

「第6編 係留施設」関係

資料6.1 地震動及び設計水平震度の算定方法

本資料では、地震動及び設計水平震度の算定方法について種々の知見を示す。本資料は、「第6編 係留施設」、「第2編第11章 地震力」及び「第2編第12章 液状化」の記述を補完するものである。レベル2地震動を主な対象としているが、発生頻度の高い津波を引き起こす地震による地震動に対しても準用できる。なお、精度の異なる複数種の方法を記載しているので留意されたい。

1. 地域防災計画等にすでに示されている地震動の使用

地域防災計画は、都道府県及び市町村における防災計画である。防災基本法に基づき都道府県防災会議及び市町村防災会議によって作成される。震災対策編をはじめ災害の種別に編が設けられ、各編においては対応の時間に沿って「予防対策」「応急対策」「復旧対策」に分けられた記述がなされている。地域防災計画では想定地震が定められていることがある。想定地震についての記述の程度は自治体によって異なっている。地震の震源と規模のみを提示している場合もあるが、場所別に来襲する想定地震動についても提示している場合もある。

また、国や研究機関によって想定地震やその地震動波形の提示がなされていて性能照査に用いることができる場合がある。

各地に来襲する想定地震動については、提示されているデータの内容に注意するのがよい。すなわち、データの種類（最大加速度のようなパラメータのみか、地震動波形か）と、それがどの深度についての値か（工学的基盤か、地震基盤か、それ以外か）に注意する。データの内容次第で、漁港の施設に適用する際の計算方法が変わってくる。

また、地震動の算定方法並びに、地震動やそのパラメータがどのくらいの地理的範囲を対象として与えられているか（たとえば地図上のメッシュ間隔）に注意するのがよい。すなわち、厳密ではない方法で求められた地震動を用いて、漁港の施設の厳密な応答計算を行っても、それにより得られる結果は厳密とは言えないことに注意する。

また、工学的基盤や地震基盤について、文献によっては、本書に示した定義とは若干異なる定義が与えられていることも有るので注意するのがよい。定義の違いが小さい場合は同一と見なしてよいこともあるが、違いが大きい場合には補正の計算を検討するのがよい。

2. 工学的基盤の地震動波形の設定方法（モデル波形を振幅調整する方法）

本項では、地域防災計画において工学的基盤における地震動波形が提示されていない場合や、地域防災計画で定められた想定地震がない場合について、工学的基盤の地震動波形を算出する方法を述べる。

まず、施設を建設する地点（以下A地点と称す）の工学的基盤における最大加速度を、断層面からA地点までの距離とマグニチュードにより数式を用いて求める。この数式で得られるのはA地点の工学的基盤の最大加速度のみである。

次に、あらかじめ与えられたモデル波形を、数式で得られたA地点の工学的基盤の最大加速度になるよう、振幅調整する。

この方法による工学的基盤の地震動波形の算定法は、図 6-1-1 及び下記 (1) ～ (3) によることができる。

本項の方法で得られる時系列波形及びそのフーリエスペクトルには、サイト特性は反映されない。

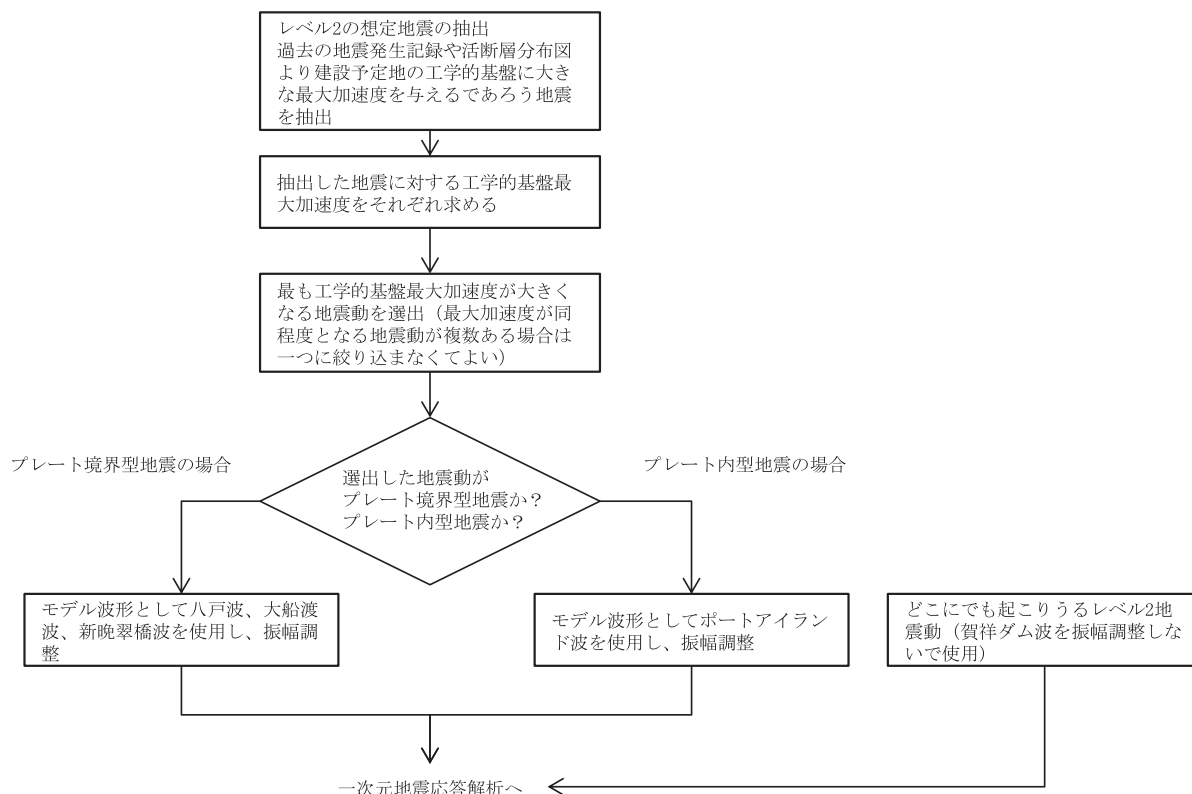


図 6-1-1 モデル波形を振幅調整することによる工学的基盤の地震動波形の算定方法

(1) 性能照査に使用する地震の設定

次の 2 つの地震の中から工学的基盤最大加速度が最も大きくなる地震を選定し、それを性能照査に使用する地震とする。

① 地震記録の残っている大規模な地震

歴史地震記録は、書物や論文等¹⁾²⁾³⁾⁴⁾を参考にし、その記録より地震の規模（マグニチュード）と断層面距離を求める。

ただし、1884 年以前に発生した地震のうち、震央位置等の断層パラメータの信頼性が劣る地震については除外する。

工学的基盤最大加速度は、式 6-1-1 から求めることができる⁵⁾。

$$\log_{10}(\alpha_{SMAC}) = 0.53M - \log_{10}(X + 0.0062 \cdot 10^{0.53M}) - 0.00169X + 0.524$$

…………… (式 6-1-1)

ここに、

α_{SMAC} ：設計水平震度算出用の工学的基盤最大加速度（Gal [cm/s²]）

M：マグニチュード

X：断層面距離（km）

この式で算出される工学的基盤最大加速度は、SMAC 型強震計で観測される値に相当する。そのため、モデル波形を振幅調整して設計水平震度を求める場合にはこの式を用いる。(モデル波形を振幅調整して二次元地震応答解析を行う場合は式 6-1-7 を用いる。)

図 6-1-2 に、式 6-1-1 から求まる断層面距離と工学的基盤最大加速度の関係を示す。

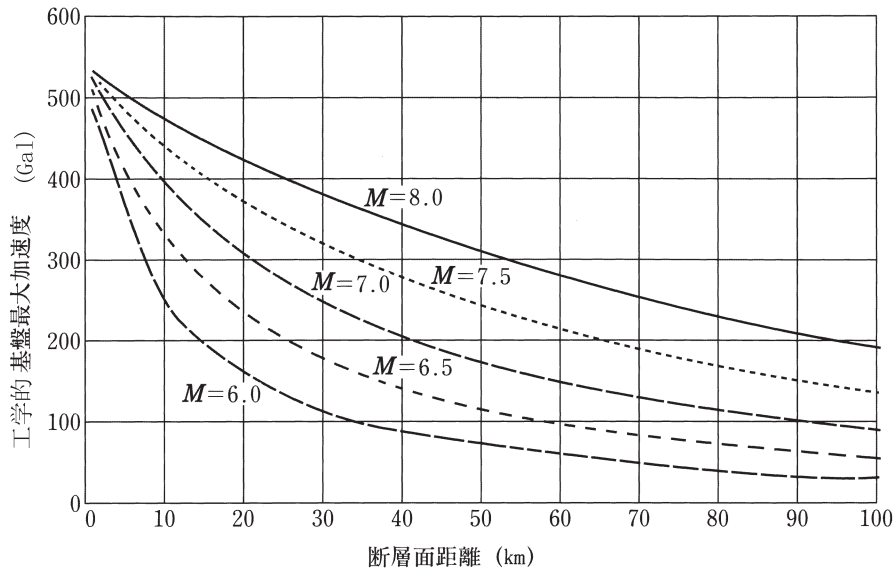


図 6-1-2 断層面距離と工学的基盤最大加速度の関係

② 対象とする施設周辺の、地震発生の記録が残っていない「確実度Ⅰの活断層」を震源とする地震

内陸活断層は、文献等 67)を参考にし、地表面活断層の長さや断層面距離を求める。求められた地表面活断層の長さから式 6-1-2 を用いてマグニチュードを推定することができる 8)。

ただし、複数の活断層が近接して存在し、全体として活断層を形成している場合に注意する。

この場合は、活断層全体が同時に活動して地震を引き起こすことが多いので、マグニチュードの推定に用いる活断層の長さには、活断層全体の長さを用いる必要がある。活断層を一つの活断層帯として見るかの判断は、それからの相互間隔が 5km 以内であるかどうかを目安とすることができる 9)。

$$M = \frac{\{\log_{10}(L_f) + 2.9\}}{0.6} \dots\dots\dots (式 6-1-2)$$

ここに、

M：マグニチュード

L_f：地表面活断層の長さ (km)

工学的基盤最大加速度は、①と同様に断層面距離とマグニチュードより式 6-1-1 から求めることができる。

実際に工学的基盤最大加速度を求める際には、書物や論文等を参考に算出するか、若しくは耐震性能の照査に使用する入力地震動を設定するプログラムを用いて算出することができる 10)。

(2) 地震波形

上記で求めた工学的基盤最大加速度になるように、下記の地震動波形を振幅調整する。

地震動波形は、性能照査に用いる地震が、「プレート境界型地震（海洋型地震）」であるか「プレート内型地震（内陸型地震）」であるかを判断し、それぞれの地震に対応した波形を用いる。ここで、プレート境界型地震とプレート内型地震の判断は、先に示した書物や論文及び日本周辺プレートの位置などから総合的に判断し決定する。

① 対象となる地震がプレート境界型地震の場合

表 6-1-1 に示した過去の代表的なプレート境界型地震の波形を用いる。

図 6-1-3 に波形を示す。

② 対象となる地震がプレート内型地震の場合

表 6-1-2 に示した過去の代表的なプレート内型地震の波形を用いる。

図 6-1-4 に波形を示す。

表 6-1-1 プレート境界型地震の地震動波形

No.	記録番号成分	観測地点	発生年月日	地震名	マグニチュード
1	S-252 NS基盤	八戸港	1968. 5. 16	十勝沖地震	7. 9
2	S-1210 E41S	大船渡港	1978. 6. 12	宮城県沖地震	7. 4
3	新晩翠橋周辺地盤上 NS成分	新晩翠橋	2011. 3. 11	東北地方太平洋沖地震	9. 0

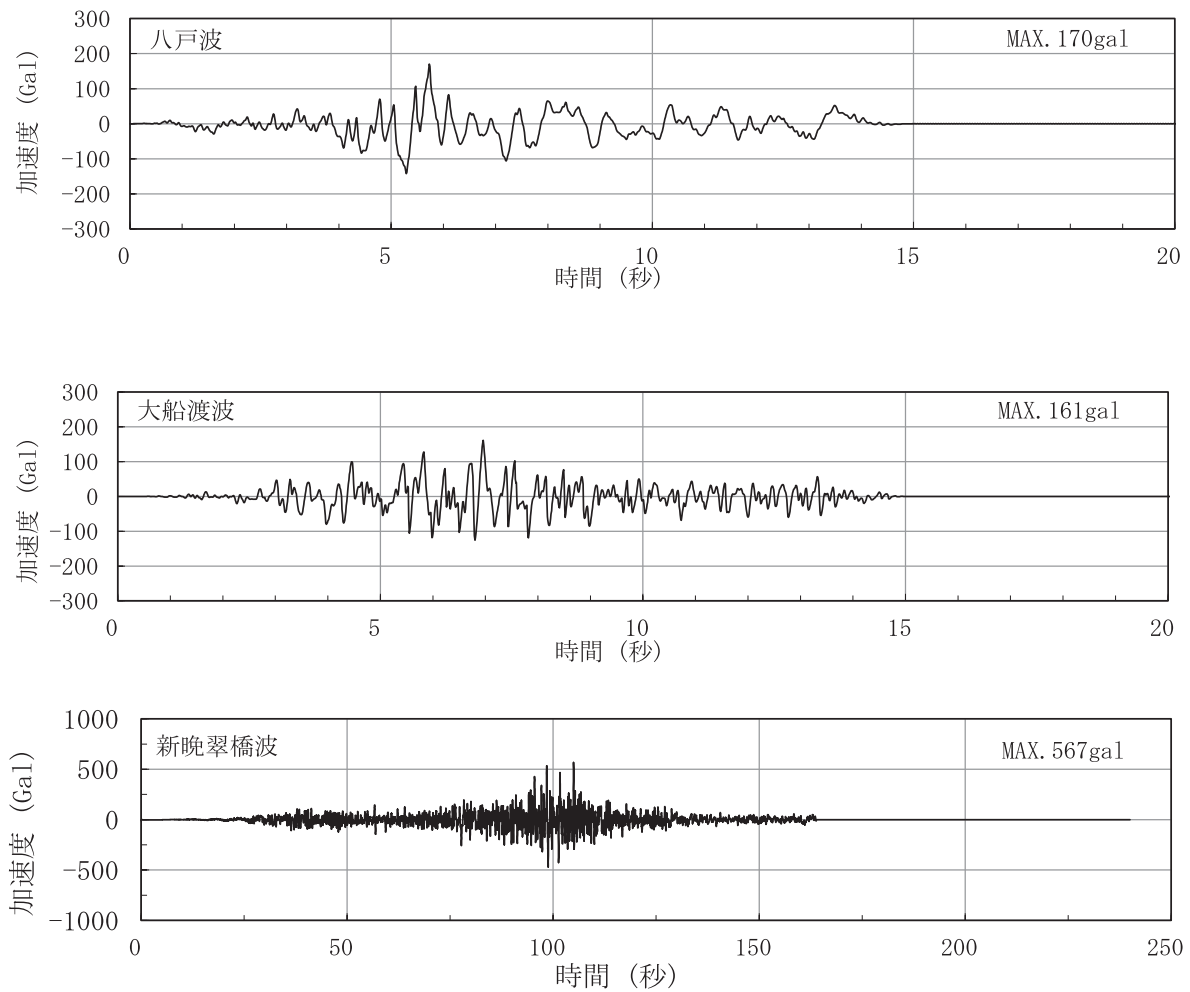


図 6-1-3 プレート境界型地震の地震動波形

表 6-1-2 プレート内型地震の地震動波形

No.	記録番号成分	観測地点	発生年月日	地 震 名	マグニチュード
1	ポートアイランド 基盤波形 NS	ポートア イランド	1995.1.17	兵庫県南部地震	7.2

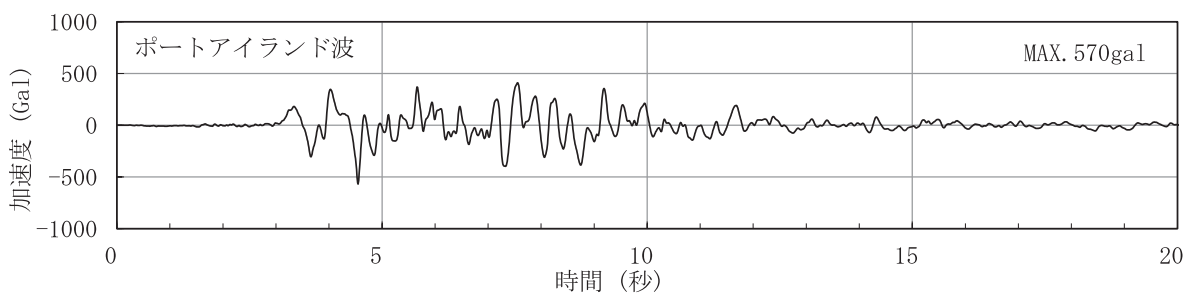


図 6-1-4 プレート内型地震の地震動波形

ここに示した 4 つのモデル波形は、いずれも、一次元地震応答解析と式 6・1・6 により設計水平震度を算定することを想定し、SMAC 型強震計の観測記録に基づくものか、感度の高い地震計で観測された波形を SMAC フィルター処理した波形に基づくものを掲載している。

(3) レベル 2 地震動の算出例

モデル波形を振幅調整する方法によりレベル 2 地震動の算出を行った例を、表 6・1・3 に示す。ここでは、北海道の福島漁港を例として挙げている。ここで用いた歴史地震データのうち、1885 年から 1980 年までの地震は、文献¹²⁾に掲載されたマグニチュード 6 以上の地震及びマグニチュード 6 未満の被害地震であり、これらの地震は仮に 1~1723 の番号がつけられている。1981 年から 1995 年 5 月までの地震は、文献³⁾に掲載されたマグニチュード 5.6 以上のものであり、これらには 1724~2279 の番号がつけられている。1884 年以前の歴史地震については、文献⁴⁾から引いており、これらには 2280~2495 の番号がつけられている。一方、活断層マップから予測した地震には、2496~3277 の番号がつけられている。

以上の全ての地震に対して福島漁港の工学的基盤における最大加速度を計算し、上位 20 位のみを示したのが表 6・1・3 である。表には、地震の発生年月日（歴史地震の場合）、震源の東経、北緯、深さ、マグニチュードそして工学的基盤最大加速度が示されている。表 6・1・3 から判断すると、当該漁港では活断層による地震が最も大きく、これを性能照査に用いることが妥当であると考えられる。

図 6・1・5 に、福島漁港に最も大きな工学的基盤最大加速度を与えると判断された活断層の位置を示す。この図から判断すると対象となった活断層は、図 6・1・6 に示したプレート境界より十分離れているため、プレート内地震であることがわかる。したがって、地震動波形としてはポートアイランド基盤波形を用いることが適切であると判断される。

表 6-1-3 レベル 2 地震動の算出例（北海道福島漁港、東経 140.26 度、北緯 41.48 度）

地震番号	発生年	発生月	発生日	震源の東経 (度)	震源の北緯 (度)	震源の深さ (km)	マグニチュード	工学的基盤最 大加速度 (Gal)
3264	—	—	—	140.34	41.38	—	6.6	308
3255	—	—	—	140.29	41.35	—	6.7	306
3251	—	—	—	139.82	41.43	—	7.4	285
3256	—	—	—	140.15	41.25	—	6.5	251
3253	—	—	—	139.64	41.54	—	7.5	233
2509	—	—	—	140.58	41.73	—	7.1	224
2408	1766	3	8	140.5—	40.70	—	7.5	218
3250	—	—	—	139.88	41.42	—	6.8	217
2197	1993	7	12	139.20	42.78	34.0	7.8	213
3257	—	—	—	140.02	41.28	—	6.7	203
1804	1983	5	26	139.08	40.35	14.0	7.7	185
3187	—	—	—	141.50	40.93	—	8.0	175
2427	1793	2	8	139.95	40.85	—	7.1	173
3259	—	—	—	139.62	41.25	—	7.0	150
3260	—	—	—	139.58	41.30	—	7.0	148
2398	1741	8	28	139.40	41.60	—	6.9	143
3252	—	—	—	139.61	41.96	—	7.2	140
3258	—	—	—	139.96	41.07	—	6.5	131
1810	1983	6	21	139.00	41.26	6.0	7.1	122
2374	1704	5	27	140.00	40.40	—	7.3	119

注 1) 地震番号は、① 1～2279は、1885年から1995年 5 月までの歴史地震

②2280～2495は、1884年以前の歴史地震

③2496～3277は、活断層マップから予測した地震

注 2) 活断層マップから予測した地震については、発生年月日は空欄となっている

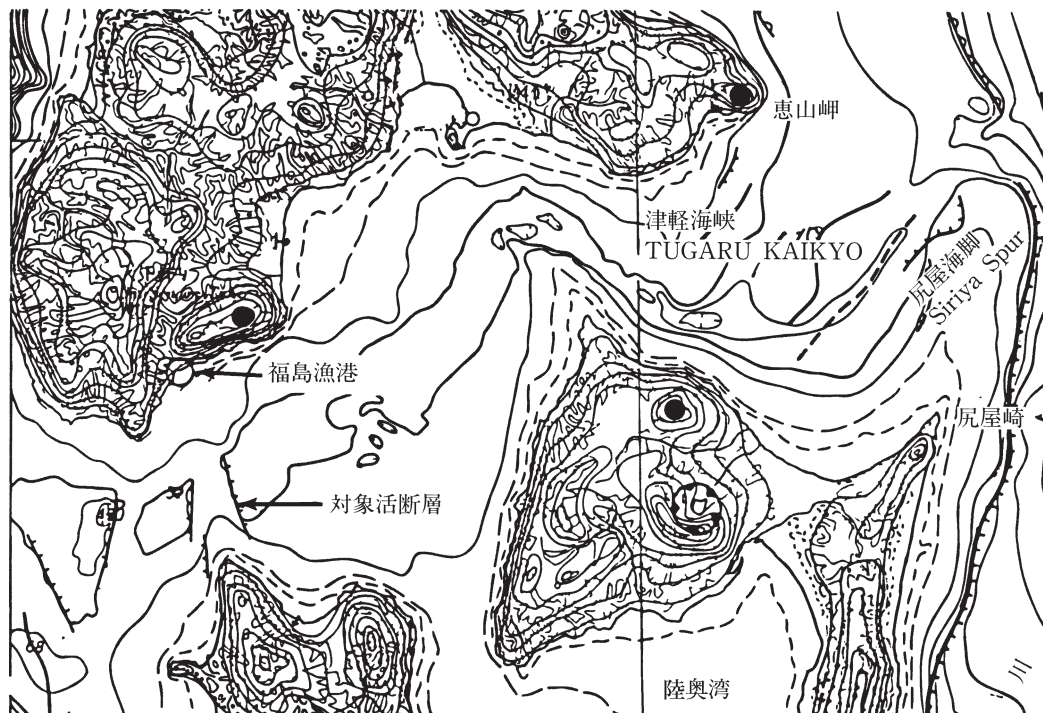


図 6-1-5 福島漁港周辺の活断層の位置 ¹¹⁾

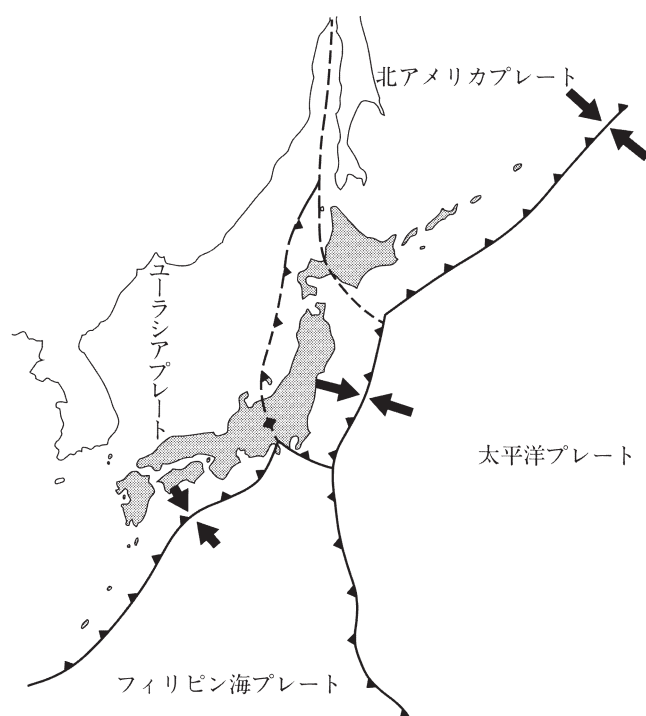


図 6-1-6 プレート境界

3. 工学的基盤や地表の地震動波形の設定方法（震源特性・伝播経路特性・サイト特性を考慮する方法）

本項では、最近の震源特性・伝播経路特性・サイト特性を考慮した手法により、性能照査に用いる地震動の時刻歴波形（施設を建設する地点の工学的基盤あるいは地表における波形）やそのスペクトルを計算する手法について述べる。

震源特性は、想定した地震ごとに、巨視的震源パラメータ、微視的震源パラメータ及び、その他のパラメータを用いて表す。巨視的パラメータは地震を起こす断層の全体を表すパラメータであり、微視的震源パラメータは、震源をいくつかの細分化した領域の組み合わせと捉え、それぞれの領域の特性を表すパラメータである。過去の地震を再現する場合はその地震記録のパラメータに基づき算出する。政府等が設定している想定地震の場合はその特性値に基づき算出する。活断層で発生する地震を想定する場合は地質・地形・地理学的調査のデータに基づき算出する。海溝型地震の震源パラメータを適切に設定できるモデルとして、SPGA モデル¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾がある。SPGA モデルは、工学的な重要な周期帯における波形の特徴をよく再現できることに特徴がある。

震源から地震基盤までの伝播経路特性は、地域別のパラメータを使用して計算できる。ここで地震基盤とは、S 波速度が 3,000m/s となる面のことであり、工学的基盤よりも深部に位置する。地震基盤より深い部分の地震動の伝播は、地域ごとにほぼ同じと考えられるので、地域別のパラメータを使用して計算できる¹⁵⁾。一方、地震基盤より浅い部分については、地点による地層の堆積状態を反映して、地点によって大きく異なる伝わり方をする。そのため、地震基盤より浅い部分における伝わり方の特性をサイト特性として別途扱う¹⁶⁾¹⁷⁾。

サイト特性は、漁港ごと、あるいは漁港を細分化したエリアごとに求めるのがよい。サイト特性はサイト増幅特性とサイト位相特性から成る。サイト増幅特性は、地震観測、常時微動観測、回帰式のいずれかによって算出できる。¹⁸⁾また、位相については、サイト位相特性を求めるより、むしろ、実際に観測された地震波形のうち適切な波形の位相（すなわち、震源特性と伝播経路特性とサイト特性の影響がすべて含まれた位相）を用いることが一般的である¹⁹⁾。

なお、サイト特性には地震基盤～地表と地震基盤～工学的基盤の 2 種類の定義が有るので注意を要す。

本項の方法で作成された工学的基盤の地震動波形は、地盤・構造物系を適切にモデル化した二次元地震応答解析の入力波形として、動的な変形照査や応力照査のために用いることができる。

4. どこにでも起こりうる地震動の検討

過去に顕著な地震記録が無く、近くに活断層が発見されていない地域においても、発見されていない未知の活断層による地震が起こりうる。レベル 2 地震動に対する耐震性能の照査では、このようなどこにでも起こりうる直下地震についても照査を行うことを原則とする。

この、どこにでも起こりうる直下地震としては、マグニチュード 6.5 程度の直下地震について、震源特性・伝播経路特性・サイト特性を考慮した計算により地震動を設定することが望ましい。しかし震源特性の設定、計算等に困難がある場合は、我が国においてどの地域であってもレベル 2 地震動として最低限考慮すべき強さの地震動として、表 6-1-4 及び図 6-1-7 に示す賀祥ダムの波形を用いてもよい。この波形は、地震のマグニチュードは 6.5 よりも大きめであるが、ダム地点というサイト増幅特性の非常に小さな場所で観測された波形であるため、沿岸域にマグニチュード 6.5 の地震が来襲した時の工学的基盤の地震動波形に相当するものとして示している。

この波形には観測地点（賀祥ダム）のサイト特性が反映されていることから、各地の漁港に適用するには厳密にはサイト特性の置換を要する。しかし、サイト特性の置換をしなくとも、全国各地の漁港の最低限考慮すべきレベル2地震動の工学的基盤の地震動波形として照査に用いることは妥当と考えられる（これは、賀祥ダムの波形のスペクトルからの判断による）。

賀祥ダムの波形は、振幅調整無しでそのまま工学的基盤の波形として利用することを基本とする。

表 6-1-4 どこにでも起こりうる直下地震による地震動波形

No.	成分	観測地点	発生年月日	地震名	マグニチュード
1	基礎部 上下流方向成分	賀祥ダム	2000. 10. 6	鳥取県西部地震	7.3

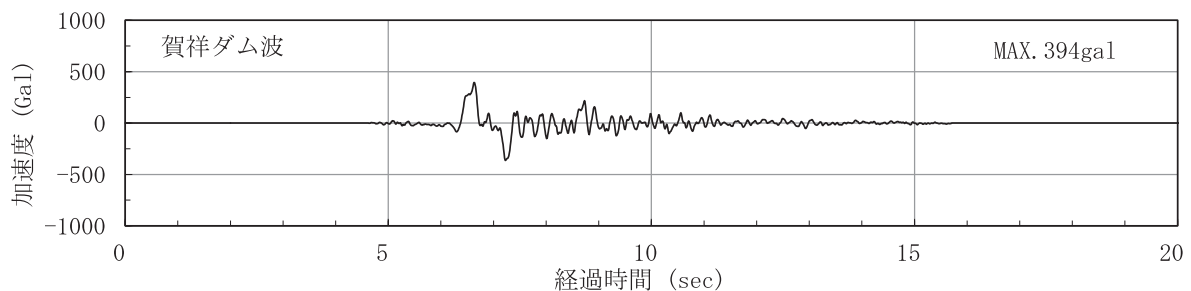


図 6-1-7 どこにでも起こりうる直下地震による地震動波形

図 6-1-7 には、SMAC 型地震計での観測記録に相当する波形を掲載している。SMAC フィルター処理した波形は、一次元地震応答解析と式 6-1-6 により設計水平震度を算定するのに使用することができる。（一方、二次元地震応答解析をする際の工学的基盤入射波として使用する波形は、「9. 二次元地震応答解析における工学的基盤の地震動波形の留意点」に示す。）

5. 工学的基盤における地震動波形の求め方

工学的基盤より上部の地盤及び係船岸をモデル化した二次元地震応答解析や、6 編 2 章に示す方法で照査用震度を求める場合、工学的基盤における地震動波形が必要となる。工学的基盤の地震動波形を求めるには次の方法のいずれかを用いることができる。

- すでに地表面の波形がわかっている場合、その波形を一次元地震応答解析コードによって工学的基盤へ引き戻す。その際、ボーリングデータ等に基づき工学的基盤～地表の地盤条件を適切に設定する。（引き戻しのできる一次元地震応答解析コードとして **SHAKE**、**DYNEQ** 等がある。一般に、引き戻し対象の地表面波形の中に含まれる、工学的基盤～地表間の伝達特性が線形（あるいは、そう見なせる）の場合は、線形計算で引き戻しを行う。一方、引き戻し対象の地表面波形の中に含まれる、工学的基盤～地表の地震動の伝達特性が非線形（あるいは、そう見なせる）の場合は、等価線形計算で引き戻すのが理論的に妥当ではあるが、

等価線形計算での引き戻しは、非線形性が強い場合に高周波域の増幅が実現象と大きく異なる結果を示すことがあるので注意を要する。）

- ・ 当該地点の「地震基盤～工学的基盤」のサイト特性がすでに分かっているならば、震源モデルを用いて地震動を計算する際や、サイト特性の置き換え計算をする際に、「地震基盤～地表」のサイト特性の代わりに「地震基盤～工学的基盤」のサイト特性を使用して計算する。

6. 工学的基盤より浅い範囲の一次元地震応答解析

工学的基盤～地表の間をモデル化して地表面の地震動波形を算出する方法は、以下の①～⑤に示す一次元地震応答解析（重複反射法）によることができる。一次元地震応答解析（重複反射法）に必要な土質定数としては、層厚 H 、単位体積重量 γ_t 、初期せん断弾性係数 G_0 、せん断波速度 V_s 、物性曲線 ($G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$) 等がある。

- ① 地盤の層分割は土質の変化に応じて行う。この場合、同じ土質でもせん断波速度が大きく異なる部分では別な層と見なす。均質な土層が厚く堆積している場合には、地表面から厚さ 10m 以浅の範囲では 1 層の厚さを 2m 以内、それ以深では 2.5m 程度に分割することができる。
- ② 単位体積重量 γ_t に関しては、土質試験結果などから求める。ただし、表 6-1-5 に示す値を使用することもできる。

表 6-1-5 単位体積重量の標準的な値

土質等の種類	湿潤単位体積重量： γ_t	水中単位体積重量： γ'_t
粘性土	14.7kN/m ³ （含水比60%以上） 16.7kN/m ³ （含水比60%未満）	4.9kN/m ³ 6.9kN/m ³
砂質土	17.7kN/m ³ （地下水以上） 19.6kN/m ³ （地下水以深）	— 9.8kN/m ³
捨石裏込め	19.6kN/m ³	9.8kN/m ³
砂礫	19.6kN/m ³	9.8kN/m ³
岩盤	21.6kN/m ³	11.8kN/m ³
ケーソン	20.6kN/m ³	10.8kN/m ³

- ③ 初期せん断弾性係数

G_0 は、せん断波速度 V_s を用いて式 6-1-3 より算定できる。

$$G_0 = \gamma_t \cdot V_s^2 \text{ (kN/m}^2\text{)} \dots\dots\dots \text{(式 6-1-3)}$$

なお、せん断波速度 V_s に関しては、PS 検層から求めた値を用いる。ただし、PS 検層の結果がない場合には、式 6-1-4 を用いて V_s を推定することもできる²⁰⁾。

$$\left. \begin{aligned} V_s &= 89.8N^{0.341} \text{ (m/s)} \\ V_s &= 20.44q_u^{0.417} \text{ (m/s)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots \text{(式 6-1-4)}$$

- ④ 動的変形特性 ($G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 関係) は、動的変形試験 (地盤工学会基準 JGS T-542、JGS T-543) より求める。ただし、動的変形試験結果がない場合には、次のように決定することもできる。

a) $G/G_0 \sim \gamma$ は式 6-1-5 を用いる²¹⁾。

$$G/G_0 = A(I_p, \gamma) \sigma'_m{}^{n(I_p, \gamma)} \dots\dots\dots \text{(式 6-1-5)}$$

ここに

σ'_m : 平均有効応力

$A(I_p, \gamma)$ 、 $n(I_p, \gamma)$: 表 6-1-6 に示される I_p 、 γ をパラメータとする値

G : セン断弾性係数

I_p : 塑性指数

γ : セン断ひずみ

b) $h \sim \gamma$ は、表 6-1-7 の値を採用する²²⁾。

表 6-1-6 代表ひずみレベルにおける $A(I_p, \gamma)$ 、 $n(I_p, \gamma)$ の値

せん断 ひずみ振幅 γ	塑性指数 I_p					
	N.P～9.4未満		9.4～30未満		30以上	
	$\overline{A}(I_p, \gamma)$	$\overline{n}(I_p, \gamma)$	$\overline{A}(I_p, \gamma)$	$\overline{n}(I_p, \gamma)$	$\overline{A}(I_p, \gamma)$	$\overline{n}(I_p, \gamma)$
10^{-6}	1	0	1	0	1	0
10^{-5}	0.93	0.01	0.96	0	0.97	0
$5 \cdot 10^{-5}$	0.83	0.03	0.91	0.01	0.93	0
10^{-4}	0.75	0.05	0.84	0.02	0.89	0
$2.5 \cdot 10^{-4}$	0.56	0.10	0.74	0.05	0.82	0
$5 \cdot 10^{-4}$	0.43	0.16	0.59	0.09	0.70	0
10^{-3}	0.30	0.22	0.45	0.16	0.58	0
$2.5 \cdot 10^{-3}$	0.15	0.30	0.26	0.22	0.42	0
$5 \cdot 10^{-3}$	—	—	0.12	0.26	0.28	0
10^{-2}	—	—	—	—	0.18	0

N.P : 液・塑性限界試験において液性限界や塑性限界が求められない
あるいは液性限界と塑性限界に有意な差がない土 (Non-Plastic)

表 6-1-7 代表ひずみレベルにおけるhの値

せん断 ひずみ振幅 γ	塑性指数 $I_p < 30$			塑性指数 $I_p \geq 30$		
	減衰定数 h			減衰定数 h		
	平均	最大	最小	平均	最大	最小
10^{-6}	0.026	0.040	0.016	0.025	0.050	0.010
10^{-5}	0.030	0.040	0.018	0.030	0.054	0.010
$5 \cdot 10^{-5}$	0.033	0.042	0.020	0.034	0.062	0.014
10^{-4}	0.037	0.048	0.026	0.038	0.070	0.018
$2.5 \cdot 10^{-4}$	0.055	0.068	0.040	0.050	0.088	0.030
$5 \cdot 10^{-4}$	0.080	0.098	0.060	0.066	0.108	0.042
10^{-3}	0.120	0.145	0.092	0.086	0.133	0.056
$2.5 \cdot 10^{-3}$	0.174	0.200	0.148	0.118	0.174	0.080
$5 \cdot 10^{-3}$	0.200	0.222	0.178	0.144	0.208	0.100
10^{-2}	0.220	0.240	0.200	0.175	—	0.125

⑤ 地震動を工学的基盤より入力する。

7. 地表面最大加速度と設計水平震度の関係

地表面最大加速度から設計水平震度を、式 6-1-6 により求めることができる²³⁾。

$$\left. \begin{aligned} k_h &= 1/3 (\alpha_{\max}/g)^{1/3} & (\alpha_{\max} > 200 \text{ Gal} [\text{cm/s}^2]) \\ k_h &= \alpha_{\max}/g & (\alpha_{\max} \leq 200 \text{ Gal} [\text{cm/s}^2]) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots \text{(式 6-1-6)}$$

ここに、

$\alpha_{\max}$: 地表面の最大水平加速度 (Gal [cm/s²])

g : 重力加速度 (980Gal [cm/s²])

k_h : 設計水平震度

式 6-1-6 の最大水平加速度は、SMAC 型強震計の観測記録に相当する波形の値を用いることを原則とする。SMAC 型ではなく近年の感度の良い地震計の観測記録に相当する波形を用いる場合や、震源モデルからの計算で作成された波形を用いる場合、波形に SMAC フィルターを掛けて使用する。

実際は、同じ最大加速度の地震動であっても、卓越する周波数が異なれば、漁港の施設に発生する変形量や応力度は変わる。しかし式 6-1-6 の方法は最大加速度のみから設計水平震度を導いているため周波数特性を考慮できない点に注意する。

8. 地震応答解析の分類

① 次元による分類

漁港の耐震性能の照査においては、主に、一次元と二次元の地震応答解析が用いられる。

二次元地震応答解析は、工学的基盤より浅い地層及びそこに建設された構造物の断面を再現して、地盤と構造物の相互作用を再現するために使用する。これにより、地層に生じる応力・ひずみ、構造物に生じる応力、変位を計算することができる。沿岸の構造物における適用実績が多く、特に港湾の岸壁には多くの実績がある解析コードとして FLIP がある。FLIP では応力とひずみ

の非線形関係を双曲線モデルで表し、過剰間隙水圧発生を井合モデルで表した二次元地震応答解析コードである。ただし **FLIP** を使用実績の無い形状や規模の構造物に適用する際は、実際の構造物の観測値と比較するなどして再現性の検証をすることが望ましい。

一方、一次元地震応答解析は、地表付近の地層中のせん断応力や応答加速度を求めるために利用される。解析コードとして **SHAKE**、**FDEL**、**DYNEQ**、**FLIP** 等がよく使用されている。上記のうち **SHAKE**、**FDEL**、**DYNEQ** は応力とひずみの関係を等価線形解析によって解く。すなわち、ひずみレベルに応じてせん断剛性と減衰定数を変化させて繰り返し計算を行い、せん断剛性と減衰定数の誤差が収束したらその時のせん断剛性と減衰定数を一貫して用いて線形解析を行う。**SHAKE**、**FDEL**、**DYNEQ** は、地盤挙動の非線形性（周波数に依存）の取り扱い方がそれぞれ異なっている。一方、**FLIP** は上述のとおり二次元地震応答解析コードだが、一次元地震応答解析も可能である。これらの解析コードに、工学的基盤より地震動を入力し、工学的基盤～地表面の間の任意点のせん断応力や応答加速度を計算する。

SHAKE、**FDEL**、**DYNEQ** では地表面の波形から工学的基盤の波形への引き戻し計算も可能である。観測や計算で地表面の地震動波形が得られているが二次元地震応答解析などのために工学的基盤の地震動波形が必要な場合に、この引き戻し計算を実施する。

② 間隙水圧の取り扱いの観点からの分類

地震応答解析は、間隙水圧の取り扱いの観点から、有効応力解析法に基づくものと全応力解析法に基づくものに分けることができる²⁴⁾²⁵⁾。

有効応力解析法は、土の液状化モデルを作成し、地震時における過剰間隙水圧の発生、消散を時々刻々計算し、有効応力の変化に応じて応力～ひずみ関係を変化させて地震応答解析を行うものである。したがって、有効応力解析自身が液状化の発生過程を忠実に再現できる。変形や応力の照査には一般に有効応力解析が使用される。解析コード **FLIP**²⁶⁾は有効応力解析法の一つである。**FLIP** は過剰間隙水圧発生モデルとして井合モデルを採用しており、累積塑性せん断仕事に基づき、液状化の進展に伴う過剰間隙水圧の上昇、有効応力の減少及びせん断剛性の低下等を評価する。

一方、全応力解析法では、計算過程において過剰間隙水圧が計算されないため、有効応力の変化による地震応答の変化が考慮できない。したがって、ある程度以上の過剰間隙水圧（有効応力比でおおむね 0.5 以上）が発生する場合には、全応力解析法による計算結果は実際の地震応答とかなり異なる可能性が大きい。しかし、設計水平震度の算出並びに液状化判定は、全応力解析が安全側の結果を出すため、全応力解析を用いることが多い。「第2編 12.2.3 繰返し三軸試験による判定」における地震時最大せん断応力比 L の算定には、全応力解析法が用いられる。解析コード **SHAKE** は、全応力解析法の一つである。

③ 計算領域の観点からの分類

地震応答解析は、計算領域の観点から、時間領域解析法と周波数領域解析法に分類できる²⁷⁾²⁸⁾。

地盤を対象とした時間領域解析法では、短い時間間隔ごとに応力～ひずみ関係の再設定を行って、時系列に沿った解析を進めていく。有効応力解析法あるいは材料特性を非線形として扱う計算は、時間領域で行われるのが一般的である。解析コード **FLIP** は時間領域解析である。

一方、周波数領域解析法の場合、各層間の伝達関数を用意したうえで、地震動の時系列波形を

周波数領域に変換（フーリエ変換）し、各層間の伝達関数に地震動波形のフーリエ変換したものを乗じて、求める層のフーリエスペクトルを得る。このフーリエスペクトルをフーリエ逆変換して、時間領域での地震動波形を得る。周波数領域解析法（SHAKE 等）の場合、地盤を水平成層よりなるものとし、その各層はせん断弾性定数及び減衰定数、単位体積重量、層厚により規定されるものとしている。それらの諸定数を用い、一次元波動方程式にしたがって、各層間の伝達関数を求めている。また、各層の応答は、鉛直方向に伝播するせん断波のみにより励起されるものとしている。

周波数領域解析を行う際の時間領域から周波数領域へ、あるいはその逆の変換には、一般的に高速フーリエ変換(FFT) が用いられる。

周波数領域解析法では、地表の地震動波形から工学的基盤の地震動波形を逆推定することができる。一方、時間領域解析法では一般にそのような逆推定は不可能である。

9. 二次元地震応答解析における工学的基盤の地震動波形の留意点

二次元地震応答解析の際に用いる工学的基盤の地震動波形は、感度の良い地震計での観測記録に相当する波形を用いることを原則とする。

そのため、SMAC 型強震計の観測波形に相当する波形しか無い場合は、感度の良い地震計での観測記録に相当する波形へ換算（SMAC フィルターの逆の演算）して用いる。

本来、漁港の施設の耐震性能を照査（変形、応力など）するために二次元地震応答解析を行う際の工学的基盤波形は、震源特性、伝播経路特性、サイト特性を考慮したものをを用いることが望ましい。ただし、諸般の事情でそのような波形を用意できない場合は、モデル波形を振幅調整したものをを用いることができる。

このとき、モデル波形として、「2. 工学的基盤の地震動波形の設定方法（モデル波形を振幅調整する方法）」及び「4. どこにでも起こりうる地震動の検討」に示した、旧型の地震計（SMAC 型）での観測記録に基づく波形ではなく、高感度の地震計（ERS 型等）による観測記録に基づく波形を用いる。

図 6-1-8 に、二次元地震応答解析を行う際に用いる、高感度の地震計による観測記録に基づくモデル波形を示す。（高感度の地震計が用いられていなかった時代の観測記録については、SMAC 型と高感度の地震計との周波数特性の違いを補正して求めた波形を示す。）これらのモデル波形は「補正波」と呼ばれることがある。これらのモデル波形を、想定される工学的基盤最大加速度に振幅調整して、二次元地震応答解析の際の工学的基盤波形として使用する。ただし賀祥ダム波は我が国のどの地点においても最低限考慮すべきレベル 2 地震動波形という位置づけであるから振幅調整しないで用いることを基本とする。新晩翠橋波は文献²⁹⁾による。

二次元地震応答解析のための工学的基盤最大加速度を求める場合、式 6-1-1 ではなく、次の式を用いる。

$$\log_{10}(\alpha_{COR}) = 0.55M - \log_{10}(X + 0.0050 \cdot 10^{0.55M}) - 0.00122X + 0.502$$

…………… (式 6-1-7)

ここに、

α_{COR} ：二次元地震応答解析を行う際に用いる工学的基盤最大加速度（Gal）

M：マグニチュード

X：断層面距離（km）

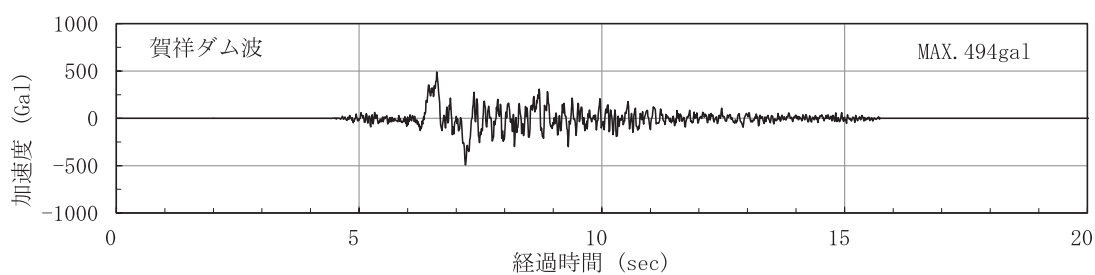
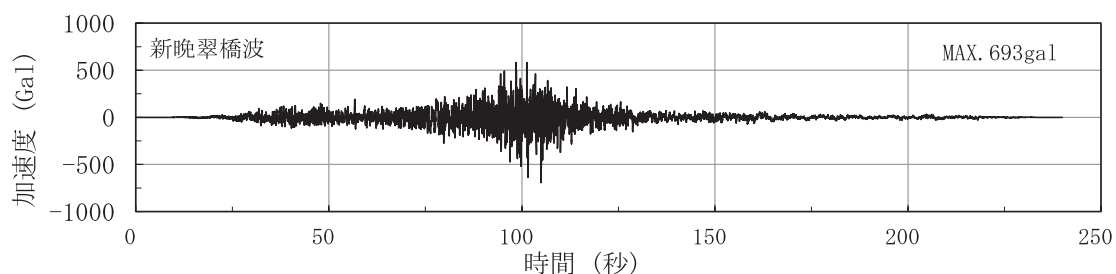
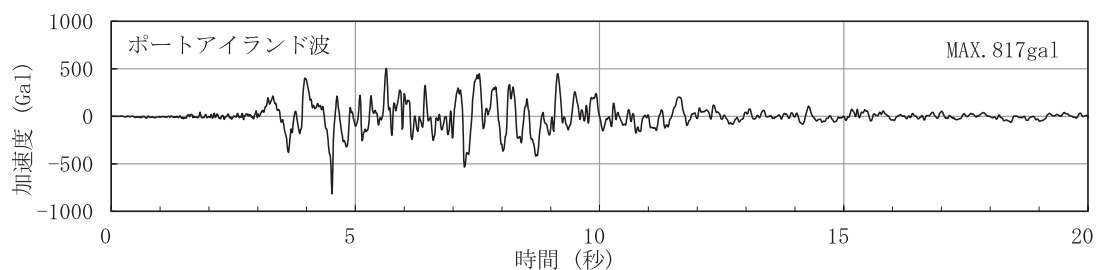
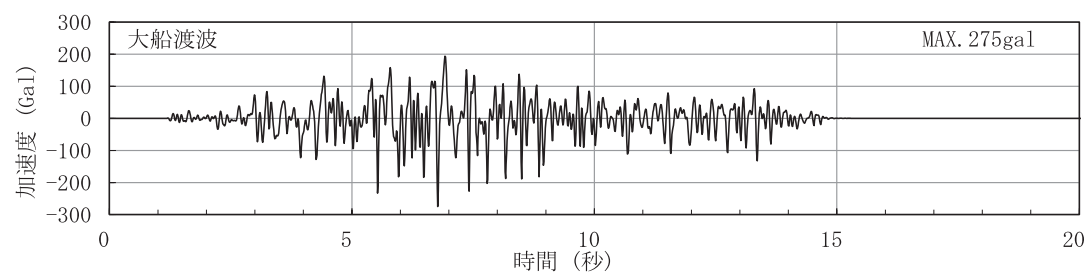
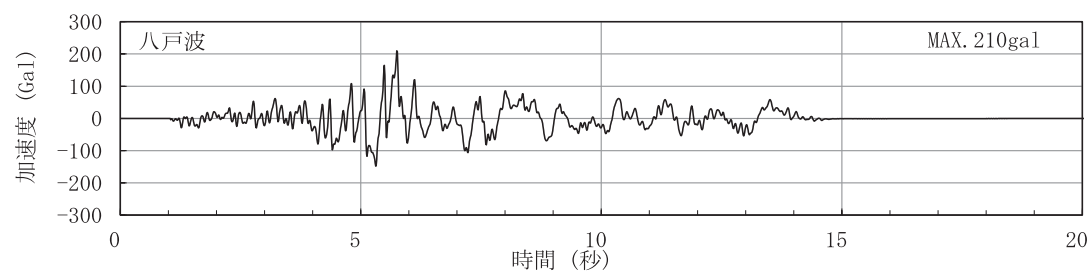


図 6-1-8 二次元地震応答解析に用いるモデル波形

10. 工学的基盤の設定

工学的基盤は、せん断波速度が $V_s=300\text{m/s}$ 以上が連続する層に設定する。実態を的確に再現するには、なるべく、せん断波速度 300m/s 以上に相当する地層を工学的基盤として計算することが望ましい。

ただし、せん断波速度が得られていない場合には、砂質土層の場合、 N 値が 50 以上が連続すること、粘性土層の場合、一軸圧縮強度 q_u が 650kN/m^2 以上が連続することを目安とすることができる。実務上すべてのボーリング孔において工学的基盤層まで調査することができない場合は、代表的な地点において詳細な調査・試験を実施することにより、地震応答解析に必要なデータを確保する³⁰⁾。

11. 本資料で使用した用語の補足説明

① 活断層

活断層という言葉は狭義には内陸活性層を示すが、ここでの活断層は海底の活断層も含む広義の活断層のことである。したがって、太平洋プレートやフィリピン海プレートが日本列島の下に沈み込むプレート境界で、大陸プレートの先端部が海洋プレートの沈み込みに伴って生じるひずみの弾性的反発により繰り返し巨大地震が発生しており、これら巨大地震の発生源であるプレート境界も活断層に含めて考える。

図 6-1-7 に示すプレート境界付近で発生する地震を境界型地震（海洋型地震）、プレート内で発生する地震をプレート内型地震（内陸型地震）とする。

② 確実度

活断層の存在の確かさを示したものである。確実度Ⅰは活断層であることが確実なもの、確実度Ⅱは活断層と推定されるもの、確実度Ⅲは活断層の可能性のあるものである。

③ 断层面距離

断层面までの最短距離をいう（図 6-1-9 参照）。

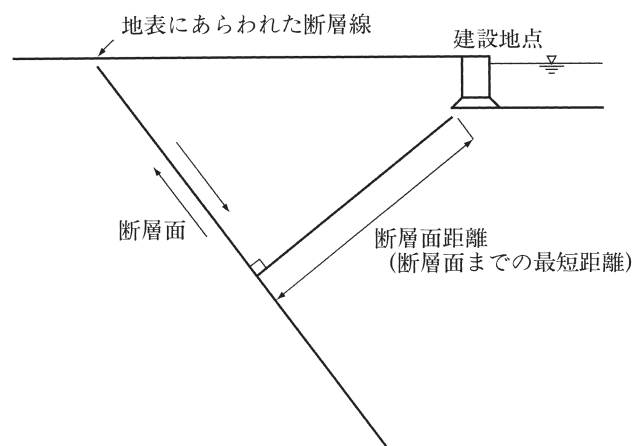


図 6-1-9 断层面距離

④ 重複反射モデル

地盤を水平成層構造としてモデル化し、その中を層境界で重複的に反射を繰り返しながら、鉛

直方向に一次元的に伝播する地震動を波動方程式に基づいて解析するものである。

⑤ 工学的基盤

ここでいう工学的基盤は岩盤、若しくはN値50以上の砂質土層、一軸圧縮強度 q_u が650kN/m²以上の粘性土層、あるいはせん断波速度 V_s が300m/s以上が連続する層をいう。

(参考文献)

- 1) 宇津徳治：日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表（1885～1980年），東京大学地震研究所彙報，Vol.57（1982），pp.401-463
- 2) 宇津徳治：日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表 1885～1980年（訂正と追加），東京大学地震研究所彙報，Vol.60（1985），pp.639-642
- 3) 気象庁：地震月報，<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/>
- 4) 宇佐見龍夫：新編日本被害地震総覧〔増補改訂版 416-1995〕，東京大学出版会（1996）
- 5) 野田節男・上部達夫・千葉忠樹：重力式岸壁の震度と地盤加速度，港湾技術研究所報告，第14巻，第4号（1975），pp.67-111
- 6) 活断層研究会編：新編日本の活断層分布図と資料，東京大学出版会（1996）
- 7) 九州活構造研究会編：九州の活構造，東京大学出版会（1989）
- 8) 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について，地震Ⅱ，No.28（1975），pp.269-283
- 9) 松田時彦：活断層，岩波新書（1995）
- 10) 野津厚・上部達夫・佐藤幸博・篠澤功：距離減衰式から推定した地盤加速度と設計震度の関係，港湾技研資料，No.893（1997）
- 11) 活断層研究会編：新編日本の活断層分布図と資料，東京大学出版会（1996）
- 12) 野津厚・山田雅行・長尾毅・入倉孝次郎：海溝型巨大地震における強震動パルスの生成とその生成域のスケーリング，日本地震工学会論文集，12-4（2012），pp.209-228
- 13) 野津厚・若井淳：強震動を対象とした2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル，港湾空港技術研究所報告，Vol.51，No.1（2012），pp.23-53
- 14) 野津厚・若井淳：南海トラフの地震（Mw9.0）を対象とした強震動評価へのSPGAモデルの適用，港湾空港技術研究所資料，No.1271（2013）
- 15) 例えば，野津厚・長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性，港湾空港技術研究所資料，No.1112（2005）
- 16) 秦吉弥・野口竜也・古川愛子・香川敬生：大規模地震を対象とした強震動評価におけるサイト増幅特性の評価の重要性，地盤工学会誌，Vol.62，No.1（2014），pp.12-15
- 17) 野津厚：地震動研究とのコラボレーションが地盤耐震工学の一層の発展をもたらす，地盤工学会誌，Vol.62，No.2（2014），pp.22-23
- 18) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会（2007），pp.339-1～340
- 19) 例えば，野津厚・若井淳：東日本大震災で被災した港湾における地震動特性，港湾空港技術研究所資料，No.1244（2011）
- 20) 今井常雄・麓秀夫・横田耕一郎：日本の地盤における弾性波速度と力学的性質，第4回日本地

震工学シンポジウム論文集（1975），pp.89-96

- 21) 沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版），沿岸開発技術研究センター（1997），pp. 66-68
- 22) 沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版），沿岸開発技術研究センター（1997），p.69
- 23) 野田節男・上部達生・千葉忠樹：重力式岸壁の震度と地盤加速度，港湾技術研究所報告，Vol.14，No.4（1975），pp.67-111
- 24) 沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版），沿岸開発技術研究センター（1997），pp.86-87
- 25) 土木学会：実務の先輩たちが書いた土木構造物の耐震設計入門，土木学会（2001），pp.92-93
- 26) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4（1990），pp.27-56
- 27) 沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版），沿岸開発技術研究センター（1997），p.93
- 28) 鹿島建設土木設計本部：耐震設計法／性能設計，鹿島出版会（2003），p.45
- 29) 日本道路協会：技術資料，<http://www.road.or.jp/dl/tech.html>
- 30) 沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版），沿岸開発技術研究センター（1997），pp.43-44