

盛土構造物の残留変形に影響を及ぼす 地震動の周波数帯域に関する基礎的検討

秦 吉弥¹・野津 厚²・一井康二³・酒井久和⁴

¹正会員 日本工営株式会社 中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)

E-mail: hata-ys@n-koei.jp

²正会員 (独)港湾空港技術研究所 地震動研究チーム (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: nozu@pari.go.jp

³正会員 広島大学大学院 工学研究院 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

E-mail: ichiikoji@hiroshima-u.ac.jp

⁴正会員 広島工業大学 工学部建築工学科 (〒731-5193 広島県広島市佐伯区三宅2-1-1)

E-mail: h-sakai@cc.it-hiroshima.ac.jp

盛土構造物の性能照査や被災再現などのために入力地震動を設定するにあたっては、地震動のどの周波数帯域が盛土の被害に大きな影響を及ぼすかを検討しておくことは、非常に重要である。そこで本研究では、2次元逐次非線形FEMによる地震応答解析を、釧路空港の高盛土の横断面を対象に実施し、盛土斜面における残留変形量と入力地震動の周波数成分との関係について基礎的な検討を行った。その結果、今回検討した範囲では、盛土斜面の線形時の固有周波数と、残留変形量に比較的大きな影響を及ぼす周波数帯域が良い一致を示した。入力地震動の高周波数成分が盛土の残留変形量に与える影響は小さかった。

Key Words : *embankment, ground motion, frequency component, residual displacement, FEM analysis*

1. はじめに

近年、我が国では大規模地震による盛土構造物の被災が相次いでいる。例えば、2004年新潟県中越地震では関越自動車道¹⁾、2007年能登半島地震では能登有料道路²⁾、2007年新潟県中越沖地震では北陸自動車道³⁾、2009年駿河湾の地震では東名高速道路⁴⁾、2011年東北地方太平洋沖地震では常磐自動車道⁵⁾・国道6号線⁶⁾においてそれぞれ盛土の被災が報告されている。このような大規模地震に対する盛土構造物の性能照査を非線形FEM解析などを用いて実施する場合、入力地震動の設定が必要不可欠となるが、地震動のどの周波数帯域が盛土構造物に被害を及ぼすかを検討することは、入力地震動の精度を重点的に向上すべき周波数帯域を特定する意味において非常に重要である。

一般に構造物の応答が線形の範囲に留まる場合、構造物の線形時の固有周波数付近の地震動成分が構造物の応答に対して大きく影響することは明らかである。しかしながら、大規模地震に対する構造物の性能照査においては、構造物の非線形応答を考慮して変形・損傷の程度を評価する必要がある。この場合、地震動のどのような周波数帯域が構造物の変形・損傷に対して大きく影響する

かは、必ずしも自明ではない。

表-1は土木構造物の変形・損傷に影響を及ぼす地震動の周波数帯域に関する既往の研究事例を一覧にしたものである。野津ほか⁷⁾は、岸壁の変形量に影響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。嶋村ほか⁹⁾¹⁰⁾は、擁壁などの抗土圧構造物の変形量に1～3Hzの地震動成分が大きく影響を及ぼすことを明

表-1 土木構造物の被災に影響を及ぼす地震動の周波数帯域

著者(発表年)	対象構造物	影響周波数帯域
野津, 井合, 一井(1998)	岸壁	1Hz以下
野津, 井合, 一井, 沼田(2000)	岸壁	2Hz以下
嶋村, 河西, 笹川, 福田(1998)	抗土圧構造物	1～3Hz
嶋村(2000)	抗土圧構造物	0.5～3Hz
立石・佐藤(2000)	ケーソン岸壁	3Hz以下
酒井・野津(2002)	地中構造物	3Hz以下



写真-1 対象とする釧路空港高盛土の概況 (2012年8月27日撮影)

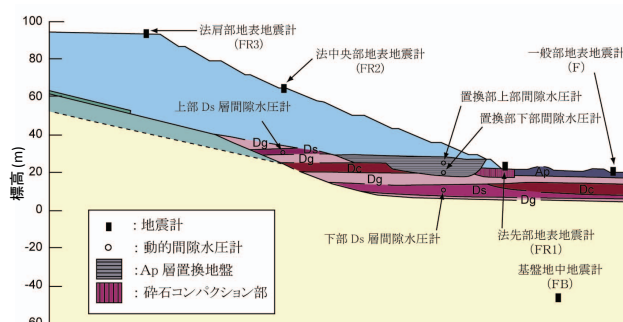


図-1 対象とする釧路空港高盛土の横断面 (文献18)に加筆

らかにしている。立石・佐藤¹¹⁾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。酒井・野津¹²⁾は、地中構造物の損傷に地震動の3Hz以下の周波数成分が大きく影響していることを報告している。

しかしながら、盛土構造物の変形に影響を及ぼす地震動の周波数帯域については、これまで十分な検討が行われていない。さらに著者ら^{13),14),15),16),17)}は、大規模地震による盛土の被災・無被災地点における地震動の事後評価を数多く実施しているが、その際、特に精度良く評価すべき地震動の周波数帯域について十分な議論が行われているとは言い難い。

そこで本研究では、盛土構造物を対象として、その被災に影響を及ぼす地震動の周波数成分について検討を行った。具体的には、2次元逐次非線形FEM解析による地震応答解析を釧路空港の高盛土の横断面(図-1参照)を対象に実施し、高盛土の大きさや入力地震動の特性を変化させたパラメトリックスタディにより、盛土法面における残留変形量と入力地震動の周波数成分との関係について基礎的な検討を行った。こうした検討を行う際、解析モデルそのものの信頼性が確保されていることは重要である。対象とする高盛土に関しては、2次元逐次非線形FEM解析(FLIP)が行われており^{18),19)}、1993年釧路沖地震に

よる被災を良好に再現する結果が得られている。そこで、この時用いられた解析モデルには一定の信頼性があると考えられることから、本研究ではこれを基本モデルとして用いた。

なお、本研究は、(公社)土木学会地震工学委員会によるリスク評価に基づく道路構造物・ネットワークの耐震設計に関する合同委員会(委員長:澤田純男・多々納裕一(京都大学防災研究所教授))が実施している委員会活動の一環として実施したものである。

2. 対象盛土

(1) 高盛土の概要

本研究では、釧路空港北側に滑走路延長のため、標高差65mの傾斜地にN44°E方向に向かって建設された高盛土^{18),19)}(写真-1の外観参照)を基本対象とし、その断面は図-1に示すとおりである。高盛土建設前の傾斜地を構成する地山は、第四紀洪積世の釧路層群によって構成され、盛土の法中から法先にかけては、上部は砂礫層Dgおよび下部は砂質土層Dsである。地山の中腹から低地までの斜面は、高盛土建設前には、あまり密でない崖錐堆積物によって覆われ、低地は軟弱な腐植土(ピート)が堆積していた。盛土材には砂質土と砂礫を1:4の割合で混合した良質土が使用されている。高盛土建設にあたり、法先部分の腐植土層は砕石コンパクション工法による地盤改良を行い、盛土荷重によって生じるせん断破壊の恐れのある腐植土層部はShear Keyとして砂礫で置換えが行われた。また、地山斜面上の崖錐堆積物は全面撤去して、盛土材で置換えが行われている。盛土部分では表層15~20m付近まではN値20~40、それ以深ではN値50以上となっており、盛土施工における十分な締固め効果が確認されている。なお、高盛土建設後の地下水面のレベルは、必要な箇所には地山表面に排水層を設けるなどし、概ね

表-2 入力パラメーターの一覧

地質名	土質名	単位体積重量 (tf/m^3)	基準有効 上載圧 (kPa)	せん断波 速度 (m/s)	基準平均 有効応力 (kPa)	初期せん 断剛性 (kPa)	初期体積 弾性係数 (kPa)	粘着力 (kPa)	内部 摩擦角 (deg.)	最大減衰 —
盛土	表土	1.50	15	93	10	13,000	33,800	19.6	42	
	上層	2.10				303,200	790,800	19.6	41	0.24
	下層	2.20	392	380	261	317,700	828,500	19.6	40	
沖積低地堆積物	腐食土 Ap	1.50	9	100	6	15,000	39,100	0.0	26	
	盛土 B									0.24
	改良地盤 Ap'	1.60	9	190	6	57,800	150,600	0.0	27	
Shear Key	砂礫 Sk	2.20	225	370	150	301,200	785,400	0.0	37	0.24
第3段丘堆積物	砂礫 Tog	1.90	152	400	102	304,000	792,800	49.0	35	0.24
釧路層群	上部層 砂礫 K2	2.15	318	550	212	650,400	1,696,100	9.8	35	
	砂質土 K1''	1.95				252,700	659,100	9.8	35	
	下層部 砂質土 K1'	2.00	294	360	196	259,200	676,000	9.8	35	0.24
	砂質土 K1	2.10				272,200	709,800	49.0	42	
第6段丘堆積物	粘性土 Dc	1.70				220,300	574,600	49.0	30	
	砂質土 Ds	1.90	294	360	196	246,200	642,200	29.4	35	0.24
	砂礫 Dg	2.00				259,200	676,000	29.4	35	

※ 上表のせん断波速度等の値は、基本ケース (Case_3, Case_7) のみに対応する。

※ 基本ケース以外 (Case_1, Case_2, Case_4, Case_5, Case_6, Case_8) では、拘束圧依存のために、せん断波速度等の値は上表とは異なる。

表-3 解析ケース

解析ケース	Case_1	Case_2	Case_3	Case_4	Case_5	Case_6	Case_7	Case_8
基本モデルに対する寸法倍率	0.31	0.62	1.00	1.23	0.31	0.62	1.00	1.23
盛土斜面高 H (m)	20	40	65	80	20	40	65	80
FEMモデル 基礎地盤高 B (m)	20	41	66	81	20	41	66	81
モデル幅 W (m)	198	397	640	787	198	397	640	787
入力地震動の種類	釧路波				一関西波			

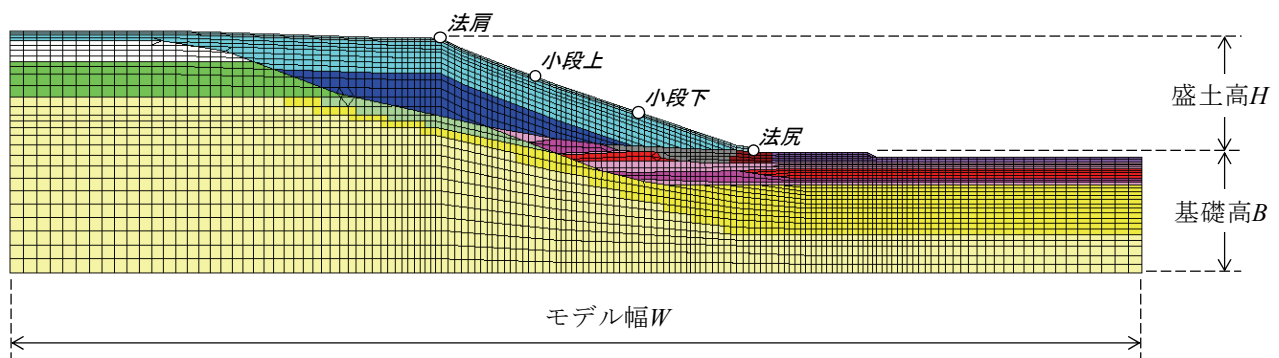


図-2 FEMモデルおよび本検討での着目地点

地山表面のレベルと一致するものとなっている。

(2) 1993年釧路沖地震による被災とその再現解析

対象とする高盛土では、1993年釧路沖地震の影響により、法中および法先付近の法面に長さ約10m、幅約15cmの亀裂が数か所発生したが、盛土全体の安定および航空機の離発着などには全く影響がなかった。また、高盛土の合計6か所において、動態観測を目的とした水平および鉛直変位の計測が行われており、水平方向の残留変位が法肩から法先へ向かう方向に盛土全体にわたって発生

し、また、鉛直方向の残留変位として法肩・小段付近での沈下、逆に法尻付近での隆起が確認されている。

さらに、対象とする高盛土では、法肩部(天端)、法中央部(小段)、法先部(法尻)、地表部および地中基盤の計5か所に地震計が設置されている(図-1参照)。また、間隙水圧計が砂層と置換部の計4か所に設置されている(図-1参照)。1993年釧路沖地震では、これらの計器により地震観測記録が得られている。

井合ら^{18),19)}は、1993年釧路沖地震発生時の当該高盛土の挙動を対象に2次元逐次非線形FEM解析(FLIP)を用いた

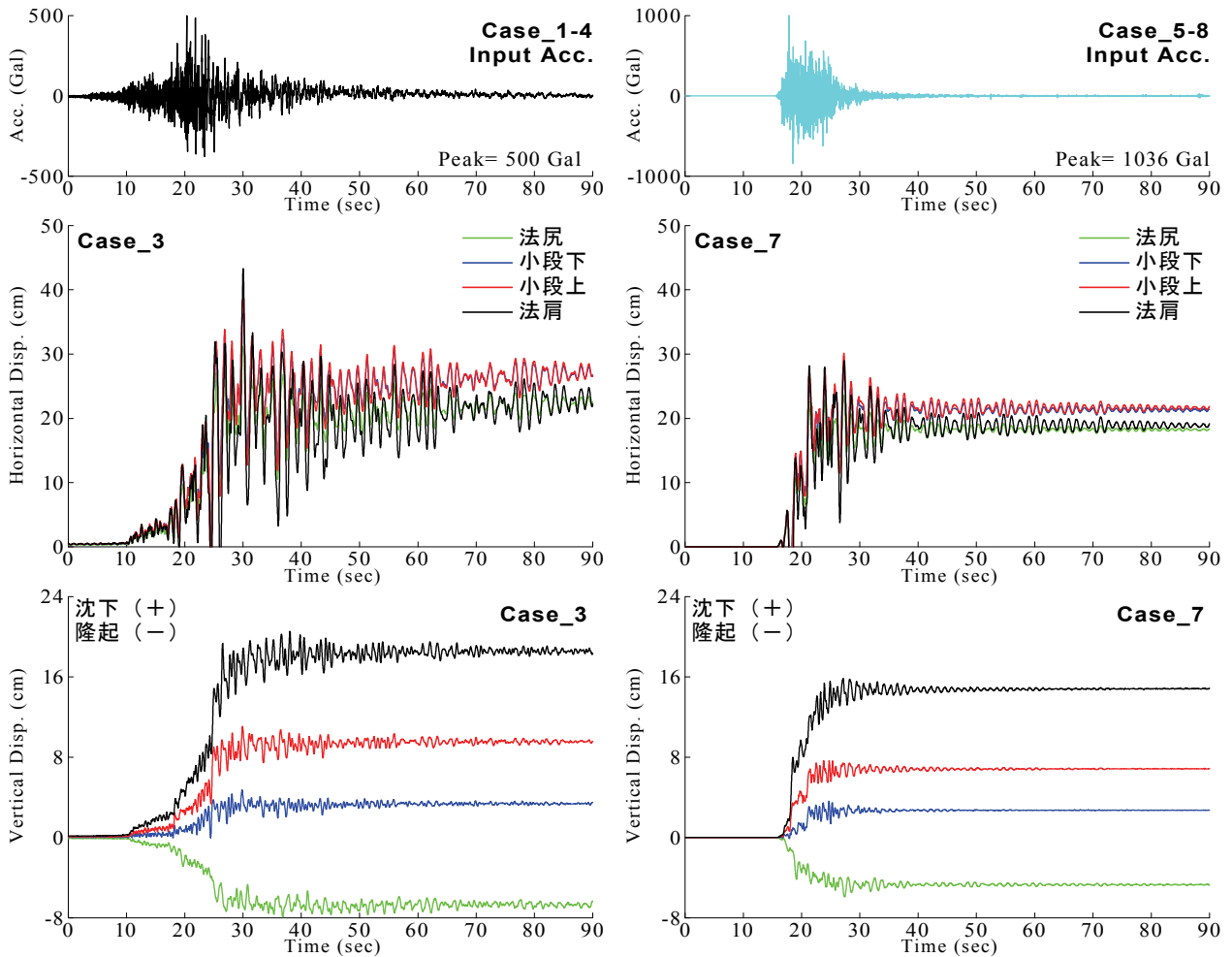


図-3 入力地震波（オリジナル波）と着目地点での応答変位の時刻歴

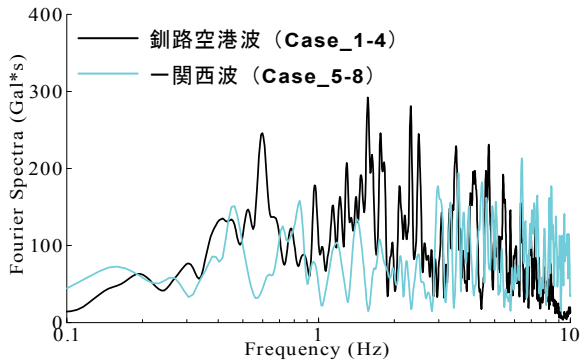


図-4 入力地震波（オリジナル波）のフーリエスペクトル

地震応答解析を実施し、高盛土における地震中の加速度応答、地震後の残留変位などの実測値と概ね整合する解析結果を得ている。本検討では、井合らによる再現解析のパラメータセット(FEM解析モデル、地盤物性値、数値解析条件など)^{18,19)}を基本とし、高盛土の大きさや入力地震動の特性を変化させたパラメトリックスタディにより、盛土法面における残留変形量と入力地震動の周波数成分との関係について基礎的な検討を行った。

3. 解析条件

(1) 解析手法および拘束圧依存性の考慮

本検討では、二次元FEM逐次非線形解析手法として、解析コードFLIP²⁰⁾を用いた。この解析手法は、運動方程式の復元力項に非線形履歴モデルを適用し、直接積分法による時刻歴応答解析により非線形解析を行うものである。FLIPは、土のせん断応力-せん断ひずみモデルとして、多数の仮想的な双曲線型バネで構成されているマルチスプリング・モデル²¹⁾を履歴減衰の大きさを任意に調節可能なように拡張している。またせん断剛性については、拘束圧依存性およびせん断面のひずみ依存性を考慮している。

対象とする高盛土の解析に必要な土質パラメータは、既往の土質調査結果と地震計設置地点でのPS検層結果に基づいて、表-2に示すとおりに決定^{18,19)}されている。また高盛土内部のせん断剛性については、せん断剛性が有効上戴圧力の平方根に比例するとして評価されている。すなわち、表-2に示す初期せん断剛性は、基準有効応力として示した拘束圧力に対応するものであり、非線形動

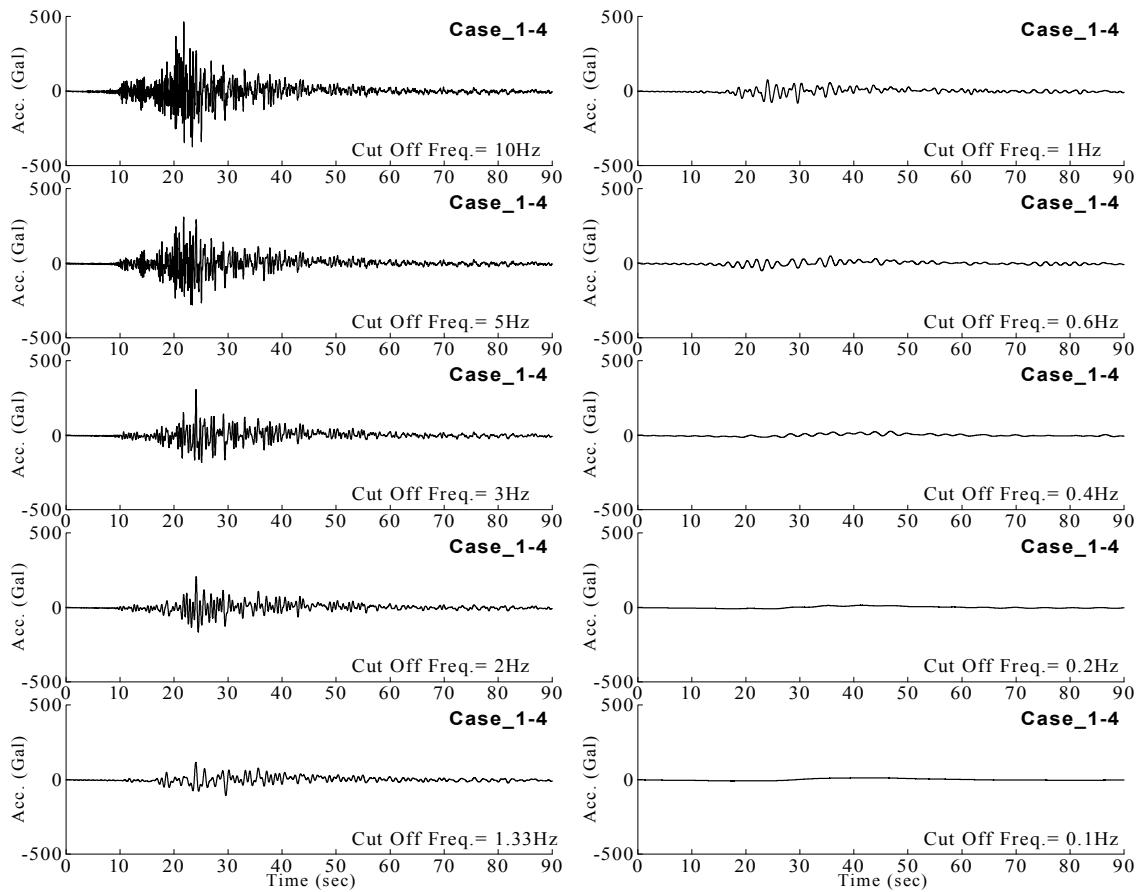


図-5 釧路空港波にローパスフィルタを適用した入力地震波 (Case_1,2,3,4)

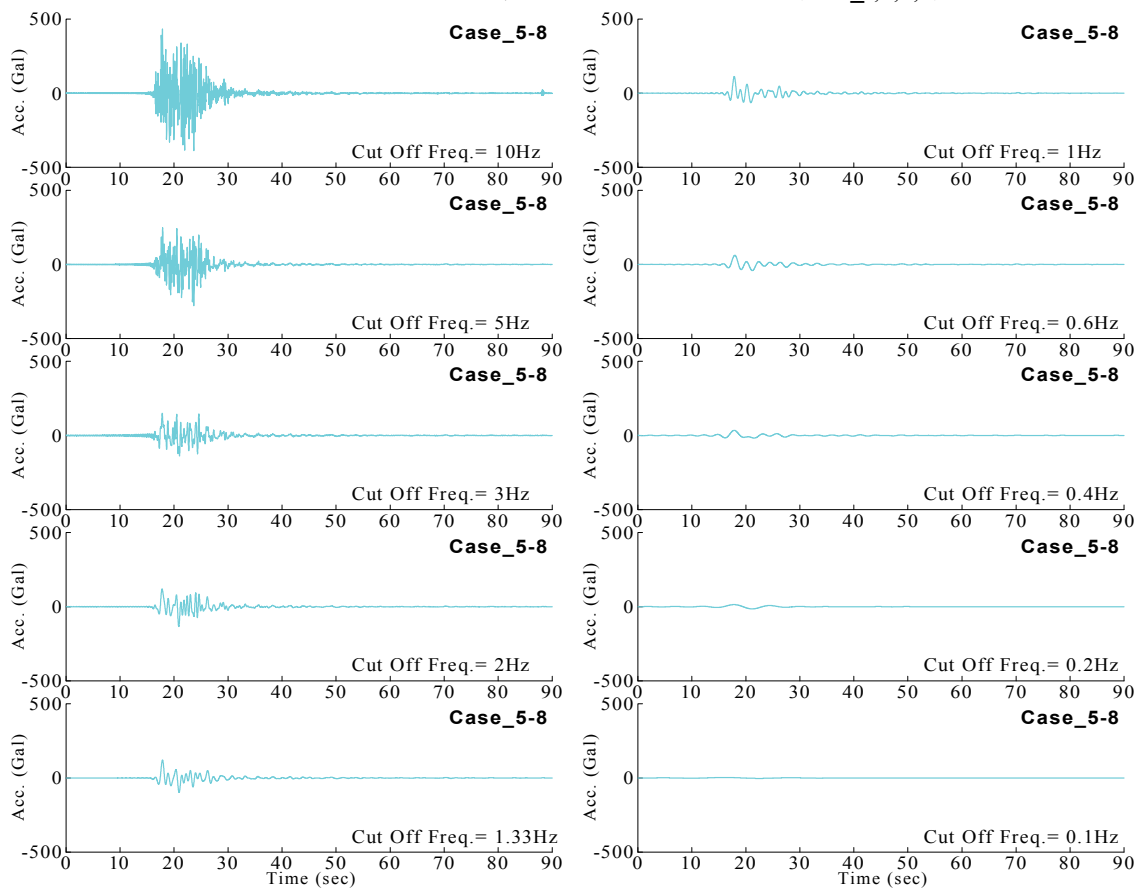


図-6 一関西波にローパスフィルタを適用した入力地震波 (Case_5,6,7,8)

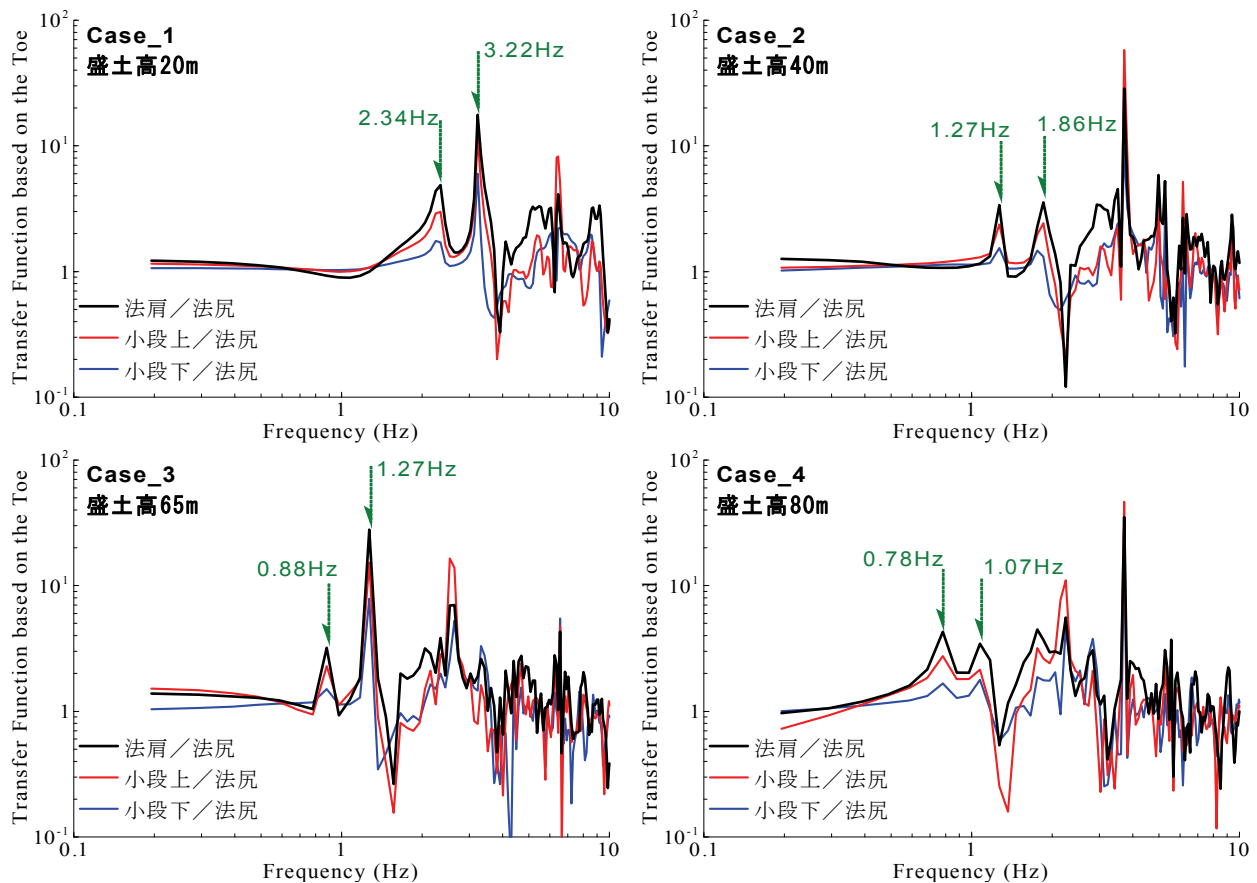


図-7 伝達関数を用いた盛土斜面の固有周波数の評価

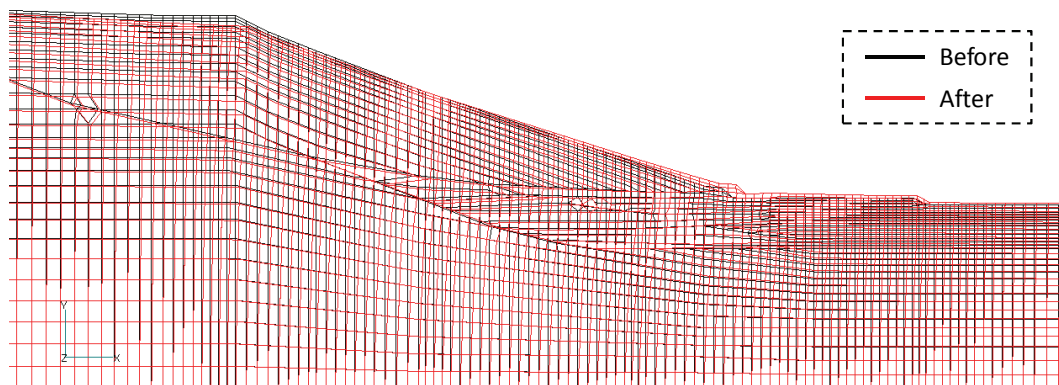


図-8 地震後の残留変形状況 (Case_3) 【変形倍率：20倍】

的解析においては、これらを基に同一材料領域内での拘束圧力依存性が考慮される。

(2) 解析ケース

表-3に本検討での解析ケースの一覧を示す。解析モデルについては、被害の再現解析に用いられたモデル（要素数7850，節点数4472，盛土斜面高 $H=65\text{m}$ ，図-2参照）に底面粘性境界を付与したものを基本モデルとして（Case_3およびCase_7），モデル寸法を0.31倍（ $H=20\text{m}$ ），0.62倍（ $H=40\text{m}$ ），1.23倍（ $H=80\text{m}$ ）と変化させた計4つの盛土解析モデルを設定した。なお，いずれの解析モデルにおいても，要素の大きさは10Hz程度の振動数成分を十分

に考慮できるように決定した。

解析領域底面への入力地震波としては，図-3に示すように2種類の波形（後述するフィルター通過前のオリジナル波形）を採用した。1つは，地中基盤FBで観測された1993年釧路沖地震による加速度波形（E+F波）を解析断面方向（N44°E方向）に変換し，本検討での解析モデル底面の境界条件（粘性境界）に合うよう2E波に補正した波形²²⁾（以後，釧路空港波と呼ぶ）を用いた。もう1つは，2008年岩手・宮城内陸地震においてKiK-net一関西²³⁾で観測された基盤での強震動のNS成分（以後，一関西波と呼ぶ）を採用した。

図-4は入力地震動のフーリエ振幅スペクトル（0.05Hzの

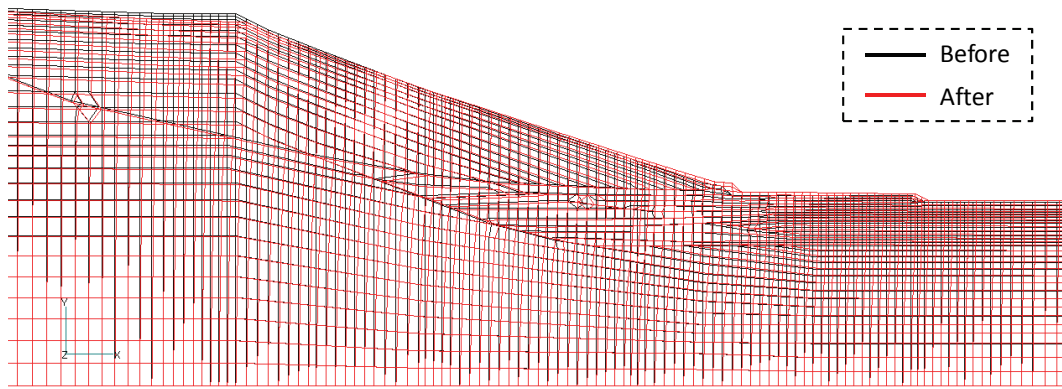


図-9 地震後の残留変形状況 (Case_8) 【変形倍率: 20倍】

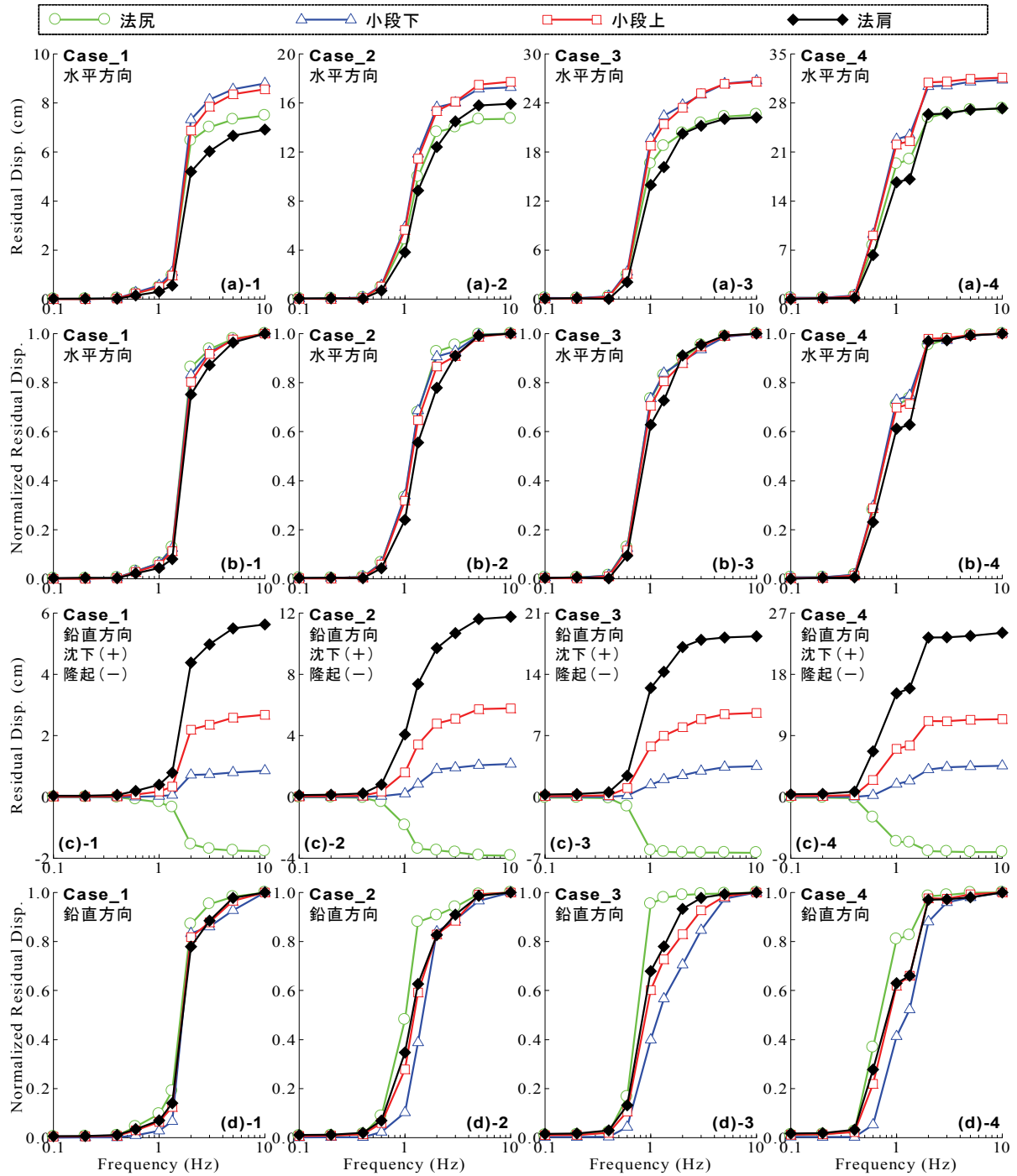


図-10 残留変位と入力地震波のローパスフィルターのカットオフ周波数との関係 (Case_1,2,3,4)

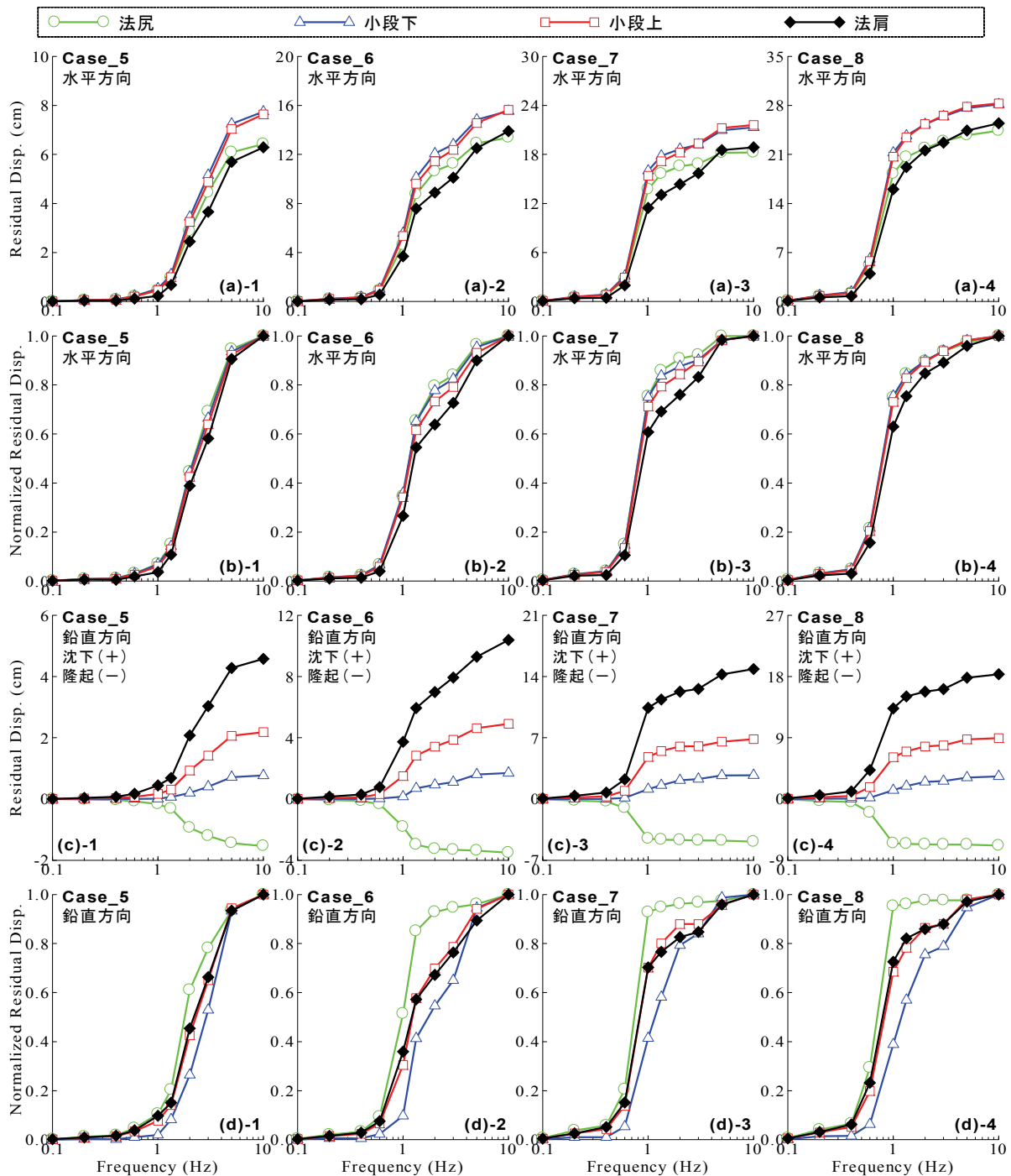


図-11 残留変位と入力地震波のローパスフィルターのカットオフ周波数との関係 (Case_5,6,7,8)

Parzen Window)を比較したものである。図-4に示すように、釧路空港波は0.5～0.6Hzおよび1～2Hz付近などにおいて顕著に卓越する地震動特性を有しているのに対し、一関西波ではフーリエ振幅のレベルが比較的一様となっている。

入力地震波としては、盛土法面における地震後の残留変形に影響する周波数帯を調べるために、オリジナル波形(図-3参照)のほかに、0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 1.0, 1.33, 2.0, 3.0, 5.0, 10.0Hzの計10種類のローパスフィルターをオリジナル波形(釧路空港波および一関西波)に施した波

(図-5および図-6参照)をそれぞれ採用した。

解析対象領域の側方境界では、自由地盤を設定することで、粘性境界を通じて無限遠方での波動の人射・逸散を考慮した。時間積分はWilson- θ 法($\theta=1.4$)を採用し、数値解析上の安定性を高めるため、レーレー減衰($\alpha=0$, $\beta=0.0005$)を用い、各解析ケースで共通とした。初期応力状態は、地震応答解析に用いた解析モデルをそのまま用いた静的自重解析により求めた。

4. 解析結果

(1) 固有周波数

盛土法面における地震後の残留変形に影響する入力地震波の周波数帯域について検討するためには、予め対象となる盛土法面での固有周波数を評価しておくことが肝要である。本検討では、地震応答解析の実施に先立ち、上述した解析モデル(表-2および図-2参照)に対して微小振幅のホワイトノイズ波を入力し、盛土斜面の線形時の固有周波数を評価した。具体的には、法尻(図-2参照)に対する小段下、小段上、法肩(図-2参照)の伝達関数を算定し、そのピーク周波数に基づいて固有周波数を評価した。図-7にその評価結果を示す。図-7に示すように、伝達関数は複数のピーク周波数を有する形状となっており、盛土斜面高 H の増加に伴い、固有周波数(最も低周波側のピーク周波数)は、2.34Hz (Case_1, 5 : $H=20\text{m}$), 1.27Hz (Case_2, 6 : $H=40\text{m}$), 0.88Hz (Case_3, 7 : $H=65\text{m}$), 0.78Hz (Case_4, 8 : $H=80\text{m}$)と低周波帯域へと変化している。

(2) 残留変形

図-8および図-9は、盛土斜面高 $H=65\text{m}$ の解析ケース(Case_3およびCase_7)におけるオリジナル波形(釧路空港波および関西波)を入力した場合の地震後の残留変状況(いずれも変形倍率：20倍)である。図-8および図-9に示すように、入力地震波の違いによる残留変形モード(法肩での沈下、法尻での隆起)の違いは小さく、両ケースともに上述した釧路空港の高盛土の被災形態(2.2節参照)と概ね整合しているのが確認できる。

さらに、本検討で着目する地点(法尻、小段下、小段上、法肩)での水平ならびに鉛直方向の相対変位の時刻歴をフィルター通過前のオリジナルの入力地震波形とともに図-3に示す(なお本稿で示す相対変位はすべてモデル下端に対する相対変位であり底面粘性境界の変位は含まない)。図-3に示すように、法肩と法尻における水平方向の挙動は比較的類似しているのに対し、鉛直方向の挙動は変位の向きや変位量が異なっている。また、Case_3とCase_7の比較では、釧路空港波を入力したケース(Case_3)のほうが、残留変形量が若干大きくなる傾向があることが読み取れる。

(3) 残留変形量とカットオフ周波数との関係

図-10および図-11は、各解析ケース(表-3参照)について地震応答解析を行った結果として、盛土斜面(法尻、小段下、小段上、法肩：図-2参照)における地震後の水平および鉛直方向の残留変位量(ならびに残留変位比)と、入力地震波のローパスフィルターのカットオフ周波数との関係を示したものである。ここに、残留変位比は、フ

ィルターカットオフされた入力地震波による残留変位量を、フィルター処理無しのオリジナル入力波による残留変位量で除したものである。

図-10および図-11に示すように、残留変位比に着目すると、水平ならびに鉛直方向ともに、盛土斜面高 H の増加に伴い残留変形量に大きな影響を及ぼす周波数帯域(本稿では、残留変位比が急激に増加している周波数帯域と定義する)が低周波側へと移行しているのが読み取れる。これは、残留変形量に大きな影響を及ぼす周波数帯域と、盛土法面の固有周波数(図-7参照)との関係を示唆するものである。また、5Hzおよび10Hzのカットオフ周波数を用いたケースでは、残留変位比が1.0に漸近している傾向が確認できる。この傾向は、着目地点(法尻、小段下、小段上、法肩)、方向(水平もしくは鉛直)、入力地震波の種類(釧路空港波もしくは関西波)にはほとんど依存していないのがわかる。

よって、本解析ケースにおいては、入力地震波の5Hz以上の周波数成分が盛土斜面の残留変形量に及ぼす影響は、極めて小さいことが明らかになった。一方で、着目地点ごとの残留変位比のバラツキが、水平方向と比較して鉛直方向のほうが大きいことがわかる。具体的には、鉛直方向における残留変形量に大きな影響を及ぼす周波数帯域が、法尻とその他の地点(小段下、小段上、法肩)では若干異なっており、法肩等の地点での沈下に大きな影響を及ぼす周波数帯域と比較して、やや低周波帯域での地震動が法尻での隆起に大きな影響を及ぼしているのが確認できる。

(4) 残留変位比と固有周波数との関係

図-12および図-13は、法肩もしくは法尻における残留変位比(図-10および図-11参照)と、固有周波数との関係を検討したものである。図-12に示すように、法肩では、盛土法面の線形時の固有周波数(図-7参照)と、水平ならびに鉛直方向における残留変形量に比較的大きな影響を及ぼす周波数帯域が良い一致を示している。一方で、図-13に示すように、法尻では、水平方向については上述した法肩で確認された傾向(図-12参照)と同様であるものの、鉛直方向については盛土法面の線形時の固有周波数(図-7参照)に対して、残留変形量に比較的大きな影響を及ぼす周波数帯域はやや低周波側にあることが読み取れる。

したがって、盛土の耐震性能照査などの実施にあたっては、盛土法面の固有周波数を考慮して適切な入力地震動を設定する必要がある。その際、盛土法面の固有周波数は、既往の知見(中小地震観測結果²⁴⁾²⁵⁾、常時微動計測結果²⁴⁾²⁶⁾、もしくは経験的算定式²⁷⁾²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾などに基づいて評価するのが望ましいと考えられる。

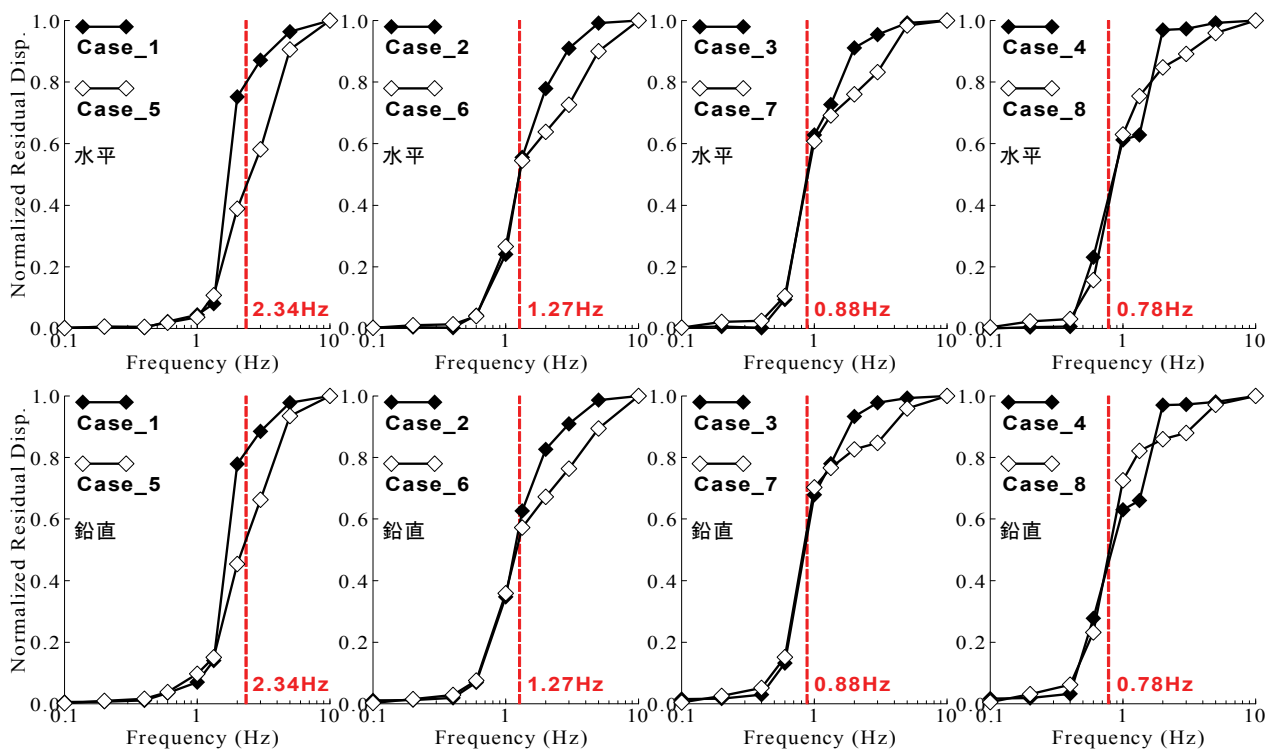


図-12 法肩における残留変位比と盛土斜面の固有周波数の関係

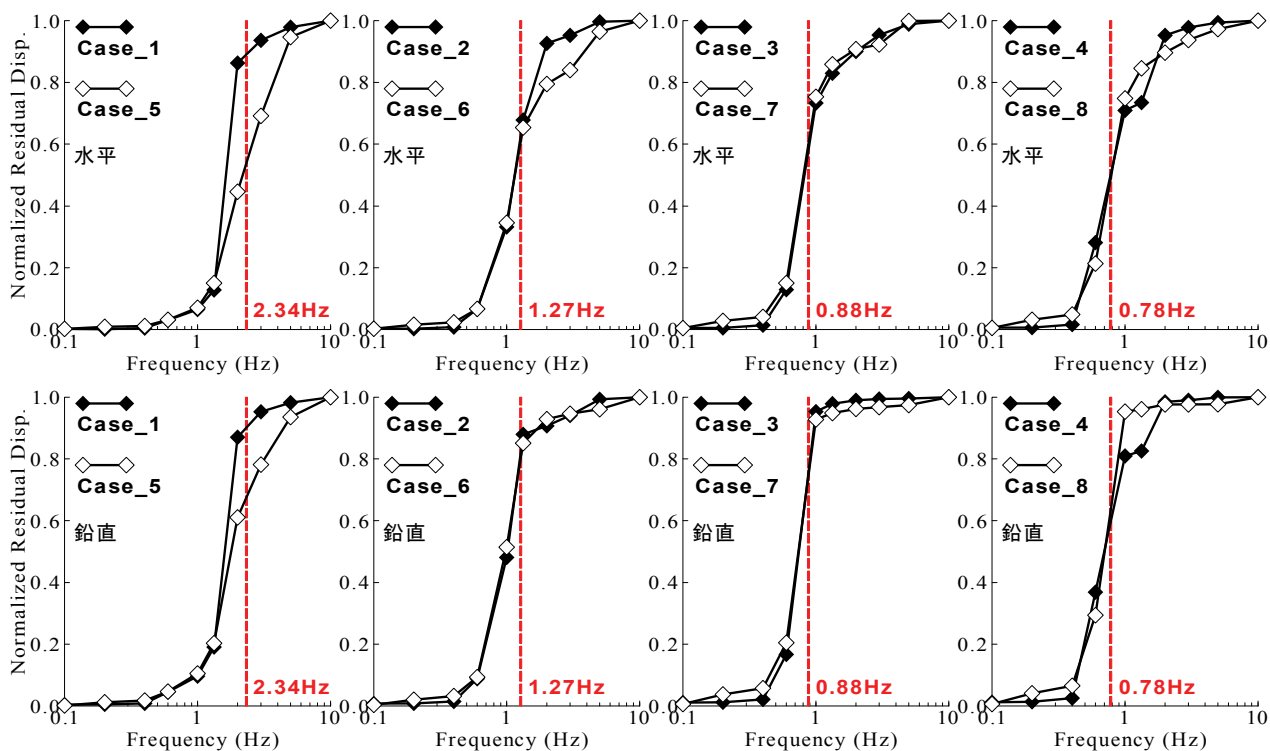


図-13 法尻における残留変位比と盛土斜面の固有周波数の関係

5. まとめ

本研究では、盛土構造物の変形に影響を及ぼす周波数帯域について検討する目的で、釧路空港の高盛土の横断面を基本にした2次元逐次非線形FEMによる地震応答解析を実施した。ここで、入力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力波とした。得られた知見を以下に示す。

- (1) 本検討ケースにおいては、入力地震波の種類に関わらず、法肩、小段、法尻における水平ならびに鉛直方向の残留変形量は、入力地震波の5Hz以下の周波数成分が特に大きく影響している。

- (2) 法肩(水平および鉛直方向)および法尻(水平方向)の残留変位量に比較的大きな影響を及ぼす周波数帯域は、盛土法面の固有周波数と良い整合性を示す。
- (3) 法尻(鉛直方向)の残留変位量(隆起量)に比較的大きな影響を及ぼす周波数帯域は、盛土法面の固有周波数よりもやや低周波帯域にある。

上記で得られた知見は、入力地震波の種類が限られた中で得られた1つの知見である。盛土法面の線形時の固有周波数付近の成分が残留変位量に比較的大きな影響を及ぼす結果となったのは、ここで入力した地震動が、盛土に対して強い非線形挙動をもたらすほど強い地震動でなかったためである可能性が残る。

よって今後は、さらに数多くの入力地震動を採用したパラメトリックスタディの実施により、同様の知見が得られるのかについて確認しておく必要がある。

謝辞：(独)防災科学技術研究所KiK-netによる地震観測記録を使用させていただきました。(公社)土木学会地震工学委員会リスク評価に基づく道路構造物・ネットワークの耐震設計に関する合同委員会の委員の皆様には、貴重なご意見をいただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) (社)地盤工学会：新潟県中越地震災害調査委員会報告書，pp.187-203, 2007.
- 2) (社)地盤工学会：2007 年能登半島地震道路災害データ集，74p., 2007.
- 3) (社)地盤工学会：2007 年新潟県中越沖地震災害調査報告書，5.4 節，pp.46-54, 2009.
- 4) 齊藤康博：駿河湾を震源とする地震による東名高速道路被災箇所の応急復旧ー東名の崩落箇所を 115 時間で復旧ー，土木学会誌，Vol.94, No.11, pp.10-11, 2009.
- 5) 矢崎敏之：東日本大震災における NEXCO 東日本の対応，高速道路の被害と復旧状況，土木学会誌，Vol.96, No.7, pp.20-21, 2011.
- 6) 国土交通省仙台河川国道事務所：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震ー被災状況(道路)，14p., 2011.
- 7) 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，地盤工学会，pp.73-80, 1998.
- 8) 野津厚，井合進，一井康二，沼田淳紀：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講習会テキスト，地盤工学会，pp.311-318, 2000.
- 9) 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，地盤工学会，pp.89-94, 1998.
- 10) 嶋村貞夫：抗土圧構造物の応答，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，地盤工学会，pp.193-206, 2000.
- 11) 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，地盤工学会，pp.223-245, 2000.
- 12) 酒井久和，野津厚：地中構造物の損傷に影響する地震動の周波数成分，第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集，No.194, pp.1033-1038, 2002.
- 13) 秦吉弥，一井康二，野津厚，古川愛子，常田賢一：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2009 年駿河湾の地震における東名高速道路盛土崩落地点での地震動の推定，土木学会論文集 A，Vol.66, No.4, pp.673-690, 2010.
- 14) 秦吉弥，一井康二，村田晶，野津厚，宮島昌克：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した線状構造物における地震動の推定とその応用ー2007 年能登半島地震での道路被災を例にー，土木学会論文集 A，Vol.66, No.4, pp.799-815, 2010.
- 15) 秦吉弥，一井康二，丸山喜久，福島康宏，酒井久和，中村晋：位相を考慮したサイト特性置換手法の震源近傍地点での適用ー2004 年新潟県中越地震における検討ー，構造工学論文集，土木学会，Vol.57A, pp.340-353, 2011.
- 16) 秦吉弥，一井康二，常田賢一，野津厚，横田聖哉，金田和男：サイト特性置換手法に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震とその最大余震における盛土被災地点での地震動の推定，土木学会論文集 A1(地震工学論文集 31-b)，Vol.68, No.4, pp.I 315-I 330, 2012.
- 17) 秦吉弥，野津厚，常田賢一：2011 年東北地方太平洋沖地震で被災した盛土での余震観測と地震動の推定，日本地震工学会論文集，2012. (Submitted)
- 18) 井合進，一井康二，佐藤幸博，桑島隆一：高盛土の地震応答解析，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集，No.D2-25, pp.1557-1562, 1998.
- 19) Iai, S., Ichii, K., Sato, Y., Kuwazima, R.: Earthquake response analysis of a high embankment on an existing hill slope, *Proc. of the 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, pp.21-25, Lisbon, Portugal, 1999.
- 20) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 21) Towhata, I. and Ishihara, K.: Modeling soil behavior under principal stress axes rotation, *Proc. of 5th International Conference on Numerical Method in Geomechanics*, pp.523-530, Nagoya, Japan, 1985.
- 22) Hata, Y., Ichii, K., Tsuchida, T., Kano, S. and Yamashita, N.: A practical method for identifying parameters on the seismic design of embankments, *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, Vol.2, No.1, pp.28-40, Taylor & Francis, 2008.
- 23) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 24) 秦吉弥，一井康二，山田雅行，常田賢一，竹澤請一郎，柴尾享，満下淳二，村田晶，古川愛子，小泉圭吾：中小地震観測および常時微動計測に基づく道路

- 盛土の地震応答特性の評価, 土木学会論文集 A1 (地震工学論文集 31-b), Vol.68, No.4, pp.I_407-I_417, 2012.
- 25) 秦吉弥, 釜井俊孝, 王功輝, 野津厚: スーパーアスペリティモデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2011 年東北地方太平洋沖地震における白石市緑が丘団地での強震波形の評価, 第 51 回日本地すべり学会研究発表会講演集, No.3-06, pp.111-112, 2012.
- 26) 秦吉弥, 一井康二, 村田晶, 野津厚, 宮島昌克, 常田賢一: 常時微動計測を利用した道路盛土のせん断波速度の評価—2007 年能登半島地震で被災した能登有料道路を例として—, 日本地すべり学会誌, Vol.48, No.6, pp.318-325, 2011.
- 27) 中村豊, 中野聡: 盛土形状に伴う固有振動数の変化の解析と物性値の推定法, 土木学会第 43 回年次学術講演会講演概要集, I-561, pp.1172-1173, 1988.
- 28) 秦吉弥, 加納誠二, 土田孝, 山下典彦: 盛土形状を考慮した水平および上下方向の固有周波数算定式, 第 41 回地盤工学研究発表会講演論文集, No.1056, pp.2111-2112, 2006.
- 29) 秦吉弥, 加納誠二, 山下典彦, 横井芳輝, 土田孝: 形状を考慮した簡便な盛土の固有周波数算定式, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.3, pp.197-207, 2007.
- 30) 都間英俊, 常田賢一, 小田和広, 江川祐輔: 応答加速度分布に及ぼす盛土の幾何学的形状の影響に関する研究, 第 29 回地震工学研究発表会報告集, 土木学会, pp.1205-1210, 2007.
- (2012.9.21 受付)

PRELIMINARY STUDY ON CONTRIBUTION OF DIFFERENT FREQUENCY COMPONENTS OF GROUND MOTION FOR THE SEISMIC DAMAGE TO EMBANKMENTS

Yoshiya HATA, Atsushi NOZU, Koji ICHII and Hisakazu SAKAI

Two dimensional non-linear FEM analyses are performed to investigate relative contribution of different frequency components of ground motions for the residual deformation of high embankments. The residual deformation of the embankments was evaluated at the shoulder, the banquettes and the toe. The results indicate that the frequency components close to the natural frequency of the embankment slope contribute to the residual deformation of the slope. The effect of high frequency components of a ground motions on the residual displacement is almost negligible. These conclusions will be useful in the determination of input motion for seismic performance evaluation of an embankment.