

不整形構造物の動的解析と耐震性能の評価例

西村 昭彦¹・〇齊 琳²・垣内 辰雄³・五十嵐 裕昌⁴・矢島 秀治⁴

¹フェロー会員 工博 (株) テス取締役 (〒185-0034 国分寺市光町 2-8-38)

²Ph.D (株) テス 土木事業部 (〒185-0034 国分寺市光町 2-8-38)

³正会員 西日本旅客鉄道 (株) 建設工事事務 (〒530-8341 大阪市北区芝田 2-4-24)

⁴正会員 技術士 ジェイアール西日本コンサルタンツ (株) (〒532-0011 大阪市淀川区西中島 5-4-20)

建築物と自由通路が一体となった不整形構造物に対して3次元動的解析を行い、その耐震性能を評価した事例を紹介する。対象構造物は建築基準法で設計されたものであり、それを道路橋示方書耐震設計編（以下「道示」と称す）によって評価した。解析モデルは構造物が不整形であることを考慮して3次元モデルとした。地震動は道示に示すタイプⅠ、Ⅱとし、部材は非線形性を考慮した。また耐震性能は塑性率によって評価した。その結果、部材は降伏するものの、塑性率は小さく安全であることを確認した。また、基礎は降伏せず安全であることを確認した。

Key Words : complex construction, 3-D model, nonlinear dynamic analysis, earthquake-resistant performance

1. はじめに

兵庫県南部地震以来、構造物の耐震性の検討が重要視されているが、現状では、大地震時における鋼構造の塑性領域での評価は難しい。そこで本論文では、実構造物において耐震性照査に関わる解析方法や評価方法を試みた。

従来からの耐震性能の照査に関する解析法および評価方法には、次のような特徴および問題点が挙げられる。

- 一次モードが卓越すると考えられる構造物を荷重の分担係数を考慮した2次元モデルで動的解析し、耐震性能を評価する。しかし、複雑な構造のねじりおよび近隣構造物の連成の影響を考慮しにくい。
- 複雑な構造物に対しては、3次元モデルにおける動的解析により耐震性の照査を行うことを基本としているが、合成応力の評価等は十分に確立されていない。
- 性能を満足するための各部材の限界状態に対する検討が十分でない。特に水平梁部材に関する評価は簡略化されている。

これらの問題点に対して、3次元モデルを利用した耐震性能照査を行い、これらの特徴を明確にし、性能設計の基本である構造部材の耐震性能評価方法を提案した。

2. 検討条件及び入力地震動

(1) 検討対象

対象構造物は建築基準法・同施工令および建設省告示により設計された構造物であるが、自由通路部については道路橋としても耐震上安全であることを照査するため、立体横断施設技術規準・同解説および道示により大規模地震に対する検討を行うものである。検討構造物の自由通路部と駅施設部の概要を図-1、図-2に示す。

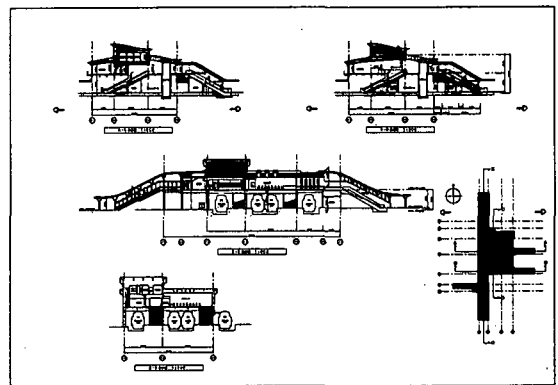


図-1 自由通路部と駅施設部の概要図その1
(横断面図、側面図)

(2) モデル化及び設計条件

a) 解析モデル

自由通路部と駅施設部は、特性の異なる構造物が一体構造となっており、地震時にはそれぞれの挙動が相互に影響をおよぼすため、複雑な挙動を示すことが考えられる。従って、自由通路部の耐震性の照査を行う場合には、駅施設部の影響を適切に評価す

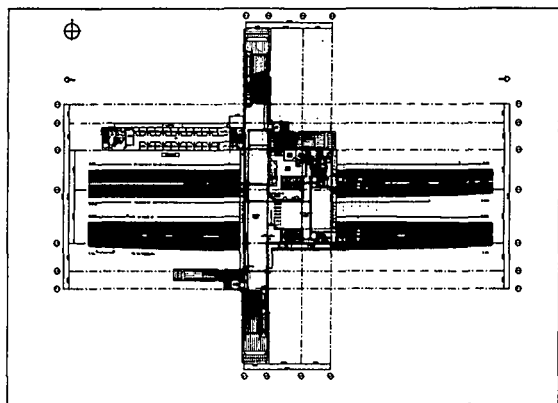


図-2 自由通路部と駅施設部の概要図その2
(平面図)

る必要があるため、自由通路部と駅施設部を一体構造とした3次元モデルにより解析を行うものとした。
本検討で用いる3次元解析モデルを図-3に示す。

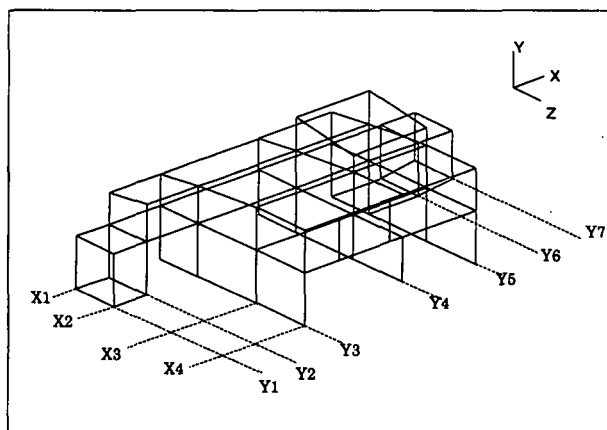


図-3 自由通路部と駅施設部の3次元骨組モデル

b) 部材特性

自由通路部の骨組みの剛性は道示に基づいて設定する。

柱は部材の非線形を考慮し、塑性率で評価を行う。また、上床梁は当初床版と鉄骨を合成した断面で部材の剛性を設定することとしたが、コンクリートの損傷が大きい場合はI型梁として評価する。その場合鉄骨のみの剛性を考慮し（コンクリートの剛性は無視するが、自重は考慮する。）、鋼材の降伏強度または塑性率で評価を行う。

c) 荷重

検討構造物の骨組が負担する鉛直荷重は床版・小梁などによる荷重伝達経路を考慮し、各部で正確な荷重を考慮する。

なお、荷重の組合せは道示に準拠し以下の組合せを検討する。

- ・ 主荷重（活荷重含む）＋地震の影響（EQ）

d) 地盤ばね

杭は杭頭ばねでモデル化した。ばね定数は道示に基づいて算出した。

地震時の地盤反力係数は、常時の2倍を使用し、検討ケースに示すように液状化を考慮する場合は、地震時の地盤反力係数に土質定数の低減係数を乗じたものを使用する。

(3) 入力地震動

地盤の周期から地盤種別を判定し(Ⅱ種地盤)、その地盤種別についてタイプⅠ、Ⅱの地震動をそれぞれ3波（道示に基づき土木研究所が配布した地震波形）用いて解析を行う。地震波の方向は線路方向と線路直角方向に作用させるものとし、耐震性能の照査は3波の応答値の平均値を用いるものとする。

(4) 検討ケース

地盤が液状化する場合は、液状化前と液状化後の両方について解析を行うものとする。

また、液状化の前後でせん断スパン比や固有周期が変わるため、液状化前後で検討を行い、構造物にとって厳しい方で照査することとした。

検討ケースを表-1に示す。

表-1 検討ケース一覧

ケース	地震波			地盤
1	線路方向加振	タイプⅠ	3波	液状化前
2		タイプⅡ	3波	
3	線路直角方向加振	タイプⅠ	3波	
4		タイプⅡ	3波	
5	線路方向加振	タイプⅠ	3波	液状化後
6		タイプⅡ	3波	
7	線路直角方向加振	タイプⅠ	3波	
8		タイプⅡ	3波	

3. 評価手順と解析法

(1) 評価手順

本検討の検討内容及び作業の流れを図-4に示す。

(2) 評価手法

部材の評価は以下に示すとおりとする。

a) 柱部材評価方法

柱については道示で塑性率が4ないし5（地震波のタイプによって異なる）まで許容されている。ただし、これは荷重～部材角（ $P-\delta$ ）の値であり、

今回のモデルは曲げモーメント～部材の曲率関係（ $M-\phi$ ）で評価するため、静的非線形解析（プッシュオーバーアナリシス）を実施し、 $P-\delta$ 上で制限値に至ったときの ϕ の制限値を設定した。

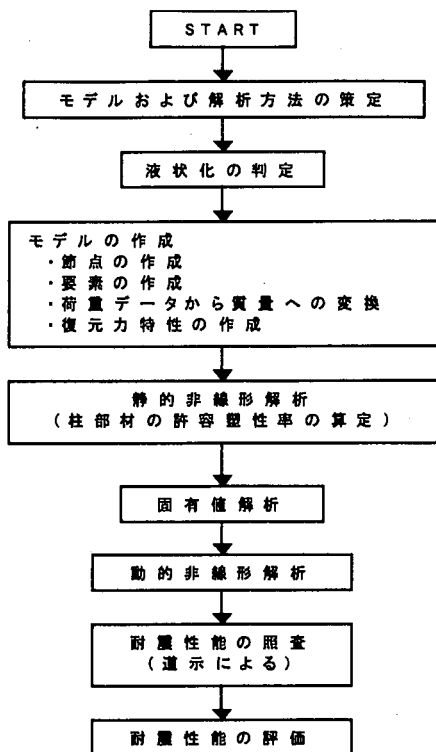


図-4 耐震性能の評価検討フロー

b) 地中梁部材評価方法

設計断面耐力以内であることを照査する。

c) 杭頭の評価方法

ばねに生じる反力が降伏支持力および降伏耐力以内であることを照査する。

杭体および地中梁は地中にあり、地震時に損傷が生じた場合発見が困難である。また、その補修に対する時間および費用も上部工が損傷を受けた場合より大きくなる。したがって、基礎は降伏させないことを原則とした。

d) 上床梁部材の評価方法

曲率の塑性率が許容塑性率以内であることを照査する。その評価手順を図-5に示す。

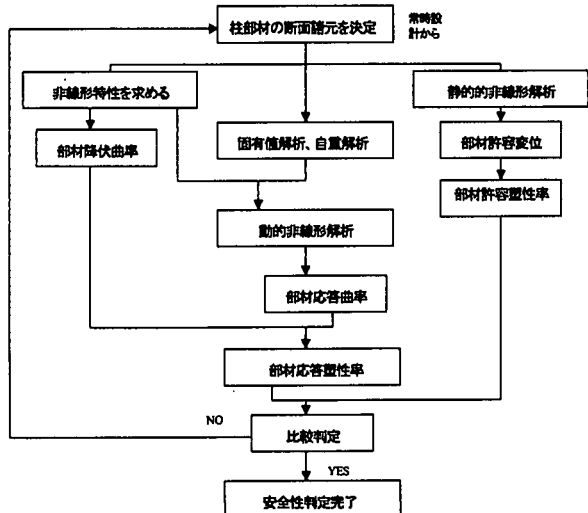


図-5 柱の耐震安全性評価手順

上床梁については、人が通行する箇所でもあり、あまり損傷を大きくしたくないと考え、当初は合成梁とし、降伏モーメント以内であれば安全として評価することとした。

しかし、曲げ剛性が大きいため、このモーメントを遙かに越える応力が発生した。そこで、梁の剛性のみで評価することとし、コンクリートは重量のみ評価した。そして梁についても多少の損傷を許容することとし、塑性率で評価することとした。

しかし、上床梁については道示に塑性率の計算手法が示されていないため、日本建築学会の建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)¹⁾に基づいて算定した。

その評価手順を図-6に示す。

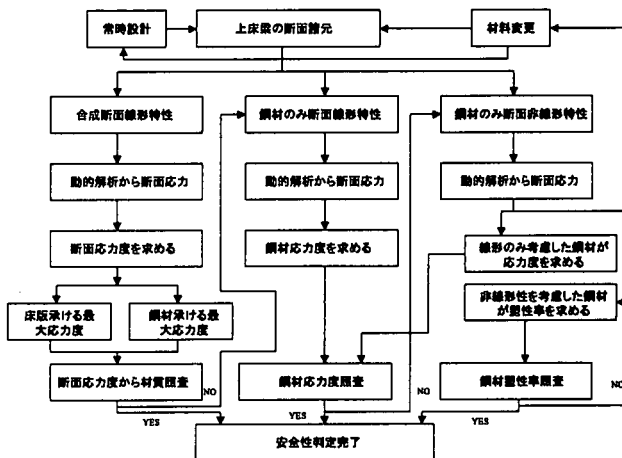


図-6 上床梁の耐震性評価手順

4. 解析結果及び評価

まず固有値解析を行い、振動モードの特徴から立体効果を評価した。次に部材の非線形性効果を取り入れた動的非線形解析結果により自由通路の耐震性を評価した。安全性の判定は3波入力地震動に対する平均値を動的非線形解析結果とみなし、非線形効果を考慮した部材は応答塑性率と許容塑性率の比較によって、非線形効果を考慮していない部材は発生応力度と降伏応力度の比較によって安全性の判定を行った。

(1) 固有値解析について

液化化なしの場合の固有周期は表-3に示すとおりであり、全体系立体モデル時の一次モードの固有振動数は1.52Hz位である。比較のため、同条件での通路部立体モデル時の一次モードの固有周期も求めた。結果は1.42Hzであり、近い値であった。また、その振動モードを図-7に示す。

表-3 固有振動数（液状化なし）

	振動数 (Hz)	周期 (Sec)	有効質量比	
			線路直角 方向	線路方 向
1	1.521	0.657	0.508	-
2	1.764	0.567	-	0.679
3	1.954	0.512	0.108	-
4	2.338	0.428	0.098	-
16	4.786	0.209	-	(0.048)

注) () は鉛直方向

(2)柱部材について

柱部材の照査は、静的非線形解析で求めた柱のP- δ 関係で塑性率4および5に相当する曲率の制限値（許容塑性率）の値と動的解析の柱部材の最大塑性率との比較によるものとした。比較の結果、すべての柱が許容塑性率以内に納まることを確認した。

(3)地中梁及び杭について

3次元動的解析の結果（3波平均値のみ）から地中梁における最大応力を抽出、断面の曲げおよびせん断応力度照査を行った。応力度は降伏応力以下となるようにした。

照査結果から、梁の断面は変更の必要はないが、鉄筋本数を増やす必要がある箇所が生じた。また、一部材の帯筋はD13からD16に変更する必要があることが判明した。

杭も地中梁と同様降伏させないことを前提としたため、動的解析結果を用いて、杭の降伏耐力の照査を行った。照査結果は、断面等の変更はないものの、鉄筋量を増加する必要があることが判明した。

(4)上床梁について

上床梁については、降伏を許すこととして、動的解析の結果と許容塑性率との比較で照査した。その結果、当初の部材強度では不足するため、部材の材質をSM490に変更した。

それにより塑性率は最大位置でも3以内に納まり、許容塑性率を満足する結果となった。

以上の検討の結果、変更が必要となった部材をの部位を図-8に示す。

5. まとめ

解析の結果、建築基準法で設計されたこの構造物は、道示で評価しても安全であることが判明した。

しかし、今後鋼構造物の塑性域での安全性の照査法の精度を高める必要がある。

おわりに、本解析を行うにあたって、独立行政法人土木研究所運上室長にご指導いただきました。

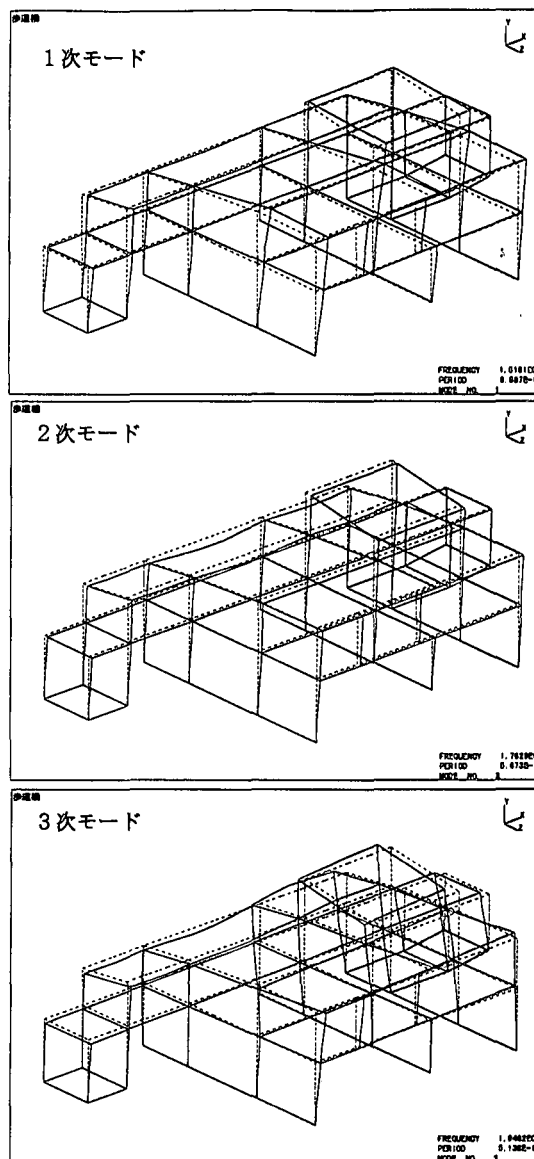


図-7 自由通路部と駅施設部一体系振動モード

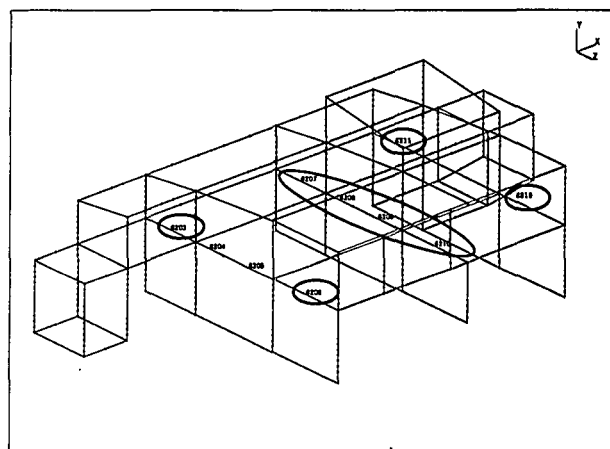


図-8 上床梁の鋼材強度不足部材(SS400時)

厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990) 日本建築学会