

非線形応答変位法による地下鉄駅舎の被災メカニズムの考察

神戸市交通局

佐俣千載* 長光弘司*

パシフィックコンサルタンツ株式会社 山本一敏** 森 伸治**

兵庫県南部地震では、地下鉄駅舎をはじめとする地下構造物が世界的にも前例のない被災を受けた。本文では、神戸市営地下鉄の中で最も被害の大きかった上沢駅を対象に、構造物の非線形性を考慮した応答変位法で検討を行った。この結果、RC中柱の変形性能が他の部材に比較して劣っていたことが主な被災原因であることがわかった。また、今回の被災を再現するためには、構造物の非線形性を考慮すること、地盤変位をはじめとする地盤の応答値を適切に評価する必要があるなどの知見が得られた。

1. はじめに

兵庫県南部地震では、地下鉄をはじめ各種の地下構造物が被災した。従来の地下構造物の地震被害は、水道管、ガス管といった比較的浅い位置に埋設される小規模のものがほとんどであり、今回のような大規模な地下構造物の被災は、世界的に見ても前例のないものであった。

従来、地下構造物は比較的地震に強いとされ、耐震設計を必要とされていないものも多い。また、耐震設計を実施する場合でも、中規模地震を想定し、許容応力度レベルの応答変位法による設計が一般的である。実際には、想定した中規模の地震を上回る地震に見舞われる可能性があるが、このような地震に対しては、構造物のじん性で対処できると考えられてきた。被災した駅に対して、中規模地震を想定した応答変位法を実施し、概ね耐震性が確保されていることを確認している。しかし、今回の地震は、従来想定されていた中規模地震をはるかに越えるものであった。

本文では、神戸市営地下鉄において被害が最も大きかった上沢駅を取り上げ、被災メカニズムについて検討した。解析には、構造物の非線形性を考慮した応答変位法を用いた。

キーワード：地中構造物、被災メカニズム、応答変位法

* 神戸市交通局高速鉄道技術部計画課 078-322-5979

** パシフィックコンサルタンツ株式会社

東京本社 構造部 地震防災課 03-3344-0443

2. 上沢駅の概要

上沢駅は、新神戸～新長田間の山手線(延長7.6km、昭和58～60年開通)の駅であり、兵庫区上沢通8丁目～下沢通8丁目に位置する。崩壊した神戸高速鉄道の大開駅に近く、いずれも震度7と判定された地域である。

図-1に駅舎の平面、側面図を示す。上沢駅は、電気機械設備の中核となるため、他の駅よりも大きなスパンを必要とし、延長が長くなっている。駅舎は、全長400m、幅13～17mの2～3層構造となっており、土かぶり厚は3～5mである。土質は、地表より表土、沖積層、段丘層、大阪層群の層順となっており、比較的良質な地盤である。大阪層群と段丘層の境界は、駅区間でGL-26m～GL-18m程度に変化している。

設計は、昭和51年当時の基準に基づいて行われている。また、駅舎の施工は、親杭横矢板による開削工法であり、親杭(H鋼)は残置されている。

図-2に代表的な被災断面図と地盤条件を示す。この断面は、3層構造となっており、B1、B2階の中柱はRC製であり、B3階は鋼製である。図-3にB1、B2階の中柱配筋図を示す。帯筋はφ9の12.5cmピッチ(B1階中間のみ25cmピッチ)で配置されている。B1、B2階の中柱の平均圧縮応力は各々80、100kg/cm²であり、同断面の側壁の10kg/cm²、一般的な道路橋のRC橋脚の10～15kg/cm²と比較すると極めて高い。

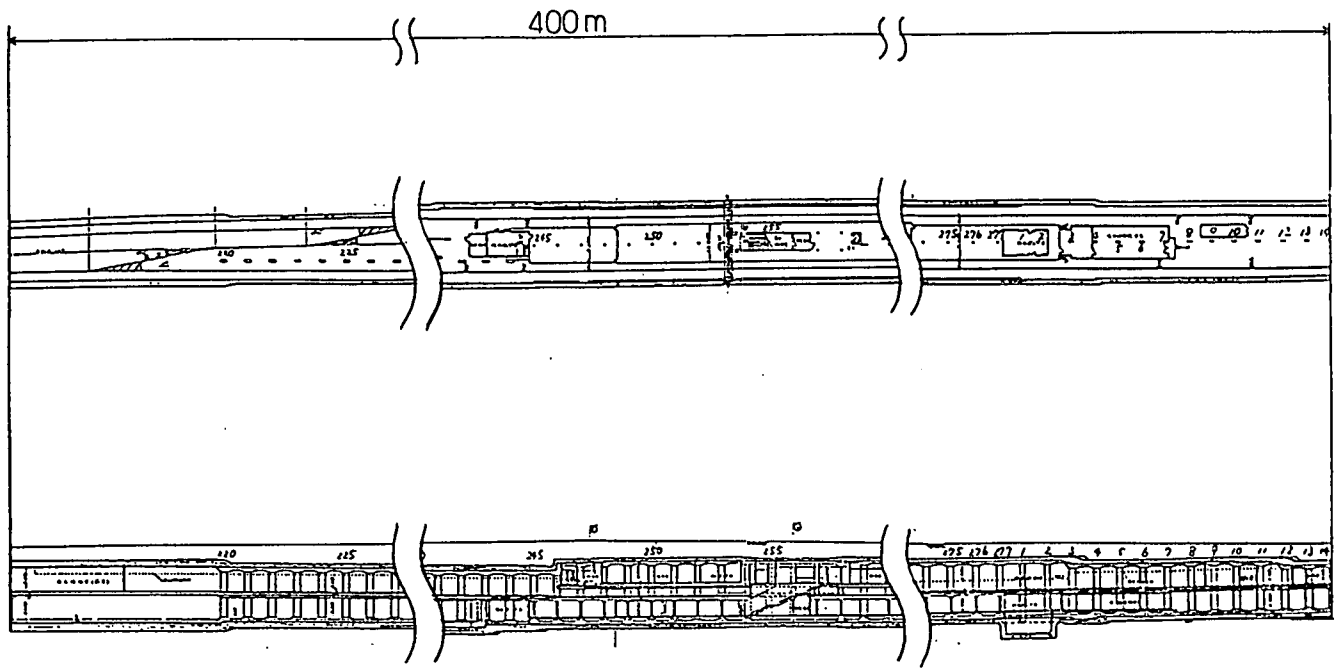


図-1 駅舎の平面および側面図

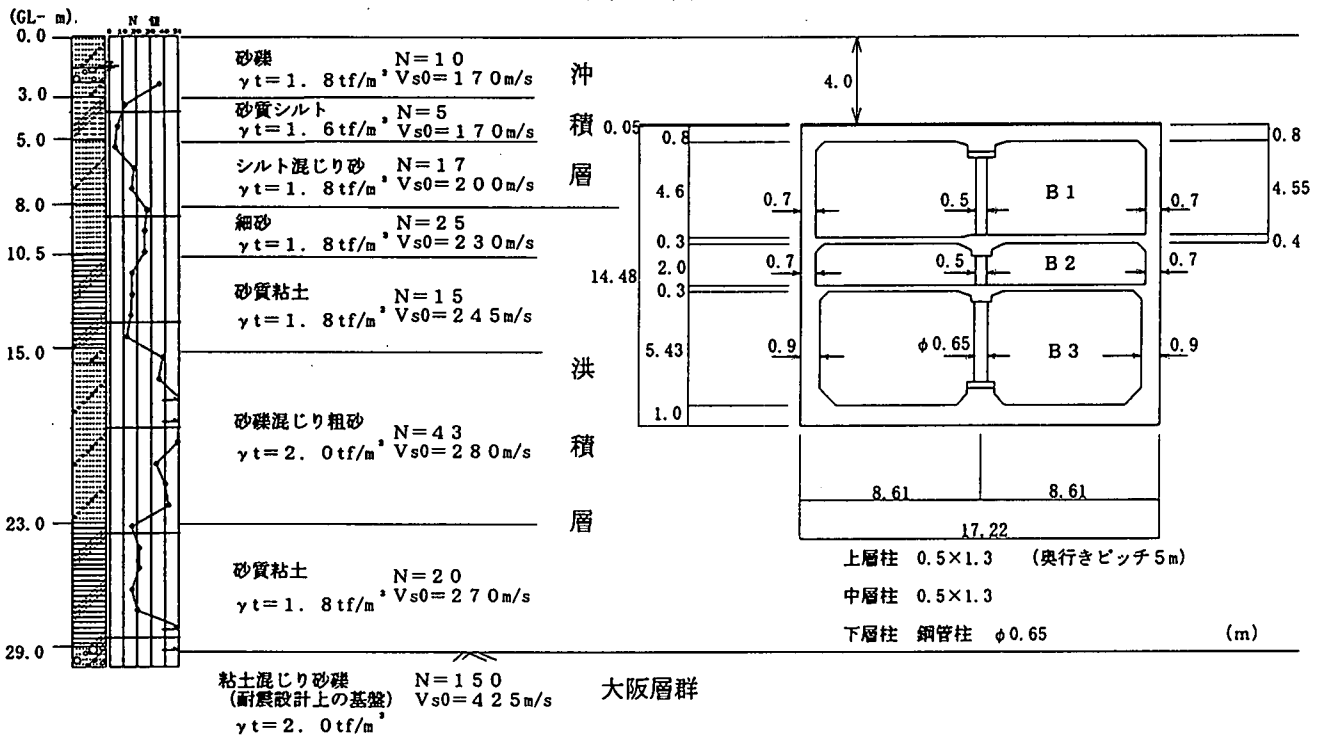


図-2 代表的な被災断面図および地盤条件

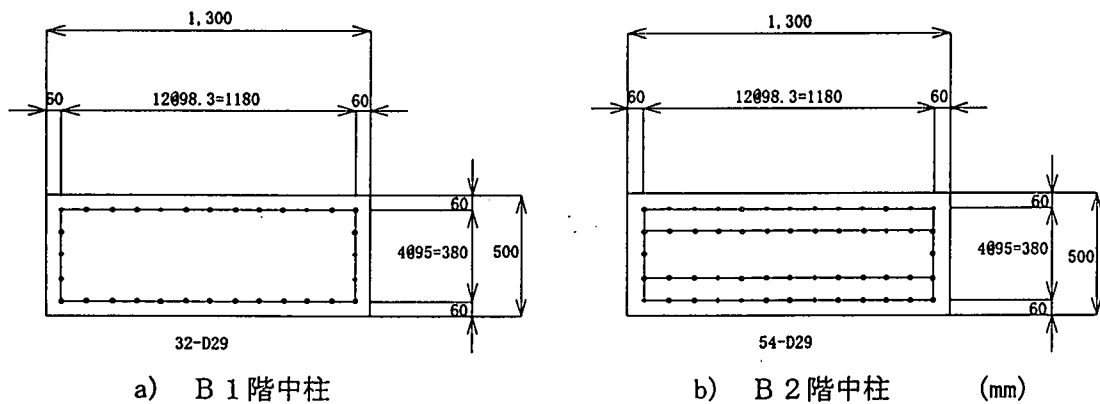
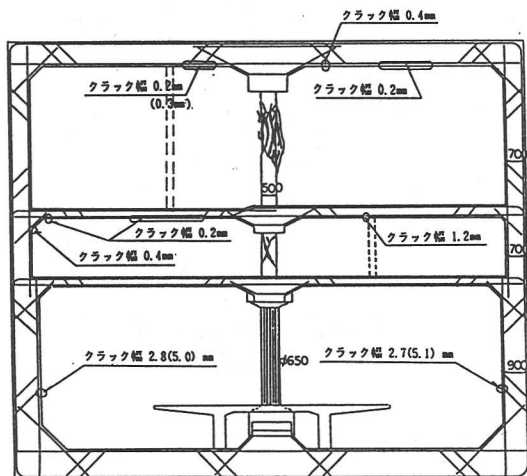


図-3 RC中柱の配筋

3. 被災状況

神戸市営地下鉄の被害は、新長田駅、上沢駅および三宮駅に集中した。新長田駅および上沢駅においては、両駅周囲の線路部も被災したが、いずれの被災もRC中柱の横断方向のせん断破壊と考えられるものが多数であった。これらの駅では、鋼管柱も用いられていたが、被災の確認はされていない。最も被害の大きかった上沢駅および周辺線路部では、421本のRC中柱の内192本(約46%)が被災した。この被災した192本の内、34本(全RC柱の約8%)では貫通クラックがあり、主鉄筋の曲がり鉄筋径以上のものであった。

図-4および写真-1に図-2の断面の被災状況を示す。RC中柱の被災は、3層中B1階で特に大きく、ひび割れ面の立った斜めせん断ひび割れが生じた。なお、各床版、側壁にも最大で数ミリレベルのクラックが観察された。



()内は同クラックの最大幅

図-4 被災状況図

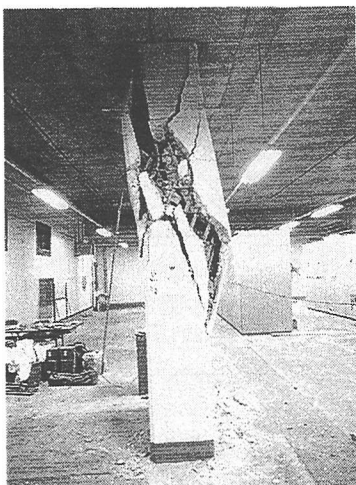


写真-1 B1階中柱の被害

4. 検討条件

(1) 解析方法

解析には、構造物の非線形性を考慮した応答変位法を用いた。非線形解析には、荷重増分法を用い、各ステップにおいて収束計算を行った。図-5に解析の流れを示す。文献1)を参考に、地震荷重として、構造物の重量に起因する慣性力、地震時水平土圧、地震時周面せん断力を考慮し、地盤ばねを表層地盤をモデル化したFEMによって求めた。

(2) 入力地震動および地盤の応答値

兵庫県南部地震においてポートアイランドのGL-83m(Ma12下面)で観測された地震記録のNS成分を入力地震動とした。図-6に入力地震動を示す。等価線形化法を用いた1次元の地震応答解析により、地盤の応答値および地盤の等価剛性を求めた。図-7には、上~下床版間の相対変位が最大となる時刻における地盤の応答値を示す。地盤変位についてみると、B1階の相対変位が大きい。

(3) 解析モデル

図-8に応答変位法の解析モデルを示す。解析モデルは、地盤ばねによって支持された平面骨組みモデルであり、各部材にはM~φ型(曲げモーメント~曲率関係)の非線形性を考慮した。M~φ関係については、文献2)を参考に設定した。図-9に代表的な部材のM~φ関係を示す。同図を見ると、中柱の変形性能は側壁に比較して劣っていることがわかる。ただし、M~φ関係の設定に当たっては、軸力を常時の軸力に固定している。なお、比較ケースとして各部材の特性を線形としたケースも実施した。

(4) 地震荷重

地震荷重には、図-7の地盤の応答値に対応する地震荷重を1.0とし、これを10分割し0.1~1.0の各地震荷重レベルの挙動を求めた。図-10に地震荷重レベル1.0の地震荷重を示す。なお、比較ケースとして文献1)のように等価な単層地盤に置換して求めた応答値を用いたケースも実施した。

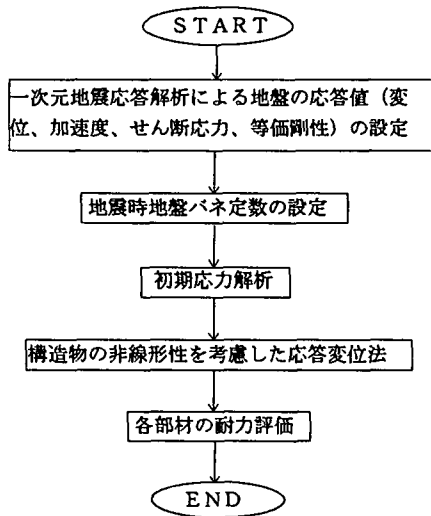


図-5 解析の流れ

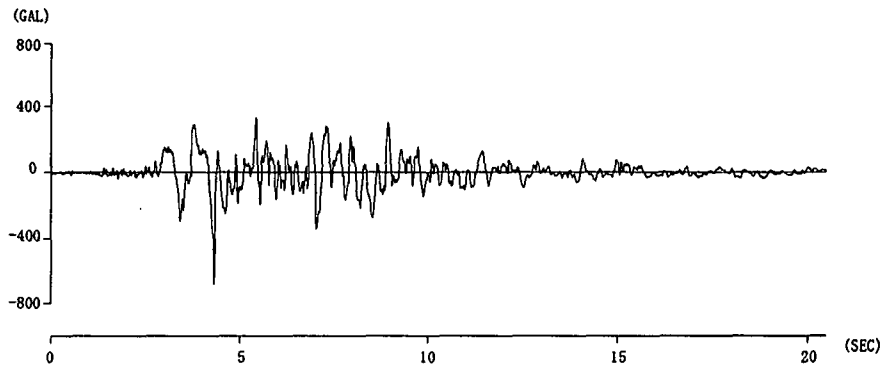


図-6 入力地震動

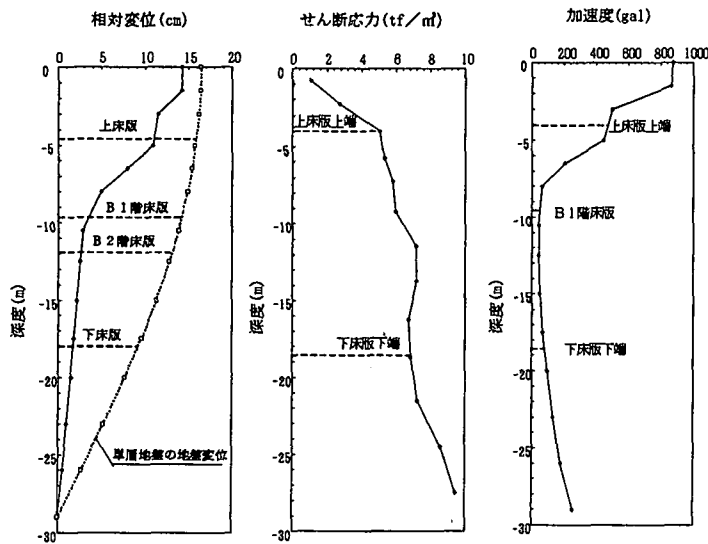


図-7 地盤の応答値

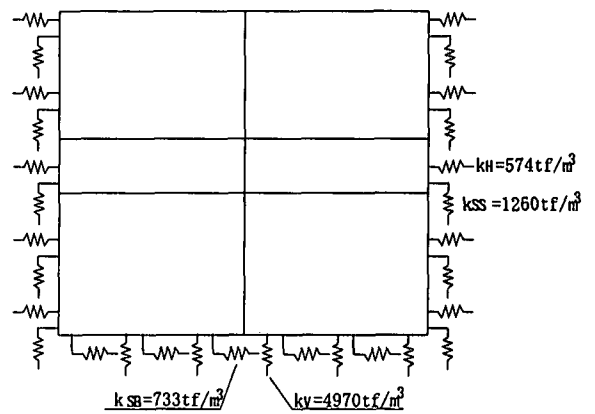


図-8 解析モデル

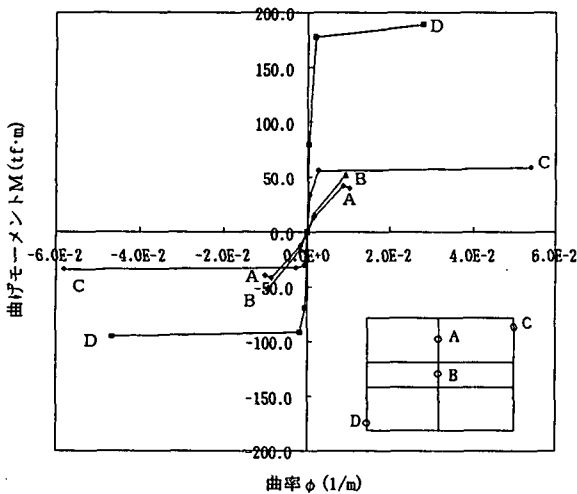


図-9 代表的部材のM~ ϕ 関係

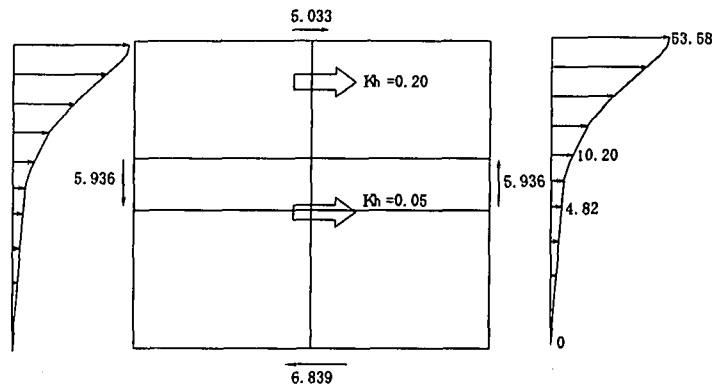


図-10 地震荷重図 (tf/m²)

5. 解析結果

(1) 被災状況の検討

図-11に構造物の非線形性を考慮し、1次元の地震応答解析の応答値に基づいたケースの地震荷重レベル0.4における変位、曲げモーメントおよびせん断力図を示す。駅舎には、地震時の地盤のせん断変形に伴い、横断方向にせん断変形が生じている。この結果、上～中～下床版に水平方向の相対変位が生じ、側壁および中柱は水平方向に強制変位を受けたような状態になっている。

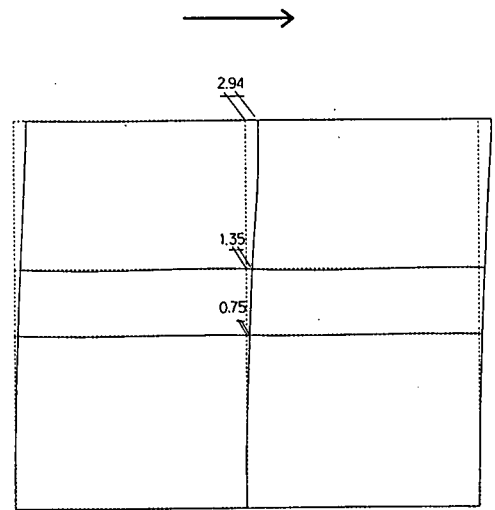
図-12, 13に各荷重レベルの主な部材の曲げおよびせん断耐力に対する安全率（耐力/発生断面力）を示す。なお、耐力は、文献2)により算出している。この結果、前述の地震荷重レベル0.4において、B1階の中柱のせん断に対する安全率は1.0以下であるのに対し、他の部材ではせん断に対する安全率が1.0以上となっている。B1階の中柱の曲げに対する安全率は、1.3となっており、せん断が先行したことが概ね再現できているといえる。つまり、横断方向にせん断変形を受けた状態で、側壁に比較して変形性能に劣る中柱が被災したと考えられる。

(2) 構造物の非線形性の影響

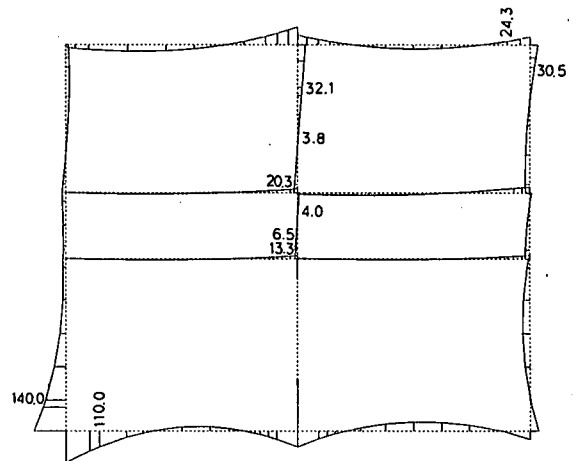
図-12, 13の構造物の非線形性を無視した線形の応答変位法について見ると、B1階より被害の軽微なB2階の中柱のせん断破壊が先行し、ほぼ同時にB1階の側壁にせん断破壊が発生する結果となる。このことは被災状況と整合せず、被災状況を説明するには部材の非線形性を考慮する必要があるといえる。

(3) 地盤の応答値の影響

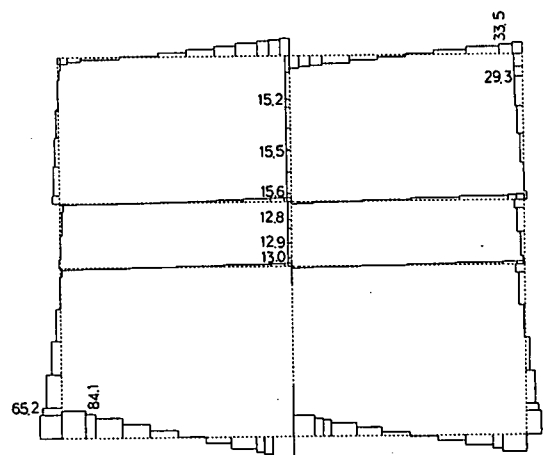
図-12, 13の等価な単層地盤の応答値を用いたケースについて見ると、B2階の中柱のせん断破壊が先行し、ほぼ同時にB3階の側壁にせん断破壊が発生することになる。このことは、被災状況と整合せず、被災状況を説明するには地盤の応答値を的確に評価する必要があるといえる。



a) 変形図 (cm)



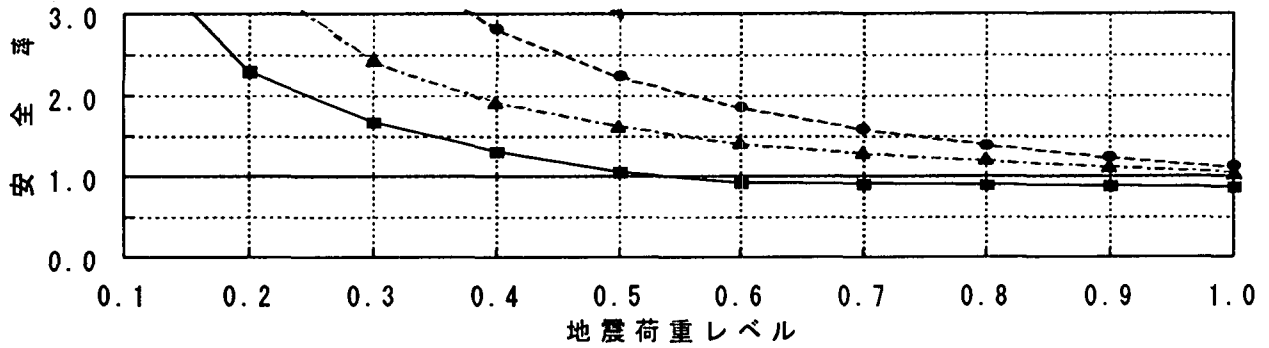
b) 曲げモーメント図 (tf·m)



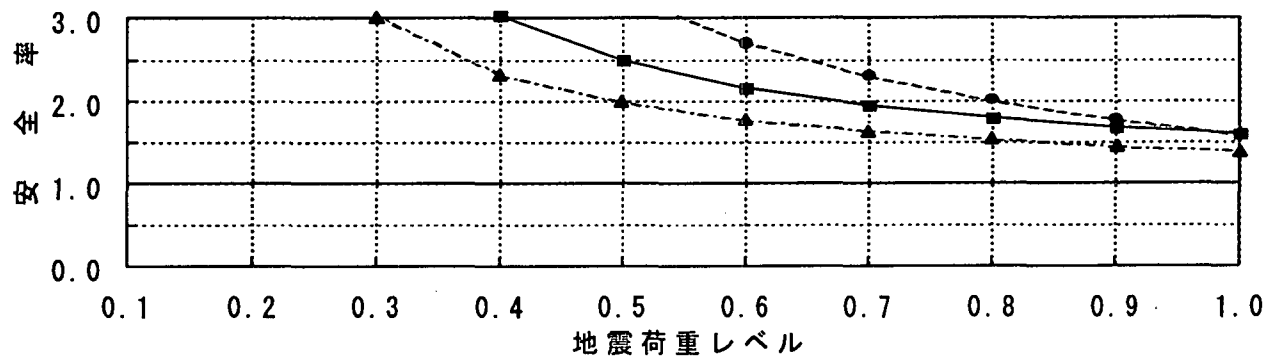
c) せん断力図 (tf)

図-11 荷重レベル0.4における解析結果

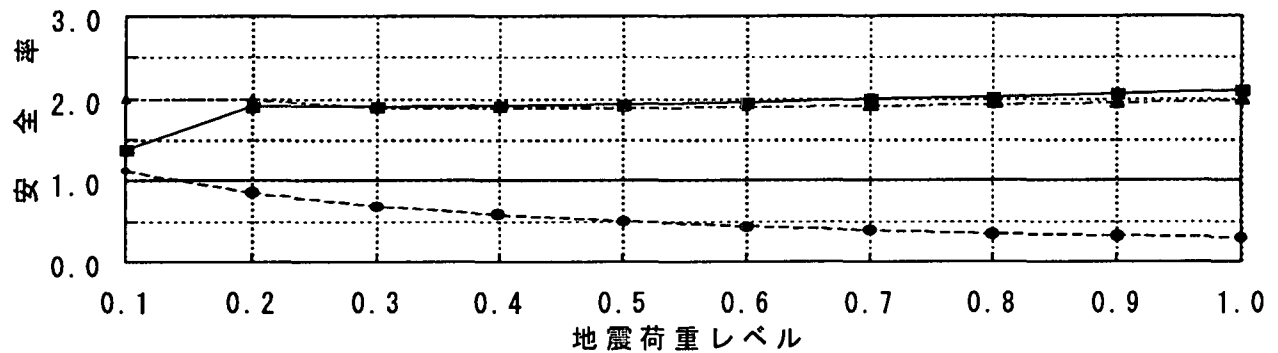
—■— 一次元地震応答解析の地盤の応答値を用いた非線形解析
 -●- 一次元地震応答解析の地盤の応答値を用いた線形解析
 -▲- 等価な単層地盤としたときの応答値を用いた非線形解析



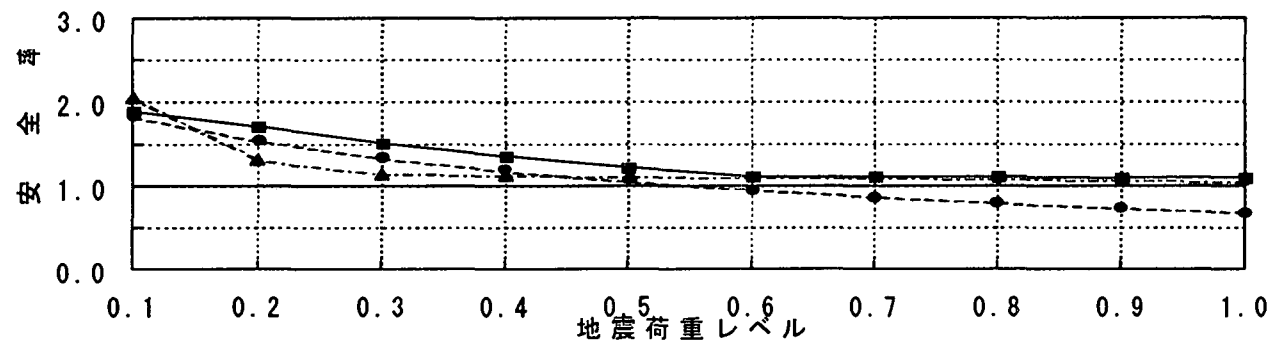
a) B1階中柱



b) B2階中柱



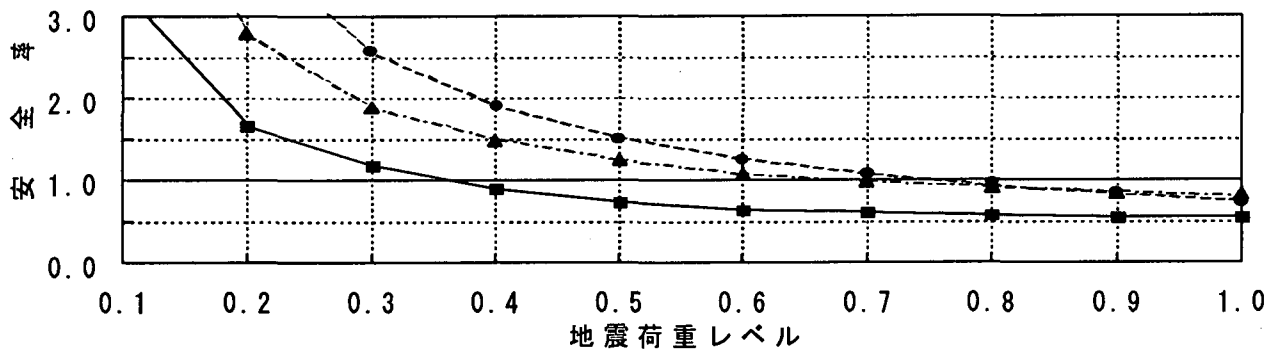
c) B1階側壁 (右上)



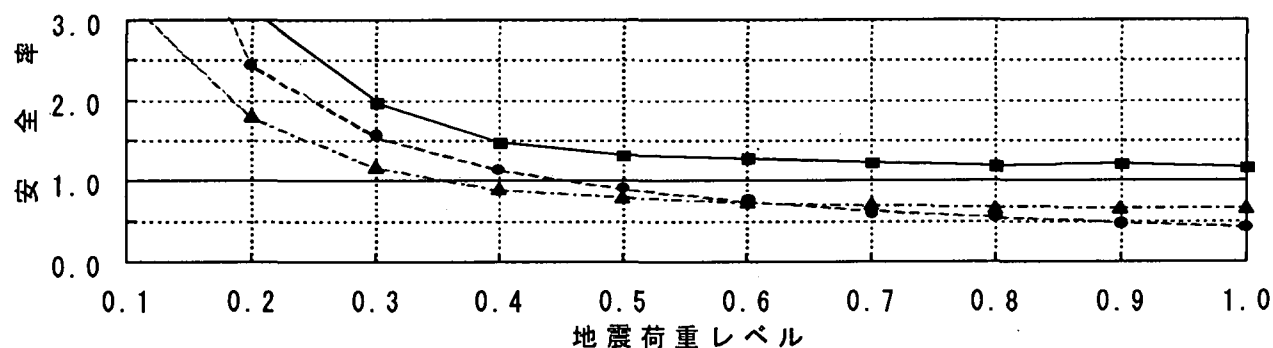
d) B3階側壁 (左下)

図-12 曲げに対する安全率

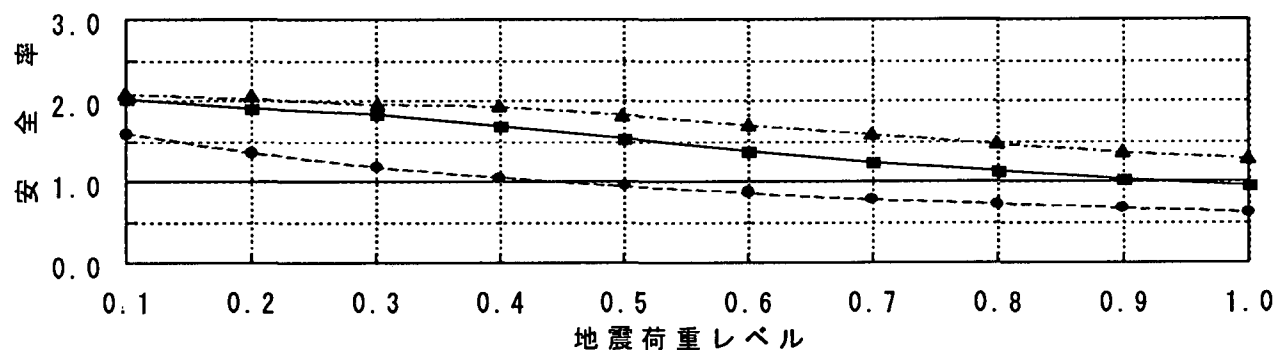
—■— 一次元地震応答解析の地盤の応答値を用いた非線形解析
 -●- 一次元地震応答解析の地盤の応答値を用いた線形解析
 -▲- 等価な単層地盤としたときの応答値を用いた非線形解析



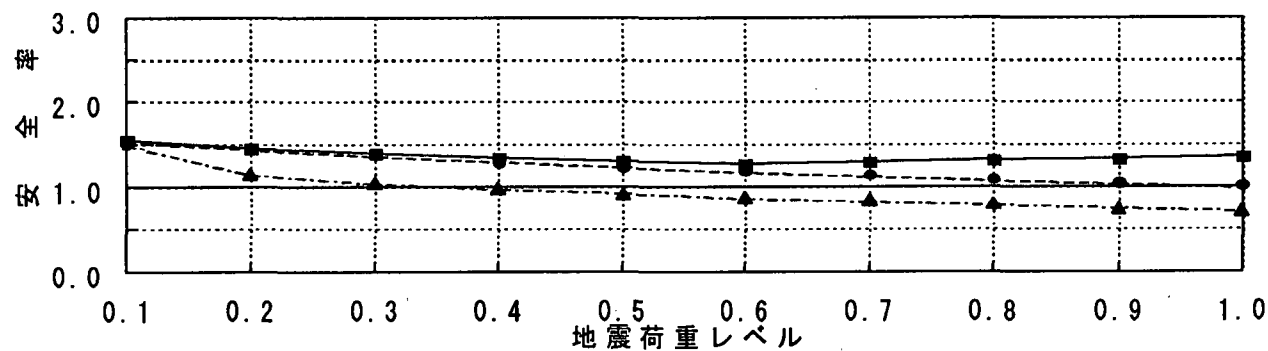
a) B 1階中柱



b) B 2階中柱



c) B 1階側壁 (右上)



d) B 3階側壁 (左下)

図-13 せん断に対する安全率

6. まとめ

兵庫県南部地震により被災した神戸市営地下鉄の代表的な駅舎である上沢駅を対象に、非線形応答変位法で検討した。この結果、次のことがわかった。

1) 被災した中柱は、上下床版および側壁に比較して変形性能が小さい部材であった。地震時において、地盤にせん断変形が発生し、これに伴い駅舎の横断方向にせん断変形が生じた。その結果、上～中～下床版に水平方向の相対変位が生じ、側壁に比較して変形性能に劣る中柱が被災したと考えられる。

2) 1次元の地震応答解析により、地盤の応答値を求め、構造物の非線形性を考慮した応答変位法によって地震時の挙動を解析した結果、B1階の中柱のせん断破壊が先行することが概ね再現できた。

3) 構造物の非線形性を無視した線形の応答変位法を用いると、B1階より被害の軽微なB2階の中柱およびB1階の側壁のせん断破壊が先行する結果

となる。このことは被災状況と整合せず、被災状況を説明するには部材の非線形性を考慮する必要があるといえる。

4) 等価な単層地盤の応答値を用いると、B2階の中柱およびB3階の側壁のせん断破壊が先行する結果となる。このことは、被災状況と整合せず、被災状況を説明するには地盤の応答値を的確に評価する必要があるといえる。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：駐車場設計・施工指針 同解説，平成4年11月
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書【平成3年版】設計編，平成3年9月

A STUDY ON A FAILURE MECHANISM OF SUBWAY STATION ANALYSED BY A NON-LINEAR SEISMIC DEFORMATION METHOD

Senzai Samata, Hiroji Nagamitsu, Kazutoshi Yamamoto, Shinji Mori

Kamisawa Station, a station in Kobe City Subway System, was damaged during the Hyogoken-Nanbu Earthquake in 1995. This paper aims at analysing a failure mechanism by the non-linear deformation method.

The following conclusions are derived from the study:

- (1) The damage occurring in Kamisawa Station was caused by the relative displacement of the station floors due to ground shear deformation during the Earthquake, and insufficient deformation capacity of the RC columns.
- (2) In seismic design for an earthquake, it is necessary to apply a non-linear analysis and to estimate an appropriate ground response.