基盤からの鉛直平面変位波入力時の地下鉄大開駅に関する過渡応答解析

室蘭工業大学大学院　フェロー　○岸　徳光　室蘭工業大学大学院　正会員　小室　雅人
大阪市立大学名誉教授　名誉会員　園田恵一郎　室蘭工業大学大学院　学生会員　瓦井　智貴

1. はじめに

1995 年 1 月 17 日未明に兵庫県南部地震（マグニチュード：7.3，最大震度：7，震源地：淡路島北部，震源の深さ：16 km）が発生し，阪神・淡路地域の建物や社会基盤施設に甚大な被害を及ぼした．

本研究では，基礎岩盤から周波数が 100Hz 程度の強制的な鉛直平面変位波を入力した場合における過渡応答時の地下構造物の被災の可能性を検討することを目的に，阪神大震災における地下鉄大開駅の倒壊事象（**写真 1**）を対象に，3 次元弾塑性応答解析を試みた．

大開駅の構造および被災状況は，**図 1** に示されるように 4 m 程度のかぶり土砂を有し，中柱で支えられた底盤を有する箱型ラーメン構造となっている．被災状況は，中柱の下端あるいは上端が著しく圧壊しており，側壁の被害は少ない．また，中柱の圧壊に伴い中柱を中心として頂版は大きく落ち込んでいる．

2. 数値解析の概要

解析では大開駅底盤から深さ約 32 m に位置する基礎岩盤までの地盤[2]を考慮して解析を行うこととした．また，解析においては，線路方向には中心間隔が 3.5 m 間隔に配置されている中柱の一本分が分担する躯体断面部を取り出し，かつ線路方向に対称な半断面をモデル化することとした．従って，線路軸方向の長さは 1.75 m となる．

なお，中柱の断面寸法は幅 × 線路軸方向長さが 400 ×

写真 1　神戸高速鉄道大開駅中柱被災状況

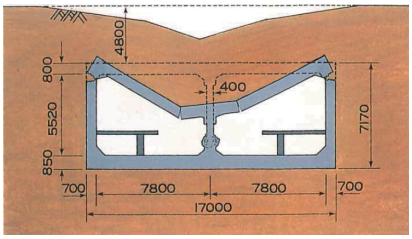
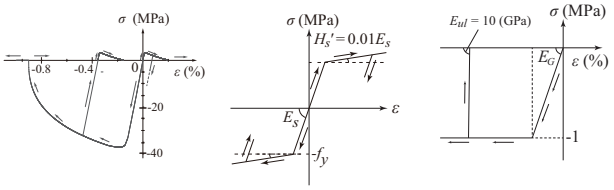


図 1　大開駅が最も大きく陥没した箇所の断面図[1]



(a) コンクリート　(b) 鉄筋要素　(c) 上載土砂

図 2　材料構成則

1,000 mm である．また，地盤の影響も考慮するために側壁から躯体幅の 2.5 倍以上の幅約 37 m の領域までを考慮することとした．鉄筋は埋め込み要素を用いて実構造に対応して配置している．なお，ホームの床板部は躯体本体への影響は小さいものと判断し無視した．

境界条件に関しては，対称面及び線路軸方向の端部面の接点は法線方向変位を拘束している．また，地盤端部及び基礎岩盤部には無反射境界を設定している．なお，数値解析には自重を考慮しており，減衰定数は入力変位の継続時間が後述のように 5 ms であることより，躯体の動的挙動への影響が小さいものと判断し考慮していない．

図 2 には，本数値解析で用いたコンクリート，鉄筋，駅躯体に上載された土砂の応力－ひずみ関係を示している．なお，地盤部に関しては，駅躯体に上載された土砂を除き均一な層状であることから全て弾性的に挙動するものと仮定した．

コンクリートの応力－ひずみ関係には，引張と圧縮領域で軟化するモデル（LS-DYNA[3]における材料物性 mat72R3）を用いている．鉄筋の応力－ひずみ関係には，降伏後の塑性硬化を考慮したバイリニア型の構成則モデルを適用した．降伏の判定には，von Mises の降伏条件に従うものとし，塑性硬化係数 H' は，弾性係数 E_S の 1 % と仮定している．駅躯体に上載された土砂に関する応力－ひずみ関係は，圧縮強度を 1 MPa に設定し，圧縮強度に達した時点で完全降伏に至るものと仮定した．引張強度は零と仮定している．

数値解析は，**図 3**(a) に示しているように，強制変位による入力波の周期を T_0 とし，基礎岩盤の同一レベルに同一速度で半周期に相当する時間（$T_0/2$）だけ上方に変位させる（最大変位量は A となる）ことにより行った．従って，変位速度 V は，(b) 図のように $V = 2A/T_0$ となる。

キーワード：阪神淡路大震災，地下鉄大開駅，過渡応答，弾塑性解析，有限要素法
連絡先：〒 050-8585　室蘭工業大学大学院　もの創造系領域　TEL/FAX　0143-46-5241

© Japan Society of Civil Engineers

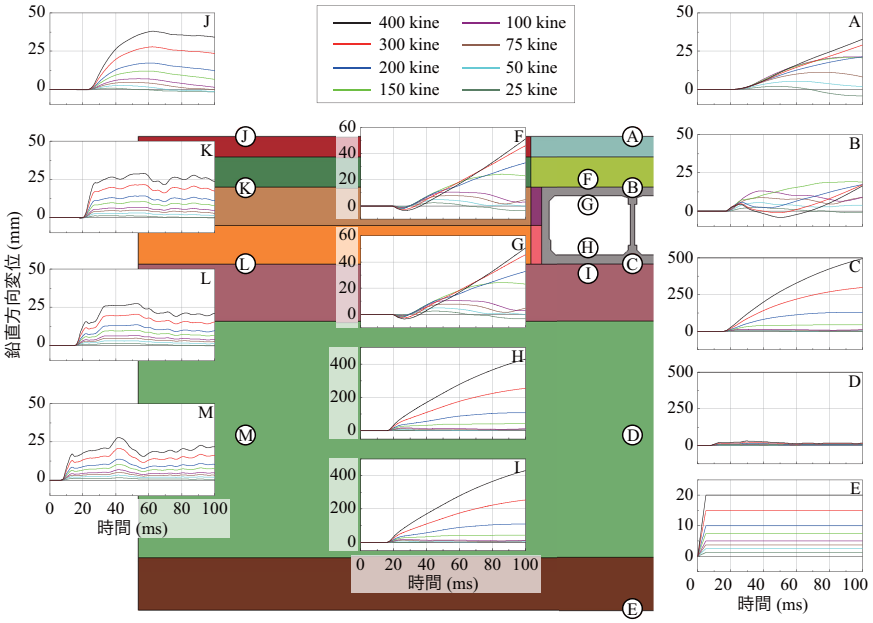
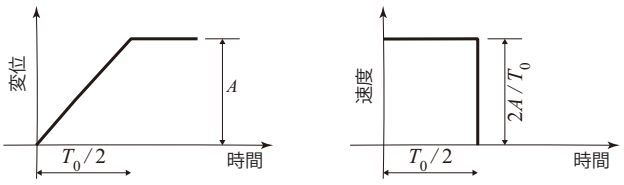


図 4　各点の変位波形



(a)　入力強制変位分布　　(b) 入力速度分布

図 3　入力波形

本研究では，このような条件下で，基礎岩盤から周波数が 100 Hz 程度の強制的な鉛直平面変位波を入力した場合において，変位速度の大きさによる影響を検討するために，$T_0/2 = 5$ ms とし変位速度 V を最小 $V = 25$ kine, 最大 $V = 400$ kine として種々検討を行うこととした．

なお，本数値解析は，構造解析用汎用コード LS-DYNA (Ver. R9)[3] を用いて行った．

3.　数値解析結果及び考察

図 4 には，変位速度を変化させた場合における土中及び駅躯体底盤・頂版及び中柱上下端部における応答変位波形を比較して示している．図より，駅躯体周辺の土層各点における変位は，基盤から上方に向かって徐々に増加する傾向を示しているが，地表面以外は著しい増加はない．ただし，地表面は軸方向応力が解放されることにより，約 2 倍程度の増幅となっている．

これに対して，駅底版の変位は応答初期には経過時間に対してほぼ線形に増加する傾向を示し，強制変位 10 mm ($V = 100$ kine)入力時には 60 ms 経過時点で約 10 倍の 100 mm 上方に推移していることが分かる．これより，底版上物体の浮き上がり現象が想起される．

また，中柱上下端部の変位波形を見ると，下端では同様に強制変位 10 mm 入力時に約 125 mm 程度に達しているのに対して，上端では 10 mm 以下の値を示し，柱中間部で著しい圧壊現象が発生していることが窺われる．

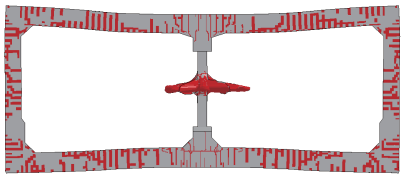


図 5　200 kine 入力時における躯体の変形状態とコンクリート要素のひび割れ発生と圧壊状況

図 5 には，$V = 200$ kine 入力時における解析終了時点の躯体の変形とコンクリートにひび割れあるいは圧壊が生じている要素を赤色にして示している．なお，変形状況は 5 倍に拡大し，容易に理解できるようにしている．図より，中柱の中央部が著しく圧壊している状況が確認できる．

4.　まとめ

基礎岩盤から周波数が 100 Hz 程度で継続時間の短い強制的な鉛直平面変位波を入力させた場合において，阪神大震災における地下鉄大開駅の倒壊事象を対象に 3 次元弾塑性過渡応答解析を実施した．その結果，変位振幅 10 mm 変位速度 200 kine の入力で，中柱中央部が圧壊に至る実現象に類似した応答に至ることが明らかになった．

参考文献

1) 日本建築学会・土木学会編，阪神・淡路大震災スライド集，丸善，1995 年
2) 佐藤工業株式会社，神戸高速鉄道東西線大開駅災害復旧の記録，1997 年 1 月
3) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version R9 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2016.

© Japan Society of Civil Engineers