

兵庫県南部地震における地下鉄大開駅の倒壊等に関する数値解析的検討

Numerical simulation for collapse of Taikai subway station due to the 1995 Kobe earthquake

室蘭工業大学大学院	○フェロー	岸 徳光	(Norimitsu Kishi)
神戸大学	フェロー	櫻井 春輔	(Shunsuke Sakurai)
大阪市立大学	フェロー	園田恵一郎	(Keiichiro Sonoda)
室蘭工業大学大学院	正 員	小室 雅人	(Masato Komuro)
室蘭工業大学大学院	学生員	瓦井 智貴	(Tomoki Kawai)

1. まえがき

1995 年今から 23 年前の 1 月 17 日未明に兵庫県南部地震（マグニチュード：7.3，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．社会基盤施設の被害では，写真-1や写真-2に示すピルツ橋の倒壊や地下鉄大開駅の間柱の倒壊が最も象徴的である．コンクリート橋脚に限定すれば，横揺れに伴う段落とし部を起点とする曲げ破壊や剪断補強筋の不足による剪断破壊が多く見られ，その後全国的に耐震補強が義務づけられた．

一方で，ドンドンと上方への突き上げがあった，ベットやピアノがジャンプして動いた¹⁾，あるいは電車が横倒れせずに脱線していたとの聞き取り調査や，コンクリート橋脚の輪切りひび割れの発生，橋脚上端あるいは下端付け根部の圧壊の事案も多数見られ，横揺れでは説明ができないような現象も多数発生している．

地震発生当初には，これらの現象は上下方向の衝撃的地震動によるものであることが指摘された．しかしながら，地震波形が公表されてからは，これらの現象も含めて全て横揺れによる現象として捉えられ，対応して設計法の見直しが行われた．被災者からの聞き取り調査にお

いては，上述のように突き上げ現象があったとの証言¹⁾も多く，衝撃的地震動による構造物の動的挙動性状の解明は興味のあるところである．

このような観点から，本研究では地下鉄大開駅の倒壊事象に着目し，躯体底部に衝撃的地震動として粒子速度の大きさを種々変化させた強制変位入力を与えたときの弾塑性応答解析を試みた．

なお，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する頂版は大きく落ち込んでいる．

2. 数値解析の概要

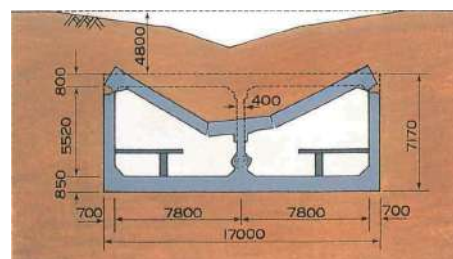
2.1 数値解析モデル

図-2には，大開駅の数値解析モデル⁴⁾を示している．実現象では基盤から地震動が伝搬してくることとなるが，基盤入力の場合には大開駅底盤で設定粒子速度を得ることが容易ではない．そのため，本研究では地盤部も含めて駅躯体底盤部のレベルに直接強制変位を与えて，設定粒子速度が得られるように簡略化することとした．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⁴⁾．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 × 1,000 mm である．

特に重要となるコンクリート要素に関しては，各部材の主軸方向の要素長を 25 mm 程度に設定して分割している．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．さらに，鉄筋は埋め込み要素を用いて実構造に対応して組み込むこととした．なお，ホームの床板部は躯体

写真-1 阪神高速道路3号線の倒壊したピルツ橋脚²⁾

写真-2 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³⁾

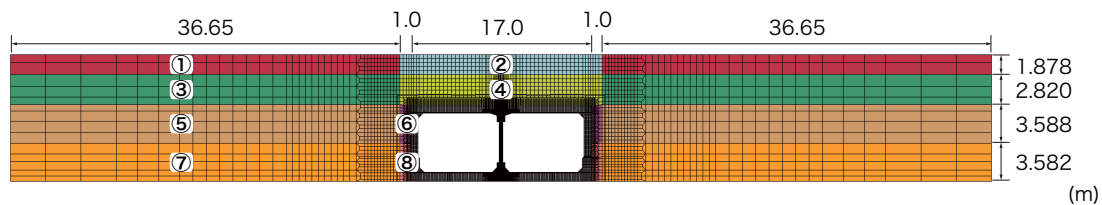


図-2 解析モデルの要素分割状況

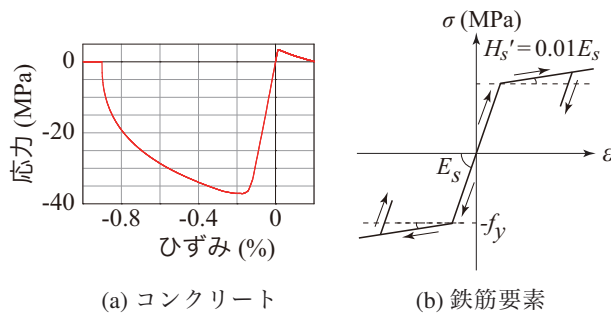


図-3 材料構成則

表-1 地層の物性値一覧

	密度 (g/cm ³)	弾性 係数 (MPa)	せん断 波速度 (m/s)	圧縮 強度 (MPa)	降伏 ひずみ $\epsilon_y (\mu)$	ポア ソン比 ν
地盤1	1.90	38.0	140	1	0.026316	0.333
地盤2	1.90	19.4	100	1	0.051579	0.427
地盤3	1.90	38.0	140	1	0.026316	0.488
地盤4	1.90	32.8	130	1	0.030520	0.489
地盤5	1.90	56.0	170			0.493
地盤6	1.90	49.6	160	1	0.020148	0.493
地盤7	1.90	70.0	190			0.494
地盤8	1.90	49.6	160	1	0.020148	0.496

本体への影響は小さいものと判断し無視している。

境界条件に関しては、対称面及び線路軸方向の端面の接点は法線方向変位を拘束している。また、地盤端部及び躯体底面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いる。減衰定数は、入力変位の継続時間が後述のように最大10 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。

2.2 材料構成則

図-3には、本数値解析で用いたコンクリート、鉄筋の応力-ひずみ関係を示している。以下に各材料物性モデルの概要を述べる。なお、地盤部に関しては、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、物性値は当時のボーリング調査結果に基づいてモデル化し、表-1のように決定している。

(1) コンクリート

(a)図には、コンクリートの応力-ひずみ関係を示している。圧縮側は、圧壊して強度を失うことを想定し、圧縮強度に達した後放物線状に軟化して応力が解放されるモデル (LS-DYNA⁵) における材料物性 mat72R3) を用いている。一方、引張側についても、引張強度に達した後線形に軟化し、ひずみが0.2%に達した段階で応力が完全に

表-2 $T_0/2 = 5$ ms 時における設定入力最大変位一覧

粒子速度 V (kine)	入力最大変位 A (mm)
50	2.5
200	10
400	20
600	30

解放されるものとした。なお、引張強度は、コードの中で自動的に評価され、圧縮強度の1/10程度となっている。コンクリートの圧縮強度は、資料⁴⁾に基づき37.27 MPaと設定している。

(2) 鉄筋

(b)図には、軸方向鉄筋及びせん断補強筋に関する応力-ひずみ関係を示している。本研究では、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することとした。降伏応力 f_y は資料⁴⁾に基づき $f_y = 306$ MPaと設定した。また、単位体積質量 ρ_s 、弾性係数 E_s 及びポアソン比 ν_s は公称値を用い、それぞれ $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³、 $E_s = 206$ GPa、 $\nu_s = 0.3$ とした。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。

2.3 数値解析ケース

数値解析は、図-4(a)に示しているように、強制変位による入力波動の周期を T_0 とし、地盤も含めて大開駅躯体底盤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(変位量は A となる)ことにより、行っている。従って、その時の粒子速度 V は、(b)図のように $V = 2A/T_0$ となる。また、この強制変位によって、躯体及び地盤には(c)図に示されるように $\sigma = \rho c V$ なる応力波が伝搬することになる。ここで、 σ は要素に作用する軸方向応力であり、 ρ 、 c は各要素の単位体積質量、弾性波速度である。

本研究では、このような条件下で、粒子速度の大きさによる影響を検討するために、強制変位の継続時間($T_0/2$)を $T_0/2 = 5$ msとして、粒子速度 V を $V = 50, 200, 400, 600$ kineに変化させた場合について検討を行うこととした。この場合における、最大強制変位は表-2の通りである。なお、本数値解析は、構造解析用汎用コードLS-DYNA (Ver. R9)⁵⁾を用いて行った。

3. 数値解析結果及び考察

図-5～図-7には、粒子速度を変化させた場合における躯体各点における入力変位に対する相対変位、コンクリート要素の上下方向ひずみ、各点の鉄筋ひずみ波形を比較して示している。

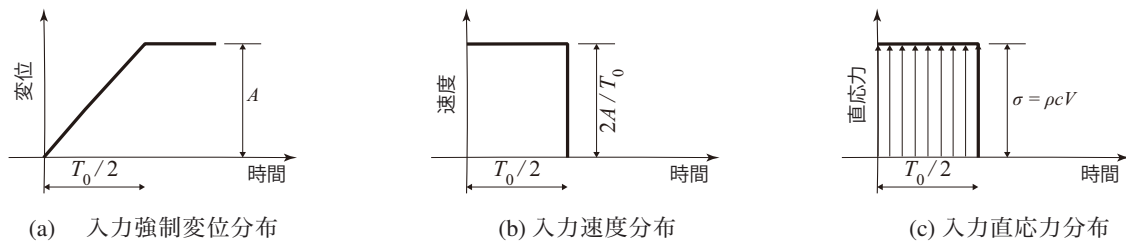


図-4 入力波形

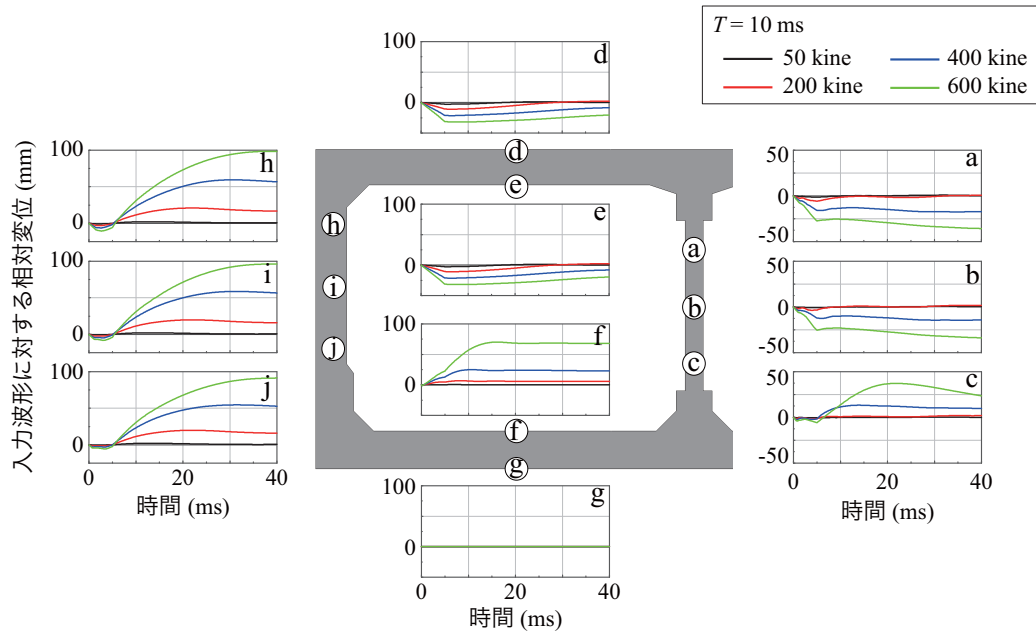


図-5 入力波形に対する相対変位波形

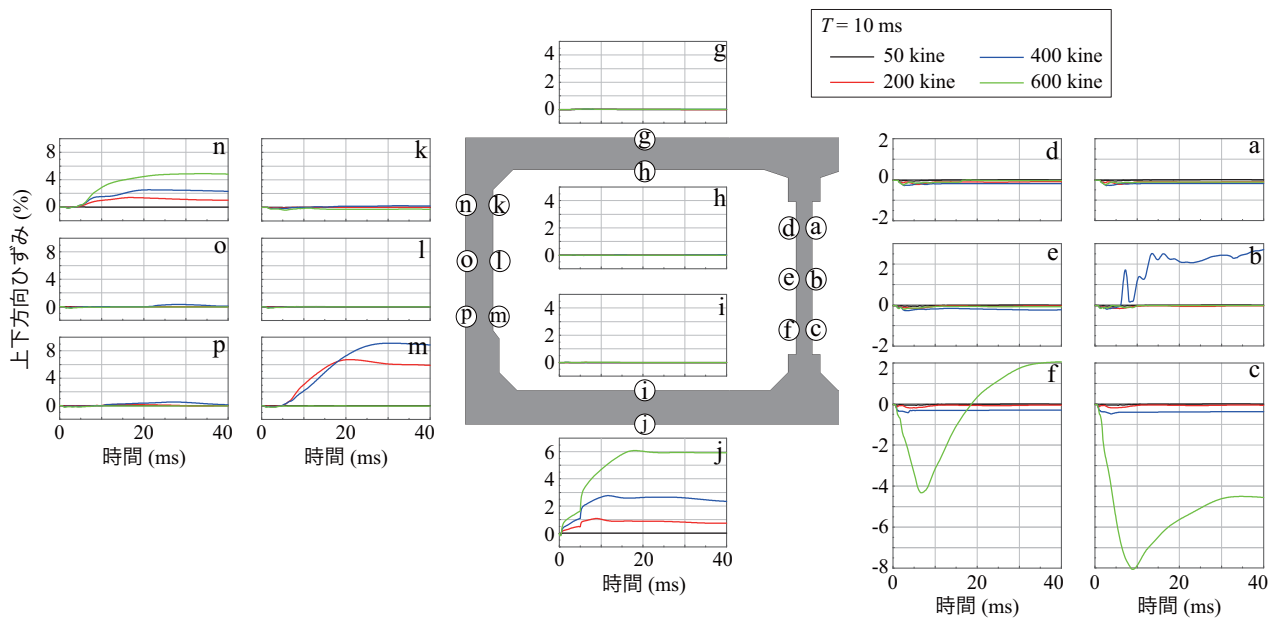


図-6 コンクリート要素の上下方向ひずみ

以下簡単に考察を行う。図-5には各点の相対変位波形を比較して示している。図より、粒子速度の大きさに対応して変位振幅も増加する傾向にあることが分かる。まず、躯体底盤の上下縁で比較すると、上縁では400 kine以上で最大変位が約25mm程度以上の値を示しており、少

なくとも上縁では飛び跳ねの性状が示されていることが分かる。側壁各点の相対変位を見ると、いずれの場合も上方に変位しており、その値は400 kineで50mm程度の値を示している。これは、側壁部は上載土圧の影響をそれほど受けず、天端で自由端に類似した性状を示すことに

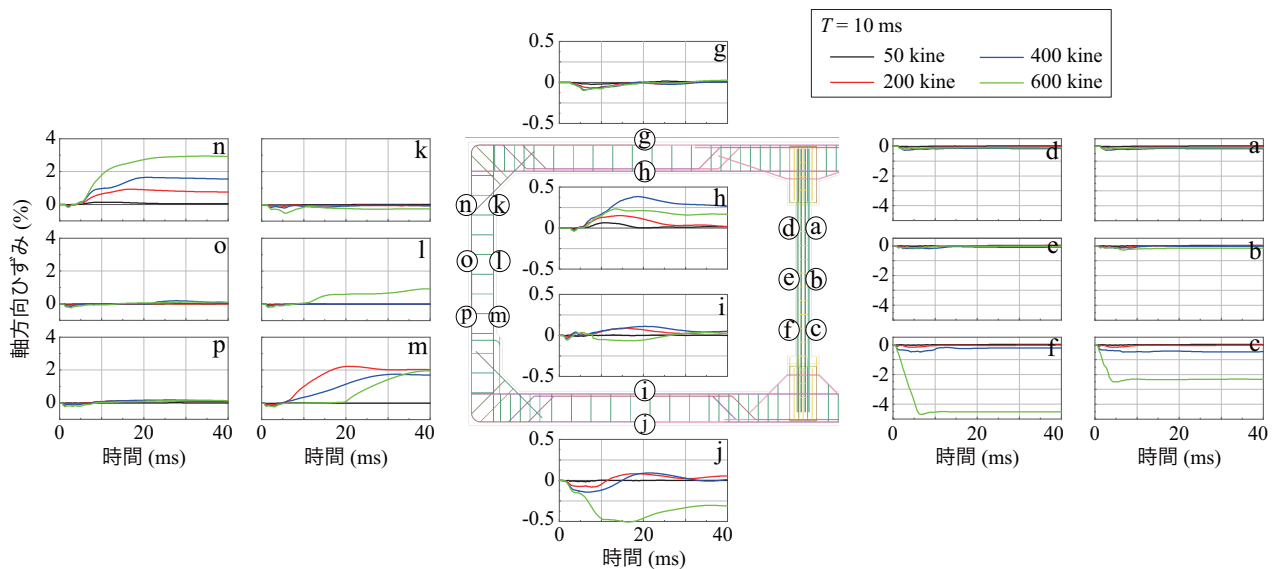


図-7 鉄筋要素の軸方向ひずみ

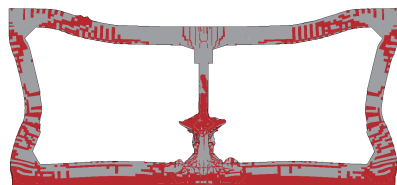
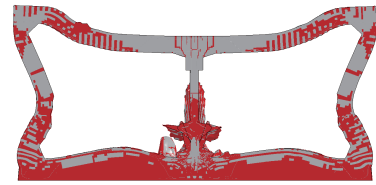
(a) $V = 400\text{kine}$, $T = 10\text{ ms}$ (b) $V = 600\text{kine}$, $T = 10\text{ ms}$

図-8 解析終了時点における躯体の破壊性状

よるものと推察される。一方、中間柱の場合には下部で上方への変位を示すものの、中間部では下方に変位しており、下部近傍で圧壊の兆候を示していることが分かる。これは、中柱部には頂版部を介して大きな上載土圧が作用し、固定端に類似した性状を示すためと推察される。

図-6において、底盤上下縁のひずみ分布を見ると下縁かぶり部近傍では大きな正の分布を示しており、下縁かぶり部から上方への突き上げが発生していることが示唆される。側壁内外縁ひずみ分布を見ると、上下部でそれぞれラーメン構造の正負の曲げが作用していることが推察される。一方、中間柱の分布を見ると、上部では剛体的な挙動を示している。また、中間部では400kine時点で負曲げが作用していることが推察される。下部では、600kine時点で4~8%の圧縮ひずみが発生しており、大きく圧壊が生じていることが示唆される。

図-7において、底盤下縁では600kine時点で大きな圧縮ひずみが発生しており、底盤全体が下端鉄筋部から上方に持ち上げられていることが推察される。また、頂版部下縁鉄筋も引張側で大きく降伏しており、頂版部が下方に変形していることが示唆される。側壁部の分布は上述のコンクリートのひずみ分布とよく対応している。中間柱部を見ると、下部鉄筋が圧縮側に大きく示されており、コンクリートの圧壊により座屈したような挙動を示しているものと推察される。

図-8には、粒子速度が400kine及び600kine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。図

より、上記で考察したように、底盤下端かぶり部に水平方向のひび割れが発生していることから底盤の飛び跳ねが類推されること、側壁部のラーメン曲げの発生、中柱下部での著しい圧壊とそれに伴う頂版の落ち込みの状況が見て取れる。特に中柱の圧壊は、写真-2、図-1に示されている状況がよく再現されているものと判断される。

4. まとめ

本研究では、兵庫県南部地震で倒壊した地下鉄大開駅の事象に着目し、衝撃的地震動による被災の可能性を検討することを目的に、半周期が5msの継続時間で粒子速度の大きさを变化させた強制変位入力解析を実施した。

その結果、400kine程度以上で底盤上部の飛び跳ね現象や中間柱下部での著しい圧壊とそれに伴う頂版の落ち込みに至る実現象と類似した挙動性状を呈することが明らかになった。今後、粒子速度一定で継続時間が変化する場合についても検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災の調査報告(紀要特別号)資料:初期上下動の証言集, 1991年1月, 大阪市立大学工学部
- 2) 神戸新聞[特集]阪神・淡路大震災
- 3) 阪神・淡路大震災スライド集, 1995年, 日本建築学会・土木学会編, 丸善
- 4) 神戸高速鉄道東西線大開駅災害復旧の記録, 平成9年1月, 佐藤工業株式会社
- 5) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version R9 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2016.