

地中構造物の損傷に影響する地震動の周波数成分 DOMINANT FREQUENCY COMPONENT OF SEISMIC WAVE FOR THE DAMEGE OF UNDERGROUND STRUCTURE

酒井久和¹, 野津厚²

¹独立行政法人 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター, 工博
Hisakazu Sakai, Earthquake Disaster Mitigation Research Center (EDM), NIED, sakai@edm.bosai.go.jp

²独立行政法人 港湾空港技術研究所, 工修
Atsushi Nozu, Port and Airport Research Institute, nozu@pari.go.jp

SUMMARY

Two dimensional non-linear FEM analysis and several one dimensional equivalent analyses are performed to investigate the dominant frequency components of a seismic wave for the damage of underground structures. The results show the following. The seismic performance of underground structures is dominated by the relative displacement between the upper and the lower slab. The relative displacement is strongly influenced by the frequency components of an input motion lower than 2Hz. The effect of frequency components higher than 3Hz on the relative displacement is almost negligible.

キーワード: 地中構造物, 地震動, 周波数成分, 損傷率, 地震応答解析

Key words : underground structure, seismic wave, frequency component, damage factor, earthquake response analysis

1 はじめに

設計用地震動を作成するにあたり,地震動のどの周波数帯域が構造物に被害を及ぼすかを検討することは,精度を重点的に向上すべき周波数帯を特定する意味において,非常に重要であると考えられる.野津ら^{1),2)}は,岸壁の変形量に対する地震動の周波数帯域の研究を行い,1~2Hz以下の低周波数成分が岸壁の変形に寄与する割合が大きいことを示している.嶋村ら^{3),4)}は,擁壁や盛土の変形量に1~3Hzの地震動成分が大きく影響を及ぼすことを明らかにしている.立石ら⁵⁾は,有効応力解析に基づいて,ケーソン岸壁の残留変形量が地震動の3Hz以下の周波数成分に左右されることを示している.

地中構造物の地震時の応答は,周辺地盤の影響を受けることから,他の陸上構造物の場合と影響を受ける周波数成分が異なることが考えられる.そこで,本研究では,地中構造物を対象として,その損傷に影響を及ぼす地震動の周波数成分について検討する.まず,2次元FEMによる地震応答解析を,神戸高速鉄道大開駅駅舎部の横断面を対象にして行い,構造物の損傷程度と入力地震動の周波数成分との関係性を調べる.つぎに,それぞれ数種類の地盤パラメータおよび地震波を採用して,自由地盤部のみでの1次元地

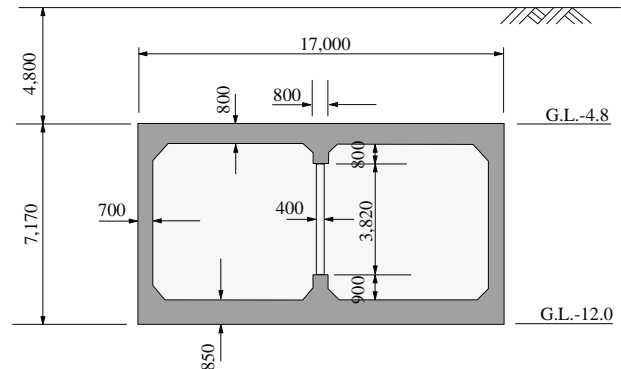


Fig.1 Cross section of structure.
(Platform floor of Daikai station)

盤応答解析を行い,構造物周辺地盤の相対変形と地震動の周波数成分との関係性を検討する.

2 地盤 - 構造物系の地震応答解析

本章では,まず,地震時の地中構造物の損傷に寄与する地震動の周波数成分を検討するために,2次元非線形FEMによる地震応答解析を行う.解析の対象は,兵庫県南部地震の際に甚大な被害を受けた神戸高速鉄道大開駅駅舎部

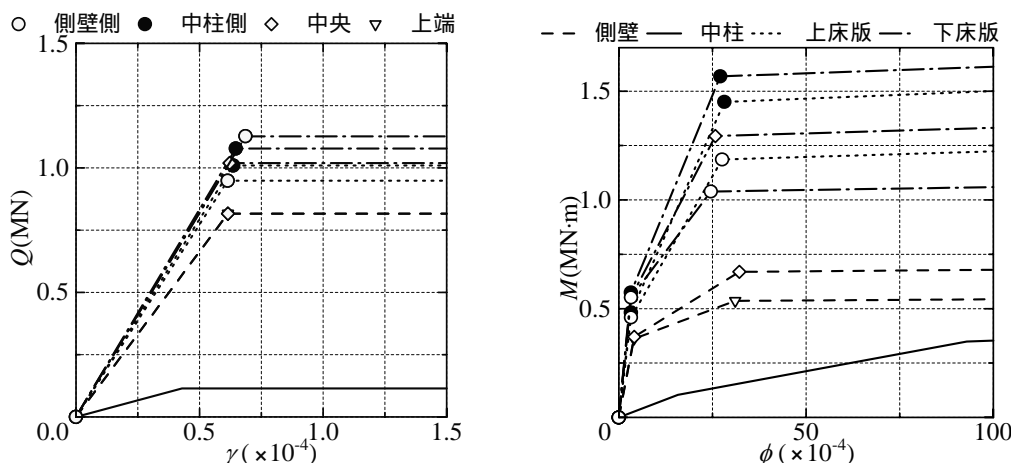


Fig.2 Used non-linearity model of structure.

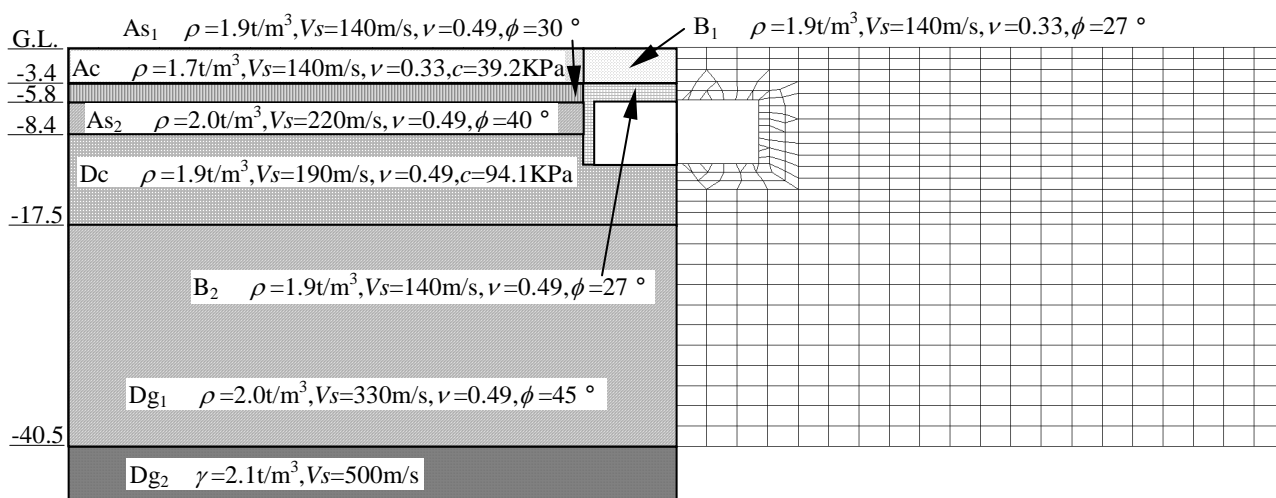


Fig.3 Finite element model.

の横断面 (Fig.1 参照) とする。

2.1 解析条件

解析は、躯体の構造部材を梁要素、地盤を 2 次元平面ひずみ要素でモデル化して、解析コード STADAS[®]を使用する。梁要素の復元力特性は、 $Q - \gamma$ (せん断力 - せん断ひずみ) 関係として弾性 - 完全塑性モデル、 $M - \phi$ (曲げモーメント - 曲率) 関係として武田モデルを採用する。設定した部材の $Q - \gamma, M - \phi$ 関係を Fig.2 に示す。ただし、躯体は部材端の剛域を考慮し、地震時の軸力の変動による耐力の変化は考慮していない。

地盤は、吉田・石原モデル⁷⁾を採用し、 $G - \gamma$ (せん断剛性 - せん断ひずみ) 関係、 $h - \gamma$ (減衰定数 - せん断ひずみ) 関係は、土質の分類に応じて建設省土木研究所の式⁸⁾より求めた。解析に用いる土質条件および解析メッシュを Fig.3 に示す。ただし、図中の ρ, V_s, ν, c, ϕ はそれぞれ、土の単位質量、せん断波速度、ポアソン比、粘着力、内部摩擦角を表し、 c, ϕ の記載がない場合には、その成分が 0 であることを意味する。

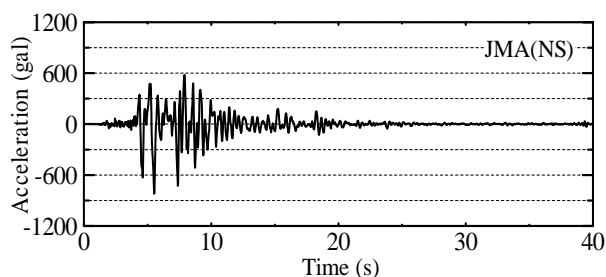


Fig.4 Acceleration waveform at Kobe JMA (NS).

入射波は、構造物の損傷に影響する周波数帯を調べるために、0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0Hz の 8 種類のローパスフィルターを神戸海洋気象台の NS 成分に施した波を採用する。フィルター通過前のオリジナルの波形を Fig.4 に、そのフーリエスペクトルを Fig.5 に示す。

非線形系の地震応答解析を行う際には、地盤および構造部材の初期応力状態が必要となるが、この初期応力は、開削トンネルの施工過程を考慮した段階載荷による自重解析⁹⁾により求める。

地震応答解析は、底面と側方は粘性境界とし、時間積分

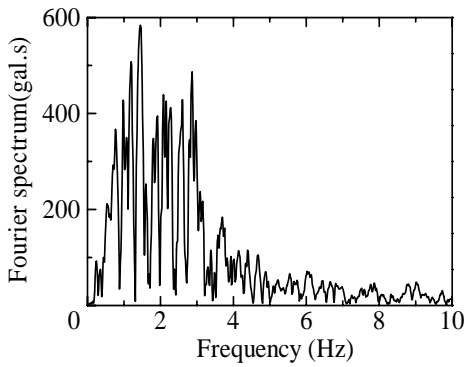


Fig.5 Fourier spectrum of Kobe JMA NS wave.

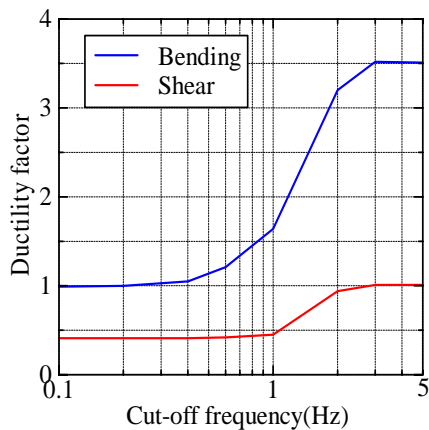


Fig.6 Relationship between cut-off frequency and ductility factor.

は Newmark の β 法 ($\beta=1/4$) , 計算時間間隔 1/1,000 秒 , 継続時間 30 秒間とする . また , 地盤と構造物の減衰は , 系の基本振動数 (約 1.5Hz) と 10Hz で減数定数 2% の Rayleigh 減衰とした .

2.2 解析結果

前節の地震応答解析の結果として , 構造部材側壁 , 上床版 , 底版 , 中柱のうち , 最も損傷程度の大きな部材のせん断および曲げの塑性率とローパスフィルターのカットオフ周波数の関係を Fig.6 に示す . ただし , せん断 , 曲げの塑性率は以下のように定義する .

せん断塑性率 μ_Q :

$$\mu_Q = Q / Q_u$$

曲げ塑性率 μ_M :

$$\begin{aligned} \mu_M &= M / M_c && (M < M_c) \\ \mu_M &= 1 + (M - M_c) / (M_y - M_c) && (M_c \leq M < M_y) \\ \mu_M &= 2 + (M - M_y) / (M_u - M_y) && (M_y \leq M < M_u) \\ \mu_M &= 2 + M / M_u && (M_u \leq M) \end{aligned}$$

ここに , Q_u は終局せん断耐力 , M_c , M_y , M_u はそれぞれ , ひび割れ時 , 降伏時 , 終局時の曲げモーメントを表す .

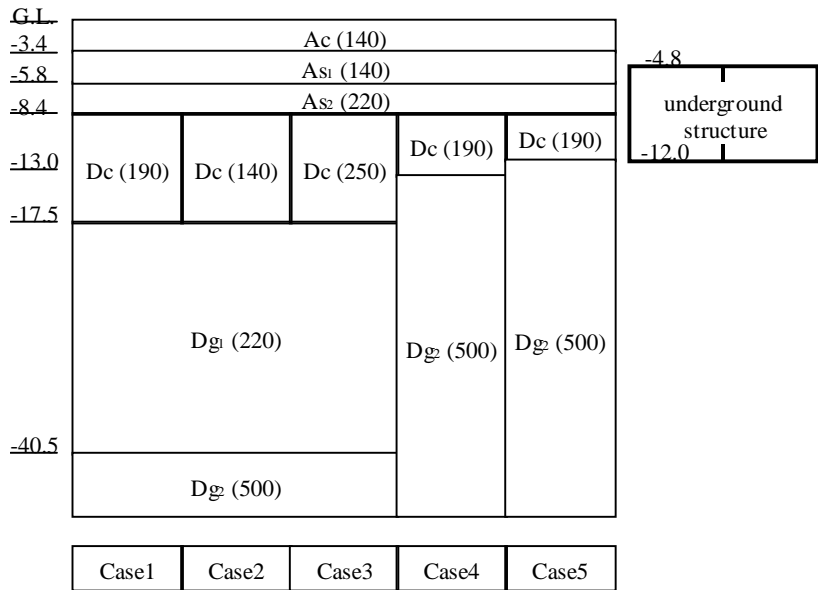


Fig.7 Analytical model for one dimensional earthquake response analysis.

Fig.6 より , 曲げに関しては , カットオフ周波数が高周波数側で 3Hz 以上 , 低周波数側では 0.4Hz 以下で塑性率がほぼ横ばいになっており , せん断に関しては , 高周波数側で 2Hz 以上 , 低周波数側では 1Hz 以下で塑性率がほぼ同程度の値を示している . したがって , 本検討断面に対しては , 神戸海洋気象台 NS 波の 0.4 ~ 3Hz の成分が , 構造物の損傷に大きな影響を与えていると考えられる .

3 地盤の 1 次元地震応答解析

前章では , 大開駅の駅舎部に神戸海洋気象台 NS 波を照射した場合について , 構造物の損傷と入力地震動のカットオフ周波数との関係を調べた . 地中構造物の地震時の挙動に関しては , 既往の研究より明らかになっている¹⁰⁾ . 地震時に固有の振動を起こすことはなく , 周辺地盤に追従して振動する . 地中構造物の変形は , 周辺地盤の相対変位またはひずみにより支配される . , の研究成果に基づいて , 本章では , 構造物を含まない水平成層地盤の地震動に着目し , 地中構造物の上床版 , 底版間の相対変形量 (以後 , 層間変形量と呼ぶ) から , 構造物に影響する地震動の周波数成分について検討を加える .

3.1 解析条件

地盤の地震応答は , 解析コード SHAKE¹¹⁾ を用いた 1 次元解析により求める . 解析モデルは , 前章の解析と同じ地盤構成のものを基本ケースとし , 基本ケースから , 構造物の損傷に影響する構造物深度付近の初期せん断剛性を変えた 2 ケース , 地震動の高周波数成分の影響を検討するため , 基盤層を浅くして系の固有周期を短くした 1 ケース , 構造物深度までの地盤の軟化による影響を防ぐために , 基盤層を構造物底版深度に一致させた 1 ケース , 以上 5 ケー

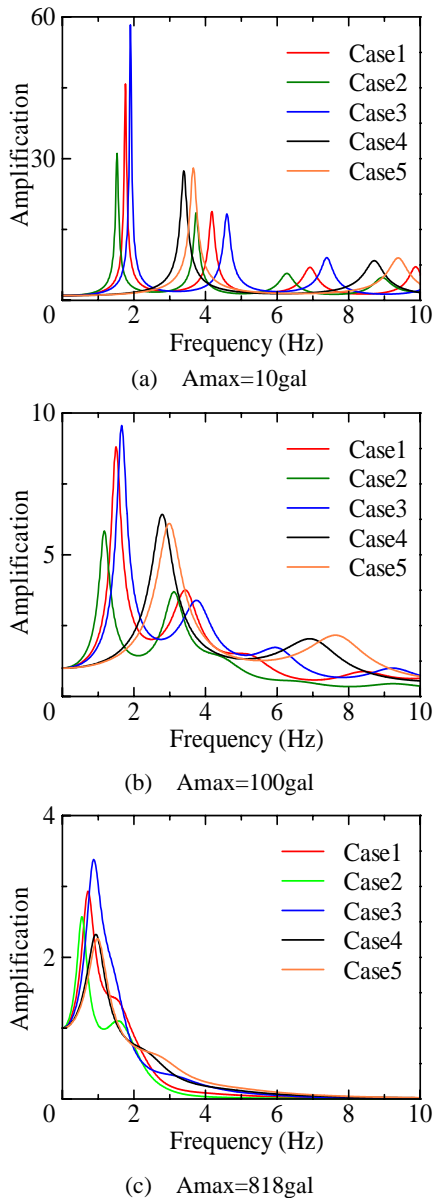


Fig.8 Amplification of Fourier spectral amplitude from the basement to the ground surface.

スとする。Fig.7 に各ケースの概要を示す。ただし、地盤の単位体積質量は各層とも Fig.3 と同じ値，土の $G - \gamma, h - \gamma$ 関係も，土質の分類に応じて建設省土木研究所の式⁸⁾より求め，前章と同じ解析条件とした。また，図中の()内の値は初期せん断波速度(m/s)を表す。参考のため，系の固有振動数を調べる目的で，神戸海洋気象台のNS波を最大振幅 10gal, 100gal に調整した波，および，観測波の振幅の異なる 3 波を入射波として，各々のケースに対して解析を行った。Fig.8 に地表面の加速度の応答倍率を示す。

Fig.8 より，最大振幅が 10gal と加速度レベルが小さいときには，応答倍率の卓越周波数が Case1~3 では，1 次が 2Hz, 2 次が 4Hz 付近，Case4, 5 では 1 次モードでおおよそ 4Hz となっている。最大振幅が 100gal の場合には，最大振幅 10gal の場合に 4Hz 付近であった卓越周波数は，いずれのケースも 3Hz~4Hz に低下し，元波形の場合には，

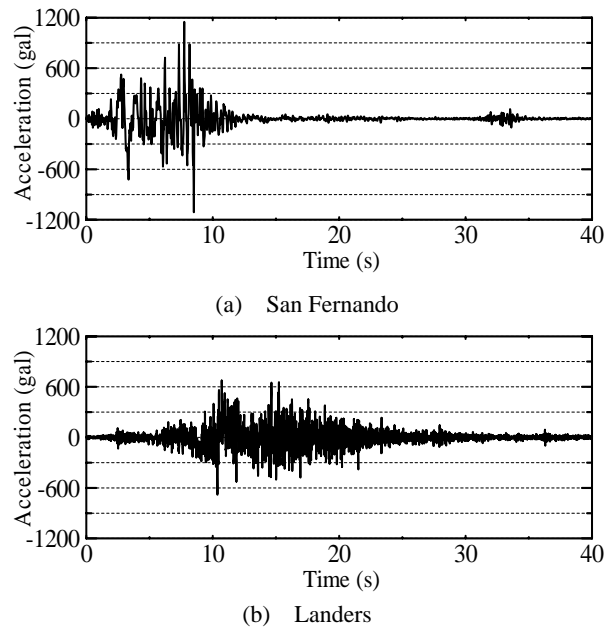


Fig.9 Acceleration waveform

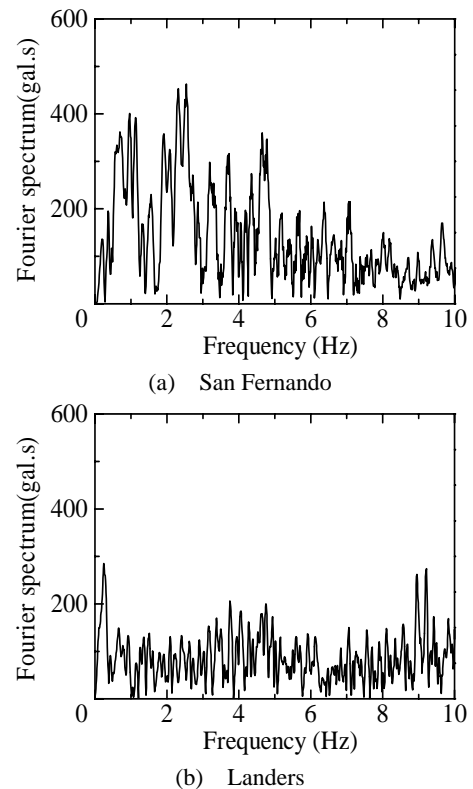
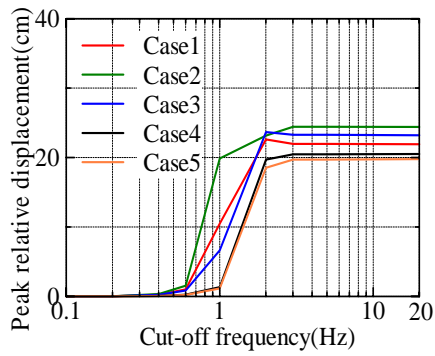


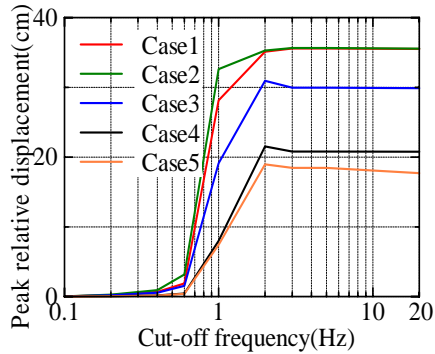
Fig.10 Fourier spectra of original seismic waves.

ほぼ 1Hz 付近にしか卓越周波数が現れず，高周波数側の振動モードの応答倍率は著しく小さくなるのが分かる。

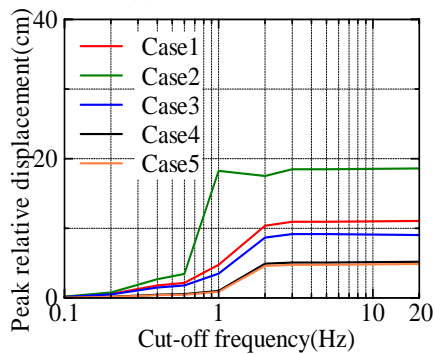
また，地震波は，異なる周波数特性をもつ強震動の波として，1971 年 San Fernando 地震の Pacoima Dam の記録，1992 年 Landers 地震の Lucern の記録の断層直交成分を採用し，解析には，前章と同様に，0.1~5Hz 間の 8 つのカットオフ周波数でローパスフィルターを通過した波を入射させる。Fig.9, Fig.10 にそれぞれの観測波形とそのフーリエスペクトルを示す。



(a) JMA

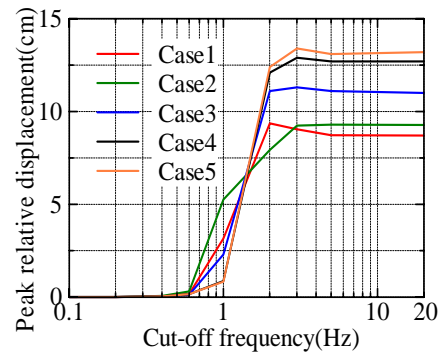


(b) San Fernando

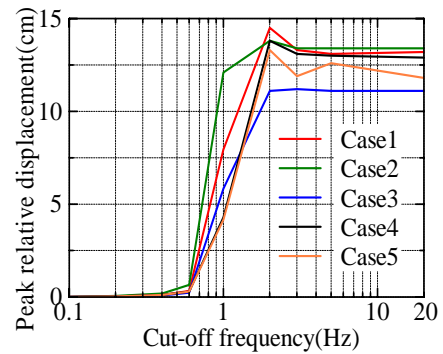


(c) Landers

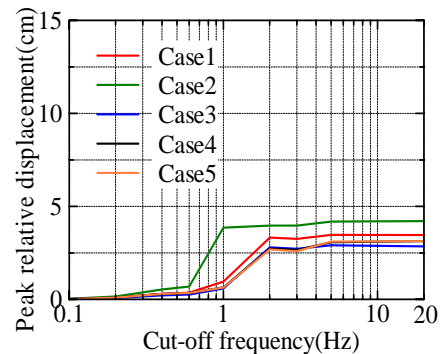
Fig.11 Relationship between cut-off frequency and peak displacement at the ground surface relative to the basement.



(a) JMA



(b) San Fernando



(c) Landers

Fig.12 Relationship between cut-off frequency and peak displacement at the upper slab relative to the lower slab.

3.2 解析結果

各解析ケースについて、地震応答解析を行った結果として、地表面の最大相対変位および最大層間変形量とローパスフィルターのカットオフ周波数との関係をそれぞれ、Fig.11, Fig.12 に示す。

本節ではまず、前章の2次元FEM解析の結果と地盤の1次元応答解析結果に基づいて、構造物の損傷程度と層間変形量との関係について検討する。Fig.6 および Fig.12(a)のCase1より、塑性率および層間変形量の変化は、いずれも、カットオフ周波数が0.4Hz以下で小さく、1~2Hz間で大きくなっており、両者は同様の傾向を示している。2Hz以上では、塑性率の値が、曲げ、せん断とも2Hzより大きいが、その値は、いずれも2Hzの1割未満の増加に

止まっている。一方、層間変形量は、3Hzの方が2Hzの場合より逆に少し小さく、両者の傾向は若干異なる。しかし、全体的には、おおむね、カットオフ周波数と、2次元FEMによる構造物の損傷程度、地盤のみの1次元解析による地盤の層間変形量とは、非常に類似した関係が見てとれる。

上述のように、構造物の損傷程度と1次元解析による地盤の層間変形量とは、地震動の周波数成分の寄与に関して同様の特性を示すことから、本節では、以降、地盤の層間変形量に対して、地震動の各周波数成分が与える影響を調べる。

Case1に比べて構造物付近の地盤が軟らかいCase2では、Fig.12より、カットオフ周波数0.6~1.0Hzの間に層間変形量が大きく変化し、特に、San FernandoとLandersの場合には、1Hzより大きな周波数成分が層間変形量にあまり寄与していないことが分かる。しかし、JMAの場合には、2

～3Hz の周波数成分が層間変形量に寄与する割合が他のケースに比べて大きく、傾向が San Fernando と Landers と異なっている。ここで、着目すべきは、地震動の周波数特性から見ると Fig.5 と Fig.10 から、Landers, San Fernando, JMA の順にフーリエスペクトルの高周波数側の割合が大きいかかわらず、その順に 1Hz 以下の低周波数成分が層間変形量に寄与する割合が大きくなっている点である。Case2 ほど顕著ではないが、Case4, 5 の JMA の場合に、2～3Hz の層間変形量への寄与度が他の 2 つの地震波のケースに比べて大きくなっており、地震動の高周波数成分の割合と、層間変形量への高周波成分の寄与度は、正の相関があるとは一概に言えない。次に、Case2 の地表面変位に着目すると、JMA の場合にカットオフ周波数 1Hz と 3Hz との関係では、層間変形量が 56%に達しているのに対して、Fig.11 より、地表面変位は 81%と 1Hz 以下の周波数の寄与の割合が大きい。同様の傾向は、San Fernando の Case1 の場合にも見られることから、地表面変位ではなく、層間変形量を指標として、地下構造物の損傷に寄与する地震動の周波数成分を検討する必要があると考える。

一方、Case2 とは逆に、構造物付近の地盤が硬質な Case3 では、系の固有周期が短いことから、層間変形量に対する入射波の高周波成分の影響が見込まれるが、Fig.12 より、San Fernando, Landers の場合には、各周波数の寄与度は Case1 とほぼ同程度となっている。また、いずれの地震波のケースでも、2Hz より大きな周波数成分は、層間変形量に対する寄与が小さいことが分かる。

基本ケース Case1 の基盤を浅くした Case4, 5 では、Fig.12 のカットオフ周波数 1～2Hz 付近の値より、JMA, San Fernando の場合に、層間変形量は、Case1 よりも高周波数成分の影響を大きく受けている。しかし、いずれの地震波のケースでも層間変形量への 2Hz より高周波側の振動成分の影響は小さくなっている。

以上、本解析ケースにおいては、いずれの場合も、地震動の 3Hz より大きな周波数成分は、ほとんど層間変形量に影響を及ぼさず、また、その変形量の大部分が 2Hz 以下の周波数成分に左右されることが明らかになった。

4 まとめ

本研究では、地中構造物の損傷に影響を及ぼす周波数成分を検討する目的で、神戸高速鉄道大開駅駅舎部の横断面を対象にして 2次元 FEM による地震応答解析を行った。また、地中構造物の変形は、周辺地盤の相対変位またはひずみにより支配されることから、追加解析として、振動特性の異なる地盤モデルに対して、3種類の強震動による 1次元の地盤震動解析を実施した。ここで、いずれの解析も、地震動にローパスフィルターを作用させた数種類の波を入射波とした。以下に成果を示す。

神戸海洋気象台の NS 波に対する大開駅駅舎部の構造モデルの損傷は、0.6～3Hz の周波数成分の影響を大き

く受けており、これは、地中構造物の上床版、底版間の層間変形に大きく寄与する周波数帯域とほぼ一致している。したがって、地中構造物の耐震性には、入射地震動のうち、層間変形に大きく影響を及ぼす周波数帯域が関与すると考えられる。

本検討ケースにおいては、構造物底版から工学基盤までの深度、構造物周辺地盤の硬軟に関わらず、構造物の上床版、底版間の層間変形は、地震動の 3Hz 以下の周波数成分が大きく影響し、特に、2Hz 以下の周波数成分は、層間変形量に寄与する割合が大きいことが分かった。

参考文献

- 1) 野津厚, 井合進, 一井康二: 岸壁の変形量と入力地震動タイプに関する一考察, 土構造物の耐震設計に用いるレベル 2 地震動を考えるシンポジウム発表論文集, pp.73-80, 1998.
- 2) 野津厚, 井合進, 一井康二, 沼田敦紀: ケーソン式岸壁の変形に寄与する地震動の振動数成分, レベル 2 地震に対する土構造物の耐震設計シンポジウムおよびテキスト, pp. 311-318, 2000.
- 3) 嶋村貞夫, 河西寛, 笹川基史, 福田尚晃: 抗土圧構造物の地震時変形に影響を及ぼす入力地震動の特性に関する一考察, 土構造物の耐震設計に用いるレベル 2 地震動を考えるシンポジウム発表論文集, pp.89-94, 1998.
- 4) 嶋村貞夫: 地盤特性が擁壁の地震時変形に及ぼす影響, レベル 2 地震に対する土構造物の耐震設計シンポジウムおよび講習会テキスト, pp.200-206, 2000.
- 5) 立石章, 佐藤忠信: LIQCA による護岸の被災変形量の有効応力解析, ケーソン式岸壁の変形に寄与する地震動の振動数成分, レベル 2 地震に対する土構造物の耐震設計シンポジウムおよび講習会テキスト, pp.223-245, 2000.
- 6) Yoshida, N.: STADAS, A computer program for static and dynamic analysis of ground and soil-structure interaction problems, Report, Soil Dynamics Group, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1993.
- 7) 吉田望, 辻野修一, 石原研而: 地盤の一次元非線形解析に用いる土のせん断応力 - ひずみ関係のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1397-1398, 1990.
- 8) 建設省土木研究所: 地盤地震時応答特性の数値解析法 - SHAKE:DESRA - , 土木研究所資料第 1778 号, 1982.
- 9) 酒井久和, 中村晋: 開削トンネルの耐震性評価における初期自重解析の影響, 第 26 回地震工学研究発表会, pp.753-756, 2001.
- 10) 立石章: 地中構造物横断方向の静的耐震計算法に関する研究, 京都大学学位論文, 2002.
- 11) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, *EERC Report*, Vol.72, No.12, University of California, Berkeley, 1972.