

神戸大学工学部 正会員 上西 幸司
 広島工業大学 正会員 櫻井 春輔
 神戸大学工学部 学生員 ○吉田 千

1. はじめに

地中構造物の地震被害状況を基に、内陸直下型地震の上下動特性について考察を行う。簡単な波動解析を行い、弾性波の入射により開削トンネル中柱が共振を起こしうること、同一寸法、材質の柱であっても、支持荷重（土被り厚）が違えば共振を起こす入射波の周波数が異なることを示し、兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）に際し神戸高速鉄道大開駅付近において被害が特定断面形状、土被り厚のトンネルに集中した原因につき考察する。

2. 大開駅の被害状況

本研究の対象である神戸高速鉄道の大開駅は、開削工法により建設され、1995年の震災時には駅付近の中柱が30本破損し、トンネル直上を走る国道28号線が長さ90mにわたって陥没したり、その被害状況をトンネル横断面図（図-1）で示す。図-1(b)に見られる大開駅構内の圧壊は、中柱（40×100cm、中心間隔3.5m）の損傷により始まったと考えられている^{1),2)}。なお、大開駅東側および西側の線路部の中柱（40×60cm、中心間隔2.5m）は、鉄筋が露出する程度の損傷を受けたものの被害は軽微であった（図-1(a)）^{1),2)}。

大開駅構内などにおける中柱破壊の発生原因として、水平動のみによるせん断破壊、曲げ破壊およびそれらの組み合わせ、軸方向の衝撃力による座屈などが挙げられている¹⁾が、一般に、地中構造物は周囲の地盤、岩盤と同じ挙動をとるため、地上構造物で見られるような大きな水平振動を起こすことは難しいと考えられること^{1),2)}、また、大きな上下動および上下動による構造物の破損が報告されていること³⁾から、中柱の破壊については、上下動が深く関わりを持つと推定されている^{1),2)}。また、土被りの非常に薄い駅コンコース部（図-1(c)）や神戸三宮の地下街では被害が軽微であった¹⁾ことから、土被り厚、言い換えれば中柱に作用する静荷重が中柱の破壊において重要な役割を果たしたと考えられる^{1),2)}。そこで、本研究では上下動、土被り厚に着目し、大開駅付近において被害が特定断面形状、土被り厚のトンネルに集中した原因について図-2に示す簡単な波動モデルを用いて検討を行う。

3. 解析モデルおよび解析結果

ここでは研究の第一段階として中柱の定常的な応答を考察する。中柱は断面積 A 、高さ h 、密度 ρ 、縦弾性係数 E で、常に荷重 M を支持しているものとし、この中柱に変位振幅 u_0 、波長 λ の調和波が入射すると仮定する。このとき、波動方程式および境界条件より、中柱が共振を起こす条件式²⁾

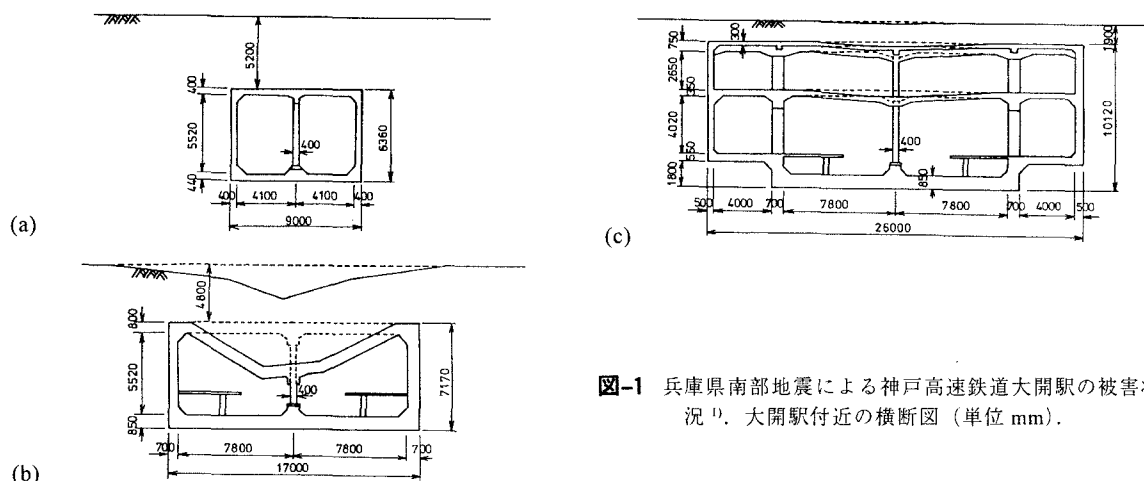


図-1 兵庫県南部地震による神戸高速鉄道大開駅の被害状況¹⁾。大開駅付近の横断面図（単位 mm）。

$$2\pi M \sin(2\pi h/\lambda) - A\rho \lambda \cos(2\pi h/\lambda) = 0 \quad (1)$$

が得られる．式(1)より，共振に係するパラメータは，支持荷重 M ，中柱の断面積 A ，高さ h ，密度 ρ ，および入射波長 λ であること，すなわち，同一寸法，材質の柱であっても，支持荷重（土被り厚）が違えば共振を起こす入射波の周波数が異なることがわかる．

大開駅中柱の実際の形状を参考にして，中柱の共振を起こす入射周波数と支持荷重の組み合わせを式(1)に基づいて求めた結果を図-3 に示す．解析の際，中柱の断面積 $A: 0.4 \times 1.0 \text{m}^2$ （駅構内）/ $0.4 \times 0.6 \text{m}^2$ （駅間部），高さ $h: 5.5 \text{m}$ ，密度 $\rho: 2200 \text{kg/m}^3$ ，波の速度 $c_b: 4100 \text{m/s}$ とした．図-3 より，トンネル周囲の地盤密度を 1800kg/m^3 ，中柱間隔を駅構内で 3.5m ，駅間部で 2.5m ，入射周波数を約 17Hz とした場合，大開駅構内では $M = 235 \text{ton}$ ，駅間部では $M = 140 \text{ton}$ 程度の支持荷重のときのみ，すなわち，ラーメン構造の図-1(b)断面 ($M = 225 \text{ton}$) および類似断面においてのみ中柱が共振，あるいはそれに近い状態になり，図-1(a)断面 ($M = 90 \text{ton}$)，(c)断面 ($M = 95 \text{ton}$) では共振が起こらないことがわかる．兵庫県南部地震のような内陸直下型地震では震源から構造物までの距離が近いので高周波成分が入りやすいと考え，大開駅付近において卓越していた地震波周波数が 17Hz 程度であるとすれば，図-1(b)の形状の断面においては被害が甚大であったのに対し，図-1(a)，(c)およびそれらに類似した断面では被害が軽微であったことを説明することができる．このように，トンネルなどの地中構造物は特定の周波数の地震波に対するセンサーとして機能し，その地震による被害状況から入力波動を推定することができると考えられる．

4. まとめ

弾性波動モデル解析により，開削トンネルの中柱が特定の周波数の波動により共振を起こすこと，同一寸法，材質の中柱でも支える重量（土被り厚）の大小により共振を起こす波の周波数が異なることが示された．また，兵庫県南部地震によって被害を受けた神戸高速鉄道大開駅の被害状況から逆にその入力波動を推定し，地中構造物が地震動に対する一つのセンサーとしても機能することを示した．なお，本研究で用いた解析モデルは，地中構造物の中柱のみならず，上部の荷重を支える柱一般に対しても適用が可能である．今後，より現実に近いモデルを用いて，定常応答だけではなく衝撃的な応答，挙動も含めて，検討していく必要がある．

参考文献

- 1) 高田至郎，森川英典：兵庫県南部地震緊急被害調査報告，神戸大学工学部地震情報センター，1995.
- 2) K. Uenishi and S. Sakurai: Characteristic of the vertical seismic waves associated with the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan earthquake estimated from the failure of the Daikai Underground Station, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 2000.
- 3) 園田恵一郎，小林治俊，中島大使：地震による土木構造物の衝撃的破壊について，兵庫県南部地震における構造物の衝撃的破壊に関するシンポジウム講演集，pp.37-44，1997.3.

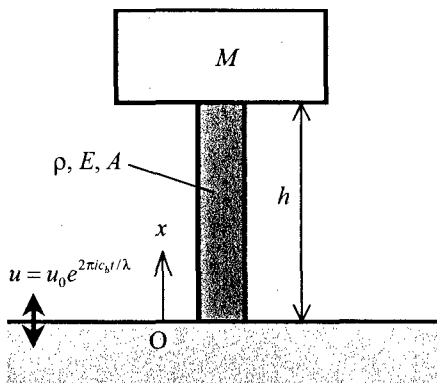


図-2 トンネル中柱の周波数応答解析モデル．

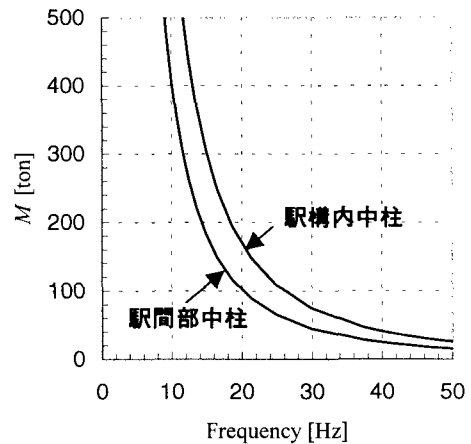


図-3 大開駅付近中柱が共振を起こす入射周波数と中柱支持荷重の関係．