

永久変位を考慮した地震動の設定について

岡田 理*・山本 修司**・福田 謙太郎***

* (一財)沿岸技術研究センター 企画部 主任研究員

** (一財)沿岸技術研究センター 参与

*** 日本工営株式会社 中央研究所 総合技術開発第2部 第2グループ

断層変位が想定される場所の構造物の耐震設計においては、永久変位を伴うようなステップ状の変位波形（フリングステップ）を考慮しなければならない場合がある。これまで港湾分野での照査用地震動の評価は、アスペリティの破壊に伴う強震動の計算に適した修正経験的グリーン関数法を用いてきたが、この手法ではフリングステップの考慮が行えない。本報告では、神戸港の摩耶断層を対象に、修正経験的グリーン関数法と離散化波数法を併用することで、永久変位を考慮した強震波形の試算を実施したので、紹介する。

キーワード：フリングステップ，地表地震断層，修正経験的グリーン関数法，離散化波数法

1. はじめに

近年、断層変位が想定される場所に構造物を建設するケースが多く見受けられる。

過去に断層変位を生じ、構造物に甚大な被害を及ぼした地震としては、1999年9月21日に発生した台湾集集地震（マグニチュード7.6(以降、「M7.6」等と示す））及び2016年4月16日に発生した熊本地震本震（M7.3）がある。

台湾集集地震の特徴は、広範囲に亘って、大きな地表地震断層が出現（最大10m程度）し、断層変位による局所的な地盤変状により、断層直上あるいはこれを跨ぐ位置にあるダム、橋梁、道路、導水トンネル、ライフライン施設等の土木構造物が大きな被害を受けたことである¹⁾。

熊本地震の地表地震断層の出現位置は、日奈久断層帯が高野—白旗区間の北部約6kmの区間、布田川断層帯は西端が日奈久断層帯との接合点より約3km西側、東端が従来活断層と認定されていた端点より約4km東側の阿蘇カルデラ内の約28kmの区間であった²⁾。

1.1 フリングステップとは

大地震の際に震源付近では永久変位を伴うような変位波形が生じる場合がある。地表地震断層を伴う地震では特にそれが著しく、ステップ状の変位波形が観測される。この変位波形をフリングステップと呼ぶ。台湾集集地震で観測されたフリングステップを図-1に示す。

フリングステップは、断層を跨ぐ位置にある構造物はもとより、断層極近傍の構造物に対し、その動的特性によっては大きな影響を及ぼす恐れがある。したがって、重要構造物の耐震設計において断層変位を想定する場合には、永久変位を含む地震動を使用する必要があると考える。

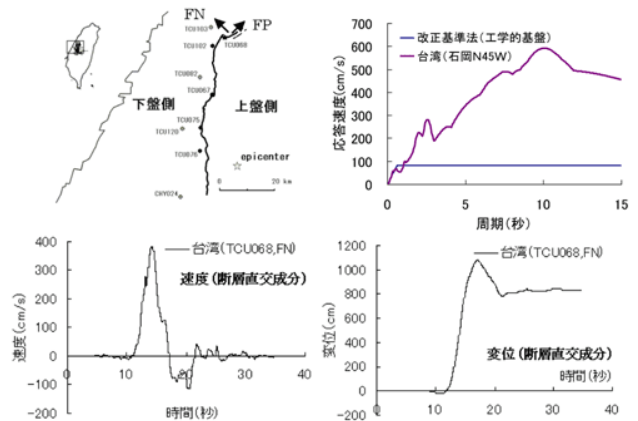


図-1 フリングステップ

(1999年台湾集集地震の震源断層と地表断層近傍の観測波・速度応答スペクトル(断層直交成分)³⁾

1.2 検討の目的

現時点で一般的に使用されている強震動シミュレーション手法はフリングステップを考慮できないものが多い。例えば、港湾分野で照査用地震動の評価に広く用いられる「修正経験的グリーン関数法」は永久変位成分が支配的でない場合の震源近傍地震動の計算において実績があるが、そのままではフリングステップを含む地震動の計算ができない。そこで、本報告では従来から設計において考慮されている「修正経験的グリーン関数法」で計算されるアスペリティの破壊に伴う強震動に加え、フリングステップを考慮できる複合型の震源モデルにより、強震動シミュレーション^{4),5)}を実施し、その適用性を検討した。複合型の震源モデルは「領域A」と「領域B」からなる。「領域A」は従来のアスペリティに対応する。すなわち、断層面上において常時は強く固着しており、地震時には大きなすべり速度を伴うすべりが生じ強震動を生成する領域

である。それに対し「領域B」はモーメントの解放は生じるものの強震動への寄与は小さい領域である。

2. 地震動の検討

2.1 修正経験的グリーン関数法

一般にグリーン関数とは、ある点に瞬間的に力を加えた場合の別な点の応答のことを指すが、強震シミュレーションでは、点とみなすことのできるような小さい破壊が生じた場合の対象地点での応答をグリーン関数と呼ぶ場合がある。小さい地震は断層面も小さくすべりの継続時間も短いので、点震源で瞬間的に破壊が生じたと仮定することができ、この波動が伝播経路特性と地盤増幅特性を受けて地表で観測されたものは経験的グリーン関数と呼ばれる。この経験的グリーン関数を直接重ね合わせて大地震時の波形を合成するものが経験的グリーン関数法である。

それに対し、修正経験的グリーン関数法では、グリーン関数のフーリエ振幅は中小地震の震源特性・伝播経路特性・経験的サイト増幅特性の三者の積として求める。また、グリーン関数のフーリエ位相としては、対象地点における中小地震記録のフーリエ位相をそのまま用いる。結果的にグリーン関数のフーリエ変換 $F(f)$ は次式で表されることになる。

$$F(f) = |S(f)||P(f)||G(f)| \frac{O(f)}{|O(f)|_p} \dots (1)$$

ここに $|S(f)|$ は中小地震の震源特性、 $|P(f)|$ は伝播経路特性、 $|G(f)|$ は経験的サイト増幅特性、 $O(f)$ は現地で得られた中小地震記録のフーリエ変換、 $|O(f)|_p$ はその絶対値をバンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウで平滑化したものである。

位相特性の評価に用いる中小地震記録については、対象地点で複数の中小地震記録が利用できる場合は、入射角および back azimuth という点で対象地震と（対象地震が複数のサブイベントからなる場合には対象とするサブイベントと）できるだけ類似している中小地震記録を用いる。それにより、堆積層が地震動の位相に及ぼす影響をより適切に考慮できるためである。

以下においては、地震基盤における水平動のグリーン関数の評価に必要な震源特性と伝播経路特性について説明する。

S波のグリーン関数の震源特性は次式に示すようにオメガスクエアモデルに従うものを与える⁶⁾。

$$|S(f)| = C_s M_0 \frac{(2\pi f)^2}{1+(f/f_{cs})^2} \dots (2)$$

ここに M_0 は中小地震の地震モーメント、 f_{cs} は中小地震によるS波のコーナー周波数である。 f_{cs} は次式で与える。^{7), 8)}

$$f_{cs} = 0.66 \frac{\beta}{\sqrt{s}} \dots (3)$$

ここに β は地震基盤のS波速度、 s は中小地震の断層面

積である。定数 C_s は次式で与える⁶⁾。

$$C_s = \frac{R_s FS PRTITN_s}{4\pi\rho\beta^3} \dots (4)$$

ここに R_s はS波のラディエーション係数、 FS は自由表面の影響による増幅、 $PRTITN_s$ はS波の水平各成分への寄与を表す係数、 ρ は地震基盤の密度である。 FS は一般には2とする。

R_s と $PRTITN_s$ については、本稿の検討では技術基準に従い、 R_s は平均値である0.63とし、 $PRTITN_s$ は後述の通り断層面の走向を考慮して定める。ただし、 R_s と $PRTITN_s$ については、次式のように理論的なものと平均的なものの重み付け平均⁹⁾として設定することも提案されている。

$$(R_s \cdot PRTITN_s)^2 = \gamma (R^{FS})^2 + (1-\gamma)(\overline{R_s} \cdot \overline{PRTITN_s})^2 \dots (5)$$

$$\gamma = \exp(-\pi fr / Q_R \beta) \dots (6)$$

ここに γ は震源距離、 R^{FS} は遠地S波項の理論的なラディエーション係数、 $\overline{R_s} \cdot \overline{PRTITN_s}$ はその平均値であり 0.63×0.71 である。 R^{FS} はAki and Richards¹⁰⁾の式(4.90) - (4.91)で計算し水平各成分に座標変換する。 Q_R はどの程度遠くまで理論的なラディエーション係数が表れるかを示すパラメータである（この値が大きいほど遠くまで理論的なラディエーション係数が表れる）。本稿ではこれらの提案式を用いていないが今後検討に値する。

伝播経路特性については次式のように幾何減衰と非弾性減衰を考慮する⁶⁾。

$$|P(f)| = \frac{1}{r} \exp(-\pi fr / Q_s \beta) \dots (7)$$

ここに Q_s はS波の Q 値である。

以上のことより、修正経験的グリーン関数法は、観測地震動のフーリエ振幅をオメガスクエアモデルに従うように調整してから重ね合わせる手法と位置づけることができる。

2.2 フリングステップを考慮した手法

修正経験的グリーン関数法には、近地項・中間項¹⁰⁾の影響が考慮されていない。一方で、断層近傍の地震動には近地項・中間項の影響が含まれ、それにより永久変位を含む波形（フリングステップ）が断層近傍にもたらされる。

フリングステップを考慮した地震動の検討には、修正経験的グリーン関数法と「離散化波数法」⁵⁾を併用する。

離散化波数法では、震源から放射される地震波を様々な周波数と様々な波数を有する地震波の重ね合わせで表現する。ここで言う波数とは、厳密に言えば波数の水平成分のことである。波数の小さな地震波はテイクオフ・アングル（進行方向と水平面のなす角）の大きい波に対応しており、波数の大きな地震波はテイクオフ・アングルの小さい波に対応している。つまり、離散化波数法では、震源から放射される地震波を様々な周波数と様々なテイクオフ・アングルを有する波に分けて考える。水平な地層境界

に入射した地震波は透過もしくは反射するが、このとき、地層境界が水平であれば地震波の波数は変化しない性質がある。そのため、水平成層地盤では、地震波の透過と反射は周波数と波数に対して独立に計算できる。そこで、周波数毎、波数毎に透過と反射の計算を行い、その結果をすべての周波数と波数について重ね合わせれば、任意の地点でのグリーン関数が求まる。本検討では、文献¹¹⁾を参考に、「領域B」からの地震動の計算に離散化波数法を用い、「領域A」からの地震動の計算には従来通り修正経験的グリーン関数法を用いる。

フリングステップを考慮した地震動計算手法と従来(港湾の施設の技術上の基準・同解説(以降、「港湾基準」と呼ぶ))の修正経験的グリーン関数法との比較を表-1に示す。

表-1 地震動計算手法の比較

項目	従来方法	フリングステップを考慮した手法
手法	修正経験的グリーン関数法(サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算)	離散化波数法と修正経験的グリーン関数法の組み合わせ
手法の種類	半経験的手法	理論的手法と半経験的手法の組み合わせ
計算における仮定	地震動に対し遠地項(1/Rで減衰)の寄与が支配的であると仮定	地震動に対し遠地項に加え近地項・中間項(1/Rで減衰)も寄与すると仮定
特徴	<ul style="list-style-type: none"> アスペリティの破壊に伴う強震動の計算に適している。地表地震断層が現れない場合には震源近傍を含め地震動の計算精度が高い(サイト特性等の適切な評価が前提) 遠地項を仮定しているため、地表地震断層が現れる場合の計算精度が低い 実用化されている 	<ul style="list-style-type: none"> アスペリティの破壊に伴う強震動に加え、熊本地震や台湾集塊地震で顕著に現れたフリングステップを含む地震動を計算することが可能 熊本地震の事例などを通じた検証がなされているもの、震源パラメータの設定方法が標準化されていないなどの課題がある。

R:震源距離

3. 強震波形計算

3.1 対象地震の選定

対象地震は、断層変位の影響についての検討に適した地震として「大阪湾断層帯」で発生する地震を選定した。本地震は、政府地震調査研究推進本部(以降、「地震本部」と呼ぶ)により「大阪湾断層帯の長期評価」¹²⁾がなされており、地震規模はM7.5、傾斜は西傾斜60~80°、1回のずれ量は約2~3.5m(上下成分)とされている。当該断層帯は図-2に示すとおり、大阪湾断層・和田岬断層・摩耶断層の3つの断層で構成されており、和田岬断層と摩耶断層は神戸港すぐ南方の海域で大阪湾断層から分岐しており、各々ポートアイランドの東側と西側を走っている。

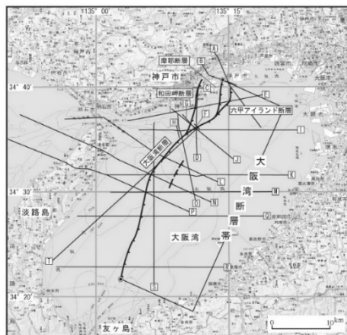


図-2 大阪湾断層帯の位置¹²⁾

3.2 計算条件

(1) 計算地点

計算地点は港湾地域強震観測の神戸港島-D(kobe-PI)と神戸向洋-D(kobe-RI)の2地点に加え、断層近傍の永久変位の程度を確認するため、摩耶断層を挟んだF1, F2, F3の3点の計5点とした。地点図を図-3に示す。

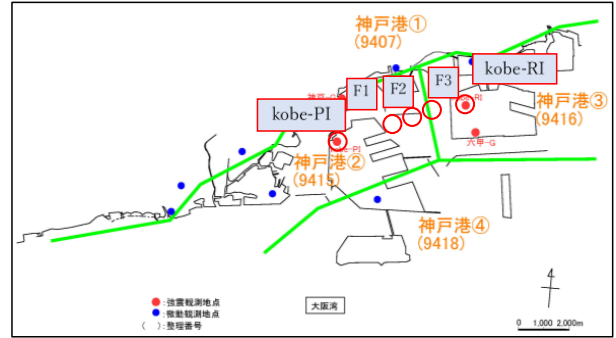


図-3 計算地点

(国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室公開資料 神戸港のサイト増幅特性のゾーン区分に計算地点を加筆)

(2) 断層モデルの設定

地震本部の長期評価¹²⁾や地震ハザードステーション(J-SHIS)等を元に大阪湾断層帯のセグメントを「大阪湾断層1」、「大阪湾断層2」、「大阪湾断層3」、「和田岬断層」、「摩耶断層」の5つに分割したモデルを設定した。巨視的断層モデル及びアスペリティは、港湾基準に従った。すべり量は、地震本部の長期評価では逆断層運動に伴う上下成分のみしか評価されていない。しかし、本断層帯は海底面下に存在しているため、不明点が多く、横ずれ成分も生じる可能性がある。したがって、検討ケースには横ずれ成分を含めることとした。Case-1はすべり量を3.5m(逆断層, すべり角90°)、Case-2はすべり量を4.9m(斜め横ずれ断層, すべり角135°)とした。4.9mは3.5mのすべりが走向直交方向と走向平行方向に同時に発生すると仮定して設定した。図-4に設定した断層モデル図を示す。

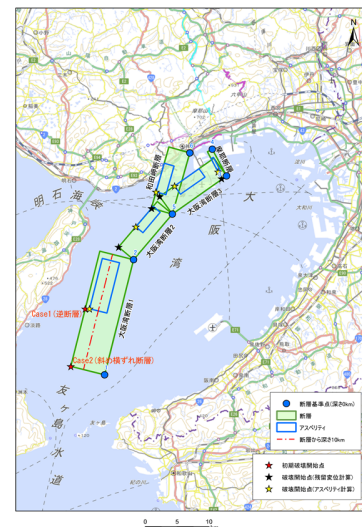


図-4 断層モデル図

(3) 断層パラメータの設定

まず、領域 B については、地震本部の長期評価を基に、断層の上端深さを 0km とし、断層幅は地震発生層の下限深さを 15km と仮定して、各セグメントの傾斜角を考慮し設定した。断層長さは各セグメント長さとした。震源付近の密度、S 波速度も港湾基準の一般値として、それぞれ 2700 kg/m³、3.5 km/s とした。P 波速度は、ポアソン固体を仮定して、S 波速度に√3 を乗じて 6.1 km/s とした。地震モーメントは、ここではすべり量に関する想定を重視し、港湾基準の経験式を用いず、以下の定義式により、想定通りのすべり量を与えるような地震モーメントを設定した。

$$M_0 = \mu DS \cdot \cdot \cdot (8)$$

ここで、 M_0 :地震モーメント(kNm), S :断層面積(m²), D :すべり量(m), μ :剛性率(kN/m²)

断層のずれに要する時間であるライズタイムは、熊本地震の評価¹¹⁾で実績のある 2.0 秒と仮定した。領域 B の断層パラメータを表-2 に示す。

表-2 領域 B の断層パラメータ

項目	大阪湾断層 1		大阪湾断層 2	大阪湾断層 3	和田岬断層	摩耶断層	
	Case-1	Case-2					
長さ(km)×幅(km)	19x16		9x16	10x16	10x16	5x15.2	
走向(度)	194.1		220.2	234.7	195.9	152.1	
傾斜(度)	70		70	70	70	80	
すべり角(度)	Case-1 (逆断層)	90	90	90	90	90	
	Case-2 (斜め横ずれ断層)	135	135	135	135	135	
すべり量(m)	Case-1 (逆断層)	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	
	Case-2 (斜め横ずれ断層)	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	
破壊開始点	北緯(度)	34.4605	34.3787	34.5622	34.6353	34.6086	34.6380
	東経(度)	135.0171	134.9923	135.0542	135.1317	135.1087	135.2336
	深さ(km)	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
破壊開始時間(秒)	Case-1 (逆断層)	0.00	-	4.21	7.88	6.59	9.99
	Case-2 (斜め横ずれ断層)	-	0.00	7.35	11.15	9.88	12.97
地震モーメント(Nm)	Case-1 (逆断層)	3.52x10 ¹⁹	-	1.67x10 ¹⁹	1.85x10 ¹⁹	1.85x10 ¹⁹	8.80x10 ¹⁹
	Case-2 (斜め横ずれ断層)	-	4.93x10 ¹⁹	2.33x10 ¹⁹	2.59x10 ¹⁹	2.59x10 ¹⁹	1.23x10 ¹⁹
	ライズタイム(秒)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00

次に、領域 A (アスペリティ) の断層パラメータは、港湾基準に従って表-3 のように設定した。地震モーメントは以下の経験式により算定する。

$$S = 2.23 \times 10^{-15} \times M_0^{\frac{2}{3}} \cdot \cdot \cdot (9)$$

ここで、 M_0 :地震モーメント(dyne・cm), S :断層面積(km²)
アスペリティの配置については、港湾基準ではアスペリティの中心深さを 10km とすることを基本としているが、アスペリティの範囲が断層幅を超えてしまうセグメントについては、断層下端にアスペリティの下端をすりあわせて設定した。

破壊は「大阪湾断層帯 1」より順に進行していくと仮定し、「大阪湾断層帯 1」の下端に初期破壊開始点をケース毎に設定した。各セグメントの破壊開始点は、初期破壊開始点からの時間が最短となる位置に設定した。

地震動の分配係数である $PRTITM$ は、図-3 で示した計算地点が断層面距離 10km 未満であることから、走行直交成分 0.85、走行平行成分 0.53 と設定した。伝播経路特性を示す Q 値は、港湾基準に示される関西地方の一般値として、63.8f^{-1.00} とした。

表-3 領域 A の断層パラメータ

項目	大阪湾断層 1	大阪湾断層 2	大阪湾断層 3	和田岬断層	摩耶断層	
破壊開始点	北緯(度)	34.4611	34.5762	34.6411	34.6242	34.6428
	東経(度)	135.0221	135.0810	135.1567	135.1234	135.2369
	深さ(km)	13.84	12.65	12.79	12.79	12.01
破壊開始時間(秒)	Case-1 (逆断層)	0.45	5.11	8.53	7.40	10.26
	Case-2 (斜め横ずれ断層)	3.43	8.39	11.74	10.66	13.23
	長さ(km)×幅(km)	8.18x8.18	5.63x5.63	5.93x5.93	10x16	4.09x4.09
地震モーメント(Nm)	2.21x10 ¹⁸	7.22x10 ¹⁷	8.46x10 ¹⁷	1.85x10 ¹⁹	2.77x10 ¹⁷	
破壊伝播速度(km/s)	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	
ライズタイム(秒)	0.73	0.50	0.53	0.53	0.37	

(4) サイト増幅特性とサイト位相特性

水平成分のサイト増幅特性は図-3 に示される神戸港②と神戸港③の各ゾーンのものを用いる。なお、神戸港のサイト増幅特性(地震基盤～工学的基盤)と地盤モデル(工学的地盤～地表)は、国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室のホームページで公開されており、サイト増幅特性(地震基盤～地表)は、サイト増幅特性(地震地盤～工学的基盤)に地盤モデル(工学的基盤～地表)に基づく伝達関数を乗じることで図-5 に示すとおり算定した。なお、サイト増幅特性は kobe-PI, F1, F2 については神戸港②のサイト増幅特性を、kobe-RI, F3 については神戸港③のサイト増幅特性を用いる(鉛直成分のサイト増幅特性も同様)。

鉛直成分のサイト増幅特性は、①震央距離 100km 以内の M4.0 以上の地震、②0.2Hz～1.0Hz までの S/N 比が良好なもの(水平 2 成分合成の加速度フーリエスペクトル)を満たす観測記録の上下水平スペクトル比の平均値に水平成分のサイト増幅特性を乗じることで、図-6 に示すとおり設定した。なお、水平成分のスペクトルは、2 成分(NS・EW)の「自乗平均平方根」として算出した。

サイト位相特性は、①大阪湾断層帯近傍で過去に発生した M4.5～6.0 の中小地震のうち、震源位置と検討対象アスペリティ位置とが比較的近いもの、②計算地点までの入射角が類似しているもの、③0.2Hz～1.0Hz までの S/N 比が良好なもの(水平 2 成分合成の加速度フーリエスペクトル)を考慮して、1995 年 10 月 24 日 2 時 4 分(M4.7)の地震の観測記録を選定した。なお、サイト位相特性は kobe-PI, F1, F2 については、kobe-PI 地点での観測記録を、kobe-RI, F3 については、kobe-RI 地点での観測記録をそれぞれ適用した。

当該エリアは、六甲山地が大阪湾に急激に落ち込んだ地形であり、地震波は深層地盤も含めた地盤の非線形効果を複数回受ける可能性がある。野津・菅野は、この地盤の非線形効果のことを「多重非線形効果」と定義し、表層地盤と深層地盤を含む堆積層における平均的な S 波速度の低下率(ν_1)及び堆積層における平均的な減衰定数の増分(ν_2) (これらを「非線形パラメータ」という)を適用することで、1995 年兵庫県南部地震のポートアイランドの鉛直アレー観測結果を適切に再現している⁴⁾。本検討の計算地点も当該地震と近接した位置であり、多重非線形効果が発生する可能性があるため、1995 年兵庫県南部地震の再現で適用された非線形性パラメータ($\nu_1=0.61$, $\nu_2=0.06$)を適用した。

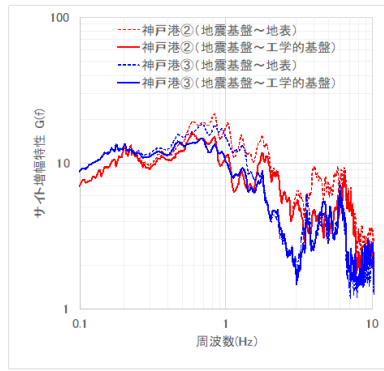


図-5 サイト増幅特性 (水平成分)

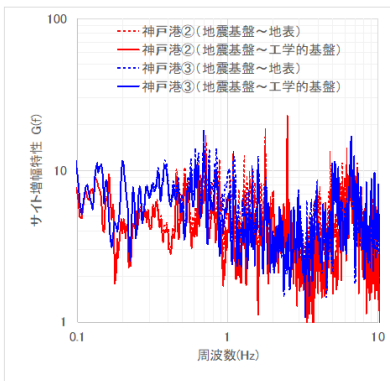


図-6 サイト増幅特性 (鉛直成分)

3.3 計算結果

(1) 地表面での比較

図-7, 8 に領域Bに起因するフリングステップを含む地表面変位時刻歴の計算結果を示す。Case-1 (逆断層) は、走向直角方向にすべるため、鉛直成分が大きくなる。例えば、摩耶断層の地表トレースを挟んで直近に位置するF2, F3 地点の鉛直方向の永久変位 (残留値) はそれぞれ 201.7cm, -90.6cm である。F3 地点で値が負になっているのは逆断層であるため上盤側(F2)が隆起し、下盤側(F3)が沈降するためである。すなわち、断層全体のおおよそのすべり量は、F2, F3 地点の永久変位の絶対値を足し合わせたもの (201.7+90.6=292.3cm≒3m) であるといえる。ここで、上記値は領域 B の地震モーメントを算定するために仮定したCase-1 のすべり量3.5m に対して、約0.5m 小さい値である。これは計算地点が摩耶断層の地表トレースからわずかに離れているためと推察される。次に、Case-1 とCase-2 (斜め横ずれ断層) との比較においては、特に kobe-PI, F1, F2 の計算地点においてCase-2 で永久変位が大きい傾向がある。これはCase-2 の方が領域Bの地震モーメントの算定で仮定した断層のすべり量が4.9m と大きいこと、当該地点は上盤側に位置していることが理由と考えられる。一方、下盤側の遠方に位置する kobe-RI は永久変位が小さい傾向にある。これは、永久変位に関連する近地項・中間項が距離とともに減衰すること、下盤側では永久変位が相対的に小さいことによる。

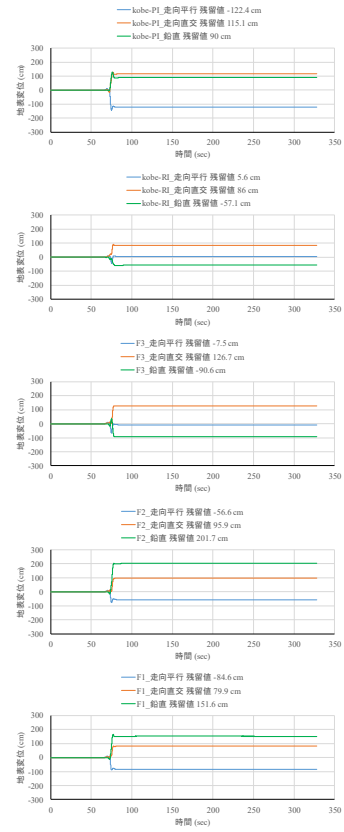


図-7 フリングステップの計算結果 (Case-1, 逆断層)

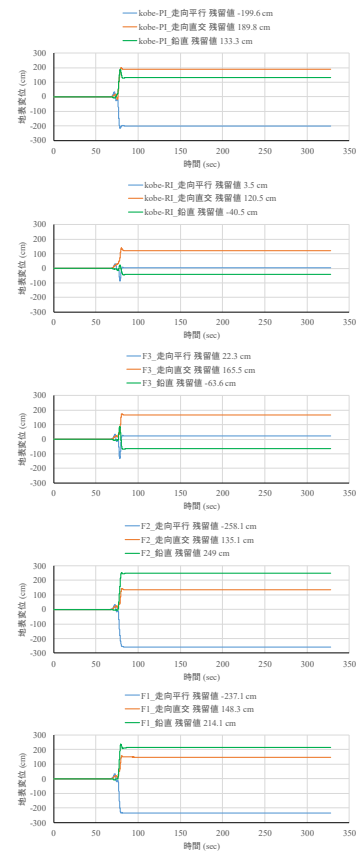


図-8 フリングステップの計算結果 (Case-2, 斜め横ずれ断層)

図-9 に速度時刻歴波形を示す。この図では、①修正経験的グリーン関数法(領域Aのみ考慮)、②離散化波数法(領域Bのみ考慮)、③両手法の合成、の3ケースの比較結果を示す。留意点として、①は、地震基盤～地表のサイト増幅特性を用いており、工学的基盤～地表の地盤の非線形性の影響は考慮していない。比較地点は摩耶断層の地表トレースに最も近いF2 地点とした。

図を見て明らかなように、両手法の速度合成波形は、離

散化波数法による長周期の波形にアスペリティに起因するより短周期の波形が重畳した波形となっている。本報告では、将来発生する可能性のある活断層の地震を対象としたため、強震観測記録との比較検証はできないが、野津他¹¹⁾による熊本地震のシミュレーションでは、両手法の特徴を組み合わせることで、精度の高い強震動評価結果が得られることが観測記録との比較により検証されている。

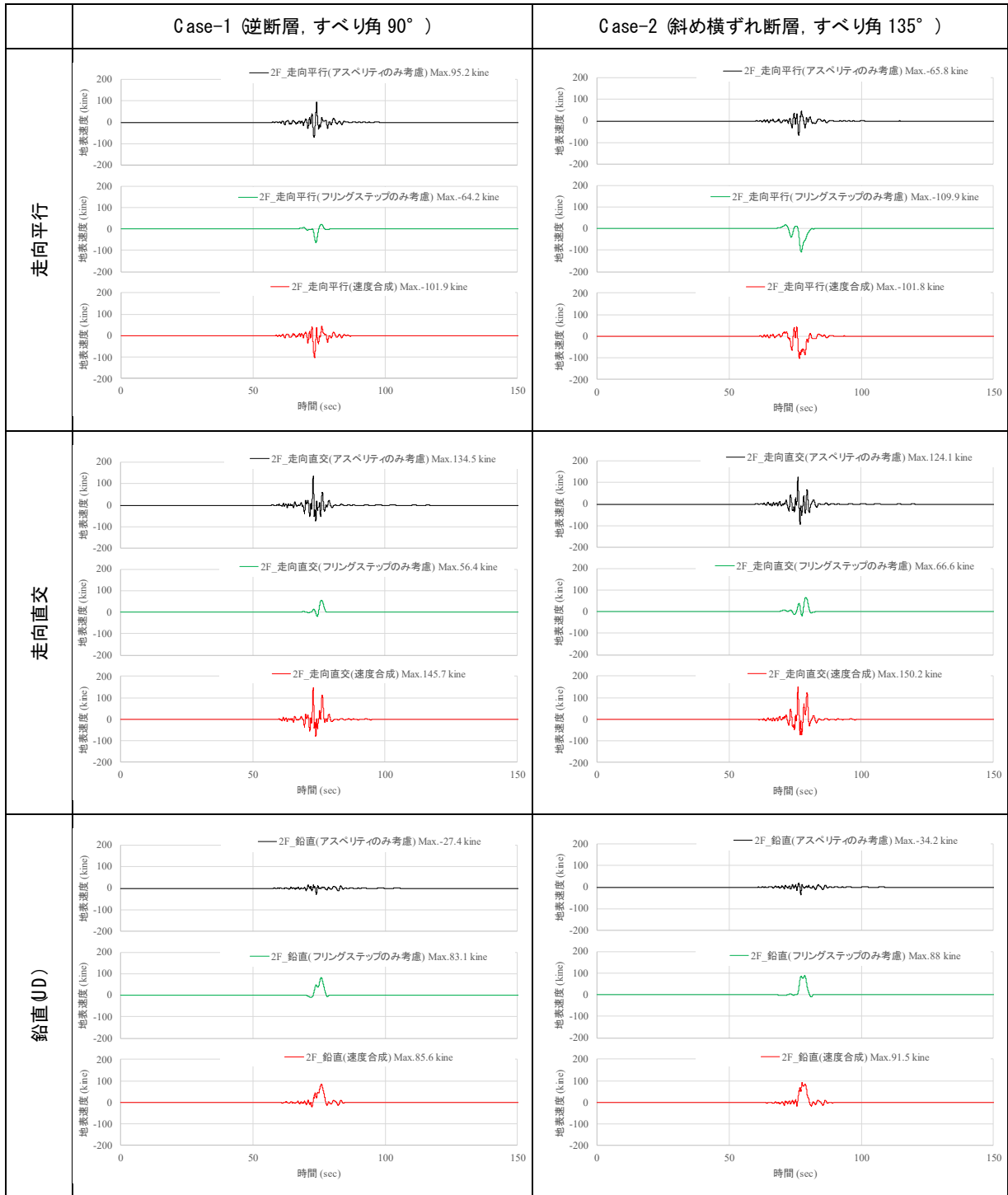


図-9 F2 地点における各手法の地表面速度時刻歴の比較

(2) 工学的基盤面での比較

工学的基盤面での比較対象地点は kobe-PI, kobe-RI の2点とし、走向平行、走向直交方向の結果については、NS、EW 方向に角度補正した。

図-10に修正経験的グリーン関数法(領域Aのみ考慮)、両手法の合成(領域A+領域B)の計算結果の比較例(EW成分)を示す。加速度時刻歴では、一見あまり違いがないように見えるが、スペクトルで比較すると、周期2~4秒程度で領域B起因のフリグステップを考慮した方が大きい結果となっていることが分かる。

図-11に両手法の合成による各ケースの水平方向の加速度応答スペクトルの比較結果を示す。同図には神戸港で設定されている港湾の既存の照査用地震動(兵庫県南部地震再来波、南海トラフ巨大地震)と道路橋示方書(H29)耐震設計編で示される設計スペクトル(I種地盤)も示した。各図に示す桃色の縦実線は、各地点の地盤の固有周期を示す。

固有周期は、道路橋示方書でも示される式(10)で算出した。

$$T_G = 4 \sum \frac{H_i}{V_{si}} \dots (10)$$

ここで、 T_G :地盤の固有周期(s)、 H_i :i番目の地層の厚さ(m)、 V_{si} :i番目の地層の平均せん断弾性波速度(m/s) 地盤の固有周期は、初期剛性の場合(左)の他、剛性が初期剛性の1/10の場合(非液状化地盤を想定)(中央)、剛性が初期剛性の1/50の場合(液状化地盤を想定)(右)の3通りを計算した(剛性低下を考慮した V_{si}' は1/10低下の場合 $V_{si}/\sqrt{10}$ 、1/50低下の場合 $V_{si}/\sqrt{50}$)。同図より、大阪湾断層帯の地震動は、周期1秒程度以上では設計スペクトル(I種地盤)を超過している箇所が認められる。一方、周期1秒程度以下では、設計スペクトルの方が上回っており、当該地震動はやや長周期帯域で影響の大きい地震動といえる。

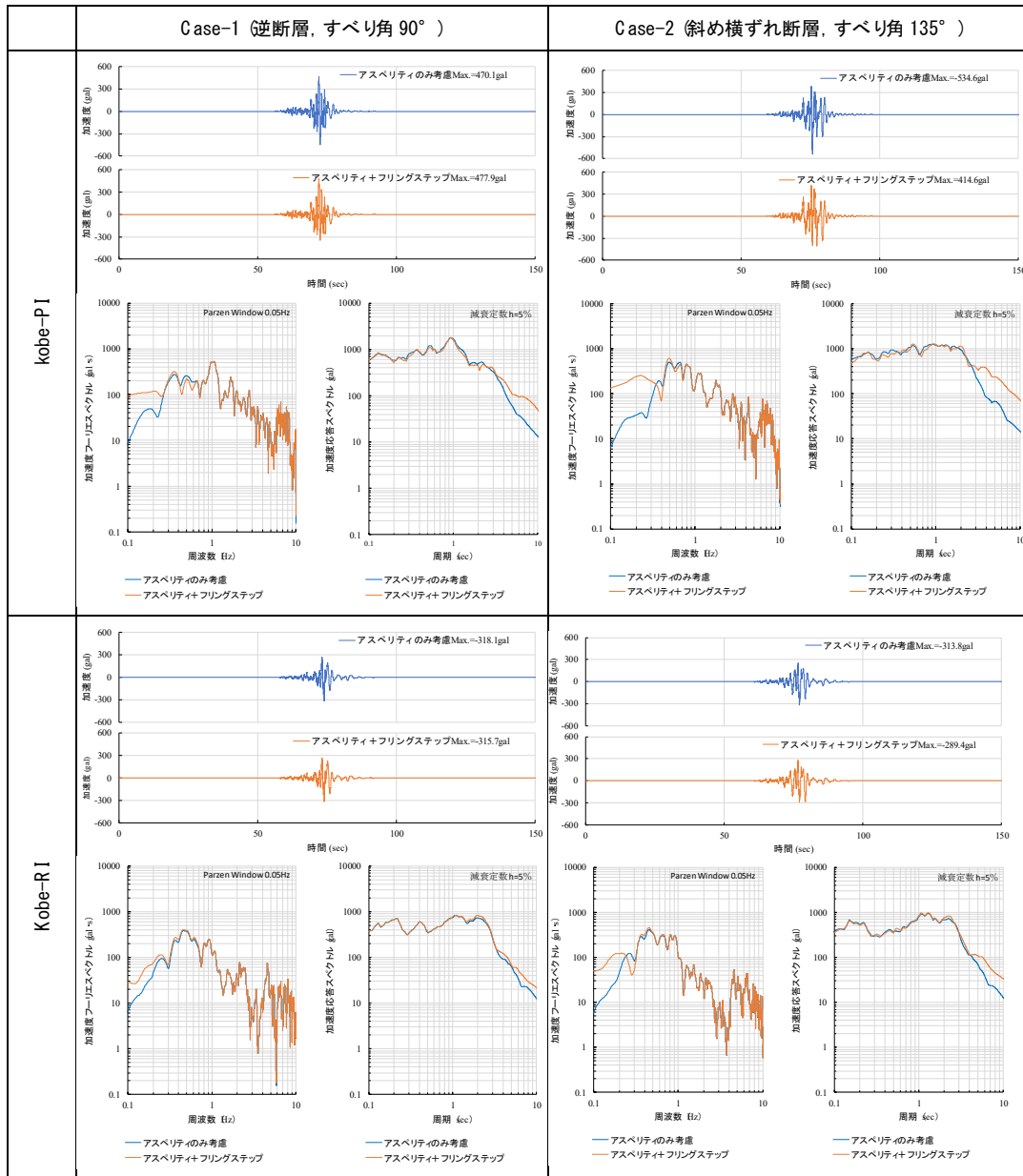
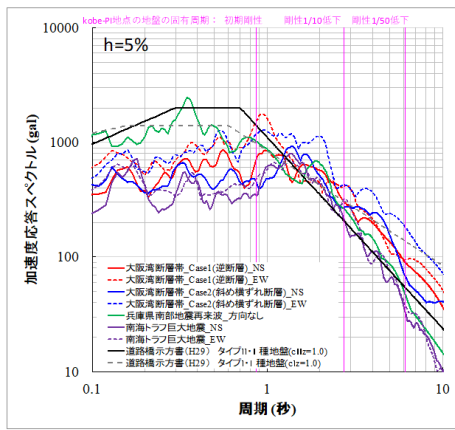
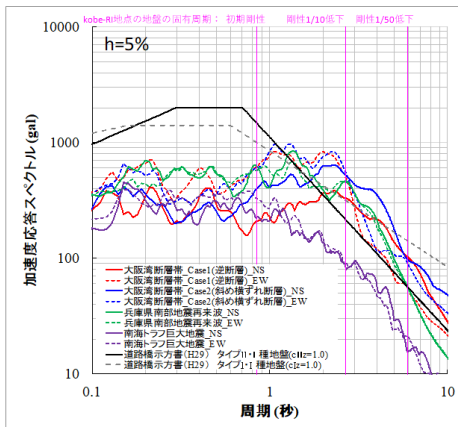


図-10 工学的基盤面における計算結果の比較例(EW成分)



(a) kobe-PI



(b) kobe-RI

図-11 水平方向の加速度応答スペクトルの比較
(大阪湾断層帯はフリングステップの影響を考慮)

4. まとめと今後の展望

4.1 まとめ

従来の修正経験的グリーン関数法と離散化波数法を併用することで、大阪湾断層帯を対象に、フリングステップを含む地震動の試算を実施した。得られた知見を以下に示す。

- 離散化波数法と修正経験的グリーン関数法の両手法で計算された速度時刻歴波形を時間領域で足し合わせることで、修正経験的グリーン関数法の場合と比較して長周期側で地震動の振幅が大きくなることを確認した。
- フリングステップを考慮した地震動は、考慮しない場合と比べて周期2～4秒程度以上で大きくなる事が確認された。
- フリングステップを考慮した大阪湾断層帯の地震動は、周期1秒程度以上の多くの帯域で港湾の既存の照査用地震動や道路橋示方書の設計スペクトルを超過した。

4.2 今後の可能性

離散化波数法によるフリングステップを考慮した地震

動の信頼性を確保する上で重要なことの一つは断層変位の評価を適切に行うことである。そのためには、検討箇所周辺の活断層に関する文献調査だけでなく、物理探査等を用いた活断層調査を実施し、その結果も考慮することが望ましい。フリングステップの影響を考慮した地震動評価手法は、パラメータの設定方法が標準化されていないなどの課題があることから、今後、検証事例を増やしノウハウを蓄積していくことで信頼性向上を図るとともに、その適用にあたってはパラメータの設定方法などについて十分な審議を経ることが重要であると考えられる。

謝辞

本報告の検討では、(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域の野津領域長より計算プログラムの提供及び貴重なご意見、ご指導をいただきました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 岩橋ら：台湾集集地震土木構造物の被害と特徴，総合都市研究 第72号，pp. 77-115，2000。
- 地質調査総合センター：平成28年（2016年）熊本地震及び関連情報[2016年5月13日] 2016年熊本地震に伴って出現した地表地震断層，GSJ地質ニュース Vol. 5 No. 6 pp. 169-174，2016. 6。
- 久田嘉章：耐震の入口と出口の話-強震動と地震防災-，第三回「震源近傍の強震動」，SEIN WEB，<https://www.sein21.jp/NewSeinWeb/TechnicalContents/Hisada/Hisada0103.aspx>，2018. 4. 30。
- 野津厚，菅野高弘：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法-因果性および多重非線形効果に着目した改良-，港湾空港技術研究所資料 No. 1173，2008. 3。
- Bouchon, M.: A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, Bull. Seism. Soc. Am, Vol. 71, No. 4, pp. 959-971, 1981.
- Boore, D.M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 73, pp. 1865-1894, 1983.
- Brune, J.N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake, J. Geophys. Res., Vol. 75, pp. 4997-5009, 1970.
- Brune, J.N.: Correction, J. Geophys. Res., Vol. 76, pp. 5002, 1971.
- 長坂陽介，野津厚，若井淳：疑似点震源モデルによる2005年7月23日千葉県中部の地震の強震動シミュレーション，日本地震工学会論文集，Vol. 16, No. 3, pp. 17-29, 2016。
- Aki, K. and P.G. Richards: Quantitative Seismology, Second Edition, University Science Books, Sausalito, California, 2002.
- 野津厚，長坂陽介，呉双蘭：断層変位に伴うフリングステップを考慮した熊本地震の強震動シミュレーション，第9回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集，pp. 189-195, 2018。
- 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：大阪湾断層帯の長期評価について，2005. 1. 12。