

## 鉄道高架橋の有効応力を考慮した3次元非線形動的解析

岩田秀治<sup>1</sup>・村田清満<sup>2</sup>・家村浩和<sup>3</sup>・石井拡一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 ジェイアール東海コンサルタンツ(株)土木設計部：J R東海より出向中（〒460-0008 名古屋市中区栄2-5-1）

<sup>2</sup>正会員 工博（財）鉄道総合技術研究所 鋼・複合構造 研究室長（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

<sup>3</sup>フェロー 工博 京都大学教授 大学院工学研究科土木システム工学専攻（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）

<sup>4</sup>正会員 J R東海 建設工部土木工事課 主席（〒450-6101 名古屋市中村区名駅1-1-4）

### 1. はじめに

兵庫県南部地震における鉄道構造物などの被害を教訓として、都市直下地震動に対応した新しい耐震基準が運輸省の「鉄道施設耐震構造検討委員会」において検討され、平成10年12月に「鉄道構造物等設計標準（耐震設計）」（以下、耐震標準<sup>1)</sup>）として運輸省から通達された。これにより、鉄道構造物の耐震設計に関する考え方が体系化され、その中では、表層地盤の性状を現実に近い形で考慮するとともに、構造物の変形性能・粘りを重視し、構造物の安全性についてはその耐震性能を照査する新しい形の設計法となった。

構造物に与える表層地盤の影響を詳細に評価するため、複雑な地震時の構造物の動的挙動の評価法としては、地盤-構造系（上部+下部+基礎構造）の一体モデルを用いた非線形動的解析（時刻歴解析）による照査法も新しくアプローチされた。

今回、解析対象構造物は鉄道ラーメン高架橋を想定し、その構造物の耐震性能評価は、2次元多質点系構造モデルの非線形動的解析での照査を行うのとともに、当該表層地盤の影響の評価として、液状化を考慮した1次元地盤モデルの有効応力解析および不整形地盤の影響も考慮した3次元地盤モデルの有効応力解析を行い、更に3次元地盤-構造系一体モデルの有効応力解析を行った。

以下、新しく耐震標準で設定された設計地震動を用い、地盤-構造系一体モデルによる複雑な地震時の表層地盤の動的挙動を考慮した解析事例として、その動的特性、解析モデルの相違による応答結果などに関して報告する。

### 2. 耐震標準の表層地盤の影響の考え方

兵庫県南部地震での構造物の被害は、近接した構造物間においても破壊・損傷形態に大きな差が見られた。これは、構造物の振動特性に加え、表層地盤の挙動も影響していると考えられる。そこで、耐震標準では、都市直下地震動を考慮し、部材の安全性の評価に関しては破壊モードを考慮することと同時に、構造物の応答値の算出にあたっては表層地盤の動的特性を考慮することとした。そのため設計想定地震動であるL1地震動、L2地震動は、双方とも工学的基盤面上で設定された<sup>2)</sup>。図-1は基盤面で設定したL1地震動・L2地震動（スペクトルⅠ、スペクトルⅡ）の弾性加速度応答スペクトル、図-2はL2地震動のスペクトルⅡ適合波形を示す。

地震動による構造物の応答値の算出にあたっては、4章から示すような、基盤地震動を用いて表層地盤および構造系を一体モデル化した時刻歴動的解析によって応答を求めても良いが、一般的には基礎-上部構造を多点質点系モデルに地表面での地震動を入力する手法が用いられる。そのため耐震標準では、地盤種別を8種類に分け、L1地震動、L2地震動（スペクトルⅠ・スペクトルⅡ）ごとに地表面設計地震動が示されている。図-3はL2地震動（スペクトルⅡ）の地表面設計地震動の弾性加速度応答スペクトル、表-1は地盤種別の区分を示す。

しかし、8種類に分けた地表面設計地震動においても、液状化層や不整形地盤の影響および局所的な地震動増幅作用は考慮されてなく、それらの影響が懸念される地点での構造物の建設に際しては、地盤のひずみとせん断弾性係数および減衰定数の関係など物理試験を行い、表層地盤の動的性状をできるだけ精度よく把握し、その地点特有の表層地盤の影響を評価する必要があると考えられる。

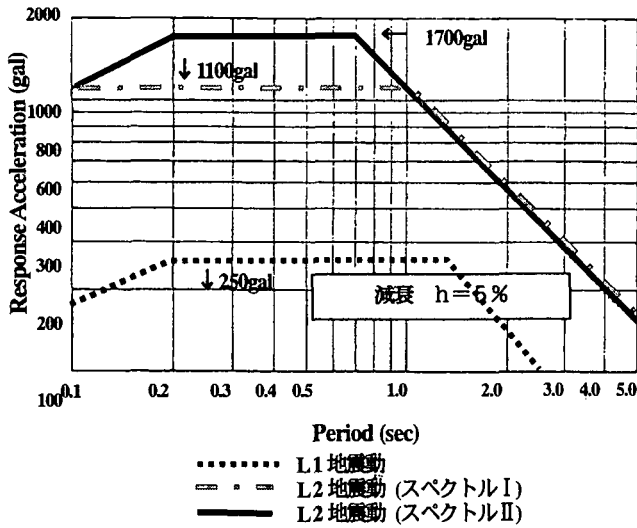


図-1 設計地震動の弾性加速度応答スペクトル

表-1 耐震設計における地盤種別

| 地盤種別 | 固有周期(sec) | 地盤条件     |
|------|-----------|----------|
| G0   | —         | 岩盤       |
| G1   | —         | 基盤       |
| G2   | ~0.25     | 洪積層      |
| G3   | 0.25~0.50 | 普通地盤     |
| G4   | 0.5~0.75  | 普通~軟弱地盤  |
| G5   | 0.75~1.0  | 軟弱地盤     |
| G6   | 1.0~1.5   | 軟弱地盤     |
| G7   | 1.5~      | 極めて軟弱な地盤 |

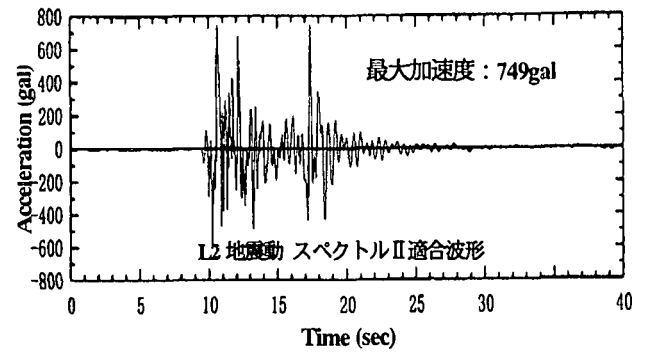


図-2 L2地震動スペクトルⅡ適合波

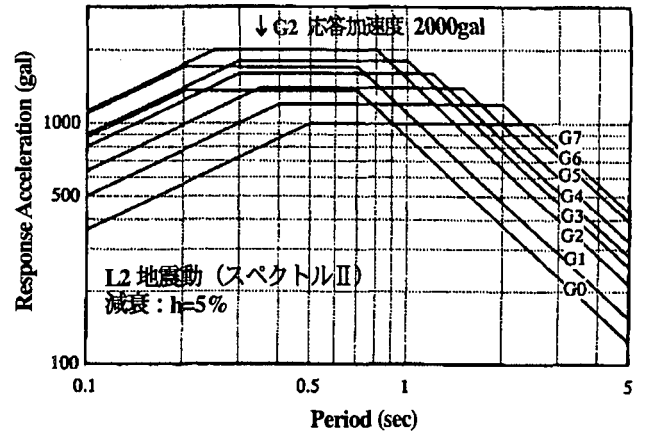


図-3 地表面設計地震動の弾性加速度応答スペクトル

### 3. 解析対象構造物

本稿で対象とする構造物は、複合構造の鉄道ラーメン高架橋で、鉄骨鉄筋コンクリート（SRC）を上層梁部材にコンクリート充填円形鋼管（CFT）を柱部材に用いている。また、CFT構造は、鋼管を型枠として使用できることから、通常のRC構造と比べ、施工の安全性・簡素化および工期の短縮が可能であり、加えて、鋼とコンクリート材料の合成効果により高い耐荷力と変形性能が期待できる。

#### （1）解析対象構造物

高架橋の構造一般図を図-4に示す。構造形式は7径間のSRCビームスラブ式1層ラーメン高架橋（柱部材：CFT、上層梁部材：SRC、地中梁部材：RC）であり、軌道構造は弾性マクラギ直結軌道、基礎形式は杭基礎（場所打ちコンクリート杭、杭径： $\phi 1,500\text{mm}$ ）である。

（設計荷重）

- ・固定死荷重（ $D_1$ ）
- ・付加死荷重（ $D_2$ ）
- ・列車荷重（ $L$ ）：設計列車荷重 EA-17

ただし、耐震の検討に用いる列車荷重は、1軌道当り

35N/mの等分布荷重として与え、線路本数が4線であるので、載荷する線路本数は2線載荷として考慮する。

・地震の影響（ $E_Q$ ）

死荷重（ $D_1 + D_2$ ）、列車荷重の水平慣性力

・温度変化（ $T$ ）

$\pm 10^\circ\text{C}$ を考慮する。

・コンクリートの乾燥収縮の影響（ $S_H$ ）

CFT柱は考慮せず、RC、SRC部材は、乾燥収縮ひずみ  $150 \times 10^{-6}$ を考慮する。

#### （2）多質点系モデルの非線形動的解析による耐震性能の評価

##### a) 構造物の要求性能

高架橋に要求される耐震性能は、L1地震動（構造物の設計耐用期間：100年以内に数回程度発生する確率を有する地震動）に対して耐震性能Ⅰ（地震後にも補修せずに機能を保持でき、過大な変位を生じない）、L2地震動（構造物の設計耐用期間：100年以内に発生する確率は低い非常に強い地震動）に対して耐震性能Ⅱ（地震後に補修を必要とするが、早期に機能が回復できる）を確保することとする（表-2、3）。

##### b) 多質点系モデルの非線形動的解析

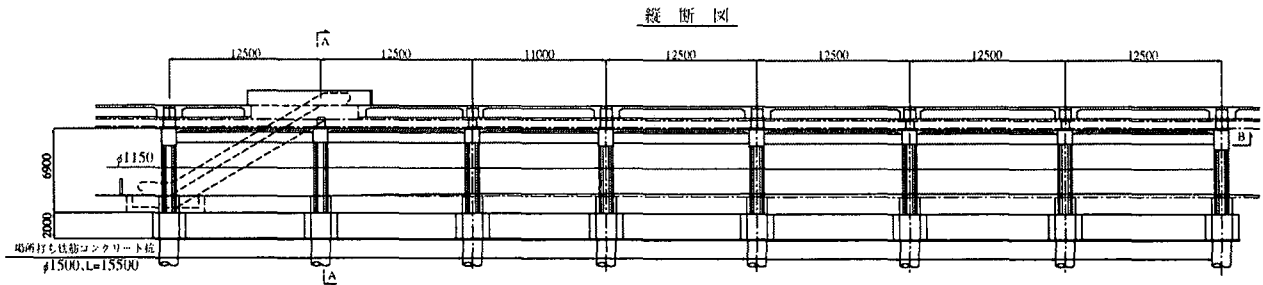
簡易的な所要降伏震度スペクトルを用いた非線形静的解析（プッシュ・オーバー・アナリシス）による照査も行っているが、本稿では図-5に示すような解析モデル

表-2 構造物の耐震性能

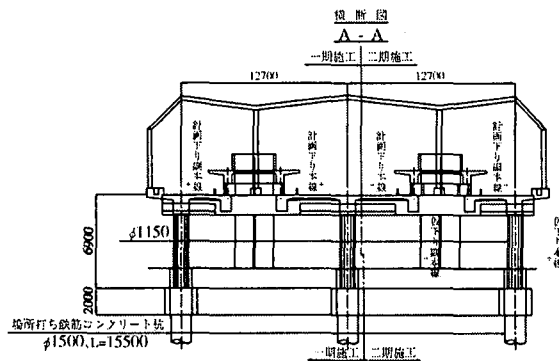
| 設計想定地震 | 構造物の耐震性能 |
|--------|----------|
| L1地震動  | 耐震性能Ⅰ    |
| L2地震動  | 耐震性能Ⅱ    |

表-3 部材の損傷レベル

|             | 耐震性能Ⅰ | 耐震性能Ⅱ |
|-------------|-------|-------|
| 上層梁、地中梁、基礎杭 | 1     | 2     |
| 柱           | 1     | 3     |



- ・コンクリートの設計基準強度 : 柱、梁、スラブ部材 27N/mm<sup>2</sup>,  
場所打ち杭 (自然泥水) 30N/mm<sup>2</sup>
- ・鉄筋 : 軀体: SD345, 場所打ち杭: SD390
- ・鉄骨 : SM490
- ・鋼管 : STK490 (外径φ1,150mm, 管厚28mm, 径厚比41)



CFT断面図(接合部)

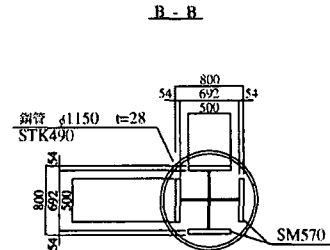
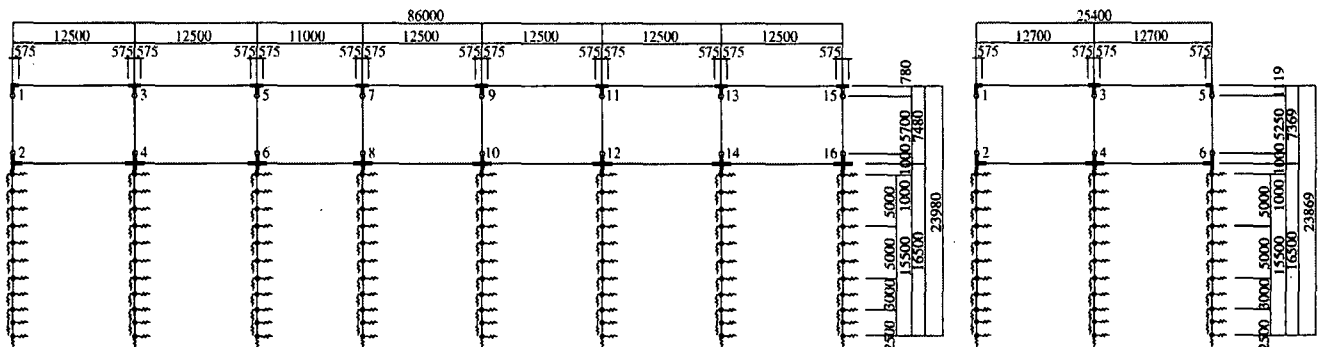


図-4 構造一般図



(1) 線路方向

(2) 線路直角方向

図-5 多質点系解析モデル

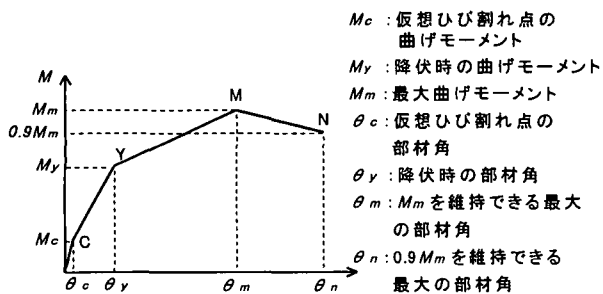
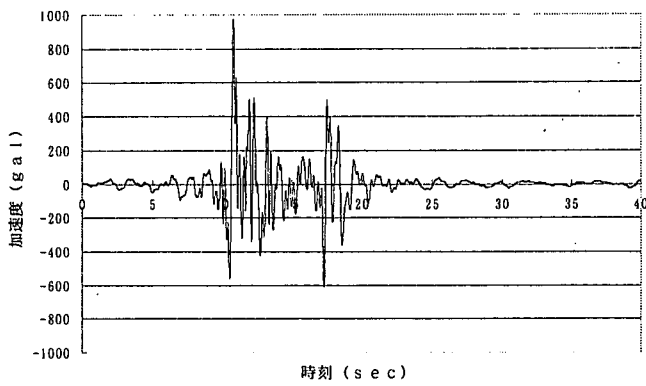


図-6 CFTの荷重変位曲線

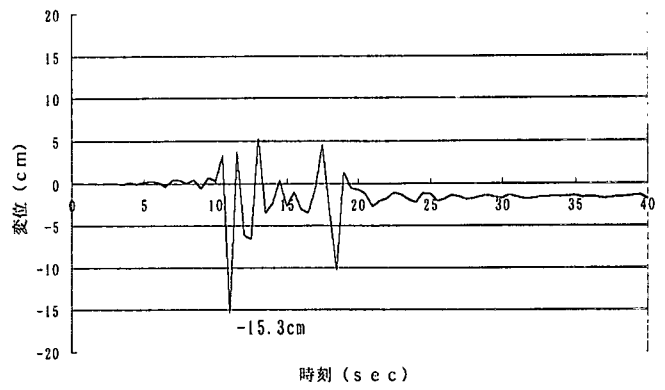
によるラーメン高架橋の上部構造部分と基礎構造部分を一体とした時刻歴応答解析について示す<sup>3), 4)</sup>。なお、減衰定数は、逸散減衰と内部減衰を含め10%とした。上部構造物の各部材の復元力特性は、テトラリニアの骨格曲線を有する剛性低下型モデルとした<sup>1), 5), 6)</sup>。図-6はCFT柱の復元力特性を示す。

入力地震動は、当該地区近傍に確実度の高い活断層は確認されていないが、L2地震動のスペクトルⅡ(内陸直下地震動想定)を用いることとする。

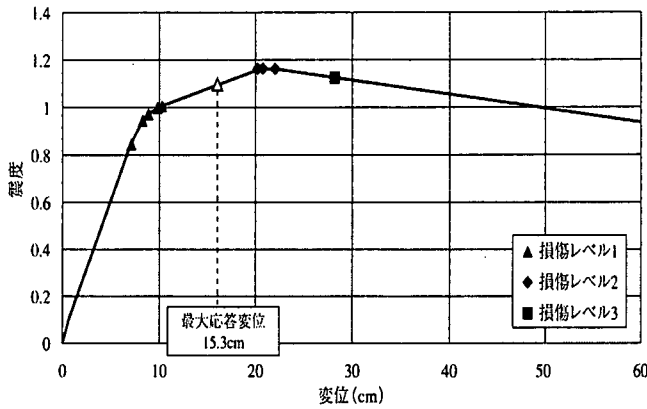
図-7は、杭部材の節点に作用させたG3地盤の地表



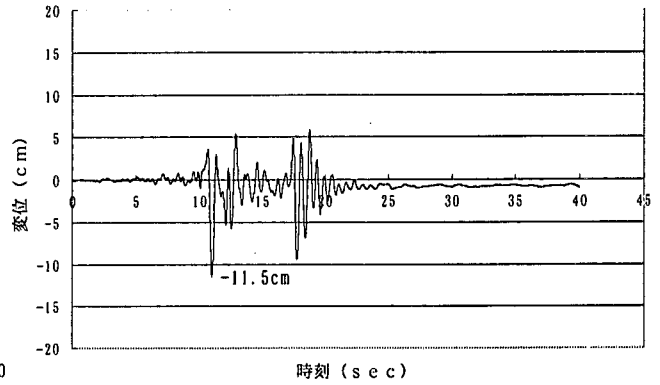
図一七 地表面地震波形 (G3地盤)



(1) 線路方向

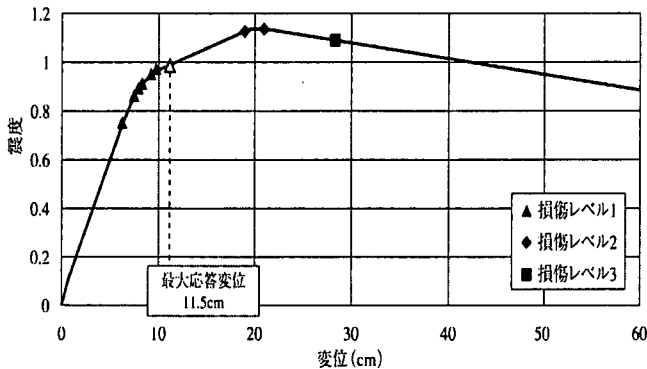


(1) 線路方向



(2) 線路直角方向

図一八 時刻歴応答変位波形



(2) 線路直角方向

図一九 荷重(震度)一変位(高架橋天端)関係

面地震波形(加速度波形)を示す。上部構造物と基礎構造物の一体モデルへの入力地震動は、予め地盤の応答解析を行い基礎構造物の節点ごとに地震波形を算定し、これを各節点に作用させるのが原則である。しかし、設計実務を考慮すると極めて煩雑にすぎることから、ここでは、各節点に作用させる地震波形は、耐震標準に示されている地盤種別に応じた地表面地震波形(G3地盤)で代表させることとした。

図一八は、高架橋天端位置での時刻歴応答変位波形を示す。最大応答変位は、線路方向で15.3cm、線路直角方向で11.5cmであり、図一七に示すように最初に大きな地震波が現れる11秒付近で発生している。

図一九は、コンクリート充填鋼管柱部材の各損傷レベルに対応した限界変位および図一八から読みとれる高架

橋天端位置での最大応答変位(線路方向:15.3cm、線路直角方向:11.5cm)を、静的線形解析から求められた構造物全体系の荷重(震度)・変位(高架橋天端位置の水平変位)関係の中に示したものである。線路方向、線路直角方向ともに、すべての柱部材は損傷レベル2の範囲に収まっている。また、同様な検討方法により、上層梁、地中梁、杭の各部材については、すべて損傷レベル1の範囲にあることが確認された。その結果、構造物系の耐震性能は、設定した耐震性能Ⅱを満足している<sup>7), 8)</sup>。

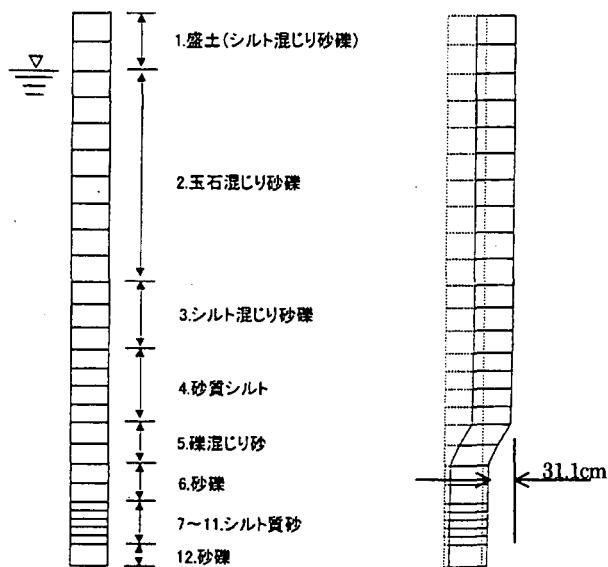
#### 4. 有効応力解析

有効応力解析は、過剰間隙水圧の上昇に伴い、有効応力の変化に応じて土の応力ひずみ関係を時々刻々と変化させる解析手法である。これにより、液状化現象に伴う過剰間隙水圧の蓄積による地震波の加速度の低減と変位の増加傾向や、透水や圧密の考慮による土粒子と水の相互作用の過剰間隙水圧の消散と地盤の沈下量の把握および砂地盤特有のサイクリックモビリティも表現できるものであり、表層地盤の動的特性を実状に即した精度の良い評価が可能なるものである。

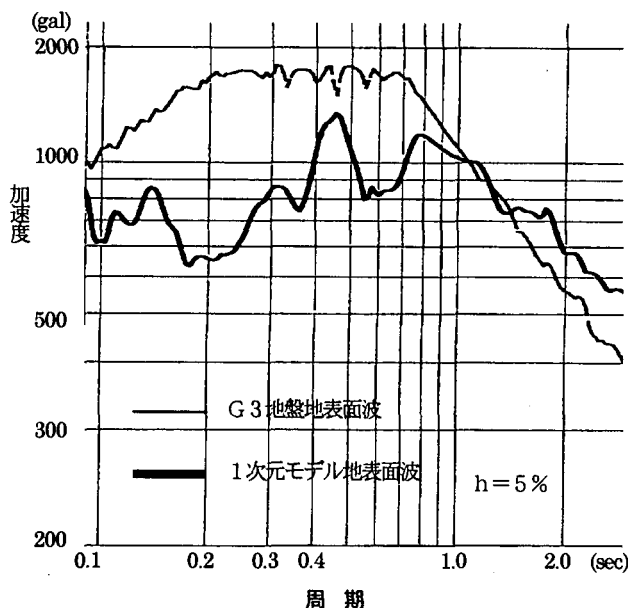
また、本解析の構成則のタイプは「履歴関数+体積ひずみモデル」、ひずみ依存性の関係は「修正R-Oモデル」、ダイレイタンス特性は「おわんモデル」を用いる。な

表一4 1次元モデルの地質データ

| 土層区分           | 下端深度 (m) | 層厚 (m) | N値 | 単位体積重量 (tf/m <sup>3</sup> ) | Vs(m/s) | 解析の種類 |
|----------------|----------|--------|----|-----------------------------|---------|-------|
| 1.盛土(シルト混じり砂礫) | -1.50    | 1.50   | 2  | 1.80                        | 100.79  | 全応力   |
| 2.玉石混じり砂礫      | -7.00    | 5.50   | 45 | 1.90                        | 284.55  | 全応力   |
| 3.シルト混じり砂礫     | -8.80    | 1.80   | 17 | 1.90                        | 205.70  | 全応力   |
| 4.砂質シルト        | -10.70   | 1.90   | 9  | 1.80                        | 208.01  | 有効応力  |
| 5.れき混り砂        | -11.80   | 1.10   | 17 | 1.80                        | 205.70  | 有効応力  |
| 6.砂礫           | -12.80   | 1.00   | 48 | 1.80                        | 290.74  | 全応力   |
| 7.シルト質砂        | -13.02   | 0.22   | 38 | 1.80                        | 268.96  | 有効応力  |
| 8.シルト質砂        | -13.24   | 0.22   | 28 | 1.80                        | 242.93  | 有効応力  |
| 9.シルト質砂        | -13.46   | 0.22   | 18 | 1.80                        | 209.66  | 有効応力  |
| 10.シルト質砂       | -13.68   | 0.22   | 29 | 1.80                        | 245.79  | 有効応力  |
| 11.シルト質砂       | -13.90   | 0.22   | 39 | 1.80                        | 271.30  | 有効応力  |
| 12.砂礫          | -14.50   | 1.48   | 50 | 1.80                        | 294.72  | 全応力   |



図一10 1次元有効応力解析モデル



図一11 1次元モデル結果の応答スペクトル

お、構造物・地盤・液体連成地震応答解析システムとしては、「DINAS」を使用した。

## 5. 地盤1次元モデルの有効応力解析

### (1) 解析モデル

当該地盤の地表面での地震動の最大加速度、最大せん断ひずみ等の把握のため、代表的な地質データ(表一4)を用いて、1次元有効応力解析を行った。図一10に解析モデルと最大変位分布を示す。各地層の非線形パラメータであるひずみ依存曲線等の算定は地質データおよび各々の地層の標準的な値を参考にし設定した。減衰の評価には、レーリー減衰を用い、固有値解析の結果より周波数と減衰の関係を設定した。また、境界条件として、側面は鉛直方向固定、底面は粘性境界と設定した。

### (2) 解析結果

工学的基盤面とした硬い砂礫(N値50以上)と地表面の中間部に砂質土層が位置するため、この砂質土層の完全液状化により砂質土層でせん断が卓越した変位分布を示した。地表面の最大相対変位は約30cm(参考値)となった。入力地震動(最大加速度750gal)に対して、中間部の砂質土層は完全液状化により最大加速度428galに低減し、地表面の最大加速度は524galとなった。この現象は兵庫県南部地震におけるポートアイランドの観測記録が示すように地盤の液状化により水平加速度が低減するという事実と同様な傾向と考える。

また、礫混じり砂質土層およびシルト質砂質土層で過剰間隙水圧比が0.95以上となり、過剰間隙水圧比時刻歴に着目すると、せん断ひずみの小さい地層では約10秒~20秒で過剰間隙水圧比が緩やかに増加し液状化しているのに対して、せん断ひずみが大きい砂質土層では約10秒~12秒で急激な過剰間隙水圧比の増加により完全液状化した結果となった。

地表面波と入力波のフーリエスペクトルの比較は、中間部の砂質土層の液状化による加速度の長周期化が確認でき、図一11に示す地表面波と入力波と加速度応答スペクトル(h=0.05)の比較は、地表面波では中間部の砂質土層の液状化により0.05秒~1.0秒の短周期側で低減し、1.0秒~5.0秒の長周期側では逆に増幅している。

また、地中での最大せん断ひずみは約0.28となった。大きい理由としては、主に①基盤深度が14.5mと浅い、



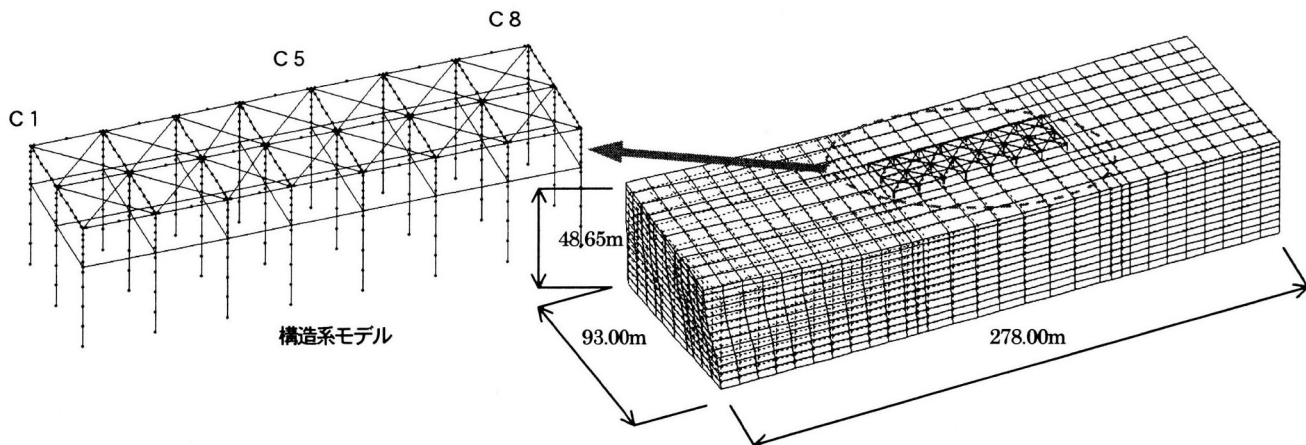


図-13 3次元地盤-構造系一体解析モデル

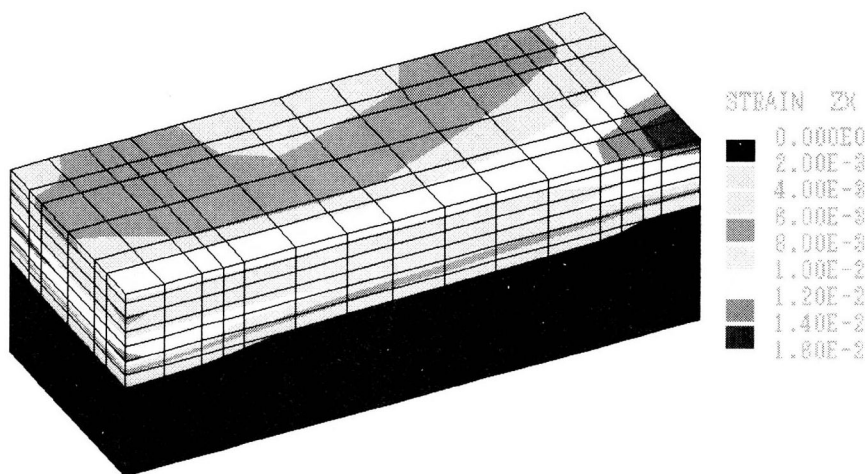


図-14 3次元一体モデルせん断ひずみコンタ

る粘性境界とした。また、入力地震波の入力方向はLG方向、TR方向の双方から入力し、2方向入力を行わないものとした。

## (2) 解析結果

今回の解析結果を示した領域は、境界条件等の影響を考慮して、上部構造物が設置される周辺部（上部構造物端部からLG・TR方向共に杭径の10倍以上）の地盤のみを考慮した。

### a) LG（線路）方向の解析結果

最大変位および最大加速度は地表面に生じており、加速度は、モデル底面から徐々に増大し地表面で最大となっている。地表面での最大加速度は800gal～1100galの間で、特に地表面が盛土層の箇所では大きい加速度が生じた。

構造物周辺部の砂質土層では、完全液状化しないために加速度が低減せず、構造物の杭部地表面での最大加速度は約890Galで、構造物周辺部の地表面の最大加速度

は約1030Galとなった。また、風化岩層の加速度増幅率に比べ、砂礫層および砂質土層の加速度増幅率が大きくなっている。

最大せん断ひずみは、風化岩層より上の層で多少大きいひずみが見られ、最大約1.6%であり、風化岩のひずみは0.2%以下であった。

上部構造物近傍の地表面の砂質土層では最大過剰間隙水圧比が95%以下であり、完全液状化

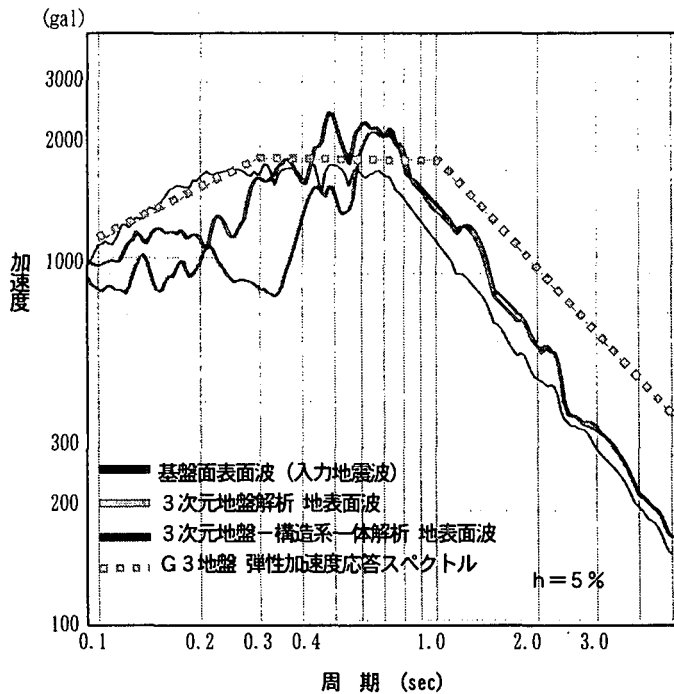
しなかった。卓越した加速度の発生時刻に着目すると、入力地震波に比べ時間の遅れが生じており、地表面の最大加速度は800Gal以上であるが、モデル底面の最大加速度は粘性境界のため約350galと小さい。最大変位は、地表面で約19cm～25cm、モデル底面で約15cmであった。

### b) TR（線路直角）方向の解析結果

LG方向の解析結果と同様な傾向にあるが、加速度は、モデル底面から徐々に増加し地表面で800gal～1100galとなっており、上部構造物近傍の地表面での加速度はLG方向解析結果のものに比べて1000gal～1100galの領域が増えている。

構造物の杭部地表面での最大加速度1014gal、構造物周辺部の地表面の最大加速度は約1050galとなった。

最大せん断ひずみは、地表面の砂質土に大きいひずみが見られ、最大約6.5%であった。風化岩のひずみは0.5%以下であった。



図一15 応答加速度スペクトルによる比較

最大過剰間隙水圧比はLG方向の解析結果と大きく異なり、地表面の砂質土層で過剰間隙水圧比が95%以上となり完全液状化した。しかし、2層目の砂質土層は液状化しなかった。最大変位は、地表面で約20cm~28cm、モデル底面で約13~14cmであった。

## 7. 3次元地盤-構造一体モデルの有効応力解析

### (1) 解析モデル

3次元地盤-構造系（上部+下部+基礎構造）の一体モデルは、図一13、14に示すように、基本的には、3章の2次元構造系モデルの3次元化と6章の地盤モデルの複合モデルである。相違な点は、構造系モデルでは部材の復元力特性を剛性低下型テトラリニア型としているのに対して、最大曲げモーメントの90%としたトリリニア型を用いている。また、構造系モデルの解析結果を反映させ、上層スラブは剛なプレートとしてモデル化した。

### (2) 解析結果

地盤の最大変位および最大加速度は地表面に、構造物の最大変位は上層梁に生じている。地表面での最大加速度は約700Gal~900galの間であるが、C3およびC7中央柱部地表面において1300galの加速度が生じている。しかし、この柱部材の加速度はサイクリックモビリティ等の数値解析上のノイズによるものと推測され、このノイズを除けば実質約900galと考えられ、構造物の応答には影響を及ぼさない。また、構造物周辺部の砂質土層

では、半液状化するために加速度が少々低減し、構造物周辺部の地表面の加速度は約700gal~900galとなった。

3次元地盤解析と同様に、風化岩層の加速度増幅率に比べ、砂礫層及び砂質土層の加速度増幅率が大きくなっており、地表付近では3次元地盤モデルに比べ地盤-構造物一体系モデルによる加速度が少し低減して傾向にある。

最大せん断ひずみは、風化岩層より上の層で1.0%以上のせん断ひずみが生じ、地表面の完全液状化した砂質土層では最大約2.4%となった。

3次元地盤モデルは液状化していないが一体系モデルでは構造物近傍の地表面の砂質土層において完全液状化（最大過剰間隙水圧比95%以上）している。

最大変位は、地表面で約20cm、モデル底面で約14cmであった。

図一15は弾性加速度応答スペクトルの比較を示す。3次元地盤解析の地表面の加速度応答スペクトルは、周期約0.5sec付近で最大約2300galとなっている。一方、3次元地盤-構造物一体系解析の地表面加速度応答スペクトルは、周期約0.7sec付近で最大約2200galとなっている。3次元地盤解析のものに比べ、3次元地盤-構造物一体系解析では短周期側で低減し、周期0.7sec以上では、ほぼ同じ大きさとなっている。入力地震動と比較すると、長周期側の加速度応答スペクトルが増加した理由としては、地表面の砂質土層で過剰間隙水圧の上昇に伴う地盤の軟化によるものが考えられる。

また、構造物の応答値は、C1、C5、C8ラーメン列において、応答加速度は上部構造物（上層梁、CFT柱）で800gal~900gal、下部・基礎構造物（地中梁、杭）で570gal~800galであった。最大変位は、上部構造物で約20cm、杭中間部で約18cm、杭先端部で約15cmである。

C8ラーメン列の天端と地中梁の最大相対変位は、5.036cm(T=10.02sec)、地中梁と杭下端の最大相対変位は13.966cm(T=3.26sec)、天端と杭下端の最大相対変位は17.502cm(T=3.72sec)である。各相対変位は同位相となっており、上部構造物の相対変位は下部構造物の相対変位より小さい。なお、C1、C5、C8ラーメン列ともに軸力の変動は小さいが、曲げモーメントの変動は大きくC1、C8で降伏点に達しており、最大変位は、構造物の許容範囲内であるが、左右中央部共にCFT柱上端で損傷レベル2限界モーメントより大きく、下端では損傷レベル2限界モーメントより小さい。

杭の曲げモーメントは、左右中間部共に上部、中間部、下部の順に小さくなっている。

3次元地盤有効応力解析と3次元地盤-構造物一体系有効応力解析の比較をすると、まず地表面の最大変位はほぼ同等であったが、地表面の最大加速度は一体系解析の方が小さくなった。また、地表面の弾性加速度応答スペクトルは、一体系解析が地盤解析に比べ短周期で小さくなった。

## 8. まとめ

今回、新しく設定された鉄道構造物の耐震照査用の設計地震動による解析事例を示した。構造物の性能評価としては、2次元構造系モデルの非線形動的解析を行うとともに、当該表層地盤の影響の評価において、1次元有効応力解析、不整形地盤・液状化の影響を考慮した3次元地盤有効応力解析、更に3次元地盤-構造系一体モデルの有効応力解析を行った。各々の解析結果は、解析モデルの違いなどにより応答値が変わるものの、構造物の耐震性能は満足する結果となった。しかし、経済性を追求し、耐震上の余裕代の少ない設計を行っていれば、解析結果として耐震性能を満たさない破壊に至る部材が存在する可能性が大きいと考える。

今後として、より簡易な手法での高精度な解析技術の開発に努めたいと考え、以下、本結果から考察する応答解析における留意点などを示し終えたい。

- ① 1次元モデルによる地盤有効応力解析は、地表面での最大加速度、最大せん断ひずみ等の把握には効果的であるが、液状化現象に伴う地震加速度の過度な低減や実挙動に即しない応答変位値となる危険性がある。
- ② 解析モデルの違いにより、大きく応答値が異なることや、同じモデルでも入力地震動の方向による応答値の相違により異なるケースも存在する。
- ③ 解析モデルが複雑になると、異常な応答値の原因が考察しにくくなり、多くの解析事例が出そうまでは、感度解析や事前の簡易モデルでの応答値の算定作業などが、結果の信憑性を含めて重要と考える。
- ④ 解析精度の高いモデル化のため、厳密な地盤地質調査の実施が必要とされる。特に表層地盤の影響が懸念される地点は、軽視されがちな地質調査の重要性が高まると考える。
- ⑤ 複雑なモデル化による解析は、入力地震動自体の周波数特性も結果に大きな影響を与える要因である。

- ⑥ 地震動の水平2方向（x-y方向）の同時入力、鉛直地震動の影響も考慮する必要がある。

謝辞：本稿をまとめるにあたり、CRC総合研究所 建設技術部長 亀岡裕行をはじめ多くの方々に多大な有益な御指導・御援助を頂いた。ここに深く感謝の意を表す次第です。

## 参考文献

- 1) 運輸省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，1999.10.
- 2) 西村昭彦：耐震設計標準の概要－新しい耐震設計の考え方－，鉄道総研報告，第13巻，第2号，pp.1-6，1999.2.
- 3) 西村昭彦，室野剛隆：所要降伏震度スペクトルによる応答値の算定，鉄道総研報告，第13巻，第2号，pp.47-50，1999.2.
- 4) 岩田秀治，村田清満，山田正人，石井弘一：鉄道構造物へのコンクリート充填円形鋼管柱の適用，鋼構造年次論文報告集，第7巻，pp.241-248，1999.11.
- 5) 村田清満，安原真人，渡辺忠朋，木下雅敬：コンクリート充填円形鋼管柱の耐力と変形性能の評価，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1555-1564，1998.3.
- 6) 村田清満，山田正人，池田 学，瀧口将志，渡邊忠朋，木下雅敬：コンクリート充填円形鋼管柱の変形性能の再評価，土木学会論文集，第640号/1-50，pp.149-163，2000.1.
- 7) 村田清満：複合構造の鉄道ラーメン高架橋の耐震照査法，土木学会 地震工学委員会 地震時保有耐力法に基づく耐震設計法の開発に関する研究小委員会，第3回橋梁構造等の耐震設計法に関する講習会論文集 第3章，pp.45-73，2000.10.
- 8) 近藤雅弘，室野剛隆，西村昭彦：L2地震時設計に用いる杭基礎-地盤系の復元力特性に関する検討，日本地震工学シンポジウム，pp.21-28，1998.11.
- 9) 松尾聡一郎，吉澤努，川神雅秀：不整形地盤におけるコンクリートラーメン橋の非線形地震応答解析，構造工学論文集，Vol.45A，pp.839-848，1999.3