

論文 下層地盤からの鉛直波動による地下鉄大開駅の倒壊現象に関する数値解析的検討

岸 徳光^{*1}・園田恵一郎^{*2}・小室 雅人^{*3}・瓦井 智貴^{*4}

要旨: 本論文では、下層地盤から継続時間の短い鉛直波が伝搬する場合の過渡応答時における構造物の被災の可能性を検討することを目的に、兵庫県南部地震での地下鉄大開駅中柱の倒壊現象を対象に、継続時間を5msとする強制変位入力の場合における3次元弾塑性応答解析を実施した。本研究で得られた結果を整理すると、1) 100 kine程度で中柱の輪切り状ひび割れが確認できること、2) 200 kine以上の場合には中柱中央部から下部で著しい圧壊とそれに伴う頂版の落ち込みに至る現象が現れ、実現象と類似した挙動性状を示すことなど、が明らかとなった。

キーワード: 兵庫県南部地震, 鉛直波動, 過渡応答, 弾塑性応答解析, 柱の圧壊

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:16km)が発生し、多くの尊い人命が失われると共に、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**に示すピルツ橋や地下鉄大開駅の中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せん断補強筋の不足によるせん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。

また、ドンドンと上方への突き上げがあった、ベッド



写真-1 阪神高速道路3号線の倒壊したピルツ橋脚¹⁾



写真-2 神戸高速鉄道大開駅中柱被災状況

やピアノがジャンプして動いた、あるいは電車が横転せずに脱線していたとの聞き取り調査²⁾や、コンクリート橋脚に関しては輪切り状のひび割れ、上下端付け根部の圧壊等の事案も見られ、横揺れでは説明ができないような現象も多数発生した。

著者等は、高架橋橋脚の破壊に関しては水平動による影響を否定するものではない。しかしながら、最大加速度を観測した神戸海洋気象台の地震計はサンプリング周波数が50Hz、ローパスフィルタが10Hzである。このことから、これらの地震計では捉えることができない高周波の地震動があったのではないかとの考えの下、下層地盤からの継続時間の短い鉛直波動による応答性状についての検討も行ってきた³⁾。

矢的ら⁴⁾は、大開駅の被災状況に着目して、地盤の非線形特性を考慮し、かつ駅躯体を弾性体と仮定した2次元の周波数応答解析的な手法に基づいて数値解析を行い、その要因分析を行っている。その結果、中柱は他部材に損傷が見られる前にせん断破壊または曲げ破壊に至り、被害状況とよく対応することを示している。

しかしながら、**図-1**に示されているように、駅躯体が一方にせん断変形している兆候もなく、かつ中柱が一様に圧壊に至っている被災状況や、上述の突き上げが

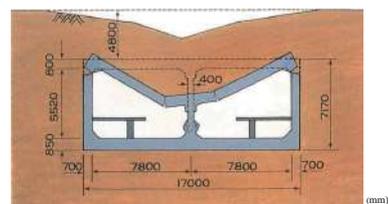


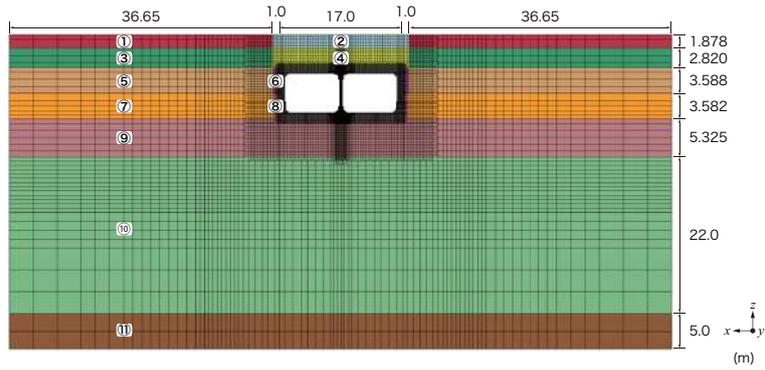
図-1 大開駅が最も大きく陥没した箇所の断面図⁵⁾

*1 室蘭工業大学大学院 もの創造系領域 特任教授 工博 (正会員)

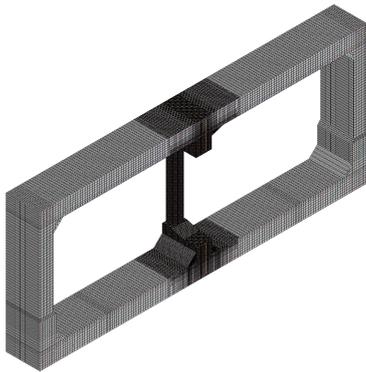
*2 大阪市立大学 名誉教授 工博

*3 室蘭工業大学大学院 もの創造系領域 教授 博(工) (正会員)

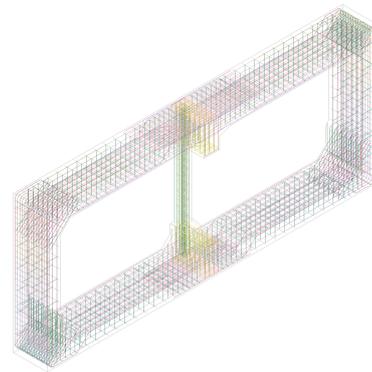
*4 室蘭工業大学大学院 工学研究科 博士後期課程工学専攻 修(工) (学生会員)



(a) 断面方向分割状況



(b) 駅躯体部の分割状況



(c) 鉄筋要素の配筋状況

図-2 解析モデルの要素分割状況

あったという聞き取り調査に基づく、継続時間が短い鉛直波入力時の過渡応答による構造物の被災の可能性について検討を行うことは興味のある処である。

このような観点から、本研究では、当時の地震計では計測できない周波数が100 Hz（周期10 ms）程度の鉛直波が基盤から伝播する場合において、その過渡応答状態における構造物の被災の可能性を検討することを目的に、地下鉄大開駅中柱の圧壊による倒壊事象を対象に、その再現性について3次元弾塑性応答解析を行うことにより検討を行うこととした。本数値解析では、躯体上部の埋め戻し地盤の自重を考慮し、時間的に線形な強制変位（速度一定の矩形波）を基盤から入力させることとし、その速度の大きさを種々変化させて数値解析を行った。なお、大開駅に関する詳細な被災状況は、文献4)を参照されたい。

2. 数値解析の概要

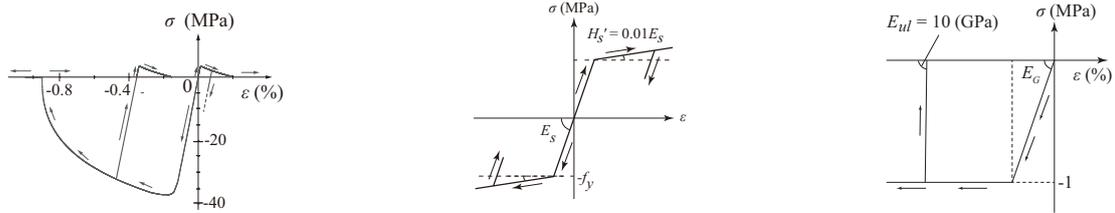
2.1 数値解析モデル

図-2には、大開駅の数値解析モデル⁶⁾を示している。図示のように、本数値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を考慮して解析を行うこととした。線路軸方向には中心間隔が3.5 m毎に配置

されている中柱1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⁶⁾。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、鉄筋は実構造に即して梁要素を用いて分割し、周辺コンクリート要素とのカップリング定義を行い、完全付着の条件を満足するように設定している。なお、ホームの床版部は躯体本体への影響は小さいものと判断し無視することとした。

境界条件に関しては、対称断面及び線路軸方向の端部面の節点を法線方向に拘束している。側壁部と埋め戻し土砂部の要素間には、滑りと剥離を考慮可能な接触面を定義している。また、地盤端部及び基礎岩盤底面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た。減衰定数は、入力変位の継続時間が後述のように5 msであり、主に強制変位入力時の駅躯体の動的挙動に着目していることより、ここでは考慮しないこととした。

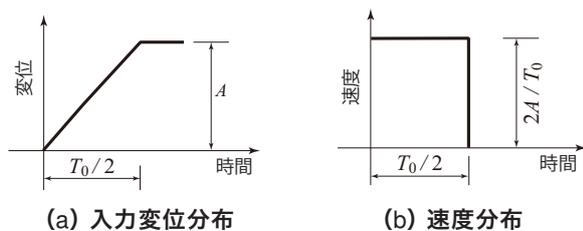


(a) コンクリート

(b) 鉄筋要素

(c) 上載および埋め戻し土砂

図-3 材料構成則



(a) 入力変位分布

(b) 速度分布

図-4 入力波形

表-1 地層の物性値一覧

地盤番号	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 ϵ_y	ポアソン比 ν
地盤1	1.90	99	140	1	0.010	0.33
地盤2	1.90	54	100	1	0.018	0.43
地盤3	1.90	111	140	1	0.009	0.49
地盤4	1.90	96	130	1	0.010	0.49
地盤5	1.90	164	170			0.49
地盤6	1.90	145	160	1	0.007	0.49
地盤7	1.90	205	190			0.49
地盤8	1.90	146	160	1	0.007	0.49
地盤9	1.90	326	240			0.49
地盤10	2.00	648	330			0.49
地盤11	2.10	1544	500			0.70

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、駅躯体に上載された土砂や埋め戻し土砂の応力-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、駅躯体に上載された土砂や表層の2層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、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のように決定した⁶⁾。ここで、表中の番号は、図-2(a)に対応している。

(1) コンクリート

図-3(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-DYNA⁷⁾における材料物性 mat72R3)を用いている。一方、引張側に対しても、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⁶⁾に基づき37.3 MPaと設定した。また、質量は $\rho_c = 2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、ポアソン比は $\nu_c = 1/6$ である。

(2) 鉄筋

図-3(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した。降伏応力 f_y は資料⁶⁾に基づき $f_y = 306 \text{ MPa}$ 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 $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $E_s = 206 \text{ GPa}$ 、 $\nu_s = 0.3$ とした。

降伏の判定は von Mises の降伏条件に従うものとし、塑性硬化係数 H'_s は弾性係数 E_s の1%と仮定している。

(3) 上載土砂および側壁側土留め壁部埋め戻し土砂

図-3(c)図には、駅躯体に上載された土砂および側壁側土留め壁部埋め戻し土砂に関する応力-ひずみ関係を示している。本研究では、駅躯体が中柱等の損傷によって躯体頂版が落ち込んだ場合にも上載土砂が変形に追従できるようにと、工事終了時の側壁側土留め壁除去後の埋め戻し土砂部も側壁の変形に追従可能にするために圧縮強度を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。また、除荷時には即座に応力が解放するように、弾性係数を $E_G = 10 \text{ GPa}$ に設定している。引張強度は零と仮定し、降伏後の塑性硬化を無視したバイリニア型の構成則モデルを適用した。

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の周期を T_0 とし、基盤レベルに半周期に相当する時間 ($T_0/2 = 5 \text{ ms}$) だけ上方に変位させる(最大変位:A) ことにより行っている。以後、Aまで変位させる状態を強制変位入力状態と呼び、変位一定時と区別する。変位速度 V は、(b)図のように $V = 2A/T_0$ となる。

本研究では、変位速度による躯体の動的挙動への影響を検討するために、変位速度 V を 25 ~ 400 kine に変化させることとした。

なお、本数値解析は、陽解法に基づきかつ時間刻みが

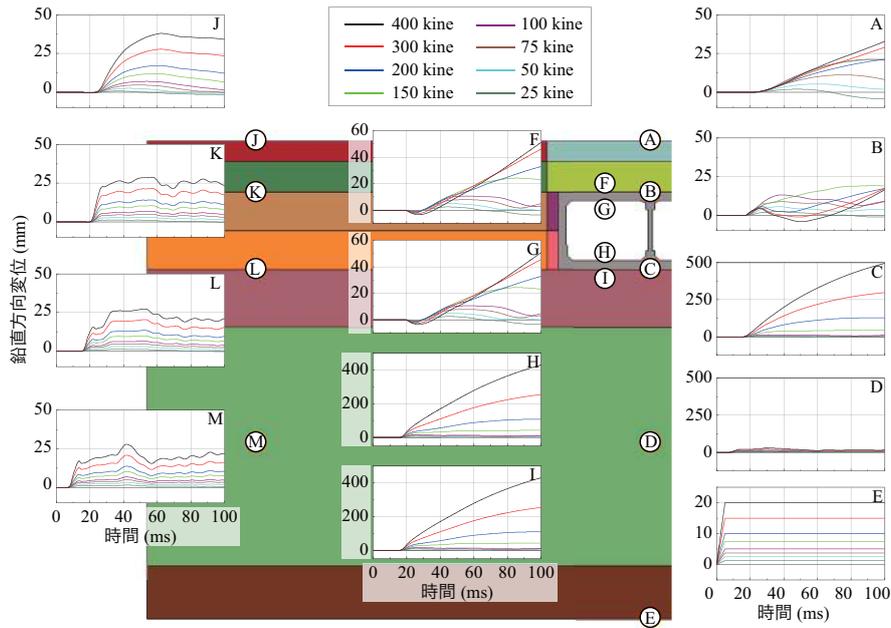


図-5 各点の変位波形

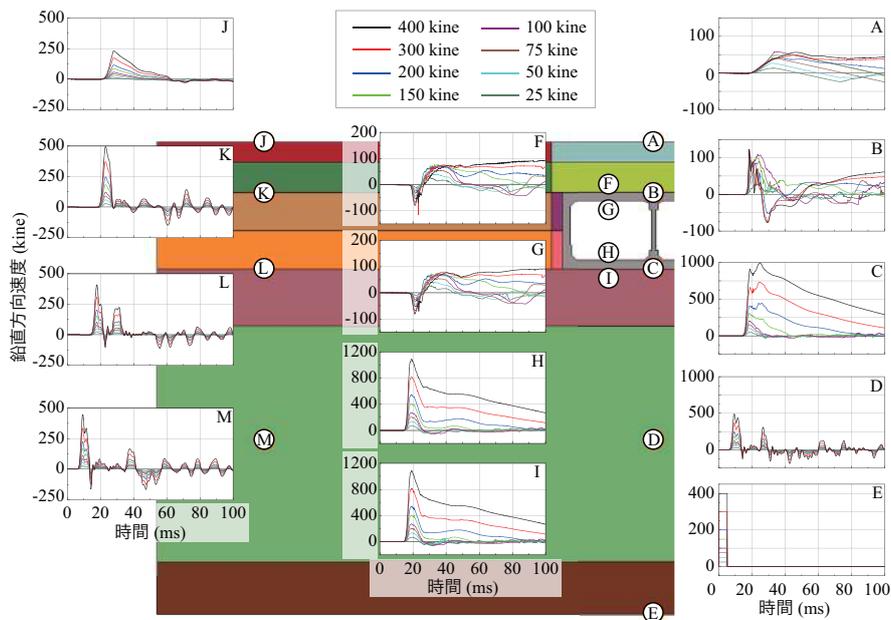


図-6 各点の粒子速度波形

Courant の条件を満たすように自動的に決定される構造解析用汎用コード LS-DYNA (Ver. R9)⁷⁾ を用いて行った。

3. 数値解析結果及び考察

3.1 各点における変位, 粒子速度及び主鉄筋ひずみ波形

図-5～図-7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各点における変位, 粒子速度, 躯体各点における主鉄筋の軸方向ひずみ波形を比較して示している。以下簡単に考察を行う。

図-5には土中及び駅躯体各点の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伝搬速度に対応して立ち

上がりに時間差があり、かつ徐々に増幅する傾向を示していることが分かる。地表面部は地中よりも振幅が大きく示されている。これは、表面において軸方向応力が解放されるように作用する反射波の影響によるものと推察される。これに対して、駅中柱軸線上の応答変位を見ると、中柱下端において 200 kine(強制変位 10 mm)入力に対して 10 倍以上の 125 mm 程度に達し大きな応答変位を示していることが分かる。また、柱上端では 50 ms 程度までは数 mm 程度の変位であることより、柱中央部から下部において圧壊に至っていることが窺われる。躯体底盤中央部の変位波形を見ると、上下端共に類似の性状を示しかつ中柱下端の波形性状に類似していることが分かる。

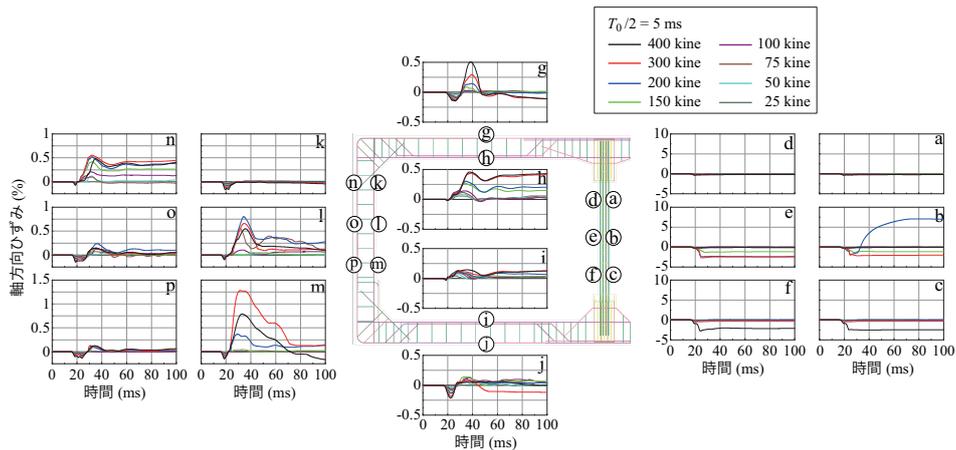


図-7 鉄筋要素の軸方向ひずみ

その程度は、400 kine (強制変位 20 mm) 入力時に 20 ms 当たり約 200 mm 程度まで達しており、底盤上での物体の浮き上がり現象が想起される。一方、頂版部の波形は中柱上端部と同様に立ち上がりも遅く、100 ms 経過後においても振幅は 100 mm にも満たないものとなっている。

図-6には、同様に各点の粒子速度に関する応答波形を示している。図より、土中の応答分布に着目すると、k 点で 200, 400 kine 入力時にそれぞれ 250, 500 kine レベルに達しており、地表面を除き変位分布と同様に上方への伝播に対応して徐々に増幅する傾向にあることが分かる。地表面では、圧縮応力が解放されることにより、粒子速度も減少しかつ入力変位に対する波動継続時間は延びている。一方、中柱軸線上の分布を見ると、中柱下端では入力レベルの 2 倍以上に増幅しているのに対して、上端では 1/10 程度に減速しており、下端から上端の間で過大な圧縮応力波が生じていることが窺える。また、150 kine 入力時には最大粒子速度が 300 kine 程度であるのに対して、300 kine 入力時には 750 kine 程度まで達しており、入力変位速度の増加と共に中柱の圧壊域が下方に推移することが推察される。躯体底盤における波形性状を見ると、中柱下端における粒子速度と類似の波形性状を示しているが、200 kine 入力時においても初期に最大粒子速度が 500 kine 程度まで達しており、2 倍以上の増加傾向を示していることが分かる。これより、前述と同様に底盤上での物体の浮き上がり現象の発生が想起される。頂版部の波形性状を見ると、中柱上端部と同様に最大振幅は 1/4 以下と大幅に低減していることが分かる。

図-7には、上下端あるいは内外主鉄筋のひずみ波形を示している。図より、底盤下縁では入力初期に上端鉄筋に引張、下端鉄筋に圧縮ひずみが発生していることより、上方への曲げ変形が見られるが、その後 300 kine 入力時を除いて上下縁鉄筋が共に引張側のひずみ分布を示している。これは、後述の躯体の変形状態から類推して、中柱の圧壊に伴う短縮化に伴って引張力が作用したことに

よるものと推察される。頂版部に関しては、入力初期には下方への曲げが示されるが、40 ms 経過後には上下縁共に引張ひずみを示し、その後 150 kine 以上の入力で変位速度の増加と共にひずみ値が増加している。40 ms 前後における上下縁の引張ひずみの発生は、底盤部での性状と類似しているものと推察される。

側壁部は、下端において 150 kine 程度までは降伏ひずみに達せず弾性的な挙動を示しているが、200 kine 以上で変位速度の増加と共にひずみ値も増加し正曲げが顕在化してくる。また、上端では負曲げのひずみ分布を示しているが、最大ひずみは 300 kine 入力時で 0.5% 前後と下部内側に比較して小さい値となっている。

中柱の波形を見ると、150~300 kine の入力で中間部に 1% 以上の大きなひずみが発生し、400 kine 入力の場合には下部で 2.5% 程度のひずみが発生している。これより、いずれの場合も柱が著しい圧壊の傾向を示していることが窺える。また、上部では零レベルのひずみ値を示している。これは、中間部や下部で圧壊の傾向を示すことにより、応力が解放されたことを暗示している。

3.2 解析終了時における駅躯体のひび割れ及び圧壊分布

本研究で適用したコンクリート構成則において、解析コード⁷⁾では、ダメージインデックスによって損傷がない状態を零、ひび割れの開口あるいは圧壊によって完全に損傷を受けた場合を 2.0 として評価する機能を有している。ここでは、ダメージインデックスが 1.98 以上の状態をひび割れ発生あるいは圧壊の状態であるものと評価して検討を行うこととする。

図-8には、入力変位速度が 100~300 kine の場合における 150 ms 時点の躯体の変形状態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、変形状態は 5 倍に拡大して示している。

(a) 図は 100 kine 入力の場合であるが、駅躯体には著しい変形は確認できない。底盤中央部は上下に貫通するひび割れが発生しており、水平方向に引張力が作用する傾

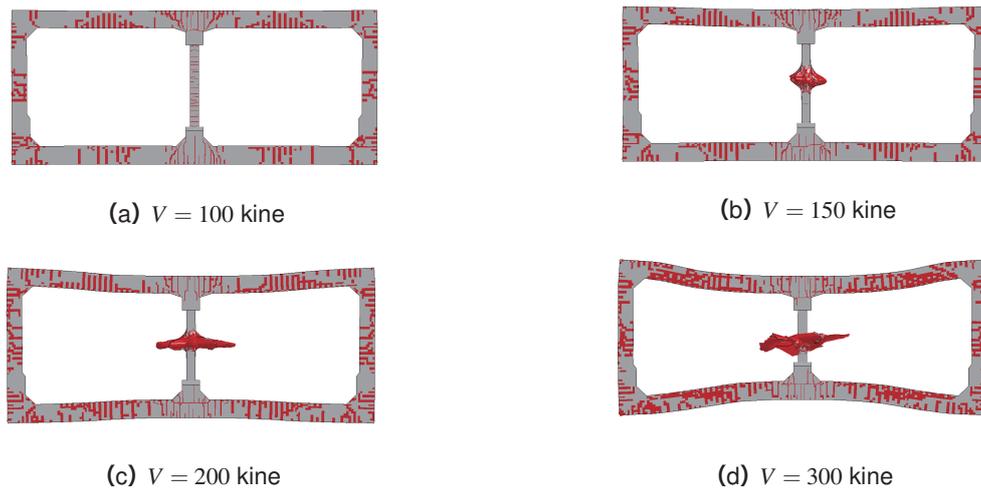


図-8 各変位速度入力時の 150 ms 経過時点における躯体の変形、ひび割れの発生と圧壊状況

向を示している。頂版部は、中央部下縁にひび割れが発生しており、正曲げの性状を示している。側壁部も上下端部で外縁部にひび割れが発生しており、負曲げの傾向を示している。中央部には貫通するひび割れが発生しており、伸張の傾向を示している。中柱の損傷状況を見ると、園田ら³⁾が弾性解析で指摘している輪切り状のひび割れが確認できる。

(b)図は 150 kine 入力の場合であるが、中柱に圧壊による損傷が現れているが、躯体全体としては大きな変状には至っていないことが分かる。底盤中央部を見ると、上縁にひび割れが発生しており負曲げの傾向にあることが分かる。頂版部と側壁部のひび割れ分布性状は、前述の 100 kine 入力時に類似している。中柱部の損傷状況を見ると、輪切り状のひび割れは確認できず中央部が圧壊していることが分かる。

(c)図、(d)図は、それぞれ 200, 300 kine 入力時における結果を示している。中柱中央部の圧壊は(b)図に比較してより顕在化しており、前述の通り入力変位速度の増加と共に圧壊域が下方に推移し、その結果底盤は上方に頂版は下方に推移していることが分かる。側壁部も上下部でそれぞれ負、正曲げが顕在化し、外側に膨らむような変形状態を呈していることが分かる。なお、これらの変形及び損傷状況は 150 ms 経過時点での結果であることより、時間の経過と共に上載土砂や自重によって躯体全体が下方に推移し、頂版部はより一層落ち込むことが推察される。

以上より、100 kine 程度の入力力で中柱の輪切りひび割れ、200 kine 以上の入力力で中柱中央部から下方に向けて圧壊を示し、頂版が落ち込む傾向を示すことが明らかになった。特に中柱の圧壊の状態は、写真-2、図-1に示されている状況をよく再現しているものと判断される。

4. まとめ

本研究では、周波数が 100 Hz 程度の鉛直波が基盤から

伝播する過渡応答状態における構造物の被災の可能性を検討することを目的に、地下鉄大開駅中柱の倒壊事象を対象に、継続時間を 5 ms とする強制変位を基盤から入力する場合について、3次元弾塑性応答解析を実施した。本研究で得られた結果を整理すると、以下のように示される。

- 1) 100 kine 入力時に中柱部に輪切り状のひび割れが再現される。
- 2) 200 kine 以上の入力時には、中柱中央から下部近傍で著しい圧壊とそれに伴う頂版の落ち込みに至る傾向が示され、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。

参考文献

- 1) 神戸新聞, [特集] 阪神・淡路大震災, 1995年1月
- 2) 大阪市立大学工学部, 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, 1997年1月
- 3) Sonoda, K. and Kitoh, H.: Vertical impulse to a structure on multi-layered grounds at near field earthquake, *Memoirs of the Faculty of Engineering, Osaka City University*, Vol. 56, Dec. 2015.
- 4) 矢的照夫, 梅原俊夫, 青木一二三, 中村 晋, 江崎順一, 末富岩雄: 兵庫県南部地震による神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析, *土木学会論文集*, No.537/I-35, pp.303-320, 1996.4
- 5) 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
- 6) 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,
- 7) Hallquist, J. O., *LS-DYNA Version R9 User's Manual*, Livermore Software Technology Corporation, 2016.