

港湾護岸等の耐震性検討マニュアル

(Version 1.0)

平成 26 年 3 月

国土交通省 中国地方整備局

目 次

序章 はじめに	1
第1章 港湾護岸等の被害想定の一必要性と本マニュアルの位置づけ.....	2
1. 1 東日本大震災における地震、津波等による被害状況.....	2
1. 1. 1 津波による被害	2
1. 1. 2 地震動、液状化による広域的な被害	2
1. 1. 3 地震動、液状化と津波による複合破壊	2
1. 2 港湾護岸等の被害想定を行う必要性について.....	3
1. 2. 1 液状化による港湾護岸等の変形、沈下への懸念	3
1. 2. 2 施設管理者が複数存在する臨海部での防災対策の必要性.....	3
1. 3 本マニュアルの概要	3
1. 3. 1 目 的	3
1. 3. 2 検討対象施設・範囲	3
1. 3. 3 外力条件	4
1. 3. 4 検討項目	4
1. 3. 5 対象者	4
1. 3. 6 マニュアルの構成	4
第2章 港湾護岸等の耐震性に関する検討.....	6
2. 1 検討条件の設定.....	8
2. 1. 1 検討対象施設・範囲の選定	8
2. 1. 2 対象地震動の設定.....	8
2. 1. 3 代表断面の設定.....	8
2. 2 地震による変形量予測.....	8
2. 2. 1 変形量予測手法の選定.....	8
2. 2. 2 簡易手法による変形量予測.....	8
2. 2. 3 詳細手法による変形量予測.....	9
2. 3 検討対象施設の地震変形による被害の想定	9
解説A 対象地震動の設定方法	10
解説B 代表断面の設定（ゾーニングの設定）	16
解説C 変形量予測手法の選定	18
解説D 簡易手法（チャート式耐震診断）による変形量予測	20

解説E 詳細手法（FLIP【地震応答解析】）による変形量予測	26
解説F 地震による被害の想定	30
参考1 サイト増幅特性について	32
参考2 最大クラス津波に先行する地震動のモデルの紹介	34
参考3 主な予測手法の概要（耐震性に関する検討）	38
参考4 チャート式耐震診断システムの精度向上の一例	40
参考5 港湾全体としての弱点部の評価の一例	46
用語集	49
『港湾護岸等の耐震性検討マニュアル』に関する問い合わせ・相談窓口	62
モデル港湾における耐震検討に関する事例集	別添資料
港湾護岸等の地震・津波災害検討に係る情報集	別添資料

序章 はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震及びこれに伴う津波は、東日本の太平洋側に暮らす人々の生活や企業の経済活動に深刻な影響を及ぼした。特に津波は、すさまじい破壊力をもって沿岸に押し寄せ、多くの尊い命を奪う未曾有の災害となり、多くの教訓を残した。

これを踏まえ、2012年6月に国土交通省交通政策審議会は、「四面を海に囲まれたわが国にとって、国民生活や産業活動の多くが臨海部に展開されており、このための物資の補給路となる港湾は、島国日本の生命線であり、港湾背後の人口や産業・物流機能を防護しつつ、こういった生命線を災害時においても維持していくことがわが国の命題である」ことから、港湾BCPに基づく港湾の災害対応力の強化による物流機能の早期回復や港湾施設の耐震性・耐津波性の確保等による「港湾における地震・津波対策のあり方～島国日本の生命線の維持に向けて～」(以下、「交通政策審議会答申」という)を国土交通大臣に答申したところである。

一方、国内有数の産業集積地として発展してきた中国地方には太平洋側の地域が甚大な被害を受けた際のバックアップ機能が期待されているものの、臨海部に展開する埋立地の港湾護岸等の倒壊や沈下、埋立地盤の液状化等の被災が懸念されている。国土交通省中国地方整備局は、「中国地方の港湾における地震・津波・高潮・液状化対策に係る検討会議」(座長：三浦房紀山口大学大学院教授)を2011年10月に設置し、モデル港湾における現状把握を行った。併せて、内閣府発表(2012年8月公表)の南海トラフで想定される巨大地震による最大クラスの津波を発生させる地震断層モデルの設定や検討手法を考慮しつつ、同地震が発生した場合における港湾護岸等の安全性の検討や想定される被害やその対応策について検討を進めてきた。

本マニュアルは、沿岸部の産業活動や港湾物流機能が、災害発生時においても維持できるよう、必要な対策を効果的に推進されることを目指すものである。そのためには、すべての施設管理者が構造物の現状把握や構造解析を行い、施設の安全性や対応策を検討する必要がある。そこで、施設管理者(実務担当者)が、精度や時間ならびにコスト等を勘案し、効率よく業務を進める際の技術的な支援になるよう、包括的にとりまとめたものである。

本マニュアルは、検討の流れを簡潔に取り纏めた『本文』により全体像を把握し、『解説』により各項目ごとの具体的な手順などが分かるように構成されている。

また、別冊の『事例集』は、港湾護岸等の耐震性検討を行った過程を取り纏めたもので、参考にすることにより検討作業を効率よく進めることが出来る。

さらに、別冊の『参考資料』は耐震性を検討した後、対策等を検討する際の参考となる情報を掲載している。

※当マニュアル内で「港湾護岸等」とは？

公共、民間所有を含めた「護岸」「岸壁」「防潮堤」など陸域を防護するために水際線等に設置されている構造物をいう。

第1章 港湾護岸等の被害想定の一貫性と本マニュアルの位置づけ

1. 1 東日本大震災における地震、津波等による被害状況

1. 1. 1 津波による被害

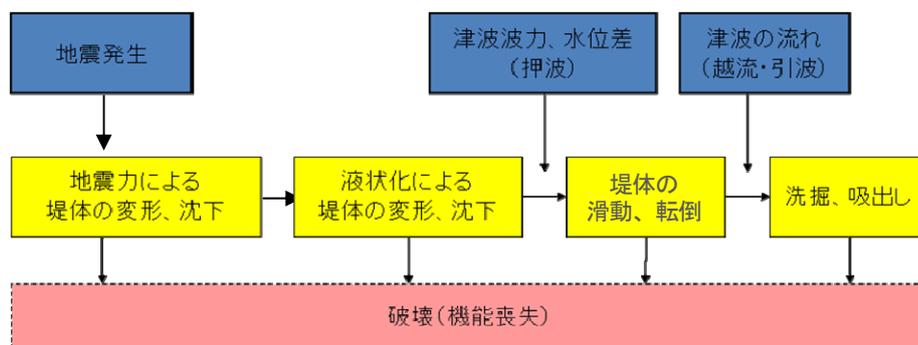
津波が港湾護岸等を越流し、押波によって港湾内で保管されていた木材、コンテナや、係留中の船舶等が市街地に流れ込むとともに、引波によって多くのガレキや車両、コンテナ等が航路・泊地に沈没し、船舶の航行に支障を与える例も多くみられた。さらに、ハザードマップで示された浸水域を超えて浸水した例も多くみられ、水門・陸閘等の閉鎖や避難誘導を行っていた方々が津波の犠牲となったほか、港湾で働く方々のなかにも津波到達時間までに避難場所に避難できなかった事例が確認された。

1. 1. 2 地震動、液状化による広域的な被害

青森県、岩手県内の港湾における被害の多くが津波を主因とするものであるのに対し、仙台湾より南に位置する港湾では、津波による被害に加え、地震動による護岸等の変位・破壊等の被害が顕著であった。また、地震動の継続時間が3分以上と非常に長かったことなどから、地盤の液状化による被害が拡大した。相馬港、小名浜港等では、施設背後が液状化や地殻変動により沈下し、岩手、宮城及び福島等の3県の港湾における沈下量は、平均で0.7m、最大で1.7mに及んだ。これにより、護岸の変位・破壊や背後の用地が陥没して段差が発生するとともに、満潮時等に護岸背後への浸水が発生した。また、震源から遠く離れた千葉港でも地震動により液化石油ガス（LPG）タンクが倒壊するなどの被害が発生するとともに、東京湾の臨海部の埋立地で液状化による地盤沈下が発生した。

1. 1. 3 地震動、液状化と津波による複合破壊

東日本沿岸域における港湾・海岸構造物は、以下に示すような先行する地震とその後襲してきた津波によって、複合的に破壊され機能を喪失した。



東日本大震災では、単独の要因(作用)または、幾つかの要因(作用)が複合的に関連したことにより破壊に至るケースが見られた。

図-1-1 地震動、液状化と津波による港湾・海岸構造物の複合破壊

【中国地方整備局作成】

1. 2 港湾護岸等の被害想定を行う必要性について

1. 2. 1 液状化による港湾護岸等の変形、沈下への懸念

内閣府公表の被害想定における瀬戸内海沿岸の津波高さは、約3～5mとなっている。一方、同地域は、干満の差が大きいこともあり高潮被害の発生地域でもある。このため高潮対策のために必要な護岸高さにより計画並びに整備が進められていることもあり、今般検討の津波高さと計画・現況の護岸高に大きな差がない地域が多い。しかしながら、同地域の臨海部は、高度経済成長期において瀬戸内工業地域として埋め立てられた地区が多く、地震に伴う液状化現象による沈下等が懸念される。つまり、産業機能が集積する臨海部（港湾）での地震動による護岸機能の低下（倒壊や液状化による沈下）が、背後の浸水被害等を拡大させ、それによる生産活動や物流機能の停止等により経済活動に大きな影響を及ぼす可能性がある。

1. 2. 2 施設管理者が複数存在する臨海部での防災対策の必要性

臨海部には、港湾管理者が管理する公共護岸等と民間事業者が管理する私有護岸等（以下、港湾護岸等と称する）が一連の海岸防護施設として機能している場合も多い。しかしながら、地方自治体等で立案する地域防災計画等においては、私有護岸等も含めた個々の構造物の安全性検討までは考慮されていない。

また、複数の施設管理者間での、想定される被害への認識の共有ならびに対応への連携が重要である。

1. 3 本マニュアルの概要

1. 3. 1 目的

本マニュアルは、港湾護岸等の施設管理者（実務担当者）が、大規模地震が発生した場合に現施設にどのような被害が発生するのか想定し、対応策の検討を行えるよう取りまとめたものである。

1. 3. 2 検討対象施設・範囲

護岸・岸壁・防潮堤等（民間所有を含む）及び背後地。

1. 3. 3 外力条件

海溝型地震（最大クラスの津波に先行する地震）を想定し、その地震によりもたらされる地震動を外力条件とする。

ただし、直下型地震などその他の地震を対象とした耐震検討にも、本マニュアルを適用することが出来る。

表-1-1 外力条件

要因	考慮すべき事項
地震動	・地殻変動（地盤沈下）による原地盤高さの変化 ・地震動および液状化による護岸・岸壁等及びその背後地盤の破壊・変状

【中国地方整備局作成】

1. 3. 4 検討項目

港湾護岸等の耐震性に関する検討

想定した地震動に対する護岸・岸壁・防潮堤の鉛直変位量、水平変位量、液状化のリスクの把握。

1. 3. 5 対象者

港湾護岸等の施設管理者（実務担当者）とし、専門分野に係わらず、全ての土木技術者を対象としている。

1. 3. 6 マニュアルの構成

本マニュアルは『港湾護岸等の耐震性検討マニュアル』『モデル港湾における耐震検討に関する事例集』『【参考資料】港湾護岸等の地震・津波災害検討に係る情報集』の3冊で一組となっている。本マニュアルの全体構成を以下に示す。

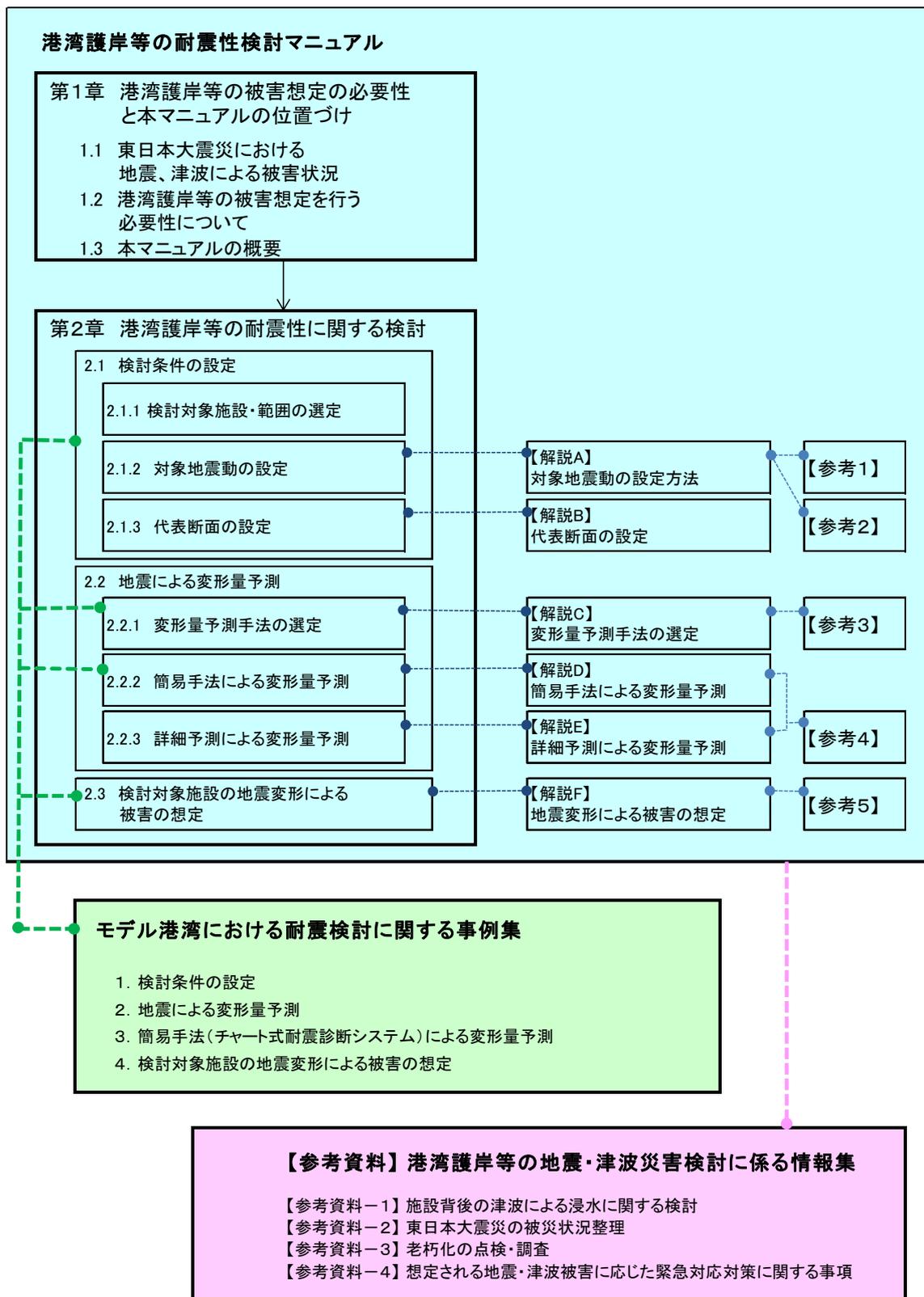


図-1-2 『港湾護岸等の耐震性検討マニュアル』の全体構成

【中国地方整備局作成】

第2章 港湾護岸等の耐震性に関する検討

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、地震により岸壁等が沈下するなどの甚大な被害を受けた。また、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では東北地方の広域に亘り、港湾護岸等の背後地域は地震による変位や津波による浸水の複合災害により甚大な被害を受けている。

このように、複合災害を想定する場合には、港湾護岸等は地震の作用により施設が沈下等の被害を受けるため、津波による浸水被害を想定する上でも、津波に先行する地震動により生じる施設の変形量を十分に考慮する必要がある。上記に鑑み、津波による背後地域の浸水被害想定の実施に先立ち、港湾護岸等の耐震性の検討を実施し、津波来襲前に発生する施設の沈下量を把握することが重要である。本章では地震時沈下量、及び排水沈下量を評価する。なお、側方流動による水平変位は背後地盤の土砂流出等の検討を行う場合に必要な要素となる。

本マニュアルでは、南海トラフ大地震など港湾の被害がより甚大と想定される津波に先行する地震動を対象としている。しかしながら、検討対象とする地域や津波によっては、津波に先行する地震動が必ずしも当該地の施設に対して最も被害を及ぼすとは限らないことも考えられる。

そのため、検討の主目的が施設の健全度評価のみである場合には、施設に対して最も被害を及ぼすと考えられる従来のL2地震動(例えば活断層型地震動)を用いて検討するなど、留意する必要がある。

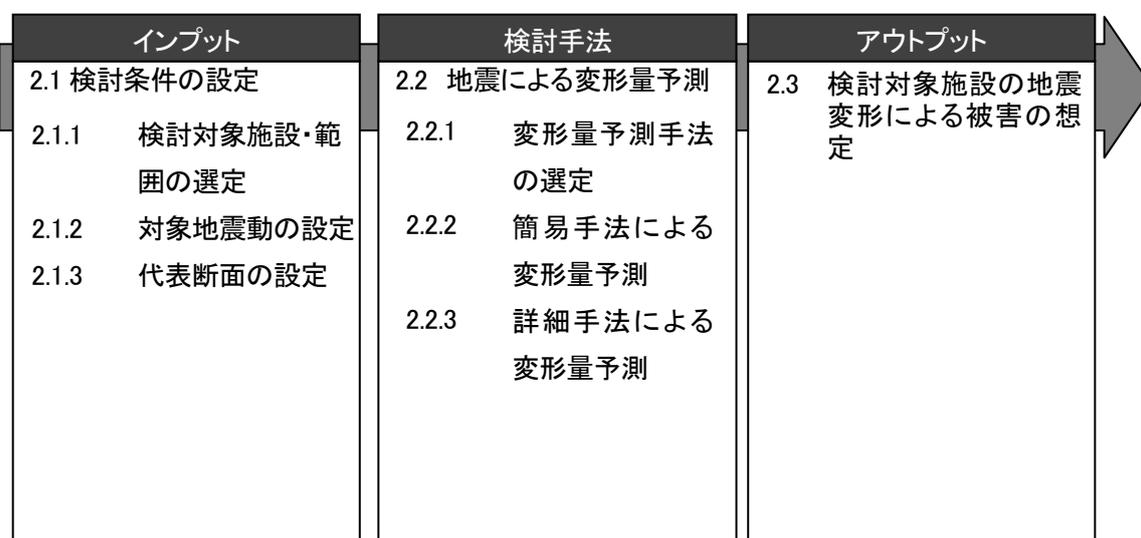


図-2-1 港湾護岸等の耐震性に関する検討：インプット、検討手法、アウトプット

【中国地方整備局作成】

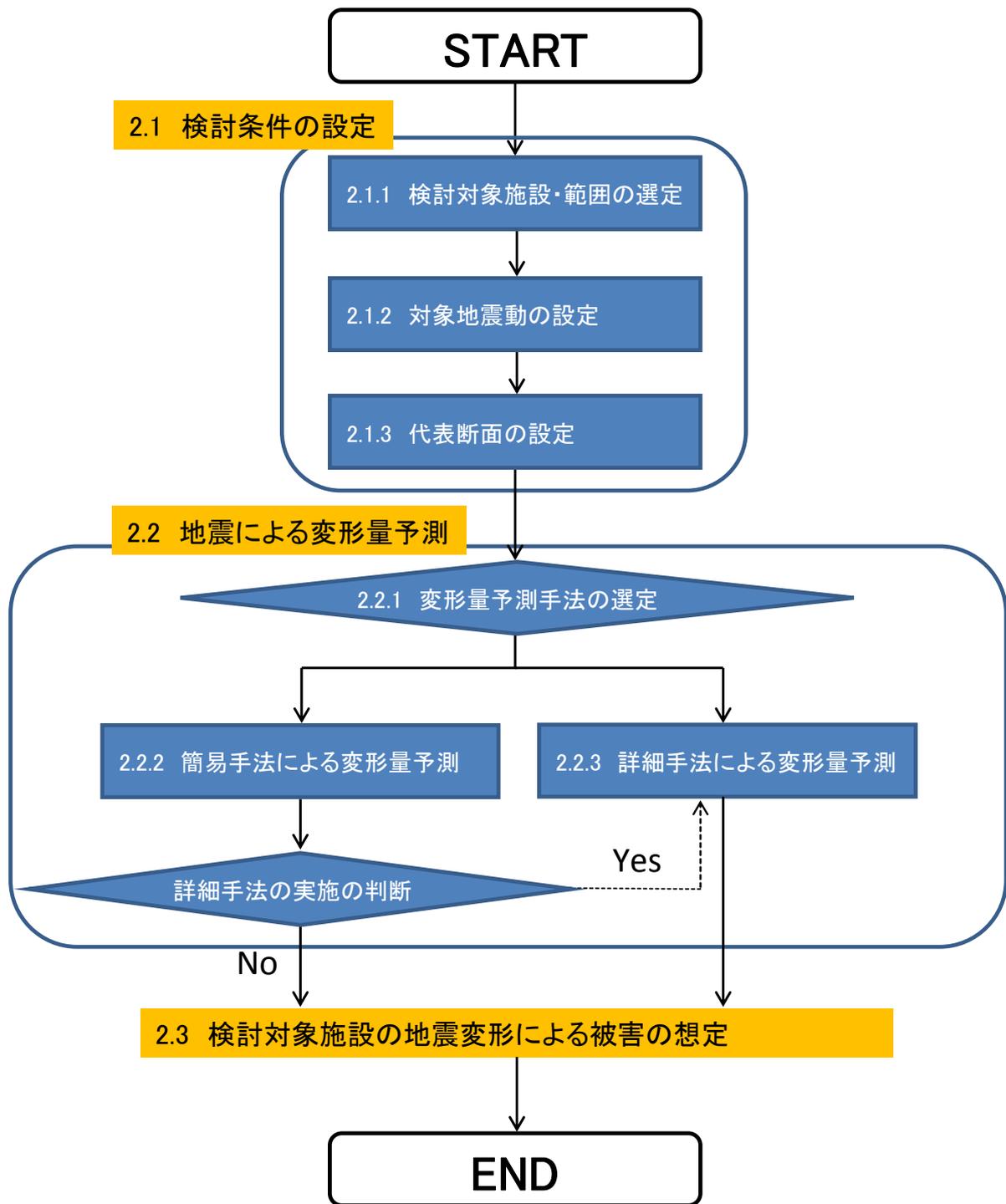


図-2-2 港湾護岸等の耐震性に関する検討：フロー図
【中国地方整備局作成】

2. 1 検討条件の設定

2. 1. 1 検討対象施設・範囲の選定

港湾護岸等の施設管理者（実務担当者）は、施設およびその背後地の重要度に応じて検討対象施設・範囲を選定する。

2. 1. 2 対象地震動の設定

検討する港湾護岸等の対象とする地震を想定し、その想定地震によりもたらされる地震動を適切に設定する。設定方法は**解説A**にある。

なお、サイト増幅特性を考慮した地震動波形データが無い場合でも、簡易手法（チャート式耐震診断システム）による変形量予測は可能である。

ただし、本マニュアルの被害想定をもとに港湾護岸等の耐震設計を行う場合は、サイト増幅特性を考慮した地震動波形データを設定し、詳細手法（FLIP【地震応答解析】）による検討を行う必要がある。

2. 1. 3 代表断面の設定

検討範囲が広域である場合や複数の港湾護岸等の検討を行う場合、地盤条件や地震特性などの面的なゾーニング、施設ごとの線的なゾーニングを行うことで、費用の削減や検討時間の短縮を図ることができる。代表断面の設定（ゾーニングの設定）方法は、**解説B**にある。

2. 2 地震による変形量予測

2. 2. 1 変形量予測手法の選定

港湾護岸等の地震による被害を予測する手法について、目的、求められる推定精度、作業に要する費用、時間を勘案して適切に選定する。変形量予測手法は、**解説C**にある。

2. 2. 2 簡易手法による変形量予測

チャート式耐震診断システムは、地震に対して危険性の高い施設を「簡易」に「早く」抽出するシステムである。

対象とする港湾護岸等に対してチャート式耐震診断を実施し、地震による港湾護岸等の変形量を算定する。本システムを使用するに当たっては、システムの特徴と必要な設定条件等を十分に理解した上で算出結果を適切に扱う必要がある。

簡易手法（チャート式耐震診断システム）による変形量予測手法は、**解説D**にある。

2. 2. 3 詳細手法による変形量予測

チャート式診断システムで得られる変形量予測は、過去のFLIP（地震応答解析）のデータを概ね内包する安全側（変位：大）の評価を行うように構築されている。そのため、チャート式耐震診断システムによる結果を勘案し、詳細な検討が必要と判断される施設に対しては、詳細手法（FLIP【地震応答解析】）による詳細な検討を行うことが望ましい。

FLIP（地震応答解析）を実施するに当たっては、システムの特徴と必要な設定条件等を十分に理解した上で算出結果を適切に扱う必要がある。

詳細手法（FLIP【地震応答解析】）による変形量予測手法の詳細は、**解説E**にある。

※ FLIP（地震応答解析）は、高度な専門性が必要であり、専門のコンサルタント等への発注が必要である。

2. 3 検討対象施設の地震変形による被害の想定

検討対象施設の直接的な被害、およびこれらの被害による航路閉塞や産業機能への影響など、目的に応じて地震後の施設や背後地盤の変形量等の把握を行い、津波来襲時の施設周辺の沈下状況や背後地盤の土砂流出の危険性を評価する。

地震による被害の想定は、**解説F**にある。

解説A 対象地震動の設定方法

①設定方法

地震動は下図に示す④震源特性、⑤伝播経路特性、⑥サイト増幅特性の3つの特性により算出される。

- ④震源特性は、地震を引き起こす震源域を評価したものである。
- ⑤伝播経路特性は、せん断波速度が3,000(m/s)以上の非常に堅固な地盤(地震基盤)を地震動が伝わる際の減衰などの特性を評価したものである。例えば、地震動の長周期成分は減衰が小さいため長距離間伝播したり、短周期成分はすぐに減衰するため比較的近距离までしか伝播しなかったりするといった性質を評価したものである。
- ⑥サイト増幅特性は、せん断波速度が地震基盤より上の地盤を地震動が伝わる際の地震動の増幅の大きさを評価したものである。軟らかい地盤では地震動が大きく増幅するが、硬い地盤では地震動の振幅が大きくなるといった性質を評価したものである(参考1参照)。

このうち、震源特性は津波を引き起こす海溝型の地震であれば、内閣府中央防災会議で設定されている地震を引き起こすと想定される断層位置を参考に設定される。伝播経路特性は、上記で設定した断層と検討対象となる施設の位置から設定される。サイト増幅特性は、検討対象となる施設直下の地震基盤より上の地盤の増幅特性を評価することにより設定される。特にサイト増幅特性は地震動の強さ等を決定づける大きな要因であるため、施設ごと、或いはサイト増幅特性が同等と見做せる範囲において適切に評価しなければならない。

なお、地震動の設定方法の詳細は、港湾の施設の技術上の基準・同解説(H19年7月)P351以降に詳しく記載されている。

サイト増幅特性の推定方法やサイト増幅特性が同等と見做せる範囲の設定については後述に詳しく述べる。

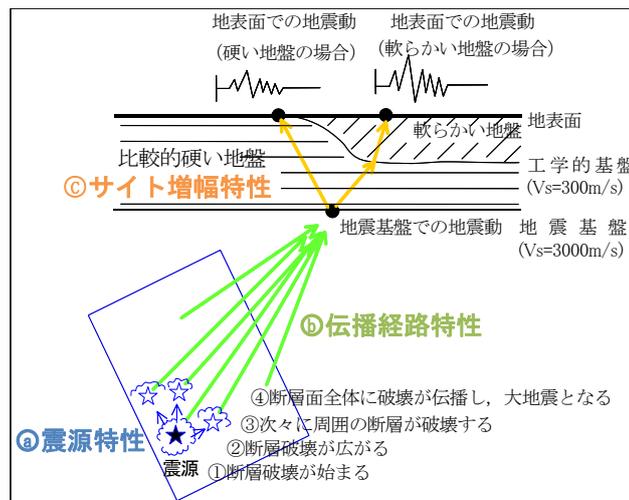


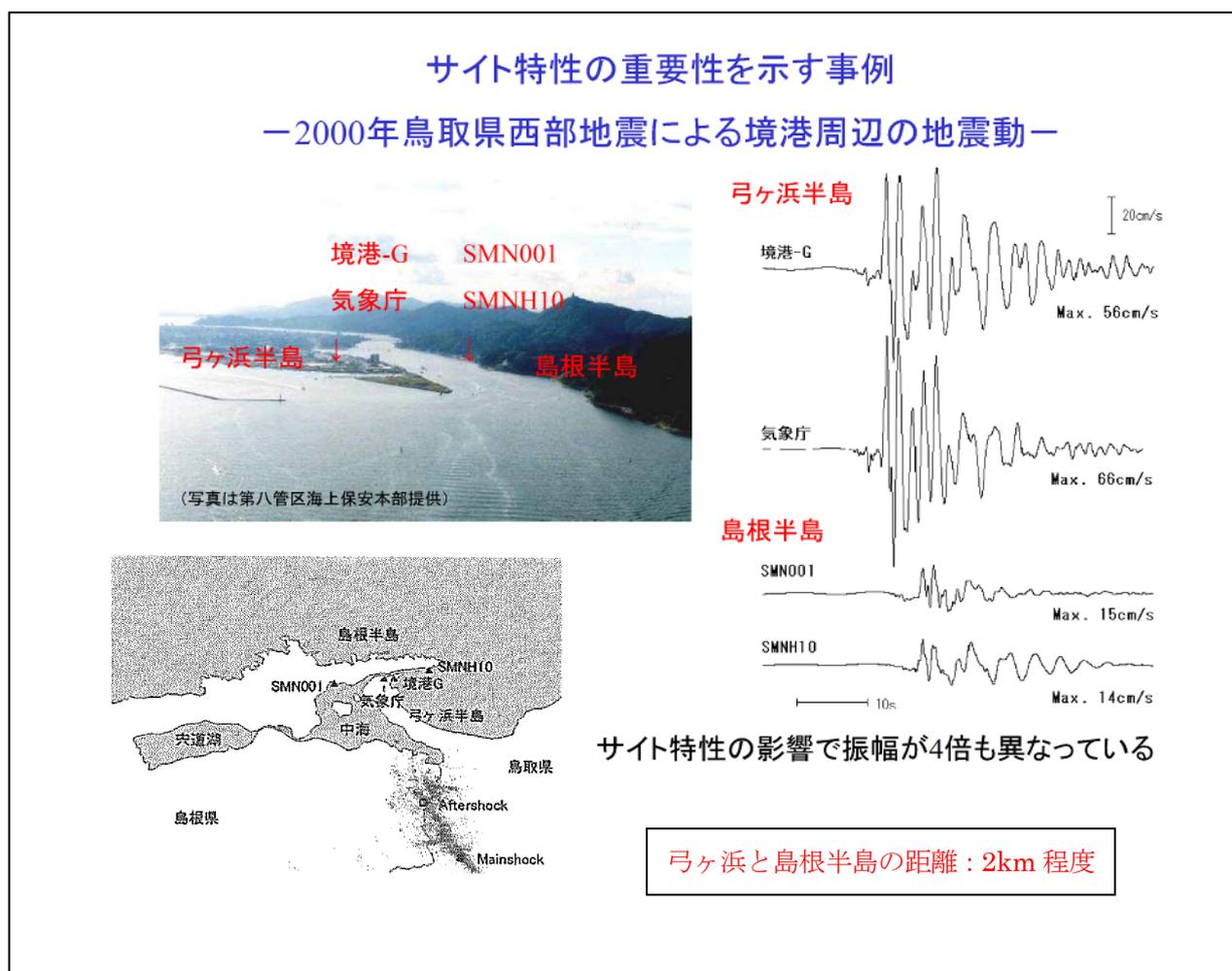
図-A-1 地震動の概念図

【中国地方整備局作成】

②留意点

地震動の波形は、施設周辺の地盤条件が大きく影響する。そのため、耐震性を評価する際に用いる地震動は周辺の地盤特性を十分に考慮した波形を選定する必要がある。例えば、2000年に発生した鳥取県西部地震による境港周辺の地震記録では、数キロも離れていない地点で地表面の地震速度の最大値が4倍も異なっていることが確認されている。これは、島根半島の地層構造が地表面まで岩盤であったのに対して、弓ヶ浜半島の地層構造は比較的深い位置から軟弱な沖積土が堆積していたためである。

また、2011年3月11日に発生した東日本大震災以降、最大クラス津波に先行する地震動として中央防災会議（内閣府のSMGAモデル）、（独）港湾空港技術研究所（SPGAモデル）が新たに地震動の提案をしており、これらの新しい知見を視野に入れた地震動選定を行う必要がある（**参考2参照**）。SMGAモデルは気象庁の計測震度を評価することを目的とし、SPGAモデルは施設の耐震性を評価することを目的としているなど、使用目的が異なるため、検討を実施する内容に応じて提案モデルを選定する必要があることに留意する。



【出典】（独）港湾空港技術研究所 HP「サイト増幅特性とは何か」に一部加筆

www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn.../method_rev2.pdf

なお、前述により設定された地震波形は、原則として対象とする施設の法線直角方向のものを用いることとする。これは、護岸・岸壁の土留構造物に背後の土圧が作用する方向を適切に評価した上で、変形量を算定する必要があるためである。なお、通常、地震動の時刻歴データは南北成分(NS成分)と東西成分(EW成分)に分かれた加速度の時刻歴波形となっているため、**図-A-2**に示す考え方に従って、護岸・岸壁法線直角方向への方向補正を行った上で検討を行う。

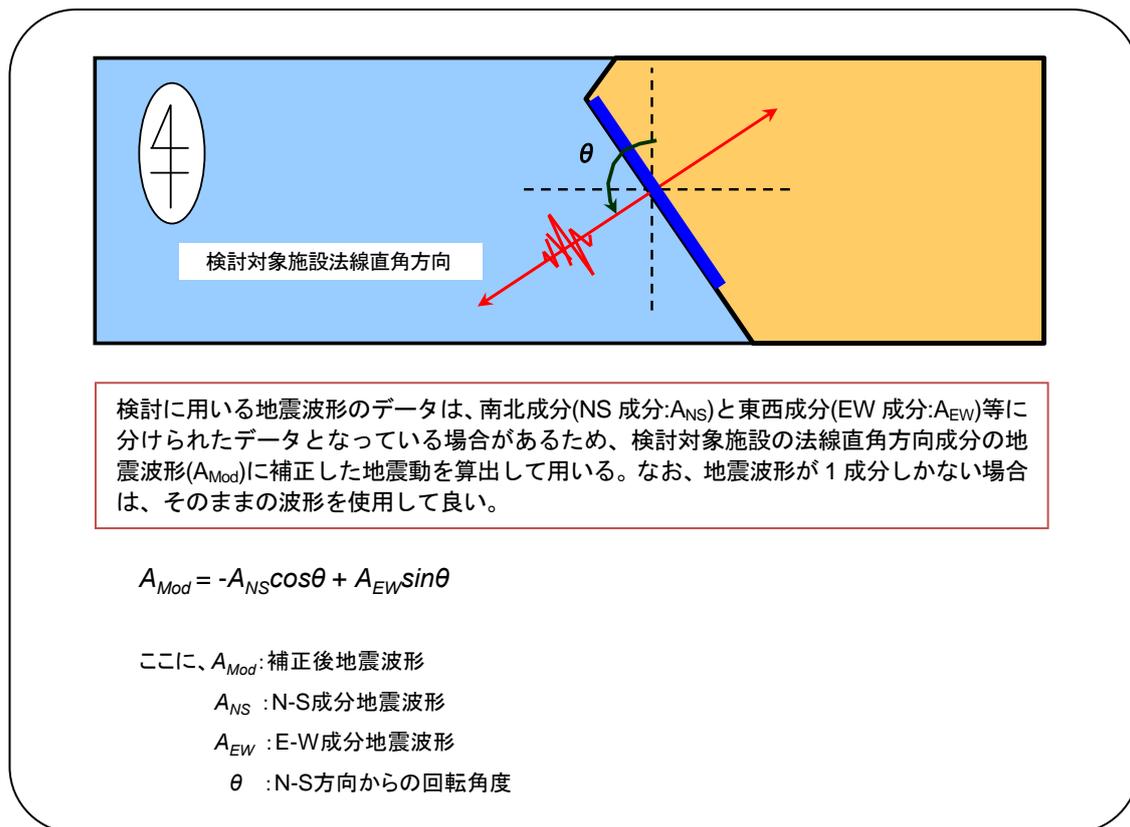


図-A-2 地震動の方向補正の考え方

【中国地方整備局作成】

<サイト増幅特性の推定方法>

港湾の施設の技術上の基準・同解説（H19年7月）p336以降にサイト増幅特性の推定方法が記載されている。ここでは、上記基準に示されている方法について、実際にサイト増幅特性を推定する際の具体的手法について紹介する。

サイト増幅特性の推定方法は大きく以下に示す3つの方法がある。これらの方法の特徴は表-A-1に示すとおりである。

- ・対象施設近傍で地震観測を実施する方法（松補正）
- ・常時微動観測の結果を用いて推定する方法（竹補正・新竹補正）
- ・港湾と周辺の強震観測地点のサイト増幅特性の経験的關係を利用する方法（梅補正）

表-A-1 サイト増幅特性の推定方法

方法	概要	特徴
地震観測 (松補正)	対象施設近傍（またはその周辺で地震動特性が大きくは異なる範囲）における地震観測記録に基づいて設定する方法	【メリット】 振幅・周期とも信頼性が高く、推定方法の中で最も信頼性が高い。 【デメリット】 地震動特性を把握するためには、ある程度の規模（M4以上）の地震動を観測する必要があり、地震観測期間が不明確で長期間に渡る可能性がある。
常時微動観測 (竹補正・新竹補正) [※]	対象施設位置からやや離れた既存の地震観測地点でのサイト増幅特性を既存の地震観測地点、及び対象施設位置の常時微動観測結果（常時微動 H/V スペクトル比のピーク値）に基づいて補正する方法	【メリット】 地震観測を実施する方法のように、長期間の観測が必要でない。 【デメリット】 周期に関しては信頼性が高いが、振幅は地震観測に比べて信頼性が下がる。
経験的關係 (梅補正)	港湾と周辺の強震観測地点のサイト増幅特性の關係を用いて、全国の港湾及びその周辺の K-NET の観測点におけるサイト増幅特性の一般的な傾向から算出された経験的關係式により補正する方法	【メリット】 常時微動観測結果を用いる方法のように新たに何らかの観測を行うことなく港湾のサイト増幅特性を推定することが可能である。 【デメリット】 精度は地震観測に基づく場合と比較して大きく低下する。

(※)竹補正はピーク周波数を補正する手法であるのに対し、新竹補正はピーク周波数、ピーク値の2つを補正する手法である。

【中国地方整備局作成】

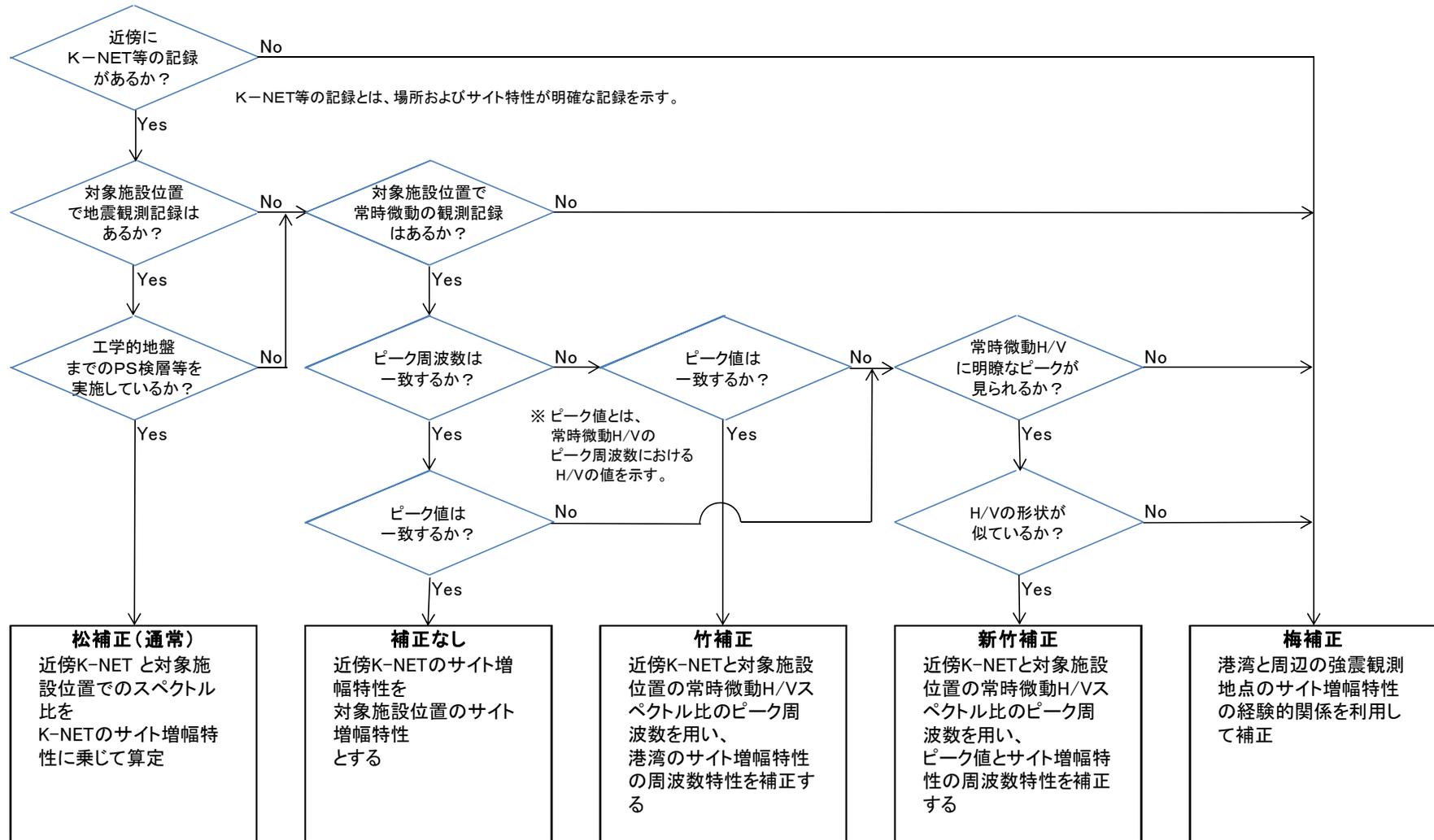
サイト増幅特性の算定において、松補正・竹補正・新竹補正・梅補正のいずれの補正が可能かは地震観測記録の有無や常時微動観測の記録の有無等に依存する。サイト増幅特性の算定フローを次頁に示す。

松補正を実施する場合には、地震観測記録が存在し(あるいは松補正を実施するために観測を実施し)、かつ近傍の K-NET 記録が存在する場合にのみ可能である。

竹補正・新竹補正は、地震観測記録は存在しないが、常時微動観測を実施することにより、近傍の K-NET と対象施設位置の常時微動 H/V スペクトルを比較することにより可能である。ただし、常時微動 H/V スペクトルに明瞭なピークが見られない場合は梅補正となる。

梅補正は、地震観測記録、常時微動観測記録とも存在しない場合に適用される。

サイト増幅特性フローの算定フロー



解説B 代表断面の設定（ゾーニングの設定）

「解説A 対象地震動の設定方法」にも示した通り、港湾護岸等の設置位置が近隣でも、地盤条件によっては観測される地震動が大きく異なることが考えられる。また、港湾護岸等の構造形式によっても地震による変形量が異なるため、港湾護岸等の変形量（ここでは沈下量に着目）を適切に把握するためには、想定する地震動、および施設の構造形式を十分に把握する必要がある。

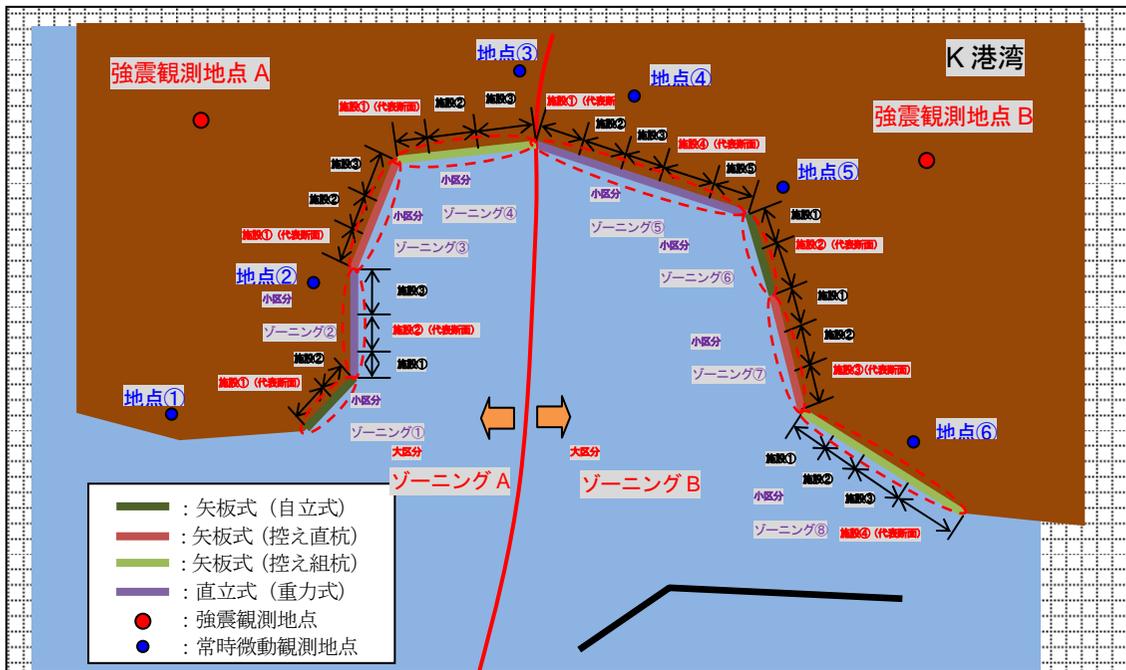
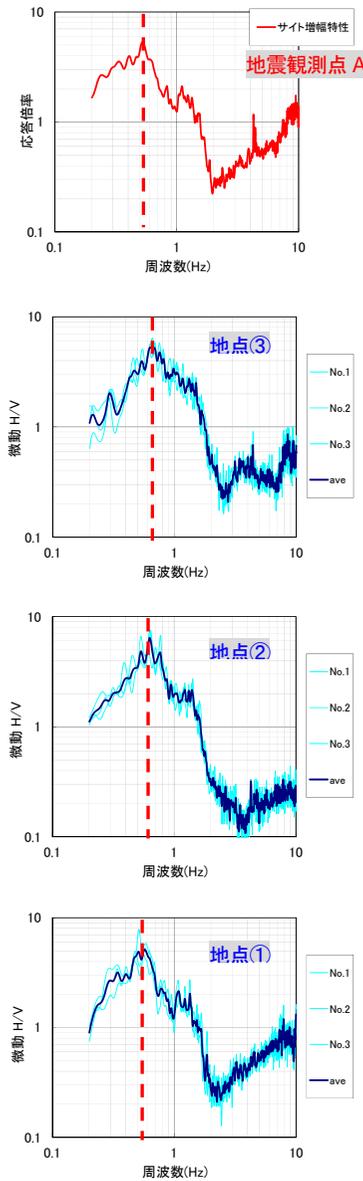
具体的には、現地のK-NET等の地震観測記録、もしくは常時微動観測記録等を用いて評価されたサイト増幅特性から工学的基盤面において同一地震動が作用すると見做せる範囲をゾーニング分けし、地震動が作成されている場合が多いため、検討対象となる施設位置のゾーンの地震動を用いることが望ましい。図B-1にゾーニング方法の詳細を示した一例を示す。

また、港湾護岸等の施設には様々な構造形式（重力式、矢板式、控え矢板式、栈橋式等）があるため、構造形式ごとにゾーニングすることにより、構造形式の違いによる変形特性を反映した変形量の把握を行うことが可能となる。さらに、同じ構造形式が並ぶ施設延長であっても施設の断面形状や地盤条件が異なることが想定されるが、時間的・費用的に全ての断面に対して検討を実施することは困難な場合が多いため、その場合には、同一の構造形式と見做せる範囲から沈下量を大きく評価する断面を代表断面とするなど、安全側の検討を行うことも考えられる。

① 設定方法

検討対象範囲でのサイト特性の把握を行う。次頁に示すように、地震観測地点のサイト特性（応答倍率）、および検討対象範囲周辺の常時微動観測結果（微動H/Vスペクトル）を確認し、両者のピーク周波数の整合性から、サイト増幅特性による大区分のゾーニング（面的なゾーニング）を行う。

次に、検討対象範囲の施設の構造形式の把握を行う。次頁に示すように、港湾全体の施設の構造形式を面的に把握し、構造形式ごとに小区分のゾーニング（線的なゾーニング）を行う。また、小区分により設定されたゾーニングの中で施設数が複数存在する場合は、地盤条件や構造物の規模を勘案し、安全側の設定になるように代表断面を選定する。



地震観測が実施されている地点のサイト増幅特性と、検討対象範囲の常時微動観測結果（微動 H/V スペクトル）から、地震動特性による大区分のゾーニング実施し、さらに施設の構造形式ごとに小区分のゾーニングを実施する。

—K 港湾を例として—

- 強震観測地点 A のサイト増幅特性は 1Hz より低高周波数帯で、強震観測地点 B のサイト増幅特性は 1Hz より高周波数帯で応答倍率のピークが確認できる。常時微動観測結果の微動 H/V より、地点①~地点③は地点 A のサイト特性と同じ傾向であり、一方で地点④~地点⑥は地点 B のサイト増幅特性と同じ傾向であることから、地点③と地点④の間に地震動特性のゾーニングの境界線を設定することができる。
- 港湾全体の施設の構造形式を面的に把握し、構造形式ごとに小区分のゾーニングを行い、施設数が複数存在する場合は、地盤条件や構造物の規模を勘案し、安全側の設定になるように選定することも考えられる。

なお、代表断面を選定する際には以下の点に留意する必要がある。

- ・液状化対象層が比較的厚く堆積、N 値が小さいボーリングを地盤条件の設定
- ・施設の断面形状が同様の場合、施設延長が長い断面を選定、施設の法線方向が多方向ある場合は方向ごとに選定

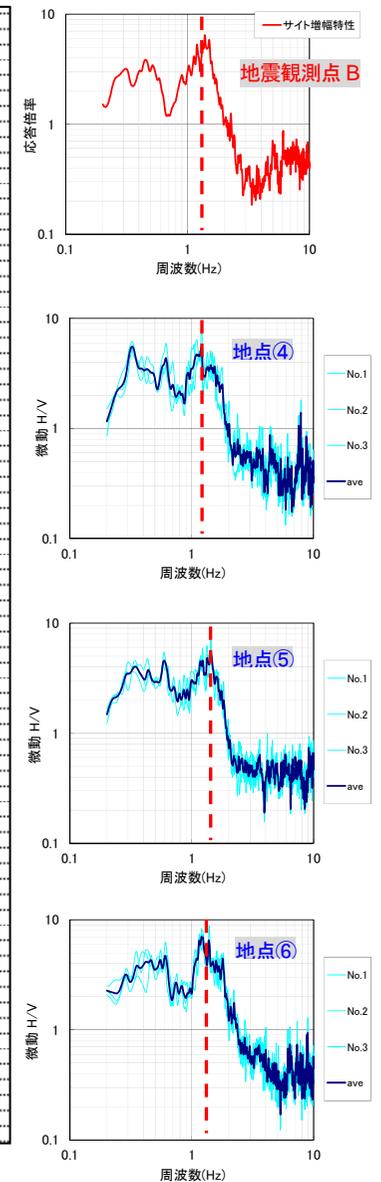


図-B-1 ゾーニング方法の一例

【中国地方整備局作成】

解説C 変形量予測手法の選定

施設の地震による変形量を予測する手法は、詳細手法から簡易手法まで多くの手法が確立されている(参考3参照)。一般的に詳細手法は有限要素法を用いて直接的に詳細に沈下量等を把握する手法であり、簡易手法は施設の形状等を入力することにより間接的に簡易に沈下量等を把握する手法である。

本マニュアルでは、詳細手法は港湾・海岸施設に対して多くの実績を有している「FLIP」(Finite element analysis of LIquefaction Program)を推奨する。また簡易手法は施設の変形量等を予測することが可能な「チャート式耐震診断システム」を選定することを推奨する。

チャート式耐震診断システムはあくまでも簡易に変形量を予測する手法であるため、概算的に変形量を予測したい場合に用いると良い。また、詳細手法を行う断面を絞り込むためのスクリーニングとしても有効なシステムである。

① チャート式耐震診断システムの概要

チャート式耐震診断システムとは、施設形状、地盤条件、設定した地震動条件等を用いて、地震発生時の港湾護岸等の変形量を簡易に予測する耐震診断システムである。

従来の地震時の変形量の予測を行う耐震診断は、地震時の液状化等を考慮できるFLIP等の二次元地震応答解析を用いて行う必要があった。しかし、二次元地震応答解析を実施するには、多大な時間と費用を要するため、簡易に施設の変形量を予測することが可能であるチャート式耐震診断システムが開発された。チャート式耐震診断システムは、数千ケース以上にも及ぶFLIPの解析結果を用いて整備したデータを用いているため、施設の地盤条件、施設形状、地震動条件を入力するのみで、施設の変形量を一定の精度で予測することが可能なシステムである。

現在開発されているチャート式耐震診断システムで対応する構造形式は、解説Dに示す直立式(重力式)、傾斜型護岸タイプ、傾斜型堤防タイプ、重力式防波堤、控え直杭式矢板、控え組杭式矢板、自立式矢板、及び直杭式栈橋の計8構造形式である。

②FLIP【地震応答解析】の概要

FLIPは、1988年に運輸省港湾技術研究所において、「液状化による構造物被害予測プログラム」として開発された地震応答解析プログラムである。この解析プログラムは、港湾施設を中心に多数の使用実績があり、既設構造物の耐震性能照査、最適な耐震対策工法の検討、新設構造物の耐震対策検討などに非常に有効な手法である。現在、FLIPコンソーシアムにおいて更なる改良が進められている。

本解析コードは、有限要素法に基づく解析プログラムであり港湾構造物と地盤とを一体的にモデル化することにより、地盤-構造物間の動的な相互作用を考慮した変形解析が可能である。また、非線形有効応力解析法を採用しており、港湾施設等に甚大な被害を及ぼす一因である、液状化現象を考慮した被災想定が可能である。

なお、兵庫県南部地震等の過去に発生した大規模な地震による港湾施設の被災状況を、精度高く再現解析できていることが確認されており、施設の詳細な耐震照査を実施する上で、非常に有効的な手法であると考えられる解析コードである。

表-C-1 チャート式耐震診断システム・FLIPに必要な費用等

(1断面当り)

	被害予測手法	作業時間	データ作成から評価までに必要な費用	推定精度
簡易手法	チャート式耐震診断システム	数時間	港湾護岸等の管理者自ら計算することが可能。	
詳細手法	FLIP【地震応答解析】	数日	専門のコンサルタントへの外注が必要。 250万円～400万円程度	精緻

【中国地方整備局作成】

表-C-2 チャート式耐震診断システム・FLIPの特徴

手法	概要	特徴
チャート式耐震診断システム	過去の解析結果のデータを基に、施設の変形量を簡易に算定するシステム。	<p>【メリット】</p> <ul style="list-style-type: none"> Excel ベースのプログラムであり、費用が安価。 限られた施設条件や地震動の条件の入力のみで、短時間に沈下量の推定が可能。 <p>【デメリット】</p> <ul style="list-style-type: none"> 既往のFLIP解析結果を内包するように、概ね安全側の評価を行うようシステムが構築されているため、変位を大きく評価する。 概算的な変形量予測としての位置づけであり、沈下量を精緻に把握するためには、FLIPによる解析が必要。 実地盤の土層構成は複雑であることが多いが、単純化していることに留意が必要。 適用可能な構造形式が限定される。
FLIP【地震応答解析】	有限要素法に基づく二次元地震応答解析プログラム	<p>【メリット】</p> <ul style="list-style-type: none"> 沈下量を精緻に評価することが可能。 構造物の損傷度合や地盤の変形等を直接的に評価可能。 港湾施設を中心に多数の使用実績。 <p>【デメリット】</p> <ul style="list-style-type: none"> 費用が高価であり、予算面で検討断面数が限られる可能性。

【中国地方整備局作成】

解説D 簡易手法（チャート式耐震診断）による変形量予測

① 検討方法

チャート式耐震診断システムは、国土交通省 近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所に貸与申請を行うことにより利用可能となる。

変形量照査を実施する際は、対象とする施設の構造形式に応じて、後述する必要設定条件の一覧表に対応した構造物の形状寸法、地盤の硬さを評価する等価N値、地震動の大きさを評価する値を適切に設定する。

なお、チャート式耐震診断システムでの検討において不明確な点があれば、液状化相談窓口（P62 参照）へお問い合わせいただきたい。

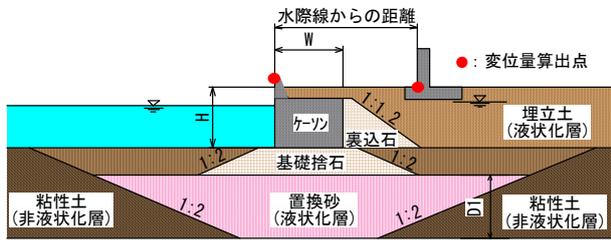
② 必要設定条件

②-1 施設形状に係る設定

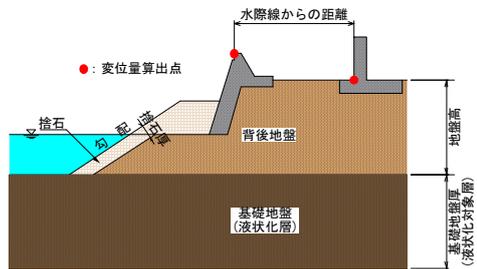
チャート式耐震診断システムは、**解説C**「①チャート式耐震診断システムの概要」に示す通り、直立式（重力式）、傾斜型護岸タイプ、傾斜型堤防タイプ、重力式防波堤、控え直杭式矢板、控え組杭式矢板、自立式矢板、及び直杭式栈橋の計8構造形式（**図-D-1 参照**）が対応している。（その他の構造形式の施設をチャート式耐震診断システムにより評価する場合は、工学的判断により地震により生じる構造物の変形モードがほぼ同じであると考えられる構造形式に置き換えて検討を実施することで対応できる場合がある。）

チャート式耐震診断システムの検討を行う上で必要となる設定条件は（**表-D-1**）に示すとおりである。

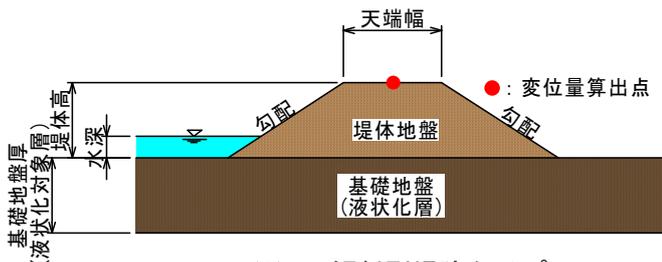
なお、既設護岸の前面に新しい護岸を前出ししている場合や、控え杭式矢板護岸の背後に松杭がある場合など、既設護岸や松杭が無いものとして構造形式を選定し計算すれば、安全側の結果となる。



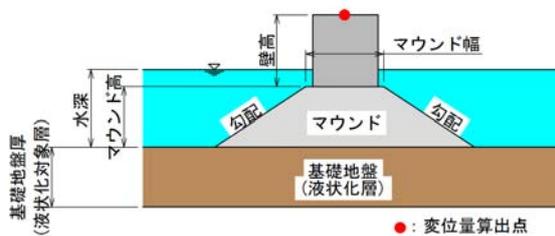
(1) 直立型（重力式）



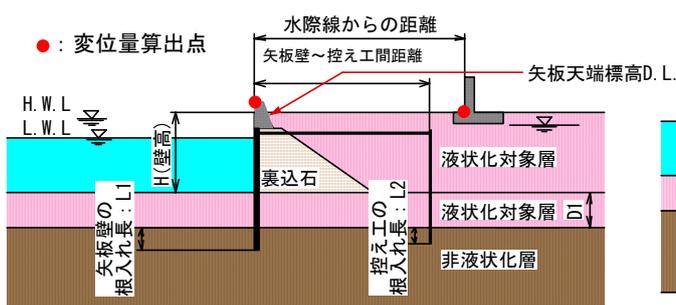
(2) 傾斜型護岸タイプ



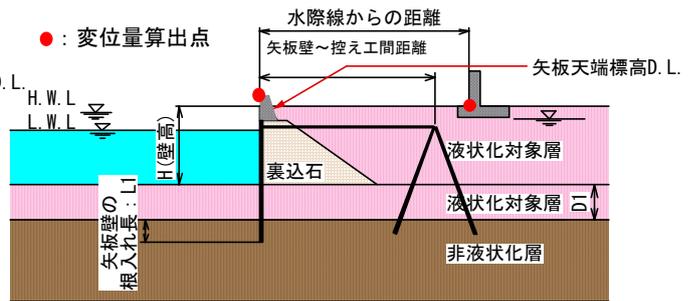
(3) 傾斜型堤防タイプ



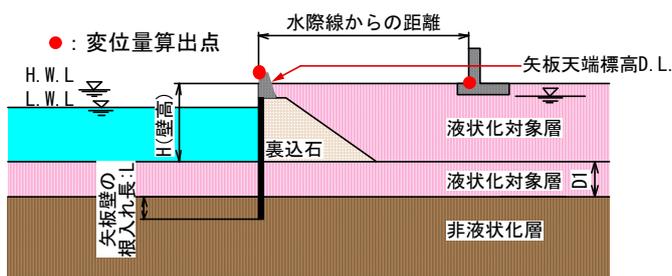
(4) 重力式防波堤



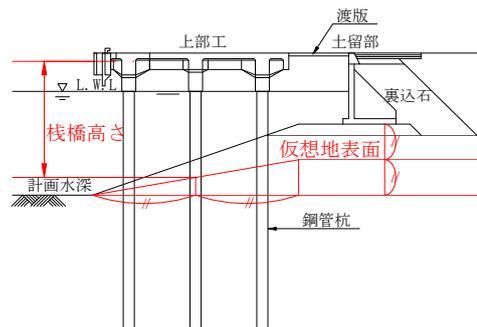
(5) 控え直杭式矢板



(6) 控え組杭式矢板



(7) 自立式矢板



(8) 直杭式栈橋

図-D-1 チャート式耐震診断システムで対応可能な構造形式

【出典】沿岸構造物のチャート式耐震診断システム Ver 1.02 利用マニュアル

表-D-1 チャート式耐震診断システムに必要な設定条件

項目		備考	
地震動条件	工学的基盤面における速度のPSI値	「図-D-1 チャート式耐震診断システムで対応可能な構造形式」を参照のこと。	
地盤条件	等価N値		
構造物の形状寸法等	(1) 直立型 (重力式)		H(壁高)
			W/H(堤体幅/壁高)
			D1/H(液状化層厚/壁高)
	(2) 傾斜型 護岸タイプ		地盤高
			捨石厚
			捨石勾配
			基礎地盤厚
	(3) 傾斜型 堤防タイプ		天端幅
			堤体高
			勾配
			基礎地盤厚
			水深
	(4) 重力式 防波堤		マウンド天端幅
			マウンド高
			勾配
			基礎地盤厚
			水深
	(5) 矢板式 (控え直杭)		防波堤重量
			H(壁高)
			L1/H (矢板壁の非液状化層への根入長/壁高)
	(6) 矢板式 (控え組杭)		L2/H (控え杭の非液状化層への根入長/壁高)
			D1/H(液状化層厚/壁高)
			H(壁高)
			L1/H (矢板壁の非液状化層への根入長/壁高)
			L2/H (押し込み杭の非液状化層への根入長/壁高)
	(7) 矢板式 (自立式)	L3/H (引抜き杭の非液状化層への根入長/壁高)	
		D1/H (海底面からの液状化層厚/壁高)	
H(壁高)			
(8) 直杭式 栈橋	L/H (矢板壁の非液状化層への根入長/壁高)		
	D1/H(海底面からの液状化層厚/壁高)		
	D 土留め部の水平変位		
	H 栈橋高さ		
	置換砂、裏込石の有無		

【出典】沿岸構造物のチャート式耐震診断システム Ver 1.02 利用マニュアル

②-2 地盤条件に係る設定

耐震診断に必要な地盤条件を設定するには、施設設計時のボーリング柱状図、土質試験結果資料等が必要となる。図-D-1 に示すように液状化層、非液状化層と単純化されていることから土質柱状図に示される土層区分（例えば図-E-1）を工学的に判断してチャート式診断の入力設定をする必要がある。また、この様な単純化を実施していることを考慮し出力値（沈下量等）の精度は高く無いことに留意する。

施設の地盤資料がない場合、追加調査を実施することが望ましい。やむを得ない場合、対象施設周辺の地盤資料を代用することも考えられるが、耐震診断の精度は落ちるので留意しなければならない。

なお、SCPなどの改良地盤は改良後の性状（N値など）を入力する。改良後の土質調査が実施されてない場合は、設計値を使うことも考えられる。改良地盤でも液状化層として扱った方が安全側となることに留意されたい。

②-3 地震動に係る設定

耐震診断には、地震動条件として、サイト増幅特性を考慮した地震動、最大加速度、またはマグニチュードと断層面距離が必要である。

耐震診断の精度は、サイト増幅特性を考慮した地震動の時系列デジタルデータを用いた場合が最も高く、サイト増幅特性を考慮した地震動の最大加速度、対象地震のマグニチュード・断層面距離の順に精度は低くなる。

チャート式耐震診断システムでは、表-D-2 に示す地震に関しては、断層モデル（マグニチュード、震源位置等）がシステムに組み込まれているため、耐震診断に用いる地震波の種類（迷ったときには海溝型地震を選択）および断層モデル（東海+東南海+南海地震=最も大きいモデル）を選定し、検討施設位置情報（緯度・経度情報←施設情報の項で入力）を入力するだけで、断層面距離を計算し、自動的に基盤最大加速度→速度のPSI値を計算することができる。

表-D-2 対象地震（海溝型地震）

断層モデル	気象庁マグニチュード (中央防災会議)
東海地震	8.0
東南海地震	8.1
南海地震	8.4
東海+東南海地震	8.3
東南海+南海地震	8.6
東海+東南海+南海地震	8.7

【出典】沿岸構造物のチャート式耐震診断システム Ver 1.02 利用マニュアル

③ 留意点

チャート式耐震診断システムは、膨大な FLIP【地震応答解析】の変形量予測を基に作成されたシステムである。本システムを構築するに当たっては、施設の変形量を過小に評価することを避けるため、FLIP の変形量を内包するように、概ね安全側の評価を行うようシステムが構築されている。そのため、**図-D-2** に FLIP の解析結果とチャート式診断システムにより推定された沈下量の比較を示す通り、FLIP の解析結果に比べて変形量を平均的に大きく評価する傾向にある。

ただし、チャート式耐震診断システムは、砂質土系の地盤を対象として構築されているため、原地盤が砂質土と粘性土の互層、または粘性土地盤の場合など、FLIP により推定される変形量に比べて小さくなる場合（危険側）もあるので注意しなければならない。

また、**図-D-1** チャート式耐震診断システムで対応可能な構造形式 に示す基本断面からかけ離れた断面で検討すると、精度が悪くなることに留意しなければならない。複数の構造形式が適応すると思われる場合は、複数の構造形式で計算を行い、残留変位の大きい方を採用し、対応することにより、安全側の検討結果となる。

したがって、詳細に検討を必要とする場合など、より精緻な変形量予測を実施する際には詳細手法（FLIP）による検討を行うことが望ましい。

なお、同一断面を対象としたチャート式耐震診断システムの推定変形量と FLIP により求められる変形量に大きな差異が認められる場合は、FLIP の解析結果を反映して、チャート式耐震診断システムに内蔵されている補正係数を再設定することにより、推定精度の向上を図ることも考えられる(参考 4 参照)。再設定された補正係数は、地震動が同じと判断されるゾーンで同一構造形式であれば適用することが可能であるため、ある程度広域で複数施設のチャート式耐震診断システムの推定結果の精度を一度に向上させることが出来ると言ったメリットがある。

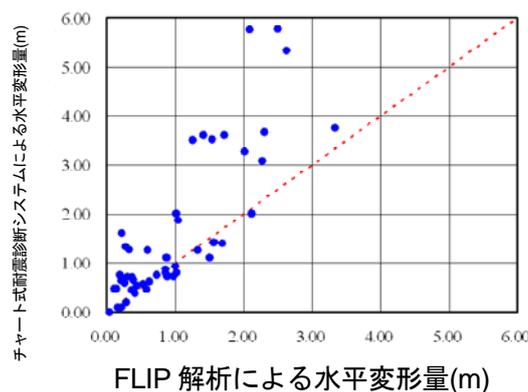


図-D-2 チャート式耐震診断システムと FLIP の変形量推定値の比較

【出典】沿岸構造物のチャート式耐震診断システム Ver 1.02 利用マニュアル

モデル港湾における耐震検討に関する事例集について

本マニュアルに基づいて、モデル港における港湾護岸等の耐震性検討を行った過程を事例集としてとりまとめた。

特に、チャート式耐震診断システムを用いて耐震診断した成果については、港湾護岸等の断面図（施設形状に係る情報）や土質柱状図（地盤条件に係る情報）からチャート式耐震診断システムのデータに置き換える方法が、構造形式別に分かり易く示されている。

なお、この事例集において、地震動については最も精度の高い、サイト増幅特性を考慮した地震動の時系列データを用いた場合の計算例を示しているが、その他の手法も参考として示している。

管理されている港湾護岸等の耐震診断の一助とされたい。

※ 事例集での掲載ページ

・施設形状に係る設定および地盤条件に係る設定

- ①直立型(重力式) …………… P.9
- ②傾斜型護岸タイプ …………… P.25
- ③控え直杭式矢板 …………… P.38
- ④控え組杭式矢板 …………… P.53
- ⑤自立式矢板 …………… P.68

・地震動に係る設定

- ①時系列デジタルデータを用いる場合 …………… P.15 ～ P.17
- ②対象地点のマグニチュードを用いる場合 …………… P.18
- ③対象地点の地震動の最大加速度を用いる場合 …………… P.19
- ④データベース化されている地震動を用いる場合 …… P.20

解説E 詳細手法（FLIP【地震応答解析】）による変形量予測

① FLIPの概要

FLIPの解析モデル(メッシュ図)の一例を以下に示す。

解析を実施する上では、まず、検討対象施設周辺のボーリング調査結果、土質試験結果から土層構成を想定し、2次元のFEMメッシュを作成する。

次に、各種土質試験結果から得られた試験値等から地盤条件を、設計図書等から構造物諸元を適切に設定する。具体的に必要な設定条件は後述するFLIPに必要な設定条件の一覧表に示すとおりである。これら作業により作成された解析モデルに対して、解析モデル最下端より適切に設定された地震動の時刻歴を入力し、地震応答解析を実行することにより地盤・構造物の変形量等の検証が可能となる。

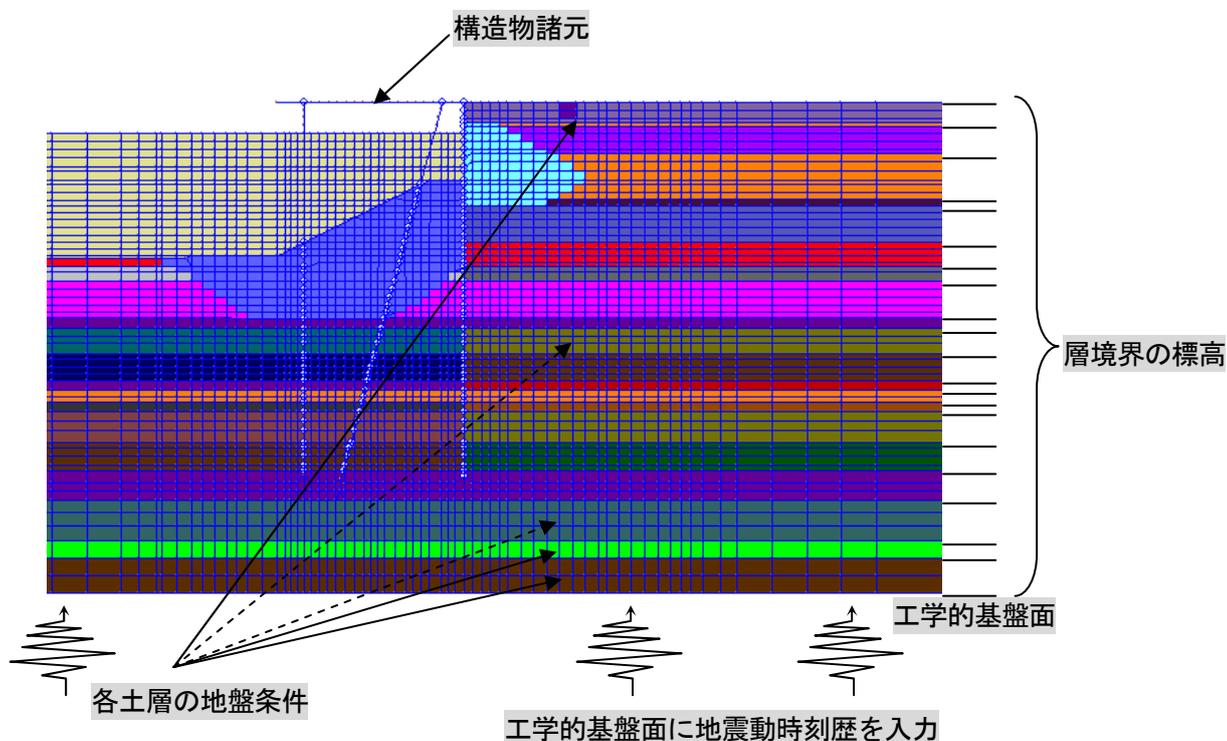


図-E-1 FLIPの解析モデル(メッシュ図)の一例

【中国地方整備局作成】

② 必要設定条件

FLIP の検討を行う上で必要となる設定条件は下表に示すとおりである。なお、詳細な条件の設定方法は、以下に示す文献が参考となる。

<ul style="list-style-type: none"> ・液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易設定法: 港湾技研資料 No. 869, 1997. 6 ・1次元 FLIP 入力データ作成プログラム 1D-MAKER (20090130) Ver. 1. 2: 国土技術政策総合研究所—横須賀庁舎—港湾空港部港湾施設研究室 HP <http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html> ・沿岸技術ライブラリーNo. 24 港湾構造物設計事例集 (平成 19 年改訂版): 財団法人 沿岸技術研究センター, 平成 19 年 3 月 ・FLIP コンソーシアム FLIP 研究会の各種成果 (※) FLIP コンソーシアムの会員となる必要がある。 <http://www.flip.or.jp/>
--

表-E-1 FLIP に必要な設定条件

項目	備考
地震動条件	工学的基盤面における地震動時刻歴
土層条件	層境界の標高
地盤条件	工学的基盤面の V_s 、 V_p
	細粒分含有率 F_c
	塑性指数 I_p
	初期せん断剛性 G
	初期体積弾性係数 K
	ポアソン比 ν (一般的に 0.33)
	間隙率 n (一般的に砂質土系 0.45、粘性土系 0.55)
	粘性土の粘着力 C
	砂質土の N 値 (等価 N 値)
	砂質土の内部摩擦角 ϕ
液状化が懸念される土層の液状化強度曲線	各項目については 図-E-1 を参照のこと。
杭諸元、矢板諸元、上部工諸元、ケーソン諸元等	

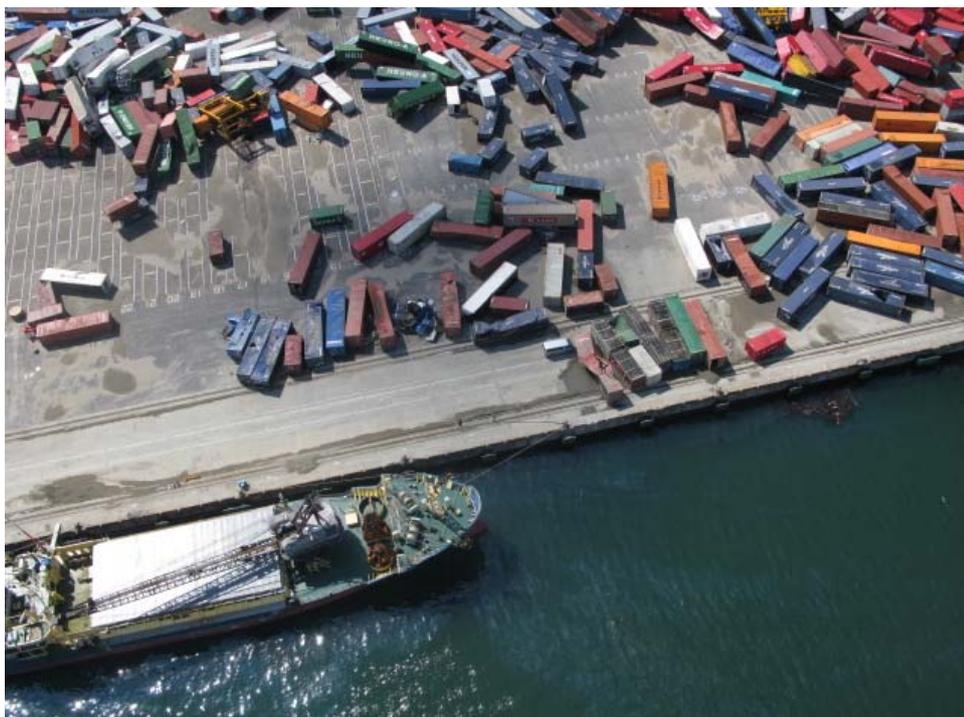
(※) 地盤のせん断剛性は等価 N 値、粘性土の粘着力、PS 検層のいずれによっても推定可能であるが、PS 検層による方法が最も推定精度が高いとされている。また、初期体積弾性係数 K は、初期せん断剛性 G とポアソン比 ν により算出される。

【中国地方整備局作成】

③ 留意点

地震動が非常に大きい場合は、構造物の加速度応答値に異常が現われるなど、解析結果に不具合が生じるため、地震動の時刻歴のタイムステップ(積分時間)を細かくする必要がある。また、FLIP は評価する項目により使用する構成式(応力ひずみ関係を定義する式)等が異なるため、目的に応じて採用する構成式を変えるなどの留意が必要である。具体的には、水平変形量が卓越する施設の検討(岸壁、護岸等)を実施する場合は、「temp7 法」と呼ばれる構成式、「改良型」と呼ばれる非反復計算法を使用し、鉛直変形量が卓越する施設の検討(防波堤、堤防等)を実施する場合は、「従来法」と呼ばれる構成式、「従来法」と呼ばれる非反復計算法を使用する必要がある。なお、構成式や非反復計算法については、前頁にて紹介した「沿岸技術ライブラリーNo. 24 港湾構造物設計事例集(平成 19 年改訂版)：(一財)沿岸技術研究センター, 平成 19 年 3 月」に詳しく掲載されている。

ただし、これらの構成式や非反復計算法については、FLIP コンソーシアムにより研究が進められているところであり、研究成果は(公社)地盤工学会や(公社)土木学会にも投稿されているため、これらの情報を参考にするとよい。



東日本大震災の被災状況（コンテナ散乱）
【出典】中国地方整備局「気球空撮システム」より撮影



東日本大震災の被災状況（コンテナ引上げ状況）
【出典】中国地方整備局

解説 F 地震による被害の想定

地震による被害は、背後土砂流出による航路や泊地の閉塞や津波来襲時における施設の沈下による浸水被害などの2次的な被害を引き起こす要因となる。したがって、変形量予測手法により求められた変形量を基に対象施設の地震後の天端高の設定を行い、津波来襲時の施設周辺の沈下状況や背後地盤の土砂流出の危険性を評価する。また、発災後の産業機能への影響などを把握することを目的として、求められた地震後の施設や背後地盤の変形量を参考に緊急対応の優先度を明確にする。発災後の産業機能への影響を評価する上で必要となる項目の一例を以下に示す。

【岸壁】

- 棧橋杭の健全性や矢板の健全性など、対象施設の直接的な被害の検証
 - ・ 施設の健全性の情報を基に被災後の船舶接岸の可否判断などを実施。
 - ・ 施設損傷に起因する背後土砂流出による航路埋没の可能性を評価。
- 重力式の水平変形量の検証
 - ・ 水平変形量の情報を基に被災後の船舶接岸の可否判断などを実施。
 - ・ 目地開きに起因する背後土砂流出による航路埋没の可能性を評価。
- 背後エプロン等の段差の検証
 - ・ 陸地からの資材搬入出の可否判断などを実施。

【護岸】【防潮堤】

- 護岸・防潮堤の防護機能に関する検証
 - ・ 鉛直変形量の情報を基に台風等が復旧前に発生した場合など2次災害の影響を評価する上で必要となる越波流量の算定により背後地への影響検討を実施。
- 重力式の水平変形量の検証
 - ・ 目地開きに起因する背後土砂流出による背後地盤の陥没の可能性を評価。
- 矢板の健全性など、対象施設の直接的な被害の検証
 - ・ 施設損傷に起因する背後土砂流出による背後地盤の陥没の可能性を評価。

さらに、産業機能への影響を評価するには、港湾全体を把握して、港湾のどこが弱点部となるのかを予め把握しておくことが非常に重要である。そのため、地震変形による被害の照査結果から港湾全体の弱点部を評価する必要がある。港湾全体としての弱点部の評価の一例を（参考5）に示す。

なお、地震による施設の沈下と併せて被害を拡大させる可能性のある要因として、港湾護岸等の老朽化が挙げられる。施設の老朽化による機能低下の恐れがある場合は、老朽化に対する検討を行う必要がある（別冊 参考資料－3 参照）。

【コラム】 その他考慮すべき災害発生

①高潮と津波の同時発生

高潮は、台風や低気圧の影響により発生する現象で、年に数回発生し、陸上に浸水被害を及ぼす規模の高潮は数十年に1回規模の発生確率である。一方、南海トラフ等の海溝型地震に伴うM8を超える規模の地震に伴う津波は約100年に1回の発生確率である。

一般的な津波浸水を対象とするハザードマップは、高潮と津波の同時発生の確率が低いことから、2つの事象が同時に発生することを想定していない。

高潮と津波が同時に発生した場合、通常の潮汐における満潮位よりもさらに高い潮位の状態で津波が押し寄せることから、陸上の浸水被害が拡大することが懸念される。

このため、津波による浸水予測結果については、検討対象地域で他の要因による浸水被害が発生する可能性がある場合は、津波と高潮が同時に発生した場合には、被害が拡大する可能性があることに留意する必要がある。

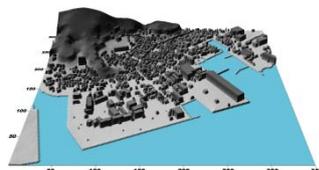
②津波の河川遡上と洪水の流下を合わせた挙動

高潮と津波の同時発生と同様に、大雨時の洪水と津波の同時発生も確率的には低いが発生する可能性がある。洪水については、津波シミュレーションにおいて河川流量として洪水時の流量を考慮することで、洪水時の河川水位の影響による津波来襲時の最大水位を評価することができる。しかし、一般的には、便宜的に設定潮位（通常は、朔望平均満潮位を用いることが多い）を河口または河川で設定する機会が多いため、河口から上流においてはこの点が考慮されていないことに留意する必要がある。

③陸上構造物による津波遡上の阻害

一般的な津波シミュレーションにおいては、地盤高の高低差のみを考慮し、建物や森林等による津波遡上への影響は、マンシングの粗度係数として土地利用区分ごとに設定した値をもとに津波エネルギーを減衰させることで評価している。

このため、鉄筋コンクリート構造物等の建物が密集する場所においては、背後への津波遡上が阻害される可能性があるが、津波シミュレーションではこの点が考慮されていないことに留意する必要がある。



実際の陸上建物の再現



土地利用区分に応じた粗度係数の設定例

土地利用区分		粗度係数
	総分類	
住宅地	建物用地	0.040~0.080
工場地等	建物用地	0.040
農地	田、その他農用地	0.020
林地	森林、荒地	0.030
水域	河川、海浜、海域	0.025
その他(空き地、緑地)	公園・緑地、道路用地	0.025

参考 1 サイト増幅特性について

我々が感じたり構造物を振動させたりする地震動は**図-参 1-1** に示す通り、

- ・断層においてどのような破壊が起こったか（震源特性）
- ・生じた地震動がどのように伝わってきたか（伝播経路特性）
- ・対象地点近傍の地盤構造によって地震動がどのような影響を受けたか（サイト増幅特性）

の組合せで表現される。このうち、サイト増幅特性は地震動の特性を決定づける最も大きな要因である。ここでは参考として、サイト増幅特性の性質について紹介する。また、実際にサイト増幅特性を設定する際の一助として、推定方法を紹介する。

<サイト増幅特性の性質>

震源より伝達した地震波が観測点近傍で堅固でない地盤（地震基盤から地表面の間）に入射すると、一般的には増幅されて大きな地震動となる。この現象をサイト増幅特性と呼んでいる。サイト増幅特性は地盤の構成や構造によって異なる。

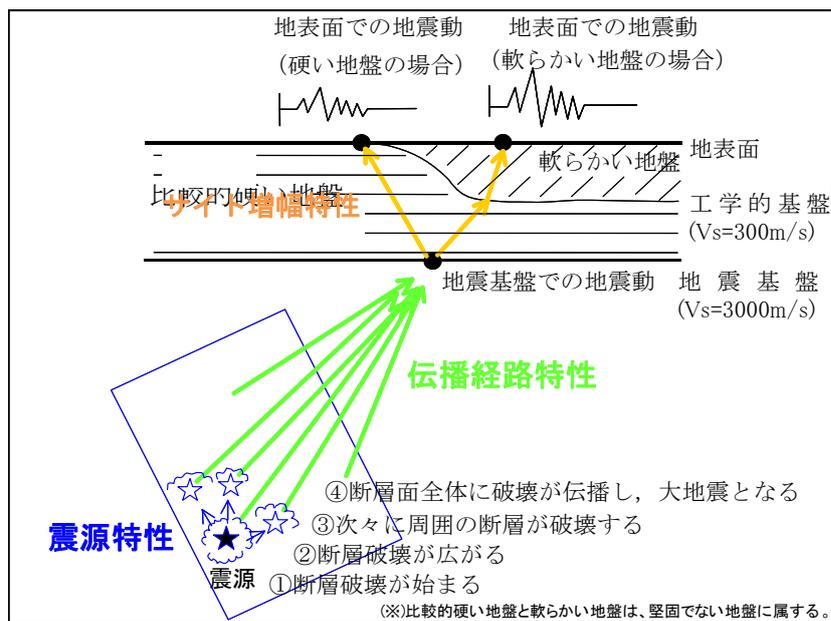


図-参 1-1 サイト増幅特性

【中国地方整備局作成】

身近な簡単な例で示すと、比較的固い地盤では（薄い木の板を揺すったときのように）、それほど大きく「増幅」しないが、やわらかい地盤では（プラスチックの下敷きを揺すったときのように）、大きく「増幅」するような増幅特性を表している。

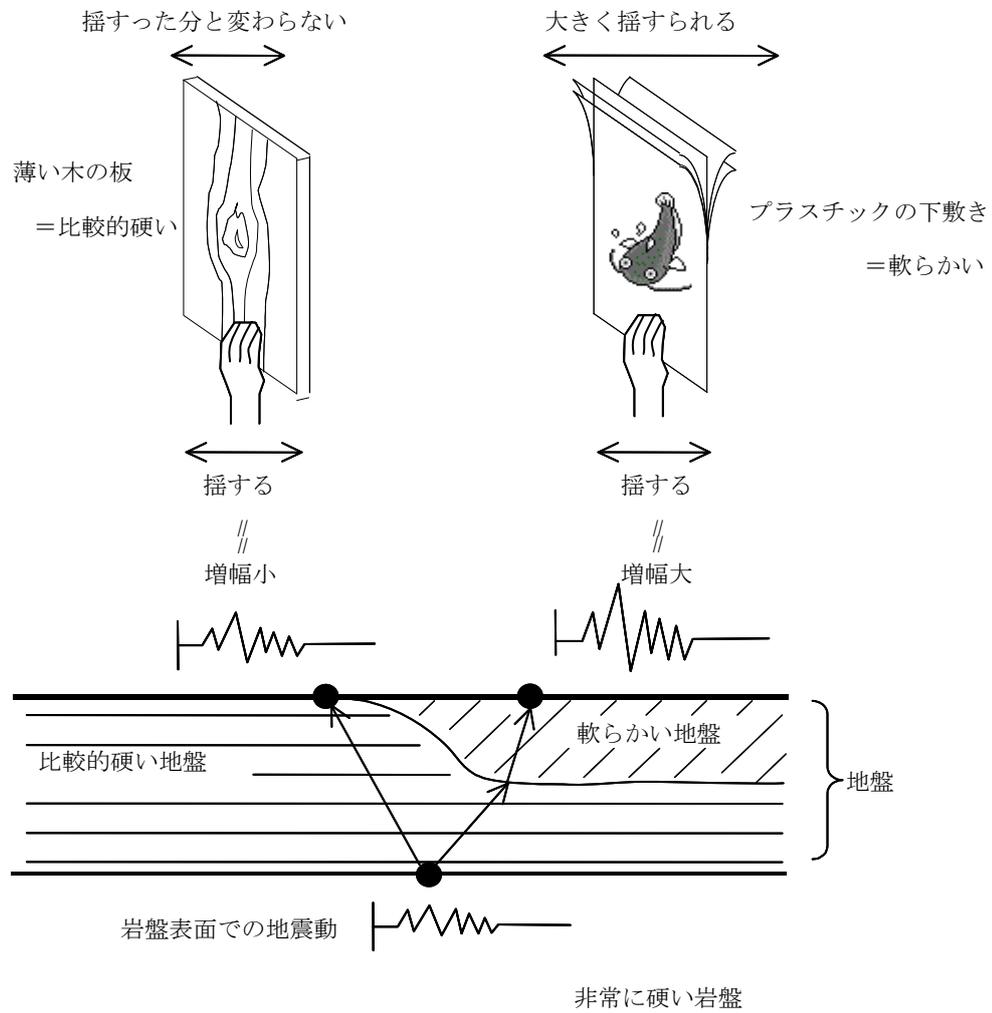


図-参 1-2 サイト増幅特性のイメージ

【中国地方整備局作成】

参考 2 最大クラス津波に先行する地震動のモデルの紹介

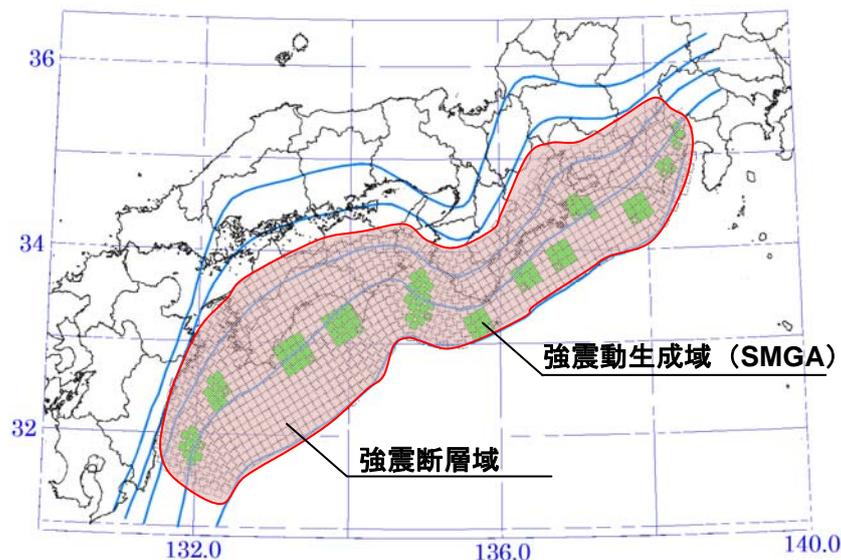
最大クラス津波に先行する地震動は、内閣府（平成 24 年 8 月 29 日付）より公表されている気象庁の SMGA（Strong-Motion Generation Area）モデルの地震動、及び（独）港湾空港技術研究所により考案されている SPGA（Strong-motion Pulse Generation Area）モデルの大きく 2 つのモデルが存在する。各モデルの特徴は次に示すとおりである。

<SMGA モデル>

SMGA は気象庁の計測震度を評価することを目的に開発されたモデルであり、その考え方は次の通りである。

強震断層域全体の概ね 10%の面積に相当する面積の強震動生成域（以下、SMGA と呼ぶ。）を配置し、この強震動生成域が滑ることにより地震が発生するとして地震動を推定するモデルである（図-参 2-1 参照）。

本モデルは、東北地方太平洋沖地震をはじめ過去の多くの地震の観測記録を基に、震度が適切に評価できていることを確認することにより妥当性の検証が行われている。



* 図中の青い線は、ユーラシアプレートとフィリピン海プレートの境界の深さを示す。
（北西より、-50km, -40km, -30km, -20km, -10km）

図-参 2-1 強震断層域と強震動生成域

【出典】南海トラフの巨大地震モデルの検討（第二次報告）強震断層モデル編

図-3.3 に一部加筆

<SPGA モデル>

SPGA は速度の PSI 値やスペクトルを合わせこみ、施設の耐震性を評価することを目的としたモデルで、SMGA モデルと同様の強震断層域と強震動生成域を用いて、それぞれの強震動生成域に 1 箇所ずつ配置した SPGA（強震動パルス生成域）が滑ることにより地震が発生するとして地震動を推定するモデルである。

強震断層域の中に複数（南海トラフ地震では 1 2 カ所を想定）の強震動生成域があり、どこが最大の滑りを起こすか断定できない。また、1 つの強震動生成域に 10 カ所程度の SPGA（強震動パルス生成域）があり、どの SPGA が滑るのかも特定できない。そこで（独）港湾空港技術研究所では、強震動生成域のそれぞれの位置に SPGA の組合せが異なるような配置を全通り検討して地震動を作成している。全ての組合せの地震動に対して、対象港湾の工学的基盤における速度の PSI 値を計算して、厳しいものから順位付けを行い、港湾毎に 90%非超過の地震動、及び 50%非超過の地震動を求めている。（**図-参 2-2 参照**、本図では 50 通りだが、南海トラフ地震では約 6 億通りの組み合わせを計算している）

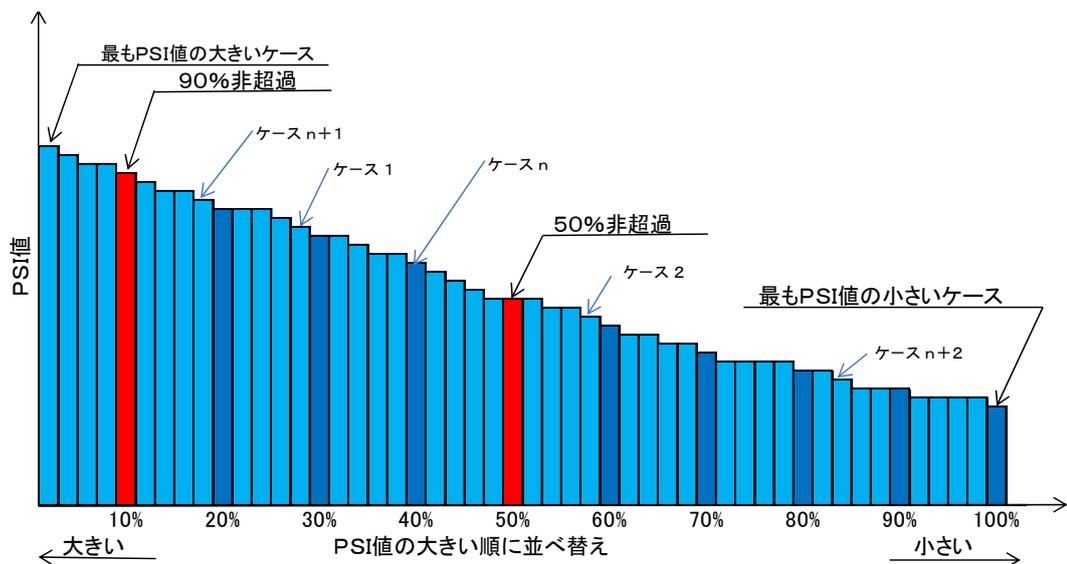


図-参 2-2 SPGA 50%非超過波と SPGA 90%非超過波の概念図

【中国地方整備局作成】

上記により求められた本モデルの大きな特徴は、耐震検討を視野に入れ、地震波形、スペクトル、及び値が観測波形を適切に評価できていることを確認することにより行っている点である。

なお、50%非超過波は地震動を過小評価するような印象を与えることもあるが、元々、厳しい地震動を想定しているので、平均的な 50%非超過波であっても決して小さい地震動ではない。どのような地震動を用いるかは設計者の判断となる。

例として、高知港において最も厳しい場合の SPGA の配置例を図-参 2-3 に示す。図中の○、○及び○が SPGA を配置した箇所となる。

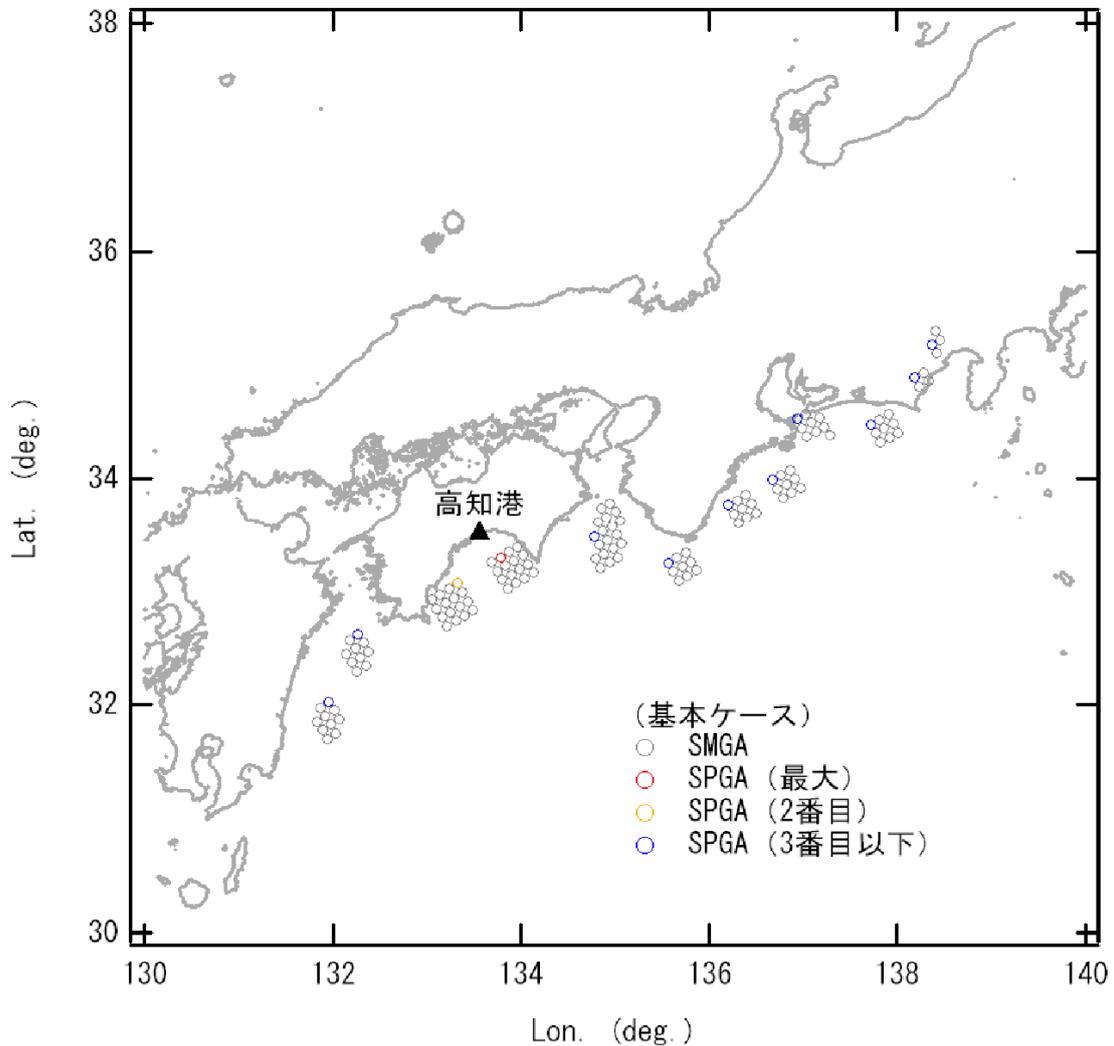
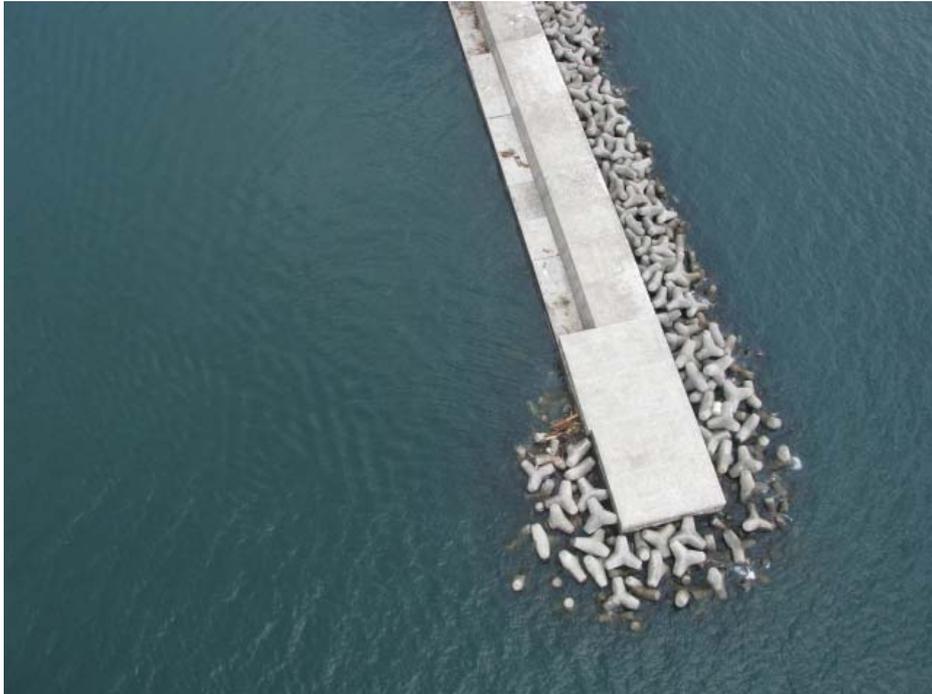


図-参 2-3 SPGA の配置の一例（高知港に対して厳しい場合）

【出典】南海トラフの地震（Mw9.0）を対象とした SPGA モデルによる地震動の評価

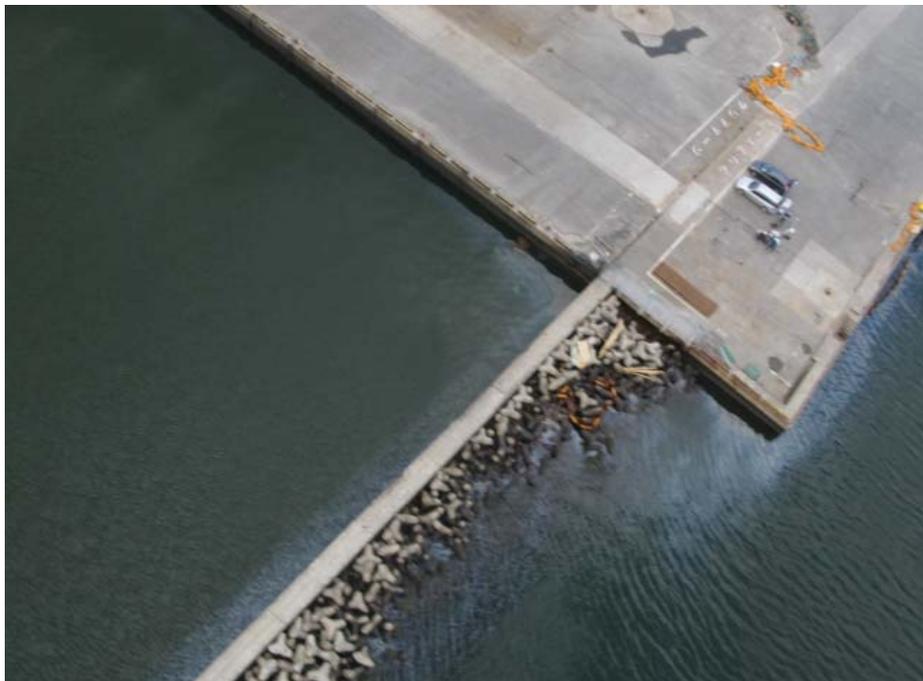
なお、SMGA・SPGAどちらも解析精度は良いが、SMGA は気象庁の計測震度を評価することを目的とし、SPGA は施設の耐震性を評価することを目的としたモデルであり、使用目的が異なることに留意が必要である。

また、両者のモデルを用いた地震波形作成に必要な技術レベルは、断層モデル化が異なるのみで、手法は同じであるため、大きく異ならない。ただし、SPGA は50%或いは90%非超過の波を算出するため、SMGA に比べて、検討費用・時間が多くかかることに留意する必要があるが、護岸等の耐震性に関する検討では、耐震性（沈下量等）を精度良く評価することを目的とするため、SPGA を用いることが望ましい。



東日本大震災の被災状況（波消ブロックの沈下）

【出典】中国地方整備局「気球空撮システム」より撮影



東日本大震災の被災状況（消波ブロックの沈下及び油流出）

【出典】中国地方整備局「気球空撮システム」より撮影

参考 3 主な予測手法の概要(耐震性に関する検討)

表-参 3-1 主な予測手法の概要

手法の区分	名称	解析手法	概要	得られるアウトプット
詳細手法	FLIP (Finite Element Analysis of Liquefaction Program)	有限要素法 静的・動的変形解析	本手法は地盤の液状化に伴って発生する流動現象を動的に評価する二次元の有限要素法を用いた手法である。 <u>地震動により作用する慣性力や地盤の液状化等を詳細に評価した手法であり、対象とする施設の変形量を把握することが可能である。港湾構造物など、地震時の偏土圧の影響が大きい港湾・海岸施設での実績が多くある。</u>	<ul style="list-style-type: none"> ・地盤の最大・残留変形量 ・地盤の液状化の程度 ・構造物の最大・残留変形量 ・地盤・構造物の応答加速度等 ・鋼材等の発生応力等 (慣性力など、動的相互作用による影響が考慮されている)
	GeoASIA (ALL SOILS ALL ROUND <i>GEO</i> -ANALYSIS INTEGRATION)	有限要素法 静的・動的変形解析	本手法は液状化や圧密現象に伴って発生する地盤の静的および動的挙動を評価する二次元の有限要素法を用いた手法である。 <u>地震動により作用する慣性力や液状化等を詳細に評価した手法であり、対象とする施設の変形量の経時変化を把握することが可能である。現時点では、地震時の偏土圧の影響が大きい港湾・海岸施設での実績は余り多く無い。</u>	<ul style="list-style-type: none"> ・地盤の最大・残留変位量 ・地盤の液状化の程度 ・構造物の最大・残留変位量 ・地盤・構造物の応答加速度等 ・鋼材等の発生応力等 (動的相互作用の影響が考慮されている、過剰間隙水圧の消散過程が考慮されている)
	ALID (Analysis for Liquefaction-Induced Deformation)	有限要素法 静的変形解析	本手法は地盤の液状化に伴って発生する流動現象を静的に評価する二次元の有限要素法を用いた手法であり、 <u>対象とする施設の変形量を把握することが可能である。静的に検討を行うため、施設に作用する慣性力までを適切に評価した手法ではない。河川堤防など、地震時の偏土圧の影響が大きくない施設での実績が多くある。</u>	<ul style="list-style-type: none"> ・地盤の残留変形量 ・構造物の残留変形量 (ただし、慣性力など動的相互作用による影響は考慮されていない)
	FLUSH	有限要素法 二次元等価線形解析	本手法は2次元の等価線形解析により地震時の地盤の剛性低下を考慮した上で、地盤内を伝達する加速度やせん断応力等を評価する手法である。本手法により施設の沈下量を把握することはできない。	<ul style="list-style-type: none"> ・地盤・構造物の応答加速度等

【中国地方整備局作成】

手法の区分	名称	解析手法	概要	得られるアウトプット
詳細手法	SHAKE	一次元等価線形解析	本手法は1次元の等価線形解析により地震時の地盤の剛性低下を考慮した上で、地盤内を伝達する加速度やせん断応力等を評価する手法である。 <u>本手法により施設の沈下量を把握することはできない。</u>	・地盤の応答加速度等
	LIQCA (Computer Program for Liquefaction Analysis)	有限要素法動的変形解析	本手法は地盤の液状化に伴って発生する流動現象を動的に評価する2次元の有限要素法を用いた手法である。 <u>地震動により作用する慣性力や地盤の液状化等を詳細に評価した手法であり、対象とする施設の変形量を把握することが可能である。</u> <u>FLIPと同等程度の精度で評価可能であるが、港湾構造物に対する耐震照査等の実績は殆ど無い。</u>	・地盤の最大・残留変形量 ・地盤の液状化の程度 ・構造物の最大・残留変形量 ・地盤・構造物の応答加速度等 ・鋼材等の発生応力等 (慣性力など、動的相互作用による影響が考慮されている)
簡易手法	チャート式耐震診断システム		本システムはFLIPの解析結果を基に変形量を簡易に評価するために構築された評価手法である。対象とする施設に作用する地震外力により施設自体の変形量を評価できるが、 <u>FLIPの解析結果から構築されたシステムに基づいているため、評価される変形量は慣性力の影響までを考慮されたものである。本システムにより施設の沈下量を把握することは可能である。</u>	・地盤・構造物の残留変形量 (慣性力など、動的相互作用による影響が考慮されている)
	海岸保全施設耐震点検マニュアル 【堤防・護岸・胸壁編】		本マニュアルは対象とする施設に作用する地震外力により施設自体の安定性を簡易に評価する手法である。 <u>本手法により施設の沈下量を把握することはできない。</u>	・構造物の耐力作用比

【中国地方整備局作成】

参考 4 チャート式耐震診断システムの精度向上の一例

チャート式耐震診断システムはFLIP【地震応答解析】に比べ安全側（大きめ）の変位量となるよう構築されている。そこで、チャート式耐震診断システムによる沈下量推定の精度向上のための様々な検討が行われていることから、その方策の一例を示す。

チャート式耐震診断システムは以下に示す方法により沈下量の予測を行っている。

このうち、構造物の形状に関する条件は対象とする施設形状を考慮することにより、個々の施設の特徴を踏まえた検討が可能である。また、地盤条件についても対象施設周辺地盤の地盤条件を考慮することにより施設周辺地盤の特徴を踏まえた検討を行うことが可能である。しかしながら、地震動条件については、全国津々浦々の地震動を対象として速度のPSI値と沈下量の関係について検討を行いながら、最終的に海南波（標準波）に整合するように補正係数を設定している。

このような開発経緯から、チャート式耐震診断システムで採用される速度のPSI値に対する補正係数は、必ずしも地域特性を適切に評価したものとなっていない可能性がある。

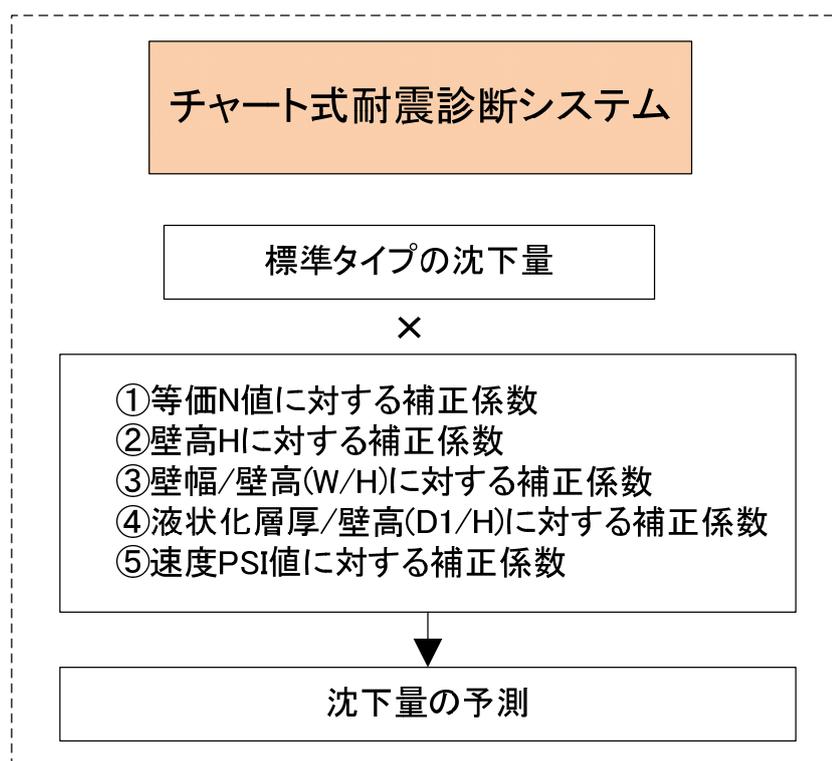


図-参 4-1 チャート式耐震診断システムの沈下予測方法

【中国地方整備局作成】

上記理由により、速度のPSI値の補正係数に着目し、地域特性を評価した補正係数の再設定を行い、地震動の地域特性を考慮した沈下予測を行うことにより、沈下予測精度の向上を図る。具体的には、下図の通りであり、構造形式ごとにFLIPによる2次元地震応答解析を实

施し、速度 PSI 値と沈下量の関係を求め、速度の PSI に対する補正係数を直接的に算出する。FLIP により直接的に求められた速度の PSI 値に対する補正係数をチャート式耐震診断システムに適用して沈下量の予測を行う。

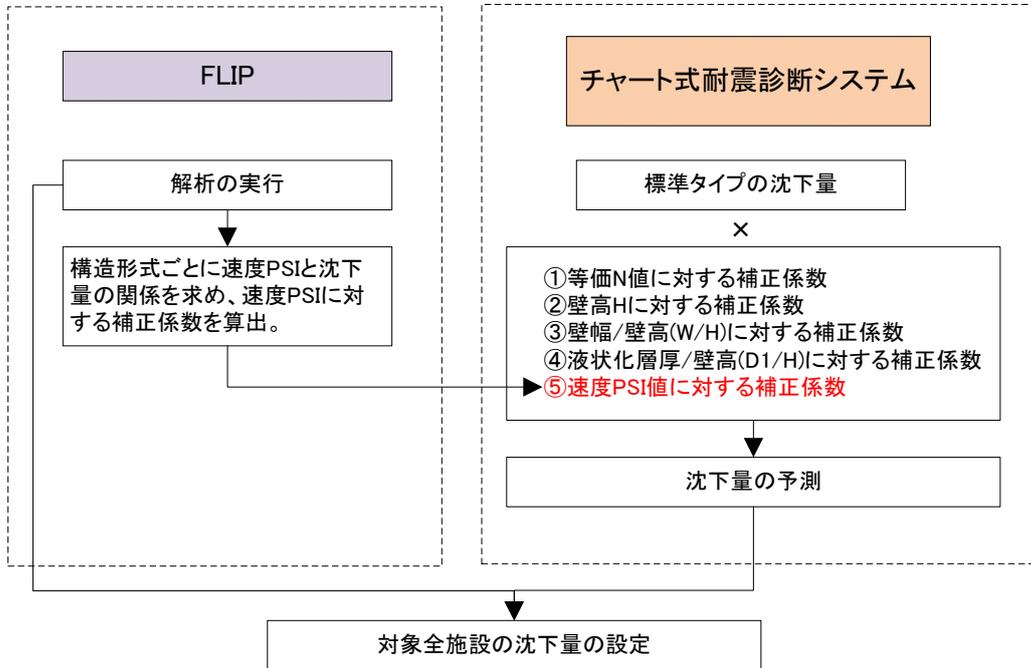


図-参 4-2 チャート式耐震診断システムの沈下予測精度向上方法のフロー
【中国地方整備局作成】

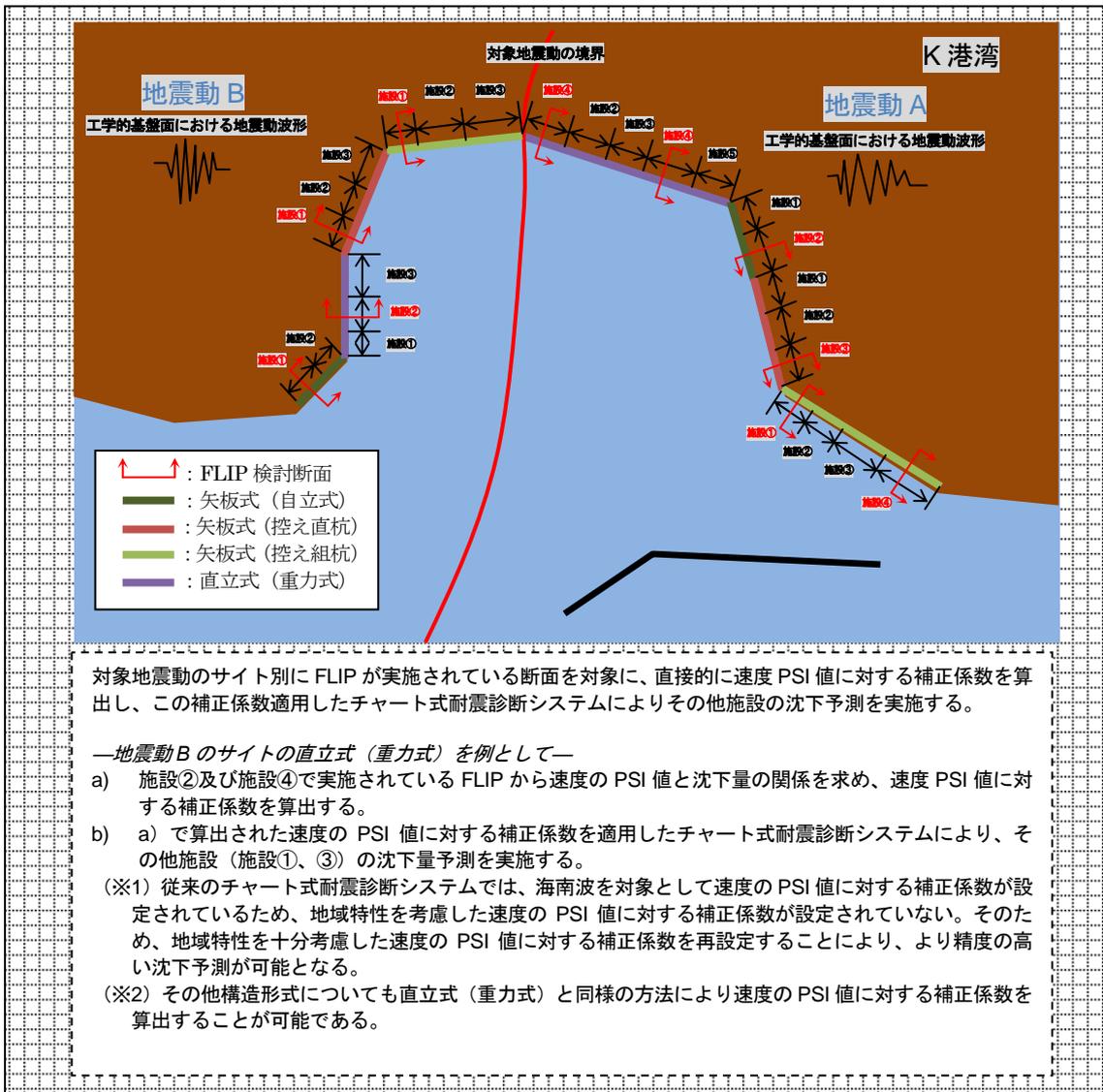


図-参 4-3 チャート式耐震診断システムの沈下予測精度向上方法の概念図

【中国地方整備局作成】

具体的に上記手法で実施した精度向上結果の一例を示す。

チャート式耐震診断システムによる変形量

=標準タイプの変形量×形状及び地盤に関する補正係数×**速度PSI値に関する補正係数(ORI)**・・・(1)

FLIPとチャート式耐震診断システム双方を実施した施設があれば、チャート式耐震診断システムで得られる変形量が精度が高いFLIPと等しくなる補正係数を算定。

着目する補正係数は、チャート式耐震診断システムを作成した際に標準波(海南波)のみから設定した補正係数である速度PSI値に関する補正係数である(地域特性が十分考慮できていない)。



FLIP解析による変形量

=標準タイプの変形量×形状及び地盤に関する補正係数×**速度PSI値に関する補正係数(FLIP)**・・・(2)



チャート式耐震診断システムに用いる速度PSI値に関する補正係数を**チャート式耐震診断システムオリジナルの補正係数：速度PSI値に関する補正係数(ORI)**から式(2)で算定さえる**速度PSI値に関する補正係数(FLIP)**に見直し再検討する。なお、複数の施設で速度PSI値に関する補正係数(FLIP)を求めることにより、上記の見直しの的確性(速度PSI値に関する補正係数(FLIP)の平均値で見直しを実施するのか、速度PSI値に関する補正係数(FLIP)のバラツキが大きいため見直さないのか)を判断する。

速度PSI値の補正係数の見直しはサイト特性が同じエリアの施設のみで実施する。

	チャート式耐震診断システム			
	見直し前の 変形量(m)	標準タイプ の変形量(m)	補正係数	
			地盤・形状	速度PSI値(ORI)
施設A	1.00	1.62	0.361	1.710
施設B	0.98	1.62	0.354	1.710
施設C	1.33	1.62	0.480	1.710
施設D	1.50	1.62	0.542	1.710
施設E	2.30	1.62	0.830	1.710



施設Aは、FLIP解析を実施したため、施設Aから求まる速度PSI値の補正係数(FLIP)を全施設に適応

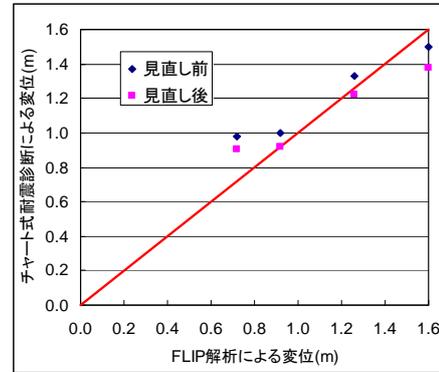
	FLIPによる 変形量(m)	チャート式耐震診断システム			
		見直し後の 変形量(m)	標準タイプ の変形量(m)	補正係数	
				地盤・形状	速度PSI値(FLIP)
施設A	0.92	0.92	1.62	0.361	1.573
施設B		0.90	1.62	0.354	1.573
施設C		1.22	1.62	0.480	1.573
施設D		1.38	1.62	0.542	1.573
施設E		2.12	1.62	0.830	1.573

5施設はFLIPとチャート式耐震診断システム双方を実施しており、前述のように施設Aの結果のみから速度PSI値の補正係数の見直しを実施することにより、精度がどの程度向上したのかを下記に示す。

	FLIPによる 変形量(m)	チャート式耐震診断システム				変形量の比 (チャート式耐震診 断システム/FLIP)
		見直し前 の変形量(m)	標準タイプ の変形量(m)	補正係数		
				地盤・形状	速度PSI値(ORI)	
施設A	0.92	1.00	1.62	0.361	1.710	1.087
施設B	0.72	0.98	1.62	0.354	1.710	1.361
施設C	1.26	1.33	1.62	0.480	1.710	1.056
施設D	1.60	1.50	1.62	0.542	1.710	0.938
施設E	2.40	2.30	1.62	0.830	1.710	0.958
					平均	1.080
					標準偏差	0.169



	FLIPによる 変形量(m)	チャート式耐震診断システム				変形量の比 (チャート式耐震診 断システム/FLIP)
		見直し後 の変形量(m)	標準タイプ の変形量(m)	補正係数		
				地盤・形状	速度PSI値(FLIP)	
施設A	0.92	0.92	1.62	0.361	1.573	1.000
施設B	0.72	0.90	1.62	0.354	1.573	1.252
施設C	1.26	1.22	1.62	0.480	1.573	0.971
施設D	1.60	1.38	1.62	0.542	1.573	0.863
施設E	2.40	2.12	1.62	0.830	1.573	0.882
					平均	0.994
					標準偏差	0.156



施設Aの結果のみから速度PSI値の補正係数の見直しを実施することにより、変形量の比(チャート式耐震診断システム/FLIP)の平均値は1.0に近づき、標準偏差も小さくなり、精度向上の可能性が示唆された。



東日本大震災の被災状況（港内の油流出（その1））
【出典】中国地方整備局「気球空撮システム」より撮影



東日本大震災の被災状況（港内の油流出（その2））
【出典】中国地方整備局「気球空撮システム」より撮影

参考5 港湾全体としての弱点部の評価の一例

チャート式耐震診断を用いた港湾全体としての弱点部の評価の一例を示す。弱点部を明確化することにより、地震により被災を受けるであろう箇所を予め把握することが可能となる。また、より詳細な検討としてFLIP(地震応答解析)を実施すべき箇所を洗い出すことも可能となる。

弱点部の評価項目は、①土砂流出の危険性及び②背後地盤の沈下量の2点について着目する。

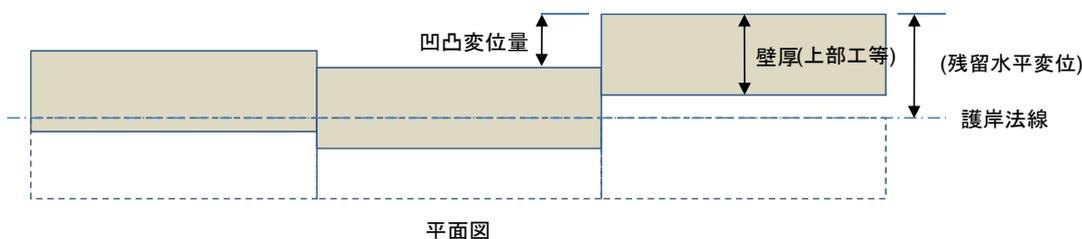
① 土砂流出の危険性は、水平変位を把握することにより照査する。

② 背後地盤の沈下量は、鉛直変位を把握することにより照査する。

具体的には、以下の方法により照査する。

<土砂流出の危険性の評価>

施設背後の土砂流出の危険性検討は一井ら^{※1)}により示されている以下の関係から想定する。なお、チャート式耐震診断の傾斜護岸では水平変形量を算定できないため、藤村・長尾^{※2)}により示されている水平変形量と鉛直変形量の関係を参考にして検討を行う。ただし、藤村・長尾により示されている式はケーソン式構造物における関係である。



兵庫県南部地震の事例調査結果(一井ら)より、連続するケーソンや上部工の凹凸変位量は残留水平変位の1/2倍となる。

したがって、護岸・岸壁の残留水平量の性能規定を行うに当たり、残留水平変位は凹凸変位の2倍以下に抑えなければならないといえる。隣り合うケーソンや上部工の目地が開く限界は凹凸変位量が壁厚(上部工等)以上となった場合であることから、次の式が成立する。

凹凸変位量 = 残留水平変位量 / 2

『残留水平変位 × 1/2 ≥ 壁厚』

となる施設については、背後土砂流出の危険性があると判断する。

図-参5-1 水平変位と土砂流出の危険性の評価方法

【中国地方整備局作成】

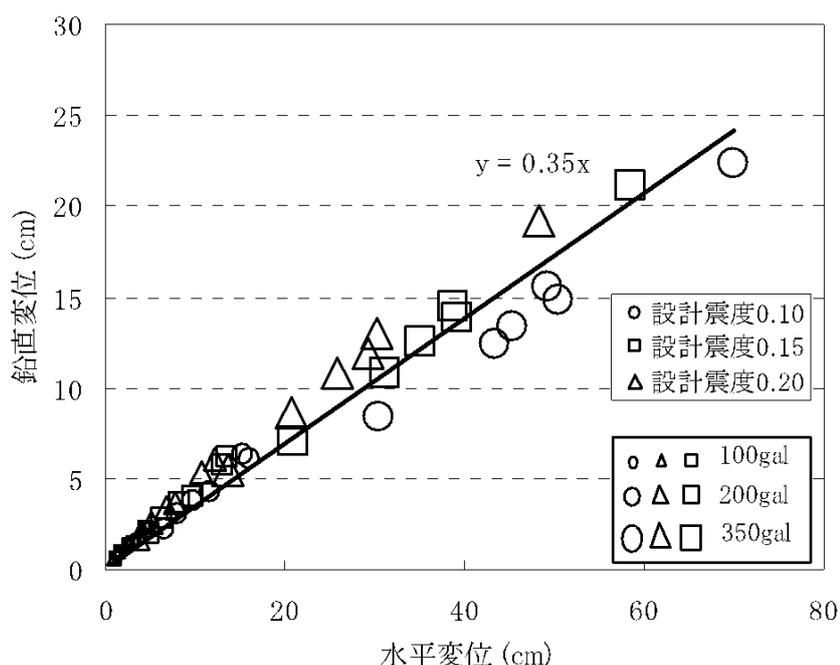


図-参 5-2 水平変位と鉛直変位の関係

【出典】 藤村・長尾：越波流量の算定精度を考慮した護岸天端高の設定方法に関する研究，
国土技術政策総合研究所資料，No.312，June 2006

なお、弱点部の評価には、東日本大震災の港湾施設の被災に関する高橋らの知見(相馬港、小名浜港、茨城港)^{※3)}も考慮した上で設定を行う。東日本大震災の港湾施設の被災状況からは、構造形式の如何に問わず、被災を受けている箇所は施設の隅角部が顕著であることが確認されている(東日本大震災の被災状況整理結果については、参考資料－2 参照)。

※1)一井ら：地震時における重力式岸壁の許容被災変形量の評価，第 10 回地震工学シンポジウム(1998)

※2)藤村・長尾：越波流量の算定精度を考慮した護岸天端高の設定方法に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，No.312，June 2006

※3)高橋ら：2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報，港湾空港技術研究所資料，No.1231，April 2011

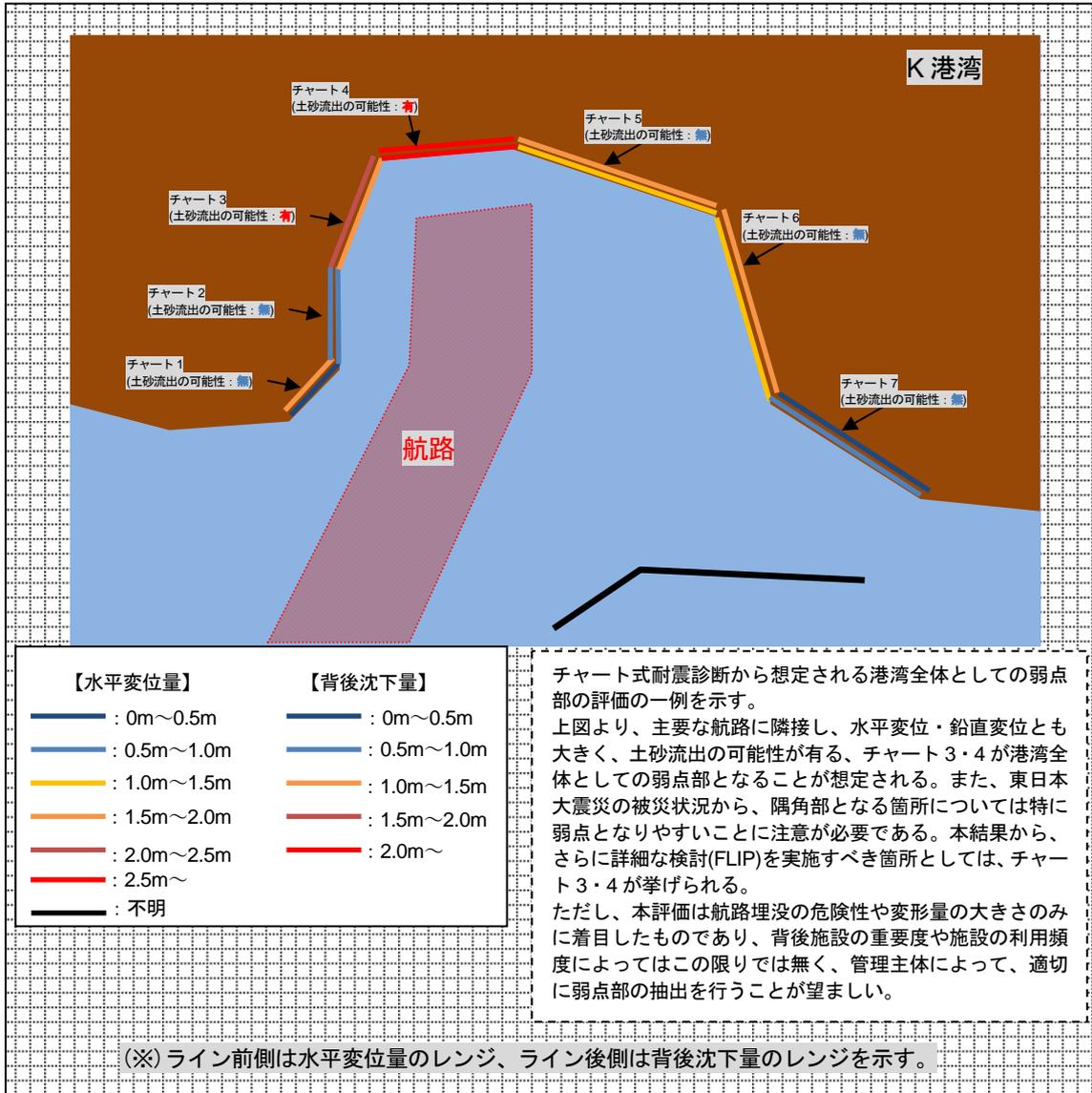


図-参 5-3 港湾全体としての弱点部の抽出の一例

【中国地方整備局作成】

用語集

□■ 目次 ■□

港湾護岸等の耐震性に関する用語

①H/V (エイチオーバーブイ)	50
②液状化強度曲線 (エキジョウカキョウドキョクセン)	50
③N 値と等価 N 値 (エヌチ・トウカエヌチ)	50
④応答スペクトル (オウトウスペクトル)	50
⑤間隙率 n (カンゲキリツ)	51
⑥強震動生成域 (キョウシンドウセイセイイキ)	52
⑦強震動断層域 (キョウシンドウダンソウイキ)	52
⑧K-net (ケイ-ネット)	53
⑨工学的基盤 (コウガクテキキバン)	53
⑩細粒分含有率 F_c (サイリユウブンガンユウリツ)	53
⑪常時微動観測 (ジョウジビドウカンソク)	53
⑫地震基盤 (ジシンキバン)	54
⑬粗密波速度 V_p 、せん断波速度 V_s (ソミツハソクド・センダンハソクド)	54
⑭せん断剛性 G (センダンゴウセイ)	54
⑮速度の P S I 値 (ソクドノピーエスアイチ)	55
⑯塑性指数 (ソセイシスウ)	57
⑰体積弾性係数 K (タイセキダンセイケイスウ)	57
⑱地殻変動 (チカクヘンドウ)	57
⑲非線形有効応力解析 (ヒセンケイユウコウオウリョクカイセキ)	59
⑳PS 検層 (ピーエスケンソウ)	60
㉑ フーリエスペクトル (フーリエスペクトル)	60
㉒ ポアソン比 ν (ポアソンヒ)	61

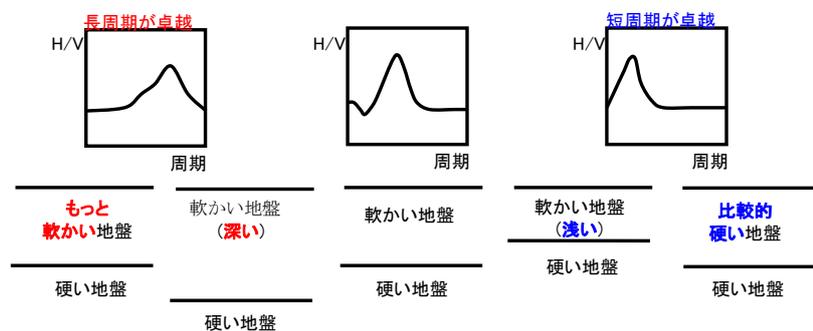
港湾護岸等の耐震性に関する用語

① H/V (エイチオーバーバイ)

常時微動観測(⑩常時微動観測を参照)で得られる H/V スペクトル比とは、地震動の水平動(H:horizontal)と上下動(V: vertical) のフーリエ・スペクトルの比のことを指す。

軟弱な地盤では水平動が増幅されるという特性を基に、上下動(V)で水平動(H)を基準化することで、地盤特性を評価するもの。

H/V スペクトル比の特徴は、図① に示す通り、硬い地盤の観測点では、地震動の H/V スペクトル比は短周期にピークがみられ、堆積層で覆われている比較的軟弱な地盤では、地震動の H/V スペクトル比は長周期にピークが見られる。



図① 地盤と H/V スペクトル比

【中国地方整備局作成】

② 液状化強度曲線(エキジョウカキョウドキョクセン)

液状化抵抗曲線ともいう。液状化に対する土の強さを表す曲線であり、地盤が液状化に至る回数とせん断応力を拘束圧で正規化したものの関係を示したものである。液状化の発生目かに済みについては、非線形有効応力解析の説明に詳しく示す。

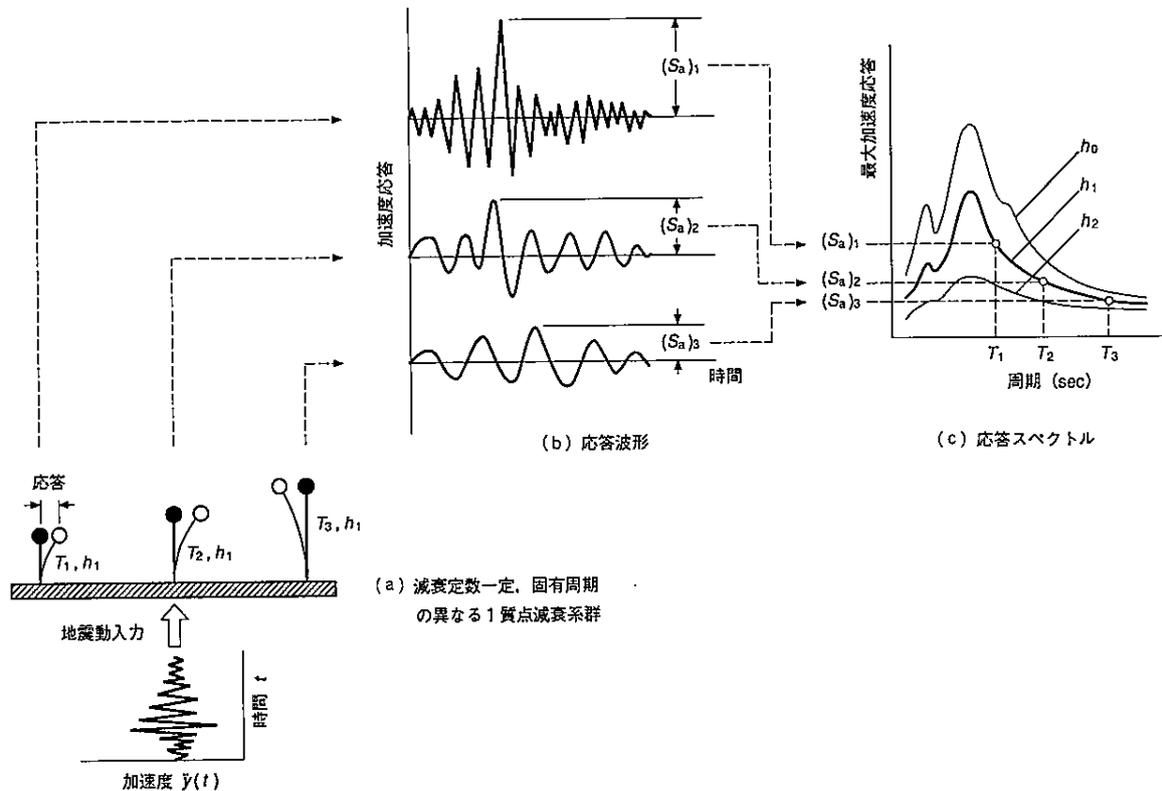
③ N 値と等価 N 値(エヌチ・トウカエヌチ)

N 値とは、ボーリング孔を利用し、質量 63.5 ± 0.5 kg のドライブハンマー (もんけん) を一定の高さから自由落下させて、30 cm 打ち込むのに要する打撃回数を言う。また、等価 N 値は各地層の N 値を有効上載圧が 66 kN/m^2 の場合の同一の相対密度の地層の N 値に換算したものを言う。

④ 応答スペクトル(アウトウスペクトル)

構造物には、それ自身が揺れやすい周波数があり、固有振動数といわれている。高い建物は固有振動数が低く(ゆっくり揺らすとよく揺れる)、低い建物は固有振動数が高い(早く揺らした方がよく揺れる)。このような構造物の特性と、地震動の特性とを両方考え合わせるときに応答スペクトルは便利である。加速度応答スペクトルの説明図を下図に示す。原理は以下の通りである。堅い床の上に、いろいろな固有周期(固有振動数の逆数)を持つ振子を串刺しして並べ、性質を調べたい地震動を入力して床を揺らす。そうすると、床に固定された振り子はそれぞれ別々に揺れる。それぞれの振り子の最大加速度値を、その固有周期に応じてプロットしたのが加速度応答スペクトルである。

これにより、ある固有周期をもつ構造物に対して、どのくらい危険な地震動であるかを調べることができる。例えば、「固有周期が XX 秒の建物には、最大〇〇gal の強さの地震動が作用する」ということが分かる。



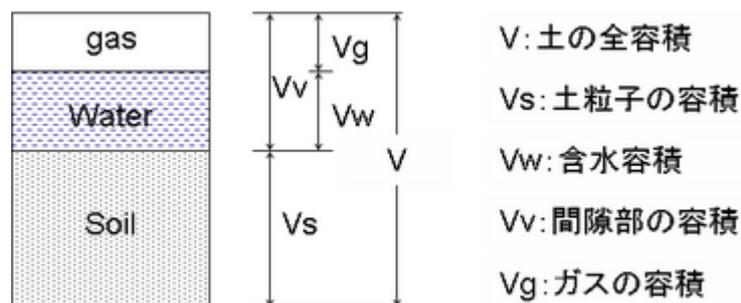
図④ 応答スペクトルの説明図

【出典】新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会

⑤ 間隙率 n (カンゲキリツ)

土を構成する各相の体積を、それぞれ V_s (固相)、 V_g (気相) および V_w (液相) とすると、間隙部分の体積は $V_v = V_g + V_w$ であり、土の全体積は $V = V_v + V_s$ で表わされる。

間隙率 n (%) は、土の間隙の状態を量的に表わすのに用いられ、土の全体積に対する間隙体積の比により表される ($n = V_v / V$)。

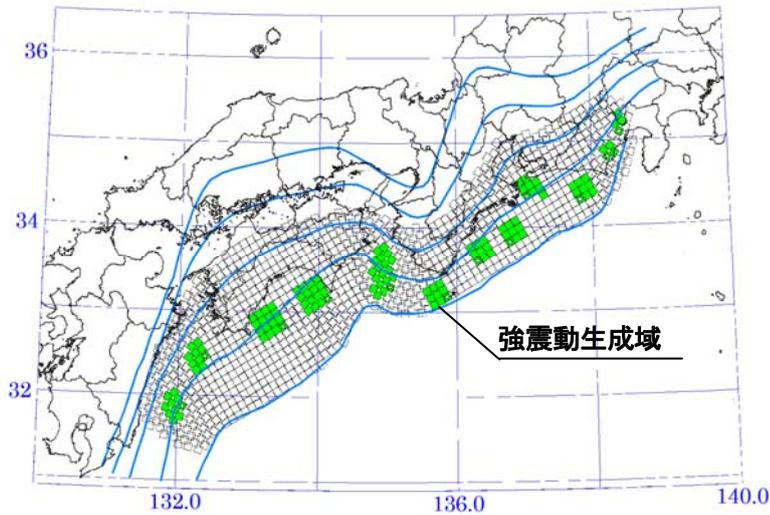


図⑤ 間隙率の概念

【中国地方整備局作成】

⑥強震動生成域(キョウシンドウセイセイイキ)

強震断層域の中でも特に強い地震動を発生させる領域を言う。南海トラフの巨大地震モデル(内閣府及び(独)港湾空港技術研究所)では、●で囲まれた範囲を強震動生成域と設定して、地震動を評価している。

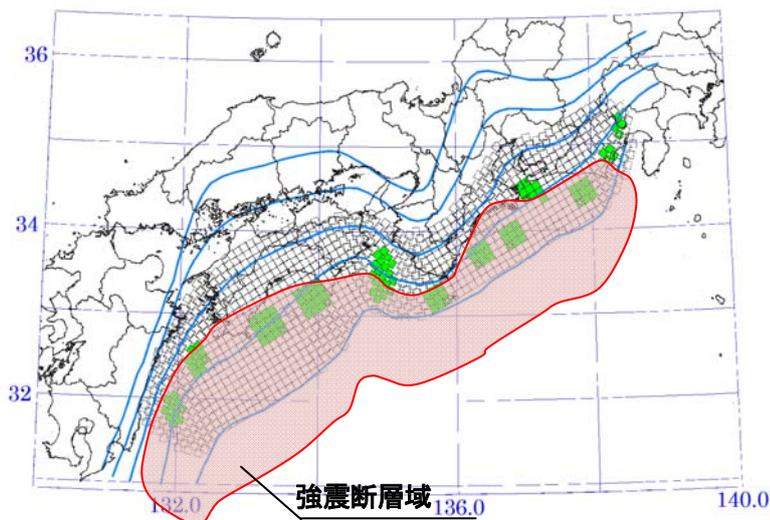


図⑥ 強震動生成域

【出典】南海トラフの巨大地震モデルの検討(第二次報告)強震断層モデル編
図-3.3 に一部加筆

⑦強震断層域(キョウシンダンソウイキ)

地震動を評価するための断層モデルを指す。南海トラフの巨大地震モデル(内閣府及び(独)港湾空港技術研究所)では、■で囲まれた範囲を強震断層域と設定して、地震動を評価している。



図⑦ 強震断層域

【出典】南海トラフの巨大地震モデルの検討(第二次報告)強震断層モデル編
図-3.3 に一部加筆

⑧K-net(ケーネット)

K-net は 1995 年兵庫県南部地震後に科学技術庁防災科学技術研究所により全国 1000 地点(現在 1001 地点)に設置された強震計ネットワークであり、日本全国に約 25km 間隔で同一のスペックを持つ加速度型強震計を設置することにより、非常に均質な観測を行う事ができる。地震記録は収録後直ちに公開されるとともに、自治体等の要請に応じて観測点から直接データを提供することができるよう設計されている。多くの観測点は役場などの公共施設等の敷地内に設置されており、硬質岩盤上に設置される場合に比べ、より人間の生活圏に近い条件で観測が行われているといえる。

⑨工学的基盤(コウガクテキキバン)

以下に示す条件を満足する基盤面を指す。

- ・岩盤
- ・標準貫入試験値 (N 値) が 50 以上の砂質土層
- ・一軸圧縮強度が 650[kN/m²]以上の粘性土層
- ・せん断波 (S 波) 速度が 300[m/s]以上の土層

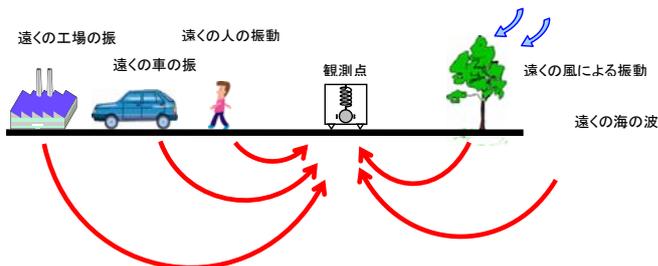
⑩細粒分含有率 Fc(サイリュウブンガンユウリツ)

土の乾燥質量に対して金属製網ふるい 75 μ m 通過分の乾燥質量が占める割合を百分率で表したものを言う。一般的に粘性土、シルト等は細粒分含有率が高く、砂質土は細粒分含有率が小さい。

⑪常時微動観測(ジョウジビドウカンソク)

地盤の常時微動は、下図に示す通り、地盤中を伝播する人工的または自然現象による種々の振動のうち、特定の振動源から直接的に影響を受けない状態で、さまざまな振動によって誘起される微小な地盤振動を指す。

常時微動観測は、この微小な地盤振動を測定して地盤の振動特性の推定や地盤種別の判定などに利用するために行うものである。



図⑪ 常時微動観測のイメージ

【中国地方整備局作成】

常時微動観測は、一箇所当たり 2 人一組で概ね 15 分程度の観測時間を要し、一日当たり 10 箇所程度の観測が可能である。

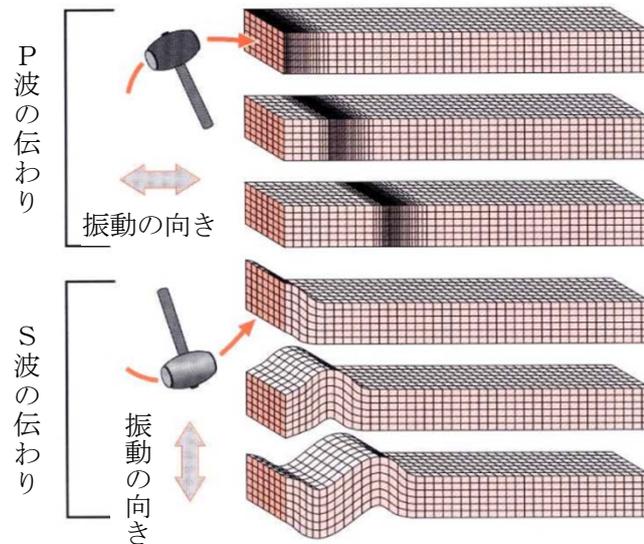
費用は地点数、計測点の位置関係による。

⑫地震基盤(ジシンキバン)

せん断波速度 3km/s 以上の岩盤を指す。

⑬粗密波速度 V_p 、せん断波速度 V_s (ソミツハソクド・センダンハソクド)

地震波には、進行方向と同じ方向に振動する粗密波(P波)と進行方向と直交方向に振動するせん断波(S波)がある。これらの波が伝わる速度をそれぞれ粗密波速度 V_p 、せん断波速度 V_s と呼ぶ。

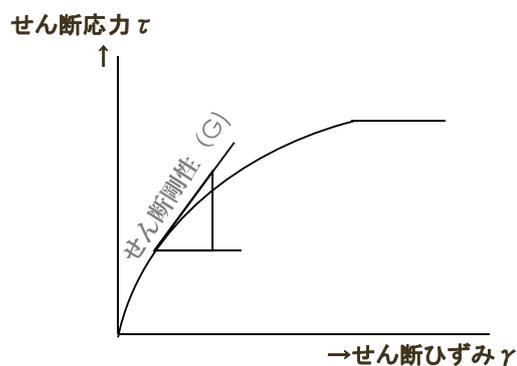


図⑬ P波とS波のイメージ

【中国地方整備局作成】

⑭せん断剛性 G (センダンゴウセイ)

図⑭に示すせん断応力 τ と、せん断ひずみ γ の関係から得られる傾きを指し、 $\tau = G\gamma$ の関係がある。



図⑭ せん断応力 τ -せん断ひずみ γ の関係

【中国地方整備局作成】

⑮速度のPSI値(ソクドノピーエスアイチ)

(独) 港湾空港技術研究所により定義され、港湾構造物の変形量の推定する評価指標として用いられており、次のような特徴を有している。

- ① 速度波形の二乗の時間積分値の平方根として定義される量で単位は (cm/s^{1/2}) である。

$$\text{速度のPSI値} = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} v^2(t) dt} \quad (\text{cm/s}^{1/2}) \quad \text{ここに} \quad \begin{cases} v = \text{速度 (cm/s)} \\ t = \text{時間 (s)} \end{cases}$$

- ② 地震の継続時間、周波数特性を考慮して地震動レベルを評価できる指標である。
③ 港湾構造物の変形量に対して非常に良い相関(線形関係)にあることが分かっている。
④ その大きさを確認することで、構造物の変形量の大小を感覚的にイメージすることができる。

地震動の性質を表現する指標として

最大加速度、最大速度、最大変位、気象庁の計測震度、速度のPSI値などがある。これらの中で、気象庁の計測震度、速度のPSIが他の指標と比較して相対的に周波数特性の影響が考慮されている。

様々な指標と港湾施設の被害程度(変形量)の相関を見てみると、速度のPSI値が最も良い相関係数となることが確認されている。

例えば、**図⑮-1**に示すように、最大加速度と残留変位の相関、最大速度と残留変位の相関、加速度のPSI値と残留変位の相関、速度のPSI値と残留変位の相関を比較した場合、変形量に対して速度のPSI値が最も良い相関を示していることが分る。この理由として、最大加速度値、最大速度値は瞬間的な地震動の強さを表す数値であり、波形として予測した地震動の全体的な強さを反映した数値でないことが原因と考えられる。

速度のPSI値が、構造物の変形量の大小を感覚的にイメージすることができる事例として、地震規模の目安に兵庫県南部地震および日本海中部地震で観測された地震動の速度のPSI値を示す。

- ・兵庫県南部地震で観測された地震による速度のPSI値は概ね 99(cm/s^{1/2})である。
- ・日本海中部地震で観測された地震による速度のPSI値は概ね 66(cm/s^{1/2})である。

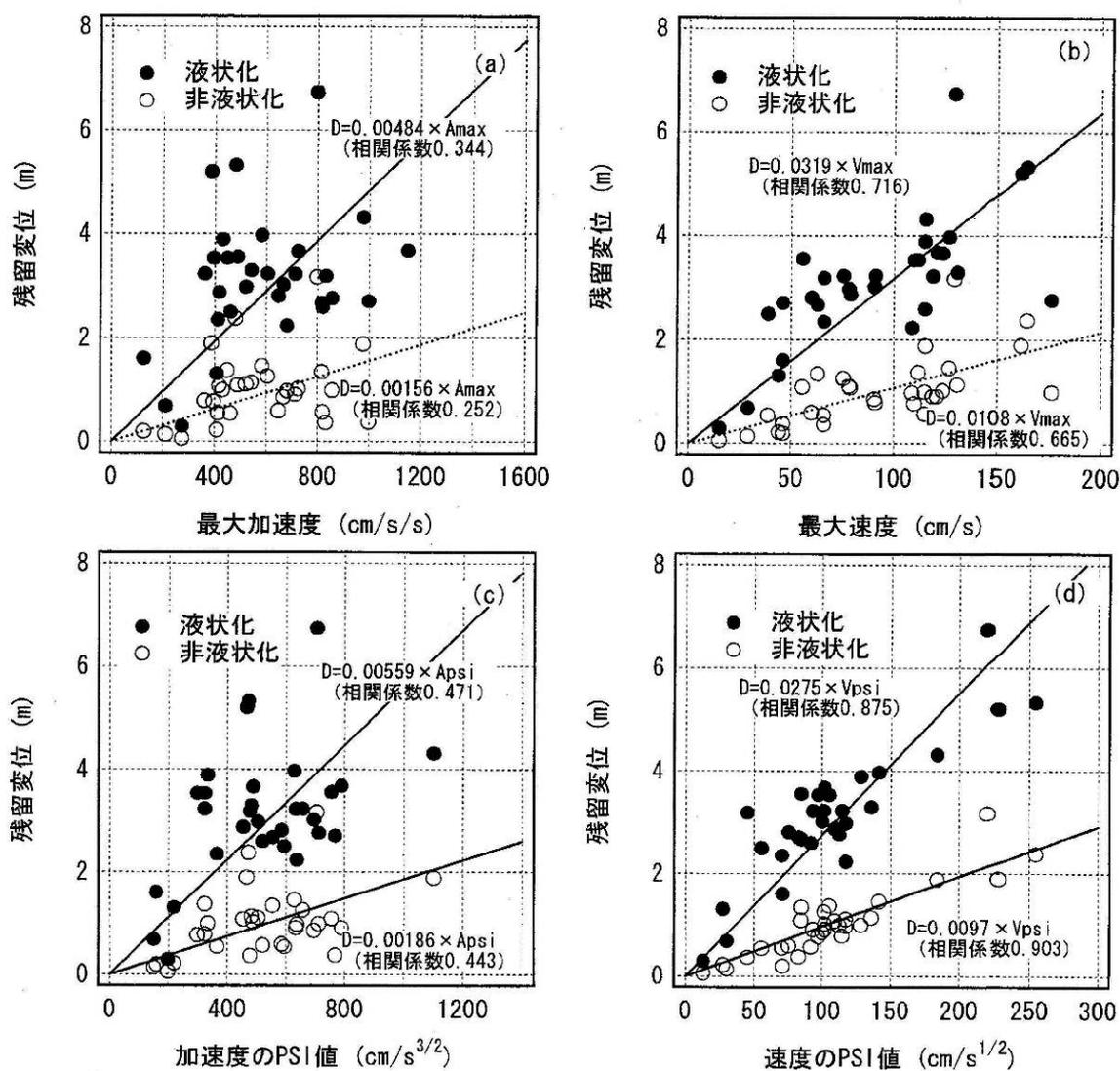
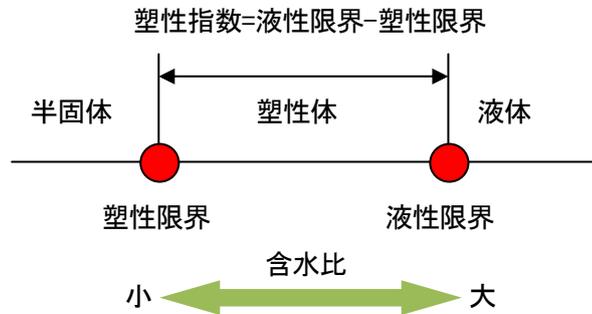


図15-1 岸壁の変形量と地震動の指標との関係

【出典】 野津厚, 井合進(2001): 岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 第28回関東支部技術発表会講演概要集, 土木学会関東支部, pp.18-19.

⑩塑性指数(ソセイシスウ)

土に含まれる細粒分等が塑性状態にある含水量の大きさを言い、液性限界と塑性限界の含水比の差で表される。この指数は土の分類に使われる。液性限界とは、土が塑性体から液体に移るときの境界の含水比を指し、塑性限界は半固体から塑性体に移るときの境界の含水比を指す。



図⑩ 塑性指数

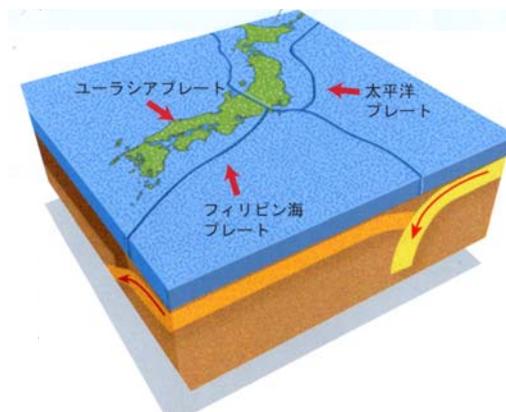
【中国地方整備局作成】

⑪体積弾性係数 K(タイセキダンセイケイスウ)

体積弾性係数とは、軸方向荷重による材料の体積変化に対する応力の比率を指す。弾性係数(E)とポアソン比(ν)によって決まり、 $K=E/(1-2\nu)$ の関係がある。

⑫地殻変動(チカクヘンドウ)

津波を引き起こす海溝型地震(プレート境界付近で起こる地震)は、海洋プレートが陸の下にもぐりこみ、陸のプレートを引きずり込み、プレートのひずみが限界に達すると、プレート境界で陸のプレート先端部が跳ね上がるにより生じる地震である。その際、プレートが跳ね上がるにより、それまで海側のプレートの押込みにより盛り上がっていた陸側のプレートが、応力解放されて押し込まれる前の高さまで戻れることを地殻変動と言う。

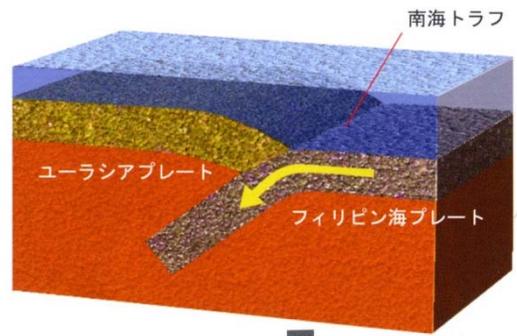


図⑩-1 日本列島沿岸のプレート

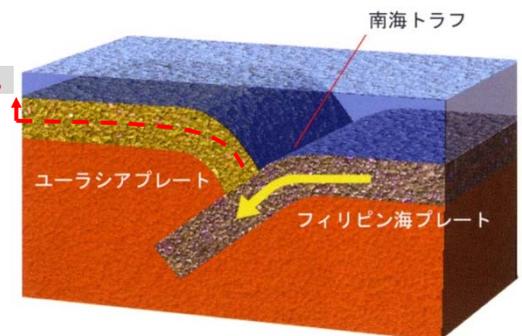
【中国地方整備局作成】

南海トラフを例に、地殻変動及び津波の発生機構について1例を示す。

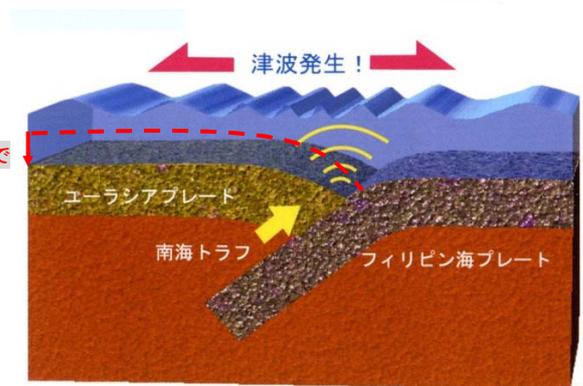
(1) ゆっくりとフィリピン海プレートがユーラシアプレートを押し込む。



(2) 押し込まれ続けることにより、徐々にプレートが盛り上がる。徐々にユーラシアプレートが盛り上がる。



(3) プレートのひずみが限界に達した時にプレートが跳ね上がり、津波が発生するとともに、プレートが押し込まれる前の高さまで戻る(地殻変動)。押し込まれる前の高さまでプレートの高さが戻る。

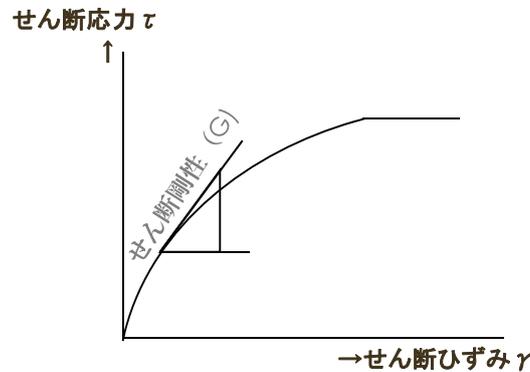


図⑩-2 南海トラフにおける津波の発生機構

【中国地方整備局作成】

⑱非線形有効応力解析(ヒセンケイユウコウオウリョクカイセキ)

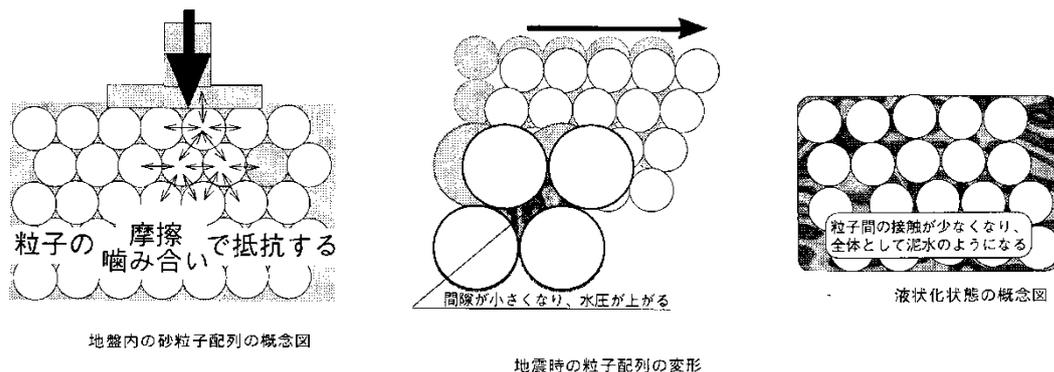
通常、地盤はせん断応力とひずみの間には図⑱-1に示すようにひずみが大きくなるとせん断剛性が小さくなるといった関係があり、線形弾性体とは異なる挙動を示す。このようにひずみレベルに応じてせん断剛性が変化する地盤を、非線形の地盤モデルとして評価する手法を非線形解析と呼ぶ。



図⑱-1 地盤のせん断応力とせん断ひずみの関係

【中国地方整備局作成】

一方、水位面下の地盤では土粒子と水が介在した状態となっており、地震動によって繰返しせん断力を受けた場合、地盤が液状化することが確認されている。液状化は図⑱-2に示す通り、常時は土粒子のかみ合い(粒子間接点で力を伝達)により外力に対して抵抗しているが、地震時には、土粒子が揺すられることにより、土粒子間の間隙が小さくなり間隙水圧が上昇し、土粒子間のかみ合いが弱まることにより(粒子間の接点が少ない)、荷重に対して抵抗できる反力が徐々に小さくなり、最終的には泥水のような現象のことを指す。この現象を表現するため、水要素と土要素をモデル化し、地震時に水圧が上昇することまでを考慮した手法を有効応力解析と呼ぶ。



図⑱-2 液状化の発生メカニズム

【中国地方整備局作成】

前述した、地盤の非線形性をモデル化した地盤を適用し、地盤中の水圧上昇を合わせて考慮できる解析モデルを非線形有効応力解析と呼ぶ。

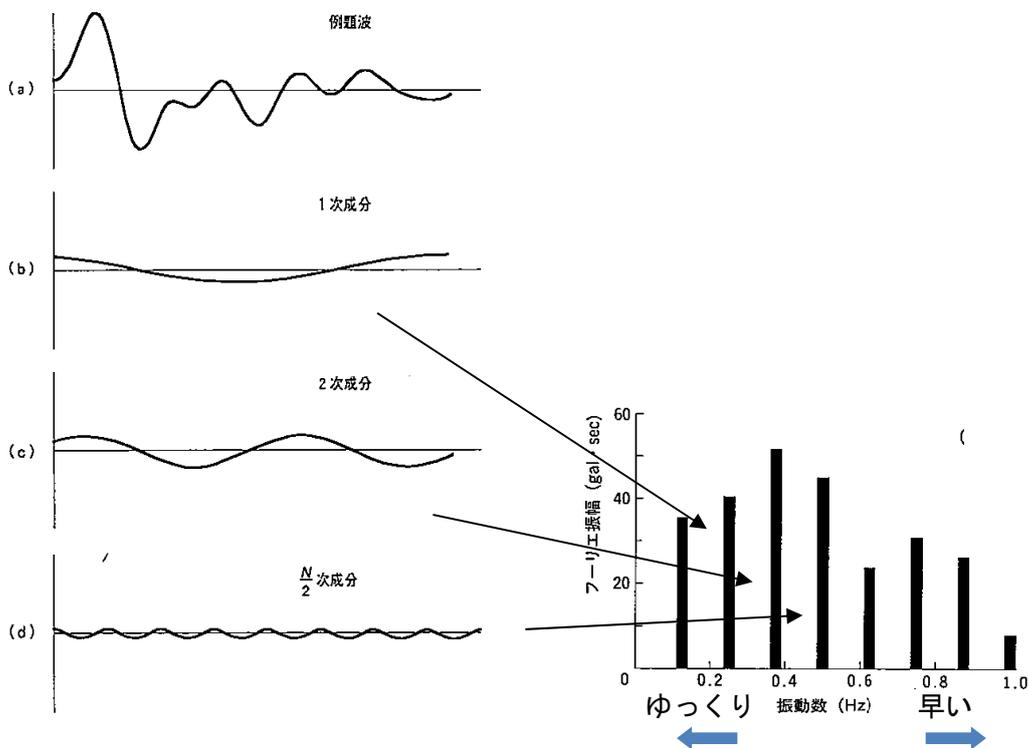
⑳PS 検層(ピーエスケンソウ)

弾性波速度検層とも呼び、ボーリング孔を利用して地盤内を伝播する弾性波(P波・S波)の深さ方向の速度分布を測定するものである。地盤中を伝播する弾性波動には、波動の振動方向と進行方向が一致するP波(縦波)と、深度方向が進行方向に対して直角になるS波(横波)の2種類がある。

測定方法は、ダウンホール方式と孔内起振受振方式の2種類があり、孔内の状況によって適宜選択する。ダウンホール方式は、地表に起振点を設置するため厚い舗装や既設構造物がある場合は不向きである。孔内起振受振方式は、地表起振点が不要なためあらゆる現場に適用可能であるが、孔内水を必要とするため、地下水面以浅の土層には適さない。

㉑フーリエスペクトル(フーリエスペクトル)

フランスの数学・物理学者フーリエ(1768～1830)は、あらゆる不規則な波形が、いろいろな周波数(揺れの早さ)を持つ単調な正弦波の足し合わせで成り立っていることを発見した。イメージを下図に示す。(b)と(c)と(d)と(もっと早く揺れる波も)全部単純に足し合わせると(a)の不規則な波となる。ただし、(b)～(d)のそれぞれの波の大きさ(振幅)とスタートする位置(0から始まるわけではない)を適切に設定する必要がある。横軸に(b)や(c)や(d)やその他の周波数を、縦軸にその振幅をプロットしたものが、フーリエ振幅スペクトルであり、波形を眺めていても評価するのが困難だが非常に重要な情報である、「どのくらいの早さで揺れる波がどのくらい含まれているのか」を明確に知ることができる。



図⑳ フーリエスペクトルの概念図

【出典】新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会

◎ポアソン比 ν (ポアソンヒ)

弾性限界内で、例えば引張りを加えた時に荷重方向の伸び(ひずみ%)、と荷重に直角方向の寸法の縮み(ひずみ%)の比をいう。

『港湾護岸等の耐震性検討マニュアル』に関する問い合わせ・相談窓口

本マニュアルに基づき港湾護岸等の耐震検討を行う中で、進め方が分からない場合やデータの入手方法が不明な場合、判断に迷った場合などは、下記窓口にご相談頂きたい。

中国地方整備局 広島港湾空港技術調査事務所 電話：082-545-7017

FAX：082-545-7019

液状化相談窓口

国土交通省港湾局では、各地方整備局等に港湾施設の液状化相談窓口を開設し、港湾施設を保有する民間企業や港湾管理者等に対して港湾施設の液状化対策に関する相談サービスを提供しています。

港湾における液状化相談窓口

- ◆相談内容：
 - ・港湾における液状化予測・判定法に関すること
 - ・チャート式耐震診断システムの貸出及び使用に関すること
 - ・液状化対策に関すること等

◆各地域の相談窓口

地域	所属	連絡先
北海道	北海道開発局	電話：011-709-2311
	港湾空港部 港湾建設課	FAX:011-709-2147
東北	東北地方整備局	電話：022-791-2116
	仙台港湾空港技術調査事務所	FAX:022-292-5366
関東	関東地方整備局	電話：045-461-3897
	横浜港湾空港技術調査事務所	FAX:045-461-3899
北陸	北陸地方整備局	電話：025-222-6115
	新潟港湾空港技術調査事務所	FAX:025-227-3225
中部	中部地方整備局	電話：052-612-9984
	名古屋港湾空港技術調査事務所	FAX:052-612-9477
近畿	近畿地方整備局	電話：078-331-0409
	神戸港湾空港技術調査事務所	FAX:078-391-5680
中国 (山口県下関市除く)	中国地方整備局	電話：082-545-7017
	広島港湾空港技術調査事務所	FAX:082-545-7019
四国	四国地方整備局	電話：087-811-5661
	高松港湾空港技術調査事務所	FAX:087-811-5670
九州 (山口県下関市含む)	九州地方整備局	電話：083-224-4130
	下関港湾空港技術調査事務所	FAX:083-224-4141
沖縄	沖縄総合事務局	電話：098-866-1906
	開発建設部 港湾計画課	FAX:098-861-9916

- ◆受付時間：9:30~12:00 と13:00~17:00 (土・日・祝祭日を除く)