている。なお、入射応力は $\sigma = -pcv$ で計算したものを用いており、 pc は岩盤層の特性インピーダンスである。図5から、橋脚天端9(m)より下では、橋脚内の引張応力がコンクリートの引張限界に達しており、どの部分で引張破壊を起こしてもおかしくない結果となっている。

4. むすび

本研究では、兵庫県南部地震により生じた衝撃的破壊の原因究明のため、入射応力を正弦1波と想定し、橋脚内に引張破壊が生じるかを検討した。その結果、入力周期と鉛直応力の関係から、周期が0.02秒、入射速度30(kine)以上になると引張破壊を起こすのに十分な引張応力が発生することが分かった。また、岩盤層下部から入射した応力波が、柱部分において引張応力、圧縮応力ともに増幅していることが明らかになった。

参考文献

- 1) 園田恵一郎、小林治俊：地震波動による構造物と地盤の相互作用に対する数値解析の検討、「衝撃的地震動と構造物の被害」に関するコロキウム、pp.59～67、1996.9.
- 2) 竹宮宏和、堀内深：衝撃的地震動によるRC構造物の引張破壊現象の可能性、第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、pp.133～pp.138、1996.6.