

1. はじめに

兵庫県南部地震では、耐震性が高いと考えられていた地中構造物に甚大な被害が生じた。特に地下鉄駅舎では中柱にせん断破壊あるいは曲げせん断破壊が生じ、甚大な被害となった。一般に地震動のような繰返し外力を受けると鉄筋コンクリート柱は、せん断耐力劣化することが知られている¹⁾。本研究では、被災した大開駅の中柱に着目し、繰返し作用が耐力及び変形性能に及ぼす影響について検証するため、地震動の周波数特性や振幅をパラメータに動的応答解析を行い、ボックスカルバートという構造体の観点から解析的検討を行った。

2. せん断耐力劣化モデル²⁾

実地震動を受ける RC 構造物は、静的載荷実験で見られる変位を順次増大させる履歴とは異なり、不規則的な応答が生じる。そこで本研究で検討したせん断耐力劣化評価は、累積損傷理論を活用し、現行のせん断耐力評価式と Priestley らの劣化曲線を基準として、動的ランダム応答へと拡張した動的劣化せん断耐力評価を用いた。まず、ランダム繰返しで 3 つのゼロクロッシングより構成される波形を応答一波とした。この振幅形状は、ランダム応答において最大変位量が等しい場合でも、全く異なる場合があり、劣化の度合いも異なると予想される。そこで既往の研究より、等価な曲率靱性率(等価振幅 μ^*)を算出し(式 1)、単発劣化係数 ξ を算出した。劣化性状はその進行に伴い収束すると推測できるため、緩和係数 m をせん断耐力劣化係数 ξ 及び定数 β と進展係数 γ の単調減少関数とした(式 2)。これらを用い累乗則によって、せん断劣化程度を評価している(式 3)。劣化を考慮したせん断耐力式 V_u を示す(式 4)。

$$\mu^* = \left(\frac{+}{1+} \frac{0}{0} \right)^n (\mu_1 + \mu_2) \quad (1)$$

$$m_k = \beta \times \frac{\gamma}{k} \quad (2) \quad \xi = \xi_1(m_0) \times \xi_2(m_1) \times \xi_3(m_2) \cdots \xi_k(m_{k-1}) \quad (3)$$

$$V_u = V_s + V_{c0} \quad (4)$$

3. 解析概要

解析対象構造物は神戸高速鉄道・大開駅で、幅 17.0m × 高さ 7.17m の 1 層 2 径ボックスカルバートであり、断面幅 0.4m × 奥行き 1.0m、奥行き方向に 3.5m の間隔で中柱が配置されている。解析はトンネル横断方向を対象として、地盤と構造部材の非線形性を考慮した 2 次元 FEM による動的応答解析を実施した。図 1 に地盤・構造物連成系の解析モデルを示す。

構造物は、はり要素にてモデル化し、隅角部は剛域を考慮し、剛性ははり要素にてモデル化した。構造部材の非線形性は対称トリリニア型の $M - \phi$ 曲線(武田モデル)を用いた。

地盤は、平面ひずみ要素にてモデル化し、土の非線形性は、R - O モデルを用いた。底面、側方地盤を粘性境界とした。大開駅付近は地盤深さ 44.2m より深い地盤で N 値が増大するため、この位置を基盤面とする。

入力地震動は、()大開地点の基盤条件を考慮した、洪積層における地中の地震波に相当すると考えられるポートアイランド波を振幅調整したもの()コンクリート標準示方書で設定している模擬地震動(レベル 1, 2 地震動)を工学的基盤面に介して入力した。図 2 に(), ()で地震波をパラメータとして扱うにあたり、基準モデルとして用いたポートアイランド波の入力地震動波形を示す。

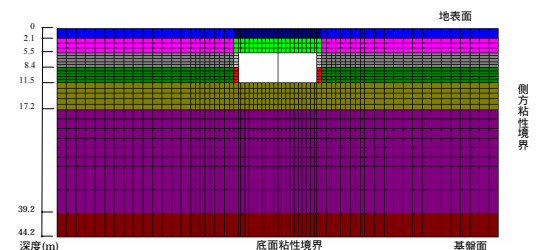


図 1 地盤・構造物連成系の解析モデル

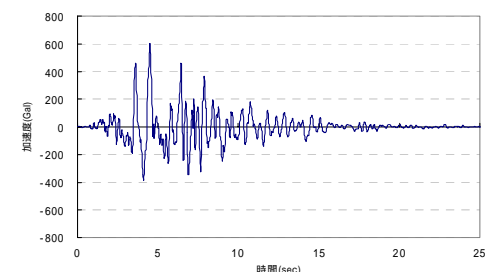


図 2 入力地震動

4. 振幅調整した入力地震動の検討 ()

図3に入力加速度 α と最大層間変形角 R 、最大せん断力 V の関係を示す。 R 、 V は α の増加に伴い増加しており、 α と R 、 V には正の相関があることが認められた。しかし V は、 α の増加に伴う、大きな差は見られない。これは、主鉄筋が降伏をむかえたことより荷重が頭打ちとなっていることに起因すると考えられる。図4にせん断劣化係数 ζ と曲率靱性率 μ_ϕ の関係を示す。 α の増加に伴い、劣化傾向が高まることが認められた。劣化の様子は α の増加に伴い、劣化回数が増すだけでなく、一度に劣化する割合が大きくなっている。また $\mu_\phi \sim \alpha$ の関係より200Gal以外は、いずれのケースも靱性率は約1となり、振幅調整による差は見られなかった。

5. 特性の異なる入力地震動³⁾の検討 ()

ここでは、特性の異なる地震動を対象に数値シミュレーションを行った。表1に検討ケースを示す。着目した入力地震動はレベル2地震動で、内陸型・海洋型の全4ケースである。内陸型は、最大加速度が大きく継続時間は短い特徴を持つ。case3は前章で使用したポートアイランド波である。海洋型は、最大加速度が内陸型に比べ小さいものの継続時間は長い特徴を持つ。case4と5の特徴の違いは、最大加速度は同程度であるが、case5に比べ4の地震波は長周期成分を持つ。図5に $V \sim \alpha$ の関係を示す。図より各地震動による大きな影響は見られなかったものの、内陸型において V が大きくなっていることが分かる。図6に $\zeta \sim \mu_\phi$ の関係を示す。図より、内陸型において劣化程度が大きいことが確認された。劣化回数 ($k=1, 2, \dots$) と劣化係数 ζ の関係から劣化進行の特徴をみると、内陸型は $k=1$ のとき劣化度合いが大きい、 $k=2$ 以降は小さい。海洋型は $k=1$ で大きく劣化が進行するのではなく、 $k=2$ 以降も劣化が進行している。すなわち、各入力地震動の特徴が劣化程度に反映されたといえる。海洋型で case4 のみ劣化が見られたのは、大開駅周辺の地盤の卓越周期 ($t=0.4 \sim 0.6$ 秒) に case4 が5より合っていたためと考えられる。図7より、主鉄筋量が同じ場合(case2~5)、いずれも靱性率は約1となり、差は見られなかった。また、図6,7の case4,6の比較より、変形性能に優れるもの程、劣化傾向が高まることが分かった。

6. まとめ

- 地震加速度の増加に伴い、せん断耐力の劣化傾向も高まる。
- せん断耐力の劣化傾向は、入力地震動特性を反映すると考えられる。また、入力地震動特性と地盤・構造物の固有周期との関係に影響を受けるものと考えられる。

<参考文献>

- 宮川善範: 鉄筋コンクリート製ボックスカルバートのせん断照査における繰返し荷重を考慮した安全係数の検討, 電力中央研究所報告, 研究報告 NO5008, 2006
- 阿形英宏: 繰返し大変形を受ける鉄筋コンクリート柱のせん断耐力劣化算定手法, 平成15年度修士学位论文
- 土木学会: コンクリート標準示方書[靱性性能照査編], 2002年制定

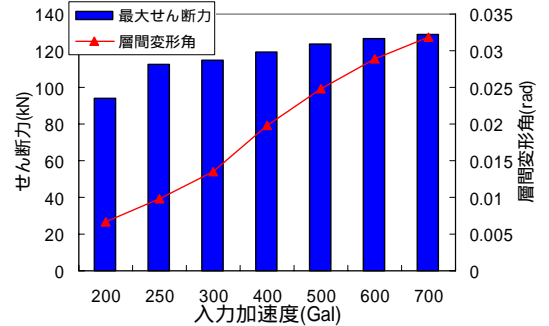


図3 ~ R, V 関係

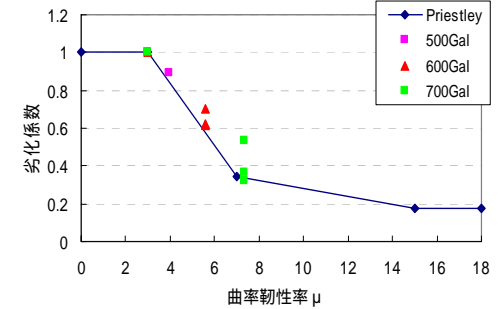


図4 ~ μ 関係

表1 検討ケース

case番号	主鉄筋比	地震動種別
case1	2.60%	レベル1 内陸型
case2		内陸型
case3		内陸型
case4		海洋型
case5	0.65%	海洋型
case6		海洋型
case7		海洋型

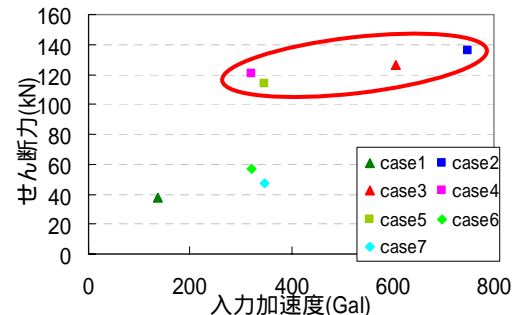


図5 V ~ 関係

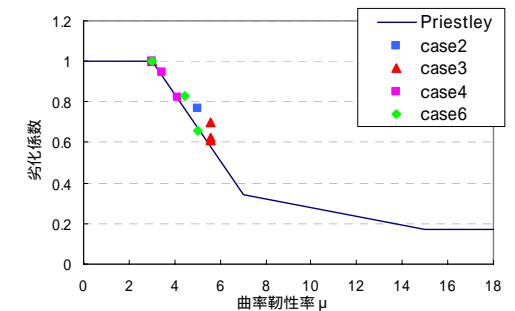


図6 ~ μ 関係

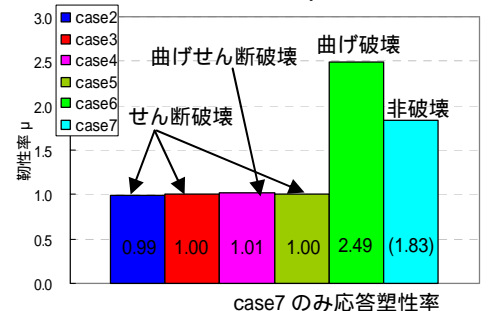


図7 各地震動における靱性率