

国土交通省港湾局監修

港湾の施設の技術上の 基準・同解説

(上 巻)

平成30年5月

公益社団法人 日本港湾協会

発刊にあたって

この度、当協会が発行している「港湾の施設の技術上の基準・同解説（以下「技術基準」という）」が平成19年以来11年ぶりに大幅に改訂されることになりました。これは、平成29年12月に「港湾の施設の技術上の基準を定める省令」及び「港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示」が改正され、本年4月1日より施行されたことを受けた改訂であります。国土交通省港湾局、国土技術政策総合研究所、港湾空港技術研究所はじめ、全国の港湾技術者の長年に亘るご努力に敬意を表しますとともに、心から感謝を申し上げます。

この改訂では、少子・高齢化時代を踏まえた生産性向上の推進、既存ストックの有効活用の促進、防災・減災対策の強化、国際競争力の向上、海域環境の保全・再生・創出等の幅広い分野において、技術的な知見の蓄積や社会的な情勢の変化等を踏まえた内容が盛り込まれております。

また、別途発行しておりました「港湾調査指針」につきまして、「技術基準」の中の参考技術資料に取り込んで掲載致しました。これにより、「技術基準」をより一層体系的に記載し、効果的に活用できるものと致しました。

本書により、技術者の新たな知見の習得とレベルアップが図られ、その役割が一層果たされるとともに、我が国が有する高い技術力が国際社会において積極的に活かされていくことを祈念しております。

平成30年5月

公益社団法人 日本港湾協会会長

宗岡 正二

推薦のこゝば

周囲を海に囲まれ、臨海部に人口、資産などが集積する我が国において、港湾は物流や人流を支える海上輸送と陸上輸送の結節点として、国民生活の向上や社会経済の発展に大きな役割を果たしてきました。港湾に係る技術基準は、昭和25年の「港湾工事設計示方要覧」発刊以来、各時代の要請に応えた港湾整備を推進するため、港湾技術者の総力を結集した最新の研鑽の成果として、概ね10年毎に取りまとめられてきました。

現在、我が国は、人口減少社会を迎え、働き手の減少を上回る生産性の向上等が求められています。海を挟んで諸外国と繋がる港湾の生産性向上は、我が国の経済発展を支える鍵であると言っても過言ではありません。こうした背景を踏まえ、今般、遠隔操作化等された移動式荷役機械について、「港湾の施設の技術上の基準」の規定を新たに制定するとともに、調査・設計・施工・維持の建設生産プロセス全体の生産性向上を図るため、ICTの活用等を促し、効率的な設計を可能とする体制を整えました。

日本港湾協会から刊行される本書は、上記に加え、急速なインフラの老朽化、コンテナ船やクルーズ船の大型化、切迫する南海トラフ・首都直下等の巨大地震への対応等、昨今の港湾を取り巻く社会ニーズに適確に対応するための内容も拡充されています。

具体的には、維持管理と連携した設計に係る内容が拡充されるとともに、既存施設の改良設計の考え方が明確化され、既存ストックの有効活用を促進する体制が整えられています。また、船舶については、就航中のみならず建造中の船舶も考慮するなど最新の大型船にも対応した内容に拡充されています。加えて、東日本大震災等から得られた新たな知見・教訓を踏まえ、耐震設計・耐津波設計の高度化を図り、防災・減災対策の強化に係る規定が拡充されています。このほか、最新の技術開発成果、生物共生型防波堤等の現場で培った技術的知見も多数取り入れられています。

このように、本書は港湾の技術基準の内容を分かりやすく解説するものとして、港湾技術の最高権威を集めて作成されています。

本書が港湾関係者の必携の技術的参考資料として幅広く活用され、「港湾の施設の技術上の基準」の実効性を高め、より良い港湾整備の実現に資することを期待します。

国土交通省港湾局長

菊地 身智雄

序 文

「港湾の施設の技術上の基準を定める省令」及び「港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示」が改正され、本年4月1日より施行されました。これを受けて、港湾技術者が港湾施設の設計を適切に対処していくための参考資料として、(公社)日本港湾協会から本書が刊行されました。

刊行に先立ち、学識経験者や行政関係者等、幅広い専門分野から多数の委員の参加を得て当委員会が設置され、本書の構成、内容など幅広い見地から熱心に検討を行ってきました。

当委員会では、国土交通省の省令及び告示の改正を受けて、性能設計法の効率化、港湾施設の維持管理を考慮した設計、既存施設の有効活用のための改良設計の考え方の明確化、地震、津波、高潮などの自然災害の教訓を踏まえた設計手法の提示、グローバル化の進展に対応した港湾計画の見直し、自然環境の保全・再生・創出のための規定等、幅広い項目で最新の技術的知見について、分かり易くかつ詳細な解説を体系的に記述しました。

したがって本書は港湾技術者を対象とした技術上の基準の解説書にとどまらず、土木工学での最新の港湾技術の集大成とも言えます。

港湾関係者をはじめとする多くの方々に本書が活用され、適正かつ効率的な港湾の整備に資するのみならず、国内外の港湾技術の普及に大いに貢献することを祈念する次第です。

港湾の施設の技術上の基準・同解説(施設編) 検討委員会

委員長 清宮 理

序 文

「港湾調査指針」は昭和46年4月に公刊されて以降、昭和62年に改訂版が発刊され、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（以下「技術基準」という）」の姉妹編として併用され、港湾に関する各種の技術的調査の精度向上と効率化のため、広く活用されてきました。しかしながら、昭和62年の改訂以来、30年にわたって改訂が行われなかった間に、情報関連技術の急速な発展により、気象・海象、土質及び材料等に係る試験や測量、観測といった各種調査における港湾技術は著しく進展を遂げました。特に、パーソナルコンピュータの記憶容量や計算速度の進歩は、それまでには考えられないような高度なシミュレーションを可能にし、設計実務への応用を大きく前進させています。

当委員会では、これらの調査全般について最新の技術的知見を加え、「港湾調査指針」を大幅に改編し、それを「技術基準」の中に参考技術資料として掲載することにいたしました。これは調査が設計と密接に関連していることを重視したものであります。特に、性能設計が「技術基準」に導入されるに伴い、設計時に求められた要求性能を構造物が満足していることを照査して示さなくてはならなくなり、照査技術と密接に関連している調査技術の重要性が増大したこととも係わっています。また、調査、設計、施工、維持管理といった構造物の安全性に係わる一連のプロセスを一層効率的に達成できるように配慮したものであります。高度化が進む設計思想やその背景をより深く理解し、港湾に対する多様な要請に対応できる技術力の向上も意図しています。

本書が港湾行政に携わる各位に広く活用され役立つとともに、本書を通して港湾調査技術がさらに進化することを祈念するものであります。

おわりに、本書の編集に携わられた方々の一方ならぬ御尽力と御熱意に対し、深謝の意を表するとともに衷心より厚く御礼申し上げます。

港湾の施設の技術上の基準・同解説（調査編）検討委員会

委員長 高山 知司

港湾の施設の技術上の基準・同解説（施設編）検討委員会 名簿

委員長	清宮 理	早稲田大学教授
委員	池田 薫 (矢下 忠彦)	(公社) 日本港湾協会 専務理事
委員	池田 龍彦	放送大学 副学長
委員	伊藤 直和	(一社) 海洋調査協会 専務理事
委員	岩波 光保	東京工業大学大学院教授
委員	江河 直人	(一財) 港湾空港総合技術センター 業務執行理事
委員	大村 哲夫	(一社) 港湾技術コンサルタント協会 会長
委員	小田 勝也 (池上 正春)	(一財) みなと総合研究財団 業務執行理事
委員	風間 基樹	東北大学大学院教授
委員	菊池 喜昭	東京理科大学教授
委員	木村 克俊	室蘭工業大学教授
委員	栗山 善昭	国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 所長
委員	小山 彰	(一財) 国際臨海開発研究センター 専務理事
委員	白石 悟	北海道科学大学教授
委員	白石 哲也	(一社) 港湾荷役機械システム協会 専務理事
委員	高山 知司	京都大学名誉教授
委員	竹村 淳一 (角 浩美)	東京都港湾局 計画調整担当部長
委員	戸田 和彦	(一社) 日本建設業連合会 常務執行役
委員	福田 功	(一社) 日本埋立浚渫協会 専務理事
委員	本城 勇介	岐阜大学名誉教授
委員	三宅 光一 (春日井 康夫)	国土交通省国土技術政策総合研究所 副所長
委員	村山伊知郎	横浜港埠頭(株) 担当理事
委員	山本 修司	(一財) 沿岸技術研究センター 参与
委員	横田 弘	北海道大学大学院教授

※() 書き氏名は前任者

(五十音順)

港湾の施設の技術上の基準・同解説（調査編）検討委員会 名簿

委員長	高山 知司	京都大学名誉教授
委員	岩波 光保	東京工業大学大学院教授
委員	菊池 喜昭	東京理科大学教授
委員	栗山 善昭	国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 所長
委員	田中 洋行	北海道大学教授
委員	中村 由行	横浜国立大学教授
委員	広瀬 宗一	(一社) 港湾技術コンサルタンツ協会 理事
委員	福井 正幸	(一社) 海洋調査協会 調査研究委員長
委員	福手 勤	東洋大学教授
委員	三宅 光一	国土交通省国土技術政策総合研究所 副所長 (春日井 康夫)
委員	山本 修司	(一財) 沿岸技術研究センター 参与

※ () 書き氏名は前任者

(五十音順)

港湾の施設の技術上の基準・同解説（施設編）検討委員会
編集調整小委員会 名簿

小委員長	西園 勝秀		
副小委員長	宮田 正史		
海象・耐津波部会	河合 弘泰 <u>鈴木 高二朗</u> 内藤 了二 平山 克也	川口 浩二 鈴木 健之 中川 康之 米山 治男	鮫島 和範 高川 智博 中村 聡志
地盤・耐震部会	大矢 陽介 高橋 英紀 森川 嘉之	小濱 英司 <u>野津 厚</u> 渡部 要一	佐々 真志 水谷 崇亮
航路・荷役部会	安部 智久 吉江 宗生	岩崎 幹平 米山 治男	<u>山形 創一</u>
環境部会	井上 徹教 佐々 真志	<u>岡田 知也</u> 細川 真也	桑江 朝比呂
構造・材料・維持 管理部会	伊豆 太 加藤 絵万 <u>松本 英雄</u> 山路 徹 渡部 要一	井山 繁 川端 雄一郎 水谷 崇亮 山田 昌郎	宇野 健司 坂田 憲治 森川 嘉之 米山 治男
総括部会	高橋 康弘 土佐 一也 米山 治男	竹信 正寛 福永 勇介	坪川 将丈 <u>宮田 正史</u>

※下線は平成30年3月31日現在の部会主査

(五十音順)

港湾の施設の技術上の基準・同解説(調査編) 検討委員会
編集調整小委員会 名簿

小委員長	西園 勝秀		
副小委員長	松本 英雄	宮田 正史	
海象・耐津波部会	奥村 勝紀	河合 弘泰	川口 浩二
	河辺 一明	佐藤 典之	鮫島 和範
	鈴木 高二朗	鈴木 健之	高川 智博
	寺西 和佳	内藤 了二	中川 康之
	中村 聡志	平山 克也	福富 直
	三井 正雄	森重 輝政	山田 秋彦
	米山 治男		
地盤・耐震部会	大矢 陽介	小濱 英司	近藤 勉
	佐々 真志	白井 康夫	高橋 英紀
	野津 厚	八谷 好高	水谷 崇亮
	森川 嘉之	吉田 武志	渡部 要一
環境部会	井上 徹教	岡田 知也	小田 秀夫
	黒川 忠之	桑江 朝比呂	合田 賀彦
	小林 聡	佐々 真志	細川 真也
構造・材料・維持 管理部会	伊豆 太	井山 繁	宇野 健司
	加地 隆之	加藤 絵万	川端 雄一郎
	小島 富士夫	坂田 憲治	八谷 好高
	松本 英雄	水谷 崇亮	森川 嘉之
	山路 徹	山田 昌郎	米山 治男
総括部会	安部 智久	岩崎 幹平	大矢 陽介
	織田 和夫	桑田 浩二	小島 富士夫
	小関 真征	小濱 英司	小林 行吉
	五味 久昭	佐々 真志	佐貫 哲朗
	高川 智博	高橋 康弘	竹信 正寛
	坪川 将丈	土佐 一也	野津 厚
	福井 正幸	福永 勇介	宮田 正史
	山形 創一	山本 貴春	吉江 宗生
	芳倉 勝治	米山 治男	

※下線は平成30年3月31日現在の部会主査

(五十音順)

港湾の施設の技術上の基準・同解説 編集協力者

青井 晃樹	青木 さやか	青木 伸之	赤倉 康寛
浅井 正	安立 重昭	安部 浩史	荒木 英二
安部 将哉	安部 義美	伊賀 浩之	池田 高則
池町 円	諫山 太郎	石原 洋	石本 健治
泉 照久	一政 悟	伊藤 春樹	伊藤 裕裁
井上 博士	今井 茂	岩崎 直晃	岩田 直樹
上島 顕司	上田 茂	上田 裕章	上原 泰正
上邨 知輝	魚住 研司	牛嶋 純	内田 賢一
江本 翔一	遠藤 仁彦	遠藤 敏雄	及川 隆
大角 和輝	大竹 雄	大津 皓平	大塚 尚志
大野 勉	大村 厚夫	岡 祥司	尾形 恒夫
岡本 敦史	岡元 渉	奥名 孝行	奥村 研一
小倉 勝利	小椋 進	尾崎 幸男	小田 隼也
柿沼 友樹	梯 浩一郎	春日井 康夫	片岡 真二
勝俣 優	加藤 利弘	加藤 紀章	加藤 治仁
亀田 弘文	川内 清光	川嶋 憲	川瀬 洋
川瀬 義行	川端 利和	川端 稔教	川原 洋
川俣 秀樹	川俣 満	川見 健二	河村 哲哉
川村 浩	神田 守	菅野 雅彦	岸 真裕
北澤 壮介	北誥 昌樹	城戸 哲哉	鬼頭 孝明
鬼童 孝	木下 明	木原 一禎	木原 弘一
君島 伸治	具志 良太	久保 敏哉	窪田 幸一郎
久保田 崇仁	黒川 文宏	桑原 直範	桑本 良治
小泉 哲也	合田 和哉	幸福 辰巳	古賀 靖子
国生 隼人	小滝 勝美	小手川 勇	後藤 佑介
後藤 友亮	小西 武	小林 正樹	小山 圭一
近藤 祐吉	斉藤 敦志	齋藤 竜司	坂井 功
堺谷 常廣	笹 昭二	佐々木 秀郎	佐藤 陽
佐藤 大希	佐藤 健彦	佐藤 恒夫	佐藤 徹
佐藤 文哉	佐藤 真	佐藤 昌宏	佐藤 裕司
佐藤 由浩	佐藤 隆二	塩崎 禎郎	篠崎 晴彦
四戸 秀治	芝崎 康介	柴田 大介	清水 美代
志村 浩美	下迫 健一郎	白熊 良平	菅 崇
須貝 健吾	菅野 高弘	菅原 敬介	菅原 禎
菅原 法城	鈴木 啓介	鈴木 清剛	鈴木 大助
鈴木 崇弘	鈴木 武	鈴木 勝	関本 恒浩
善 功企	曾根 照人	田賀 傑	高井 徹也

港湾の施設の技術上の基準・同解説 編集協力者

高嶋	宏	高津	宣治	高野	剛光	高野	向後
高橋	小夜佳	高橋	信幸	高橋	宏直	高橋	康弘
高見	之孝	高山	優晃	滝川	尚樹	竹内	信夫
竹内	純	竹田	晃人	武田	均	竹高	麗子
辰巳	大介	田中	祐人	田中	豊和	田中	良典
谷口	史一	田端	優憲	爲廣	哲也	丹生	清輝
團村	肇	地本	敏雄	津金	正典	傳	亮司
土田	孝	寺崎	英一	梅坂	清嗣	時吉	学
冨澤	文彦	富田	健	富田	孝史	冨本	正大
冨安	真一郎	仲	晃一	長井	一平	中川	安洋
中嶋	道雄	中島	雄一	永田	享志	長津	則夫
中野	武	中野	尊之	中野	敏彦	中野	直志
中村	克成	中村	健	中村	俊之	中村	悟史
仁井	克明	西尾	岳裕	西尾	保之	西岡	健志
西岡	周平	西子	恵市	西島	浩之	西村	博美
西本	高志	練尾	伸一郎	野口	哲史	萩原	俊克
長谷	一矢	服部	俊朗	濱野	政光	林	典佳
林	正宏	原	隆	原田	卓三	原田	浩司
原田	光博	日置	幸司	東山	茂	福田	修吾
藤井	敦	藤田	芳樹	藤村	公宜	藤森	和也
船橋	雄大	細野	衛	保利	悦孝	本田	孝茂
本田	秀樹	本間	大輔	前田	忠彦	正岡	享二
増田	勝人	松岡	賢司	松崎	良	松田	卓次郎
松原	弘晃	丸山	晴広	水島	正悟	水谷	裕幸
南	正治	南本	浩一	宮島	裕宣	宮本	政弘
宮脇	周作	村上	和康	村上	昭	村内	敏雄
室田	博文	本山	賢司	森内	一信	安田	浩
森本	睦	森屋	陽	諸星	達夫	山内	晶敬
安田	将人	矢野	直匠	矢野	陽介	山口	浩之
山上	修太	山川	元貴	山岸	真史	山崎	邦弘
山口	徹	山中	一浩	山崎	道	山本	将
山下	健吾	山本	慎一	山本	芳生	山谷	由治
山本	伸幸	吉川	藤謙	吉崎	仁志	吉田	幹雄
横山	敏	吉村	泰子	芳村	康男	米島	武士
吉野	宏知	早田	豊	渡辺	健二	渡部	
若松	富博	渡邊					
渡部							

総目次

総目次

(上巻)

共通編	
○本書における法令の表記	3
○本書の位置づけ・構成	3
1 本書の位置づけ	3
2 本書の利用者	3
3 本書の全体構成	3
3.1 全体構成	3
3.2 各編の概要	3
4 本書の記載内容の分類	4
5 主要関連図書	5
6 本書に記載されている技術の扱いについて	5
7 国際単位系の使用	5
8 その他	5
3.5 主たる作用及び従たる作用	19
3.6 設計状態	19
3.7 要求性能	19
3.7.1 技術基準における要求性能の位置づけ	19
3.7.2 技術基準における要求性能の分類	20
3.8 性能規定	23
3.9 性能照査	24
3.9.1 性能照査法	24
3.9.2 作用の設定	26
3.9.3 材料	26
3.9.4 特性値	26
3.9.5 性能照査式	27
第1章 総論	6
1 適用範囲	8
1.1 技術基準の全体構成	8
1.2 技術基準への適合	8
1.3 技術基準対象施設	9
1.3.1 技術基準対象施設	9
1.3.2 特定技術基準対象施設	9
1.4 技術基準と他の法令との関係	10
1.5 技術基準への適合性確認制度	10
1.5.1 適合性確認制度の意義	10
1.5.2 適合性確認の対象施設	10
1.5.3 登録確認機関による適合性確認業務	12
2 性能設計の体系	13
2.1 性能設計の体系	13
2.1.1 性能設計	13
2.1.2 技術基準で規定される事項	13
2.1.3 性能照査	13
2.1.4 設計と性能照査	13
3 性能設計に係る基本事項(用語定義)	14
3.1 技術基準対象施設の目的	18
3.2 設計供用期間	18
3.3 年超過確率	18
3.4 作用の分類	18
第2章 技術基準対象施設の建設、改良または維持	29
1 技術基準対象施設の性能確保の流れ	29
1.1 性能確保の流れ	29
1.2 事業への影響度を考慮した各種リスク要因の抽出と各段階における基本的対応	30
1.3 個別事業における情報の流れ	30
1.4 港湾の事業全体における情報の流れ	32
2 技術基準対象施設の設計	33
2.1 設計の基本理念	33
2.1.1 設計の基本理念	33
2.1.2 設計の前提	33
2.1.3 設計の範囲と留意点	34
2.1.4 維持管理の基本的な考え方	34
2.2 各段階における配慮	35
2.2.1 各段階における配慮の重要性	35
2.2.2 設計における施工への配慮	35
2.2.3 設計における維持への配慮	35
2.3 設計の基本事項	37
2.3.1 総論	37
2.3.2 施設の設置目的	39
2.3.3 設計供用期間	39

2.3.4 要求性能・性能規定・性能照査手法	40	3.5.1 一般	64
2.3.5 計画条件・利用条件	41	3.5.2 安全管理の適用	64
2.3.6 自然環境条件	41	3.5.3 海上作業における考慮すべき事項	64
2.3.7 材料条件・施工条件	42	3.6 施工管理及び安全管理を行う者	67
2.3.8 維持に係る条件	43	3.7 施工時の安定	69
2.3.9 設計条件を越える事象への配慮	44	4 技術基準対象施設の維持	70
2.3.10 環境等への配慮	44	4.1 総説	71
2.3.11 経済性	44	4.2 維持管理計画等の策定及び維持管理計画 等に定める事項の実施	73
2.4 改良設計の基本事項	45	4.2.1 一般	76
2.4.1 総論	45	4.2.2 点検診断	79
2.4.2 既存施設の改良目的	46	4.2.3 総合評価	80
2.4.3 既存施設の改良の全体手順	47	4.2.4 維持補修計画	81
2.4.4 改良設計の留意事項	49	4.2.5 維持工事等の実施	81
3 技術基準対象施設の施工	55	4.2.6 維持管理計画の見直し	81
3.1 総説	55	4.2.7 専門技術者	81
3.2 施工の計画として定める内容等	56	4.2.8 記録	82
3.2.1 一般	56	4.3 危険防止に関する対策	83
3.2.2 施工の基本事項	57	4.3.1 専門技術者	84
3.2.3 施工計画書の作成	57	4.4 管理を委託する国有港湾施設	85
3.3 施工方法として定める内容	59	4.5 供用を停止した施設に対する対策	86
3.4 施工管理の内容等	62	第3章 環境等への配慮	87
3.4.1 一般	62	1 基本的な理念	87
3.4.2 施工管理	63	2 環境等への配慮に際しての重要な視点	88
3.5 安全管理の内容	64		

第1章 総説	93	4.4.7 波の打上げ高、越波及び伝達波	164
1 一般	93	4.4.8 波による平均水位の上昇と	
2 基本事項	93	サーフピーク	178
3 その他事項	93	4.5 長周期波	181
第2章 気象・海象	94	4.6 静穏度の考え方	184
1 性能照査において考慮すべき気象・海象項目	94	4.7 航走波	187
1.1 一般	94	4.8 浮体への作用とその動揺	191
2 風	95	4.8.1 一般	191
2.1 一般	95	4.8.2 浮体に生じる作用	193
2.2 風速の特性値	99	4.8.3 浮体の動揺及び係留力	196
2.3 風圧力	99	4.9 波浪の観測及び調査	198
2.4 気象の観測及び調査	105	5 津波	206
3 潮位	108	6 波力	212
3.1 天文潮	108	6.1 一般	212
3.2 高潮	110	6.1.1 波浪・津波による波力と高潮時の	
3.3 副振動	113	波力	212
3.4 異常潮位	117	6.1.2 波浪による波力の構造物の形態に	
3.5 平均海面水位の長期変動	117	よる分類	212
3.6 設計潮位条件	118	6.1.3 水理模型実験による波力の検討	212
3.7 潮位の観測及び調査	119	6.1.4 数値計算による波力の検討	212
4 波浪	122	6.2 直立壁に作用する波力	213
4.1 波浪条件の設定	123	6.2.1 直立壁に作用する波力の一般的性質	213
4.1.1 施設の安定性及び構造部材の安全性		(断面破壊)の照査に用いる波浪条	
(断面破壊)の照査に用いる波浪条	123	6.2.2 壁面に波の峰がある時の重複波及び	
4.1.2 構造部材の使用性の照査に用いる		砕波の波力	213
波浪条件の設定	129	6.2.3 壁面に波の谷がある時の負の波力	218
4.1.3 静穏度の照査に用いる波浪条件の設定	130	6.2.4 衝撃砕波力	219
4.2 設計に用いる波の取扱い	130	6.2.5 消波ブロックで被覆された直立壁に	
4.2.1 波の設定方法	130	作用する波力	222
4.2.2 波の表し方	134	6.2.6 上部斜面ケーソン堤に作用する波力	225
4.3 波浪の発生・伝播・減衰	140	6.2.7 直立消波ケーソンに作用する波力	227
4.4 波浪の変形	146	6.2.8 法線形の影響を考慮した波力の算定	228
4.4.1 波の屈折	146	6.2.9 水深急変部における直立壁に作用	
4.4.2 波の回折	150	する波力	229
4.4.3 波の回折と屈折の組合せ		6.2.10 砕波線より陸側で汀線近傍にある	
(換算沖波波高)	152	直立壁に作用する波力	229
4.4.4 波の反射	153	6.3 海中部材及び大型孤立構造物に作用する	
4.4.5 浅水変形	157	波力	229
4.4.6 砕波	158	6.3.1 海中部材に作用する波力	229
		6.3.2 大型孤立構造物に作用する波力	233

6.4 水面付近の構造物に作用する波力	233	7.4.3 底質の特性と分布	274
6.4.1 水面付近の水平板に作用する揚圧力	233	7.4.4 漂砂の移動形態	276
6.4.2 水面付近の鉛直板に作用する水平波力	236	7.4.5 移動限界水深の物理的意味とその 推定式	277
6.5 護岸背後に働くマウンド透過波圧と 目地内波圧	237	7.4.6 沿岸漂砂	279
6.5.1 一般	237	7.4.7 砕波帯における漂砂現象	280
6.5.2 マウンド透過波圧	237	7.4.8 波打ち帯の地形(汀線)変化	281
6.5.3 目地内波圧	237	7.4.9 前浜地形変化と地下水位の関係	282
6.6 波浪に対する被覆石及びブロックの安定性	238	7.4.10 沿岸砂州の移動	283
6.6.1 斜面の被覆石及びブロックの所要質量	238	7.4.11 飛砂	283
6.6.2 波浪に対する混成堤マウンドの被覆石 及びブロックの所要質量	244	7.4.12 気候変動と地形変化との関係	283
6.6.3 流れに対する被覆石及びブロックの 所要質量	248	7.5 洗掘と吸い出し	284
6.7 津波波力	248	7.5.1 一般	284
6.7.1 海中の直立壁に作用する津波波力	248	7.5.2 洗掘	284
6.7.2 陸上の直立壁に作用する津波波力	252	7.5.3 吸い出し	289
6.7.3 津波の越流に対する被覆材の所要質量	255	7.6 海浜変形予測	290
6.8 高潮時の波力	256	7.6.1 経験工学的予測	290
6.8.1 高潮時の潮位が構造物の天端高より 低い場合	256	7.6.2 水理模型実験(特に移動床模型実験)	292
6.8.2 高潮時の潮位が構造物の天端高より 高い場合	257	7.6.3 数値シミュレーションによる予測	292
7 水の流れ等	264	8 その他の気象・海象	298
7.1 沿岸域の海水流動	264	8.1 その他考慮すべき気象項目	298
7.1.1 一般	264	8.2 気象・海象を考慮した工事稼働率の評価	299
7.1.2 海流	264		
7.1.3 潮流	264		
7.1.4 潮汐残差流	264		
7.1.5 吹送流	264		
7.1.6 密度流	265		
7.1.7 海浜流	265		
7.2 流れに伴う流体力	265		
7.3 河口水理	268		
7.3.1 一般	268		
7.3.2 河口域の流れ	268		
7.3.3 シルテーション	269		
7.4 漂砂	270		
7.4.1 一般	270		
7.4.2 海岸地形	271		
		第3章 地盤条件	300
		1 地盤調査	300
		1.1 地盤条件の決定方法	300
		1.2 調査地点の位置、間隔及び深度	300
		1.3 調査方法の選定	301
		2 地盤物性値	304
		2.1 地盤物性値の推定	304
		2.2 土の物理的性質	308
		2.2.1 土の単位体積重量	308
		2.2.2 土の分類	311
		2.2.3 土の透水係数	315
		2.3 土の力学的性質	316
		2.3.1 弾性定数	316
		2.3.2 圧縮圧密特性	318
		2.3.3 せん断特性	326
		2.3.4 N 値の解釈方法	334
		2.4 動的解析	338
		2.4.1 動的変形定数	338
		2.4.2 動的強度特性	342
		3 地下水位と浸透	346

第4章 土圧及び水圧	350	3 地震作用	403
1 総説	350	3.1 地盤一構造物系のモデル化と地震作用	403
2 土圧	350	3.2 震度法における地震作用	404
2.1 一般	350	3.3 修正震度法における地震作用	405
2.2 永続状態における土圧	350	3.4 応答変位法における地震作用	406
2.2.1 砂質土の土圧	350	3.5 地盤一構造物系の地震応答解析における	
2.2.2 粘性土の土圧	353	地震作用	406
2.3 地震時土圧	353		
2.3.1 砂質土の土圧	353	第7章 地盤の液状化	408
2.3.2 粘性土の土圧	356	1 一般	408
2.3.3 見掛けの震度	356	2 液状化の予測・判定	409
3 水圧	358		
3.1 残留水圧	358	第8章 船舶	418
3.2 動水圧	359	1 対象船舶の主要諸元	418
		1.1 標準値	418
第5章 地盤の沈下等	362	1.2 その他	426
1 地盤の沈下	362	2 船舶による作用	430
2 地震による地殻変動	362	2.1 一般	430
		2.1.1 船舶の接岸	430
第6章 地震	363	2.1.2 船舶の動揺	430
1 地震動	364	2.2 船舶の接岸による作用	431
1.1 一般	364	2.3 船舶の動揺による作用	436
1.1.1 震源特性	365	2.4 船舶の牽引による作用	440
1.1.2 伝播経路特性	367		
1.1.3 サイト特性	367	第9章 環境作用	444
1.1.4 表層地盤の非線形挙動	373		
1.1.5 地震動の空間的変動	374	第10章 自重及び載荷重	446
1.2 施設の性能照査に用いるレベル1地震動	374	1 総説	446
1.2.1 概要	374	2 自重	447
1.2.2 サイト増幅特性の評価	374	3 載荷重	448
1.2.3 表層地盤の地震応答計算	378	3.1 積載荷重	448
1.2.4 レベル1地震動の補正	384	3.2 活荷重	449
1.3 施設の性能照査に用いるレベル2地震動	385		
1.3.1 概要	385	第11章 材料	465
1.3.2 レベル2対象地震の選定	386	1 総説	465
1.3.3 震源パラメータの設定	388	2 鋼材	466
1.3.4 サイト増幅特性の評価	391	2.1 一般	466
1.3.5 強震波形計算	391	2.2 鋼材の特性値	469
1.3.6 表層地盤の地震応答計算	395	2.3 鋼材の腐食	473
1.4 施設の性能照査で考慮する地震動の空間的		2.3.1 一般	473
変動	395	2.3.2 鋼材の腐食	473
2 地殻変動	402	2.3.3 鋼材の腐食速度	474
		2.4 鋼材の防食	475
		2.4.1 一般	475
		2.4.2 電気防食工法	475

2.4.3 被覆防食工法	476	6.1 一般	500
3 コンクリート	480	6.2 強度性能	500
3.1 コンクリート材料	480	6.3 耐久性	502
3.2 コンクリートの品質及び性能	482	7 再生資源材料	506
3.3 水中コンクリート	485	7.1 一般	506
3.3.1 一般の水中コンクリート	485	7.2 スラグ	507
3.3.2 水中不分離性コンクリート	485	7.2.1 一般	507
3.4 マスコンクリート	486	7.2.2 鉄鋼スラグ	507
3.5 その他の特殊なコンクリート	486	7.2.3 非鉄スラグ	508
3.6 コンクリート杭材料	486	7.2.4 エコスラグ	508
4 アスファルト材料	489	7.3 石炭灰	508
4.1 一般	489	7.4 コンクリート塊	509
4.2 アスファルトマット	491	7.5 アスファルトコンクリート塊	510
4.2.1 一般	491	7.6 浚渫土砂	510
4.2.2 材料	491	7.7 貝殻	511
4.2.3 配合	492	7.7.1 一般	511
4.3 舗装用材料	493	7.7.2 カキ殻	511
4.4 サンドマスチック	494	7.7.3 ホタテ殻	511
4.4.1 一般	494	8 その他の材料	513
4.4.2 材料	494	8.1 鋼材以外の金属材料	513
4.4.3 配合	495	8.2 繊維補強材	514
5 石材	497	8.3 プラスチック及びゴム	515
5.1 一般	497	8.4 塗装材料	518
5.2 基礎捨石	497	8.5 注入材料	519
5.3 裏込材	498	8.5.1 一般	519
5.4 被覆用材	498	8.5.2 注入材料の性質	520
5.5 路盤材料	498	8.6 埋立材料としての廃棄物	520
6 木材	500	9 摩擦係数	522

巻末1	港湾法（技術基準関係抜粋）	527	巻末6	技術基準対象施設の施工に関する基準 を定める告示	565
巻末2	港湾法施行令（技術基準関係抜粋）	528	巻末7	技術基準対象施設の維持に関し必要な 事項を定める告示	567
巻末3	港湾法施行規則（技術基準関係抜粋）	529	巻末8	港湾法第五十六条の二の二第三項 ただし書の設計方法	570
巻末4	港湾の施設の技術上の基準を定める省令	530	巻末9	港湾法第五十六条の二の二第三項に 定める設計方法の標準式	574
巻末5	港湾の施設の技術上の基準の細目を 定める告示	543			

施設編

第1章 総説	589	2.3.3 作用	641
第2章 技術基準対象施設に共通する事項	590	2.3.4 性能照査	643
1 部材の照査	590	2.3.5 吊り上げ部の照査	645
1.1 一般	592	2.4 セルラブロック	646
1.1.1 部材の照査の方法	593	2.4.1 性能照査の基本	646
1.1.2 性能の経時変化に対する検討	594	2.4.2 基本断面の設定	647
1.1.3 部分係数	594	2.4.3 作用	648
1.2 コンクリート	595	2.4.4 性能照査	650
1.2.1 性能照査の基本方針	595	2.4.5 吊り上げ部の照査	655
1.2.2 基本断面及び特性値の設定	595	2.5 直立消波ケーソン	656
1.2.3 部材の照査の方法	595	2.5.1 性能照査の基本	657
1.2.4 性能の経時変化に対する検討	598	2.5.2 作用	658
1.2.5 初期ひび割れに対する検討	601	2.5.3 部材の性能照査	666
1.2.6 構造細目	602	2.6 ハイブリッドケーソン	667
1.3 鋼	602	2.6.1 一般	667
1.3.1 性能照査の基本方針	602	2.6.2 性能照査の基本	669
1.3.2 基本断面及び特性値の設定	603	2.6.3 作用	669
1.3.3 部材の照査の方法	603	2.6.4 性能照査	669
1.3.4 性能の経時変化に対する検討	603	2.6.5 防食	671
1.3.5 鋼材の防食設計	603	2.7 被覆石及びブロック	672
1.3.6 構造細目	607	2.7.1 性能照査の基本	672
1.4 複合構造	608	2.7.2 無筋コンクリートの吊り上げ時の 照査	672
1.4.1 性能照査の基本方針	608	3 基礎	675
1.4.2 基本断面及び特性値の設定	608	3.1 総説	675
1.4.3 部材の照査の方法	608	3.2 浅い基礎	675
1.4.4 性能の経時変化に対する検討	609	3.2.1 一般	675
1.4.5 構造細目	610	3.2.2 砂質土地盤における基礎の支持力	676
2 構造物の部材	612	3.2.3 粘性土地盤における基礎の支持力	678
2.1 一般	612	3.2.4 多層地盤における支持力	680
2.2 ケーソン	613	3.2.5 偏心傾斜した作用に対する支持力	681
2.2.1 性能照査の基本	616	3.3 深い基礎	685
2.2.2 基本断面及び特性値の設定	616	3.3.1 一般	685
2.2.3 作用	618	3.3.2 性能照査の基本	685
2.2.4 性能照査	632	3.3.3 性能照査	685
2.2.5 吊り上げ時の吊り筋の照査	633	3.3.4 深い基礎の鉛直支持力	689
2.3 L型ブロック	640	3.4 杭基礎	690
2.3.1 性能照査の基本	640	3.4.1 一般	690
2.3.2 基本断面及び特性値の設定	641	3.4.2 杭基礎の性能照査の基本	691

3.4.3 杭の軸方向押込み抵抗力	693	5.5.1 性能照査の基本	781
3.4.4 杭の軸方向引抜き抵抗力	699	5.5.2 改良体の諸元の仮定	784
3.4.5 軸方向力による杭頭の変位	700	5.5.3 改良体への作用条件	787
3.4.6 軸直角方向力を受ける杭のたわみ	702	5.5.4 性能照査	789
3.4.7 チャンの方法による杭のたわみの計算	704	5.5.5 液状化対策を目的とした深層混合 処理工法	798
3.4.8 港研方式による杭のたわみの計算	711	5.5.6 矢板前面の受働抵抗の向上を目的 とした深層混合処理工法	799
3.4.9 組杭の支持力	723	5.6 軽量混合処理土工法	799
3.4.10 群杭の支持力	724	5.7 高炉水砕スラグ置換工法	802
3.4.11 負の周面抵抗力	727	5.7.1 一般	802
3.4.12 細目	730	5.7.2 性能照査の基本	803
3.5 基礎の沈下	732	5.8 事前混合処理工法	803
3.5.1 地中応力	732	5.8.1 性能照査の基本	803
3.5.2 即時沈下	738	5.8.2 事前調査	805
3.5.3 圧密沈下	739	5.8.3 作用	805
3.5.4 側方変位	743	5.8.4 処理土の強度の決定	805
3.5.5 不同沈下	743	5.8.5 配合設計	806
3.5.6 広域地盤沈下	744	5.8.6 改良範囲の検討	807
4 斜面の安定	748	5.9 サンドコンパクションパイル工法 (砂質土地盤を対象とする場合)	810
4.1 一般	748	5.9.1 性能照査の基本	810
4.2 安定性の検討	749	5.9.2 圧入率の照査	812
4.2.1 円弧すべり面による安定解析	749	5.9.3 補給砂量の性能照査	817
4.2.2 円弧すべり面以外のすべり面を仮定 する安定解析	753	5.10 サンドコンパクションパイル工法 (粘性土地盤を対象とする場合)	817
5 地盤改良工法	755	5.10.1 性能照査の基本	817
5.1 一般	755	5.10.2 砂杭	818
5.2 地盤改良の性能照査のための地盤調査	761	5.10.3 粘性土地盤	819
5.2.1 一般	761	5.10.4 改良地盤のせん断強さの算定式	822
5.2.2 パーチカルドレーン工法に係る地盤 調査	761	5.10.5 地盤改良を行った場合の重力式 係船岸の照査用震度の特性値	824
5.2.3 サンドコンパクションパイル工法 (粘性土地盤を対象とする場合)に 係る地盤調査	764	5.10.6 性能照査	824
5.2.4 深層混合処理工法に係る地盤調査	766	5.11 ロッドコンパクション工法	829
5.2.5 サンドコンパクションパイル工法 (砂質土地盤を対象とする場合)に 係る地盤調査	769	5.11.1 性能照査の基本	829
5.2.6 化学的固化により地盤材料を改良 する工法に係る地盤調査	770	5.11.2 性能照査	830
5.3 置換工法	771	5.12 バイプロフローテーション工法	830
5.4 パーチカルドレーン工法	773	5.12.1 性能照査の基本	830
5.4.1 性能照査の基本	773	5.12.2 性能照査	831
5.4.2 性能照査	775	5.13 液状化対策としてのドレーン工法	832
5.5 深層混合処理工法	781	5.14 ウェルポイント工法	833
		5.15 表層処理工法	833
		5.16 薬液注入による液状化対策工法	834
		5.16.1 性能照査の基本	834
		5.16.2 事前調査	836

5.16.3 工法の適用性の検討	836	2.4.2 第2区分における性能照査	898
5.16.4 性能照査に用いる強度定数の設定	837	3 泊地	901
5.16.5 作用	837	3.1 一般	902
5.16.6 設計基準強度の設定	837	3.2 性能規定	903
5.16.7 改良率の設定	837	3.3 性能照査	905
5.16.8 改良地盤の性能照査	837	4 船だまり	908
5.16.9 注入諸元の設定	837	第4章 外郭施設	910
5.16.10 配合設計	838	1 総説	910
5.17 管中混合固化処理工法	839	1.1 外郭施設の目的	910
5.17.1 性能照査の基本	839	1.2 外郭施設の築造に際しての留意点	910
5.17.2 管中混合固化処理工法の性能照査	839	1.3 外郭施設による多重防護	910
5.17.3 配合設計	839	1.4 外郭施設に関する環境等への配慮	911
5.18 固化材によって処理された地盤材料を用いた場合の主働土圧	839	2 防波堤に共通する事項	912
5.18.1 一般	839	2.1 基本的な機能を有する防波堤に関する事項	915
5.18.2 主働土圧	840	2.1.1 一般	915
5.19 高圧噴射攪拌工法	843	2.1.2 配置	916
5.19.1 一般	843	2.1.3 構造形式の選定及び断面の設定	917
5.19.2 性能照査の基本	843	2.1.4 港内静穏度の維持に対して配慮すべき事項	917
5.19.3 性能照査に用いる改良体の諸元	844	2.2 偶発対応施設の防波堤に関する事項	918
6 埋立造成	851	3 基本的な機能を有する防波堤	920
6.1 一般	851	3.1 重力式防波堤(混成堤)	920
6.2 埋立造成のための調査及び条件設定	851	3.1.1 一般	921
6.3 埋立地盤の性能照査	852	3.1.2 基本断面の設定	923
6.3.1 一般	852	3.1.3 作用	925
6.3.2 埋立地盤の性能照査	852	3.1.4 堤体の全体安定性に関する性能照査	926
6.4 地盤改良工法の選択と照査	853	3.1.5 堤体の全体安定性に関するその他の性能照査及び留意事項	932
6.5 埋立工法の選定	854	3.1.6 直立部の港内側を補強する場合の性能照査及び留意事項	933
6.6 施工管理	854	3.1.7 根固ブロック	938
6.7 維持管理	855	3.1.8 構造部材の性能照査	939
第3章 水域施設	856	3.1.9 構造細目	940
1 総説	856	3.2 重力式防波堤(直立堤)	943
2 航路	857	3.2.1 一般	943
2.1 一般	857	3.2.2 基本断面の設定	943
2.2 航路水深	859	3.2.3 作用	943
2.2.1 性能照査の基本	859	3.2.4 性能照査	943
2.2.2 第2区分における性能照査	860	3.2.5 構造細目	943
2.3 航路幅員の性能照査	864	3.3 重力式防波堤(傾斜堤)	944
2.3.1 性能照査の基本	864	3.3.1 一般	944
2.3.2 第2区分における性能照査	865	3.3.2 基本断面の設定	944
2.4 航路法線(屈曲部)	898		
2.4.1 性能照査の基本	898		

3.3.3 性能照査	946	3.10.2 基本断面の設定	970
3.3.4 構造部材の性能照査	948	3.10.3 作用	970
3.3.5 構造細目	948	3.10.4 性能照査	970
3.4 重力式防波堤(消波ブロック被覆堤)	949	4 生物共生型防波堤	974
3.4.1 一般	949	5 親水機能を有する防波堤	977
3.4.2 基本断面の設定	950	6 高潮防波堤	978
3.4.3 作用	950	6.1 一般	978
3.4.4 堤体の全体安定性に関する性能照査	950	6.2 基本断面の設定	978
3.4.5 堤体の全体安定性に関するその他の性能照査	951	6.3 作用と性能照査	978
3.4.6 構造部材の性能照査	951	6.4 構造細目	978
3.4.7 構造細目	951	7 津波防波堤	979
3.5 重力式防波堤(直立消波ブロック堤)	952	7.1 一般	979
3.5.1 一般	952	7.2 耐津波設計の基本的考え方	980
3.5.2 基本断面の設定	952	7.2.1 設計津波	980
3.5.3 作用	953	7.2.2 設計及び性能照査の順序	980
3.5.4 堤体の全体安定性に関する性能照査	953	7.3 基本断面の設定と配慮すべき事項	982
3.5.5 構造部材の性能照査	954	7.3.1 基本断面の設定	982
3.6 重力式防波堤(消波型ケーソン堤)	954	7.3.2 基本断面の設定にあたって配慮すべき事項	982
3.6.1 一般	954	7.3.3 断面諸元の設定	983
3.6.2 基本断面の設定	954	7.4 設計津波の作用	983
3.6.3 作用	955	7.4.1 津波に先行する地震動等の設定とその影響評価	983
3.6.4 性能照査	955	7.4.2 津波の作用に関する留意点	984
3.6.5 構造部材の性能照査	955	7.4.3 堤体の安定性に関する性能照査	984
3.7 重力式防波堤(斜面型ケーソン堤)	956	7.4.4 津波の流れに対する基礎マウンド及び海底地盤の安定性	989
3.7.1 一般	956	7.4.5 腹付工	991
3.7.2 基本断面の設定	956	7.5 「設計津波」を超える規模の津波に対する「粘り強い構造」の検討	991
3.7.3 作用	957	7.5.1 一般	991
3.7.4 性能照査	957	7.5.2 防波堤に対する「粘り強い構造」の考え方	991
3.7.5 構造部材の性能照査	958	7.5.3 付加的な対策の段階的検討	992
3.8 杭式防波堤	959	7.5.4 防波堤の「粘り強い構造」の効果の確認	993
3.8.1 一般	959	7.6 津波防波堤の津波低減効果と遅延効果	993
3.8.2 基本断面の設定	961	7.7 その他	994
3.8.3 作用	964	8 木材取扱施設の防波堤	995
3.8.4 性能照査	964	8.1 一般	995
3.8.5 構造部材の性能照査	965	8.2 作用	995
3.8.6 構造細目	965	8.3 基本断面の設定	995
3.9 軟弱地盤着底式防波堤	966	8.4 構造細目	995
3.9.1 性能照査の基本	966	9 防砂堤	996
3.9.2 作用	967	9.1 一般	996
3.9.3 性能照査	967		
3.10 浮防波堤	968		
3.10.1 性能照査の基本	968		

9.2 性能照査	998	15.5.2 偶発対応施設の堤防	1028
10 防潮堤	999	16 突堤	1029
10.1 一般	1001	17 胸壁	1030
10.2 配置	1001	17.1 一般	1030
10.3 基本断面の設定	1001	17.2 基本断面の設定に関して配慮すべき事項	1031
10.4 作用と性能照査	1002	17.3 胸壁の天端高の設定	1031
11 導流堤	1004	17.4 作用	1031
11.1 一般	1004	17.5 性能照査	1031
11.2 性能照査	1005	17.5.1 性能照査	1031
12 水門	1006	17.5.2 偶発対応施設の胸壁	1032
12.1 一般	1008	18 埋没対策施設	1033
12.2 水門の配置・規模の設定	1009	18.1 総説	1033
12.3 水門の性能照査	1009	18.2 漂砂あるいは河川流下土砂を捕捉する ための施設	1034
13 閘門	1011	18.3 飛砂防止工	1035
13.1 一般	1011	18.3.1 一般	1035
13.2 閘門の配置・規模の設定	1012	18.3.2 工法の選定	1036
13.3 閘門の構造及び性能照査	1013	第5章 係留施設	1038
14 護岸	1015	1 総説	1038
14.1 一般	1016	1.1 係留施設の目的	1038
14.2 基本断面の設定に関して配慮すべき事項	1016	1.2 総論	1038
14.3 埋立造成と護岸築造に関して留意 すべき事項	1017	1.3 係留施設の規模及び配置	1038
14.4 護岸の天端高の設定	1017	1.4 係留施設の構造形式の選定	1039
14.5 作用	1021	1.5 耐震強化施設に関する留意点	1048
14.6 性能照査	1021	2 岸壁	1052
14.6.1 共通	1021	2.1 岸壁に共通する事項	1052
14.6.2 重力式護岸の性能照査	1023	2.1.1 岸壁の諸元	1055
14.6.3 矢板式護岸の性能照査	1024	2.1.2 洗掘防止工	1060
14.6.4 セル式護岸の性能照査	1024	2.1.3 生物共生型岸壁	1060
14.6.5 捨石式護岸の性能照査	1024	2.2 重力式係船岸	1062
14.6.6 消波ブロック被覆護岸の性能照査	1024	2.2.1 一般	1062
14.6.7 偶発対応施設の護岸	1024	2.2.2 作用	1064
14.6.8 構造細目	1024	2.2.3 性能照査	1069
14.7 生物共生型護岸	1025	2.2.4 地震時における施設の変形量に対する 性能照査	1075
14.8 親水機能を有する護岸	1026	2.2.5 セルラブロックの性能照査	1077
15 堤防	1027	2.2.6 構造部材の性能照査	1079
15.1 一般	1027	2.2.7 構造細目	1080
15.2 基本断面の設定に関して配慮すべき事項	1027	2.3 矢板式係船岸	1082
15.3 堤防の天端高の設定	1027	2.3.1 一般	1085
15.4 作用	1027	2.3.2 矢板式係船岸を軟弱地盤に対して 設置する際の留意事項	1086
15.5 性能照査	1028	2.3.3 断面諸元の仮定	1087
15.5.1 性能照査	1028		

2.3.4 作用	1089	2.10 置きセル式係船岸	1173
2.3.5 矢板壁に関する性能照査手の種類	1092	2.10.1 一般	1173
2.3.6 矢板壁断面の剛性の影響を考慮した 性能照査	1097	2.10.2 作用	1174
2.3.7 矢板壁の全体安定性に関する性能照査	1098	2.10.3 断面諸元の設定	1175
2.3.8 腹起しの応力に関する性能照査	1107	2.10.4 性能照査	1175
2.3.9 控え工に関する性能照査	1108	2.10.5 構造部材の性能照査	1178
2.3.10 レベル2地震動に関する偶発状態に おける性能照査	1114	2.11 直立消波式係船岸	1178
2.3.11 上部工の性能照査	1115	2.11.1 一般	1178
2.3.12 構造細目	1116	2.11.2 性能照査	1180
2.4 自立矢板式係船岸	1120	3 係船浮標	1185
2.4.1 一般	1120	3.1 性能照査の基本	1186
2.4.2 作用	1122	3.2 作用	1188
2.4.3 性能照査	1123	3.3 係船浮標各部の性能照査	1189
2.4.4 構造部材の性能照査	1126	3.4 構造部材の性能照査	1193
2.5 斜め控え杭矢板式係船岸	1126	4 係船くい	1194
2.5.1 一般	1126	5 栈橋	1195
2.5.2 作用	1128	5.1.1 栈橋の諸元	1198
2.5.3 性能照査	1128	5.1.2 生物共生型栈橋	1199
2.5.4 構造部材の性能照査	1128	5.2 直杭式横栈橋	1199
2.6 前方斜め支え杭矢板壁を有する係船岸	1129	5.2.1 一般	1199
2.6.1 一般	1129	5.2.2 基本断面の設定	1201
2.6.2 配置及び諸元	1131	5.2.3 作用	1205
2.6.3 作用	1131	5.2.4 直杭式横栈橋に関する性能照査	1210
2.6.4 性能照査	1131	5.2.5 レベル2地震動に対する偶発状態に おける性能照査	1215
2.6.5 構造部材の性能照査	1132	5.2.6 構造部材に関する性能照査	1217
2.7 二重矢板式係船岸	1133	5.3 斜め組杭式横栈橋	1218
2.7.1 一般	1134	5.3.1 一般	1218
2.7.2 作用	1136	5.3.2 基本断面の設定	1219
2.7.3 性能照査	1136	5.3.3 作用	1220
2.8 棚式係船岸	1138	5.3.4 斜め組杭式横栈橋に関する性能照査	1221
2.8.1 一般	1139	5.3.5 レベル2地震動に対する偶発状態に おける性能照査	1222
2.8.2 断面諸元の設定	1142	5.3.6 構造部材の性能照査	1222
2.8.3 作用	1142	5.4 格点ストラット式栈橋	1223
2.8.4 性能照査	1144	5.4.1 一般	1223
2.8.5 構造部材の性能照査	1146	5.4.2 作用	1223
2.9 根入れを有するセル式係船岸	1147	5.4.3 性能照査	1223
2.9.1 一般	1149	5.5 ジャケット式栈橋	1224
2.9.2 作用	1152	5.5.1 一般	1224
2.9.3 換算壁体幅の設定	1153	5.5.2 作用	1225
2.9.4 性能照査	1154	5.5.3 性能照査	1225
2.9.5 構造部材の性能照査	1172	5.6 ドルフィン	1225
		5.6.1 一般	1225

5.6.2 配置	1226	9.3 潜り止め	1268
5.6.3 作用	1227	9.3.1 一般	1268
5.6.4 性能照査	1228	9.4 照明設備	1269
5.7 デタッチドピア	1229	9.4.1 一般	1269
5.7.1 一般	1229	9.4.2 照明に関する性能照査項目	1269
5.7.2 基本断面の設定	1230	9.4.3 基準照度	1269
5.7.3 作用	1230	9.4.4 照度分布に関する性能照査	1275
5.7.4 性能照査	1231	9.4.5 グレア(まぶしさ)に関する性能照査	1275
5.7.5 構造部材の性能照査	1231	9.4.6 光色及び演色性に関する性能照査	1275
5.7.6 構造細目	1232	9.4.7 障害光及び省エネルギーに関する性能照査	1276
6 浮棧橋	1233	9.4.8 光源の選定	1276
6.1 性能照査の基本	1235	9.4.9 器具の選定	1278
6.2 基本断面の設定	1239	9.4.10 維持管理	1281
6.3 作用	1240	9.5 階段及びはしご	1282
6.4 性能照査	1241	9.5.1 一般	1282
6.5 構造細目	1248	9.5.2 性能照査	1282
7 物揚場	1249	9.6 救命設備	1283
7.1 一般	1249	9.6.1 一般	1283
7.2 作用	1249	9.7 車止め	1284
7.3 性能照査	1249	9.7.1 一般	1284
8 船揚場	1250	9.7.2 性能照査	1284
8.1 性能照査の基本	1250	9.8 車両の乗降設備	1286
8.2 性能照査	1251	9.8.1 一般	1286
8.3 設置位置の選定	1251	9.9 給水設備	1288
8.4 各部の諸元	1252	9.9.1 一般	1288
8.4.1 供用性に関する規定	1252	9.10 排水設備	1289
8.4.2 各部の高さ	1253	9.10.1 一般	1289
8.4.3 船揚場延長及び背後面積	1253	9.11 給油設備及び給電設備	1290
8.4.4 前面水深	1253	9.11.1 一般	1290
8.4.5 斜路の勾配	1254	9.12 人の乗降設備	1291
8.4.6 前面の泊地面積	1254	9.12.1 一般	1291
8.5 揚陸部の壁体及び舗装	1255	9.13 柵、扉、ロープ等	1292
8.5.1 揚陸部の壁体	1255	9.13.1 一般	1292
8.5.2 舗装工	1255	9.14 監視設備	1293
9 係留施設の附帯設備等	1257	9.14.1 一般	1293
9.1 係船柱及び係船環	1257	9.15 便所	1293
9.1.1 性能照査の基本	1257	9.15.1 一般	1293
9.1.2 係船柱及び係船環の配置	1257	9.16 標識等	1294
9.1.3 作用	1259	9.16.1 標識及び標示の設置	1294
9.1.4 性能照査	1260	9.16.2 標識等の様式及び設置場所	1294
9.2 防衝設備	1262	9.16.3 標識の設置位置	1302
9.2.1 性能照査の基本	1262	9.16.4 標識の構造	1304
9.2.2 防舷材の配置	1263	9.16.5 材料	1307
9.2.3 作用	1264		
9.2.4 性能照査	1265		

9.16.6 維持管理	1307	4.2 規模及び設置場所の検討	1369
9.16.7 防護柵	1309	4.3 性能照査	1369
9.16.8 バリケード	1309	5 橋梁	1374
9.17 消防設備及び警報設備	1309	5.1 一般	1375
9.17.1 一般	1309	5.2 性能照査の基本	1375
9.18 エプロン	1310	5.3 耐久性の確保	1377
9.18.1 一般	1310	5.4 防衝工の性能照査	1377
9.18.2 エプロンの諸元	1310	6 運河	1380
9.18.3 性能照査	1311	6.1 一般	1380
9.19 荷役機械の基礎	1329	6.2 性能照査	1380
9.19.1 一般	1330	7 鉄道	1381
9.19.2 作用	1334	7.1 一般	1381
9.19.3 基礎杭を用いる場合の性能照査	1335	7.2 性能照査	1381
9.19.4 基礎杭を用いない場合の性能照査	1336	8 ヘリポート	1382
9.20 取付部	1338	8.1 一般	1382
9.20.1 一般	1338	第7章 荷さばき施設	1383
9.20.2 前面水深が変化する部分に関する留意事項	1339	1 総説	1383
9.20.3 異なる施設が接続する部分に関する留意事項	1340	1.1 総説	1383
9.20.4 隅角部に関する留意事項	1340	2 固定式荷役機械及び軌道走行式荷役機械	1384
10. 再生可能エネルギー発電設備の係留施設	1346	2.1 一般	1385
10.1 性能照査の基本	1349	2.2 コンテナクレーン	1387
第6章 臨港交通施設	1350	2.2.1 一般	1387
1 総説	1350	2.2.2 性能照査の基本	1387
1.1 標識及び標示等	1350	2.2.3 耐震性能照査	1387
2 港湾の道路	1351	2.2.4 風による逸走を防止するための適切な機能	1391
2.1 性能照査の基本	1352	2.3 アンローダ	1392
2.2 車道及び車線	1353	2.3.1 一般	1392
2.3 建築限界	1359	2.3.2 性能照査の基本	1392
2.4 曲線部の拡幅	1359	2.3.3 耐震性能照査	1393
2.5 縦断勾配	1360	2.3.4 風による逸走を防止するための適切な機能	1393
2.6 平面交差	1360	2.4 ローディングアーム (固定式荷役機械)	1393
2.7 舗装の性能照査	1360	2.4.1 一般	1393
3 水底トンネル	1362	2.4.2 性能照査の基本	1394
3.1 一般	1363	2.4.3 性能照査	1395
3.2 性能照査の基本	1364	2.5 石油の輸送に用いるゴムホース (固定式荷役機械)	1396
3.3 基本断面の設定	1365	2.5.1 一般	1396
3.4 性能照査	1366	2.5.2 性能照査	1397
3.5 構造細目	1368	2.6 石油、LPG、LNG 導管等 (固定式荷役機械)	1397
4 駐車場	1369	2.6.1 一般	1397
4.1 一般	1369		

2.6.2 性能照査	1398	機能	1415
2.7 固定式荷役機械及び軌道走行式荷役機械 の維持管理	1398	1.2.4 自動化・遠隔操作化された移動式荷役 機械の導入にあたっての留意点	1416
3 荷さばき地	1400	1.2.5 自動化・遠隔操作化された移動式荷役 機械の維持管理	1416
3.1 一般	1401	2 移動式旅客乗降用施設	1417
3.2 木材の整理のための荷さばき地	1402	2.1 一般	1418
3.3 水産物荷さばき施設	1402	2.2 性能照査の基本	1418
3.4 危険物荷さばき施設	1402	2.3 性能照査	1419
3.5 コンテナターミナルエリア	1403	2.4 附帯設備	1419
4 上屋	1404	第11章 その他の港湾施設	1420
4.1 一般	1404	1 旅客乗降用固定施設	1420
第8章 保管施設	1405	2 廃棄物埋立護岸	1422
1 総説	1405	2.1 一般	1422
2 倉庫	1406	2.2 廃棄物埋立護岸の目的及び種類	1423
3 野積場	1407	2.2.1 安定型廃棄物埋立護岸	1423
4 貯木場	1408	2.2.2 管理型廃棄物埋立護岸	1423
5 貯炭場	1409	2.2.3 遮断型廃棄物埋立護岸	1424
6 危険物置場	1410	2.3 性能照査の基本	1425
7 貯油施設	1411	2.4 性能照査	1425
第9章 船舶役務用施設	1412	3 海浜	1428
1 総説	1412	3.1 一般	1428
1.1 船舶のための給水施設	1412	3.2 海浜の目的	1429
1.2 その他の船舶役務用施設	1413	3.3 性能照査の基本	1430
第10章 移動式施設	1414	3.4 海浜地形	1430
1 移動式荷役機械	1414	3.5 親水性	1431
1.1 一般	1414	3.6 自然環境の保全	1432
1.2 コンテナヤード内荷役等の用に供する 移動式荷役機械	1415	4 緑地及び広場	1437
1.2.1 一般	1415	5 旅客上屋	1439
1.2.2 性能照査の基本	1415	5.1 一般	1439
1.2.3 自動化・遠隔操作化された移動式荷役 機械における衝突防止のための適切な		5.2 性能照査	1440
		5.3 附帯設備	1440

共通編に関する参考技術資料

第1章 設計等における参考事項	1443	1.4.2 設計値法による部分係数の算定法 及び留意点	1451
1 主要関連図書	1443	1.4.3 部分係数の簡易算定理論	1452
第2章 信頼性設計法に関する基本事項	1444	1.5 信頼性解析のツールとしてのモンテカルロ シミュレーション (MCS)	1453
1.1 信頼性設計法の概要	1444	1.5.1 MCSを利用するメリット	1453
1.1.1 総説	1444	1.5.2 MCSによる部分係数の設定	1454
1.1.2 信頼性設計法の分類	1444	1.5.3 MCSの試行回数	1454
1.2 破壊確率及び目標安全性水準に関する基本 的考え方	1444	1.5.4 その他補足事項	1454
1.2.1 信頼性解析に関する留意点	1444	第3章 環境等への配慮	1456
1.2.2 本書における構造物の信頼性の絶対的 尺度としての破壊確率に関する考え方	1445	1 一般	1456
1.2.3 目標安全性水準の決定に関する主な 手法	1445	1.1 水質	1456
1.2.4 本書における目標安全性水準の設定 プロセス	1446	1.2 底質	1457
1.3 レベル1信頼性設計法における荷重抵抗係 数アプローチの採用	1447	1.3 生物	1457
1.3.1 概説	1447	1.4 生態系	1458
1.3.2 部分係数法	1447	2 生物共生型港湾構造物	1461
1.3.3 材料係数アプローチによる部分係数法 の得失	1448	2.1 一般	1461
1.3.4 荷重抵抗係数アプローチによる部分 係数法の得失	1449	2.2 構造形式	1461
1.3.5 荷重抵抗係数アプローチによる部分 係数法の採用の理由	1449	2.3 生息場タイプ	1461
1.4 信頼性解析に関する理論	1449	2.4 整備計画	1462
1.4.1 破壊確率と信頼性指標	1449	2.4.1 条件の把握	1462
		2.4.2 目標の設定	1462
		2.4.3 生息場タイプの候補選定	1463
		3 自然環境の保全・再生	1464
		3.1 自然再生	1464
		3.2 覆砂	1464
		3.3 深掘れ箇所埋め戻し	1465

第1章 観測、調査及び試験	1471	2.5.2 津波観測の実施	1522
1 総説	1471	2.5.3 津波観測機器の種類、維持管理及び メンテナンス	1525
1.1 基本事項	1471	2.5.4 観測データの整理・とりまとめ	1525
1.2 本章の位置づけ・構成	1471	2.5.5 津波シミュレーション	1526
1.2.1 本章の位置づけ	1471	2.6 深浅測量	1527
1.2.2 本章の構成	1471	2.6.1 概要	1527
1.3 調査技術の品質と信頼性	1472	2.6.2 深浅測量の実施上の留意点	1528
1.3.1 基本事項	1472	2.6.3 深浅測量の実施	1533
1.3.2 基本的な留意事項	1473	2.7 スワス測深	1537
1.4 ICT (情報通信技術) の活用	1474	2.7.1 概要	1537
1.5 港湾の施設に関する調査技術の全体体系	1474	2.7.2 測深原理	1539
2 気象・海象に係る観測及び調査	1477	2.7.3 マルチビーム音響測深機の構成	1541
2.1 一般	1477	2.7.4 計画準備	1542
2.1.1 概要	1477	2.7.5 艀装・テスト	1545
2.1.2 観測の実施における留意点	1477	2.7.6 マルチビームを用いた深浅測量	1548
2.1.3 観測機器の維持管理	1478	2.7.7 精度の検証 ⁴⁹⁾	1552
2.1.4 観測データの整理・とりまとめ	1478	2.7.8 測深データの整理・解析・とりまとめ	1552
2.2 気象の観測及び調査	1479	2.8 水の流れ等の観測及び調査	1557
2.2.1 概要	1479	2.8.1 概要	1557
2.2.2 観測の実施	1481	2.8.2 流況観測の実施	1562
2.2.3 気象測器の種類	1482	2.8.3 流況観測機器	1564
2.2.4 気象測器の維持管理	1484	2.8.4 流況観測機器の維持管理・ メンテナンス	1565
2.2.5 観測データの整理・とりまとめ	1486	2.8.5 潮流観測データの整理・とりまとめ	1566
2.2.6 気象庁による気象観測データ・GPV (Grid Point Value) データの利用	1487	2.8.6 潮流観測の事例に基づく流速計の 相互比較	1569
2.3 潮位の観測及び調査	1488	2.9 漂砂に係る観測及び調査	1574
2.3.1 概要	1488	2.9.1 概要	1574
2.3.2 潮位観測の実施	1492	2.9.2 調査の体系とフロー	1575
2.3.3 潮位観測機器	1494	2.9.3 観測方法	1576
2.3.4 潮位観測機器の維持管理	1496	2.10 水理模型実験	1586
2.3.5 潮位観測データの整理・とりまとめ	1500	2.10.1 一般	1586
2.4 波浪の観測及び調査	1512	2.10.2 構造物を対象とした水理模型実験の 分類	1588
2.4.1 概要	1512	2.10.3 実験装置・測定機器	1588
2.4.2 波浪観測の実施	1512	2.10.4 模型実験のための自然条件の設定	1589
2.4.3 波浪観測機器	1513	2.10.5 水理模型実験における留意点	1590
2.4.4 波浪観測機器の維持管理	1519		
2.4.5 波浪観測データの整理・とりまとめ	1520		
2.5 津波の観測及び調査	1522		
2.5.1 概要	1522		

2.10.6 構造物の耐波安定性に関する 水理模型実験	1594	3.6 サンプリグ 1657	
2.10.7 構造物の反射・伝達性能に関する 水理模型実験	1600	3.6.1 サンプリグ方法の種類とその特徴	1657
2.10.8 構造物の越波対策に関する水理模型 実験	1603	3.6.2 サンプリグの目的と試料の乱	1663
2.10.9 構造物の耐津波性能に関する水理 模型実験	1604	3.6.3 現場における品質評価と乱れた試料の 取り扱い	1663
2.10.10 平面波浪場に関する水理模型実験	1606	3.7 室内土質試験	1664
2.10.11 移動床実験	1608	3.8 物理探査	1665
2.11 構造物の性能照査に係る数値解析	1611	3.8.1 弾性波探査	1667
2.11.1 一般	1611	3.8.2 表面波探査	1668
2.11.2 構造物を対象とした数値解析の分類	1615	3.8.3 常時微動観測	1670
2.11.3 計算機と解析ソフトウェア	1615	3.8.4 微動アレー探査	1671
2.11.4 数値解析のための自然条件の調査	1615	3.8.5 電気探査	1673
2.11.5 数値解析における留意点	1615	3.8.6 音波探査	1675
2.11.6 構造物の性能照査に係る数値解析	1617	3.8.7 危険物探査	1681
2.11.7 3次元数値解析	1619	3.9 路床及び路盤の試験	1696
2.11.8 設計波の算出 (平面波浪場解析)	1620	3.9.1 一般	1696
2.11.9 平面波浪場の解析手順	1622	3.9.2 現場密度試験	1697
2.11.10 平面波浪場解析における留意点	1623	3.9.3 現場締固め試験	1698
3 地盤に係る調査及び試験	1631	3.9.4 現場CBR試験	1703
3.1 一般	1631	3.9.5 平板載荷試験	1704
3.1.1 目的	1631	3.9.6 突固めによる締固め試験	1706
3.2 地盤調査計画	1631	3.9.7 室内CBR試験	1710
3.2.1 段階的な調査の実施	1631	3.9.8 その他の試験	1715
3.2.2 調査計画立案フロー	1632	3.10 杭の載荷試験	1716
3.2.3 計画段階における留意点	1633	3.10.1 一般	1716
3.2.4 調査方法の体系整理	1633	3.10.2 載荷試験の目的	1716
3.2.5 調査・試験の一般的な頻度	1635	3.10.3 載荷試験の種類と概要	1717
3.3 既存資料調査・現地踏査	1638	3.10.4 試験計画の立案	1722
3.3.1 既存資料調査	1638	3.10.5 杭の押込み試験	1724
3.3.2 現地踏査	1638	3.10.6 杭の急速載荷試験	1728
3.4 ボーリング	1639	3.10.7 杭の衝撃載荷試験	1731
3.4.1 ボーリングの種類及び方法	1639	3.10.8 杭の引抜き試験	1735
3.4.2 ボーリング資機材の種類	1642	3.10.9 杭の水平載荷試験	1740
3.5 原位置試験	1644	3.10.10 動的支持力管理式	1743
3.5.1 サウンディング	1644	3.11 動態観測	1745
3.5.2 孔内載荷試験	1646	3.11.1 一般	1745
3.5.3 孔内検層 (物理検層)	1650	3.11.2 動態観測事例	1746
3.5.4 間隙水圧測定	1655	4 照査用地震動の評価に係る観測	1775
		4.1 一般	1775
		4.2 対象施設設置地点とその周辺での常時 微動観測	1776
		4.3 臨時の地震観測に基づくサイト増幅特性 の評価	1779

4.4 常時微動観測に基づくサイト増幅特性の 評価	1783	6.2.2 分析項目及び分析方法	1832
4.5 常時微動観測によるサイト増幅特性の ゾーニング	1786	6.2.3 評価	1834
4.6 常時微動観測結果の港湾計画への応用	1788	6.3 底質調査	1836
5 構造・材料の調査・試験に係る一般的事項	1789	6.3.1 底質環境の特徴	1836
5.1 総説	1789	6.3.2 分析項目及び分析方法	1837
5.1.1 施設整備における材料試験・調査	1789	6.3.3 特殊な調査	1839
5.1.2 改良設計時における材料試験・調査	1789	6.3.4 評価	1840
5.1.3 外国産の材料の試験・検査	1790	6.4 生物調査	1840
5.2 鋼材	1790	6.4.1 沿岸の生物の特徴	1840
5.2.1 材料品質に関する試験	1790	6.4.2 分析項目と分析方法	1843
5.2.2 鋼材の腐食	1791	6.4.3 評価	1845
5.2.3 鋼材の防食	1791	第2章 大規模地震・津波後の調査・試験	1850
5.3 コンクリートの試験	1792	1 総論	1850
5.4 アスファルト材料	1797	1.1 本章の位置づけ	1850
5.4.1 一般	1797	1.2 本章の構成	1850
5.4.2 アスファルトマット、サンドマス チックに関する試験方法	1798	2 大規模地震・津波後の調査	1851
5.4.3 舗装用アスファルト材料に関する 試験方法	1803	2.1 調査の全体手順	1851
5.5 石材	1803	2.2 基本情報の事前整理・準備	1851
5.5.1 石材の試験	1803	2.3 初期調査(全体)	1852
5.5.2 採石地における調査・試験	1810	2.4 港湾の利用可否の判定調査(初期調査)	1854
5.6 木材	1811	2.4.1 係留施設の利用可否の判定調査	1854
5.6.1 木材の試験	1811	2.4.2 航路・泊地の利用可否の判定調査	1858
5.7 防舷材	1811	2.5 緊急復旧調査	1859
5.7.1 防舷材に関する試験	1811	2.6 本格復旧調査	1859
5.7.2 試験の種類	1811	3 大規模地震・津波後における港湾管理用基準面 の再設定	1863
5.7.3 物理試験	1811	3.1 2011年東日本大震災時の対応と新たな 測位技術	1863
5.7.4 静的圧縮試験	1812	3.1.1 被災状況	1863
5.7.5 耐久性試験	1814	3.1.2 緊急復旧に向けた課題	1863
6 環境に係る観測及び調査	1816	3.1.3 新たなGNSS測位技術(PPP-AR方式) と地震後の活用方法	1863
6.1 環境調査の考え方	1816	3.2 港湾管理用基準面の緊急設定	1864
6.1.1 目的	1816	3.2.1 基本手順	1864
6.1.2 調査の流れ	1816	3.2.2 量水標観測及び推算潮位を用いた仮の 港湾管理用基準面の設定方法	1865
6.1.3 現地踏査	1817	3.3 本格復旧工事に向けた港湾管理用基準面の 再設定	1867
6.1.4 調査計画の立案	1817	3.3.1 臨時の潮位観測をするための簡易的な 観測手法	1867
6.1.5 調査データの解釈・評価	1821	4 大規模地震・津波後の調査手法	1869
6.1.6 基準値一覧	1824	4.1 総説	1869
6.2 水質調査	1831	4.2 被害状況の全体把握	1869
6.2.1 水質環境の特徴	1831	4.2.1 総説	1869

4.2.2 人工衛星による画像等の活用 …	1870	4.4.5 測量船搭載型レーザスキャナ …	1885
4.2.3 航空機による空撮 ……………	1872	4.5 広域的な地盤変動の把握 ……………	1886
4.2.4 UAV (Unmanned Aerial Vehicle : 無人航空機) による空撮 ……………	1873	4.5.1 総説 ……………	1886
4.2.5 航空レーザ測量……………	1875	4.5.2 衛星画像を利用した広域地盤変動解析 (PSInSAR) ……………	1886
4.3 陸上部の形状把握……………	1876	4.5.3 航空レーザデータを用いた広域地盤 変動解析……………	1887
4.3.1 総説 ……………	1876	4.6 地盤の液化化に関する調査 ……………	1889
4.3.2 PPP-ARによる精密単独測位 (Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution) ……………	1877	4.6.1 総説 ……………	1889
4.3.3 リアルタイムキネマティック測量 (RTK測量) ……………	1877	4.6.2 2次元表面波探査 ……………	1889
4.3.4 ネットワーク型VRS-RTK-GNSS測量 ……………	1878	4.6.3 ピエゾドライブコーン (PDC) …	1891
4.4 水中部の形状把握……………	1879	4.7 エプロン部等の空洞把握 ……………	1893
4.4.1 総説 ……………	1879	4.7.1 総説 ……………	1893
4.4.2 スワス測深機……………	1880	4.7.2 地中レーダー探査 ……………	1893
4.4.3 サイドスキャンソナー ……………	1881	4.7.3 路面下探査車……………	1895
4.4.4 音響ビデオカメラ・水中3Dスキャナ ……………	1882	4.8 地中構造物の変状把握……………	1896
		4.8.1 総説 ……………	1896
		4.8.2 衝撃弾性波探査……………	1896
		4.8.3 ボアホールレーダー ……………	1897

第1章 耐震設計に関する基本的事項	1903	1.1 設計の基本方針	1961
1 照査用震度に関する詳細事項	1903	1.2 係留施設の設計	1963
1.1 照査用震度算出手法の分類	1903	1.2.1 バースの長さとお水深	1963
1.2 照査用震度算出の手順	1904	1.2.2 係船設備	1964
1.2.1 グループ1の照査用震度の算出の手順	1904	1.2.3 防衛設備	1964
1.2.2 グループ2の照査用震度の算出の手順	1911	1.3 陸上施設の設計	1964
1.2.3 グループ3の照査用震度の算出の手順	1914	1.3.1 エプロン	1964
1.2.4 グループ4の照査用震度の算出の手順	1914	1.3.2 コンテナクレーン	1965
2 地震応答解析に関する基本事項	1915	1.3.3 コンテナヤード	1968
2.1 総説	1915	1.3.4 コンテナフレートステーション	1971
2.2 変形照査の概要と設計での位置づけ	1915	1.3.5 メンテナンスショップ	1972
2.2.1 変形照査の目的と手法	1915	1.3.6 管理棟	1972
2.2.2 変形照査の手法選択の考え方	1916	1.3.7 ゲート	1972
2.2.3 変形照査の結果の解釈	1917	1.3.8 その他の附属設備	1973
2.3 変形照査における精度確保のための留意点	1920	1.4 コンテナターミナルエリアの規模の推計	1974
2.3.1 変形照査の手順	1920	2 クルーズふ頭	1985
2.3.2 プログラムの適用性についての確認	1921	2.1 クルーズふ頭の目的・機能・定義	1985
2.3.3 解析領域の設定について	1921	2.2 クルーズふ頭を構成する主要施設の機能等	1985
2.3.4 地震動の設定と底面境界	1927	2.3 要求性能の基本的な考え方	1986
2.3.5 地盤物性の設定	1927	2.4 クルーズふ頭を構成する施設の配置・規模の決定に関する重要事項	1986
2.3.6 解析条件の設定	1929	2.5 クルーズ船に対応した既存施設の改良に関する事項	1990
2.3.7 解析の信頼性のチェック	1931	2.5.1 一般	1990
2.3.8 解析結果の解釈に関する留意点	1932	2.5.2 係留施設の改良に関する検討	1991
2.4 解析手法の適用性に関する検討事例	1932	2.5.3 その他施設	1991
2.4.1 解析手法の選択	1932	3 フェリーふ頭	1994
2.4.2 重力式係船岸を対象とした事例	1932	3.1 フェリーふ頭の目的・機能・定義	1994
2.4.3 矢板式係船岸を対象とした事例	1947	3.2 フェリーふ頭を構成する技術基準対象施設と主要施設の機能等	1994
2.5 モデル化に関する留意点	1951	3.3 要求性能等の基本的な考え方	1995
2.5.1 各種の耐震対策工法のモデル化	1951	3.4 フェリーふ頭を構成する施設の配置・規模の決定に関する重要事項	1996
2.5.2 杭のモデル化法	1953	4 マリーナ	2004
2.5.3 水の影響に対する取り扱い	1959	4.1 マリーナ一般	2004
2.5.4 過剰間隙水圧の消散に伴う地盤沈下の評価	1959	4.2 マリーナ諸施設に求められる要求性能等の基本的な考え方	2006
第2章 専門ふ頭	1961	4.3 マリーナを構成する施設の配置・規模の決定に関する重要事項	2007
1 コンテナふ頭	1961	4.4 マリーナの設計・施工・維持管理等	2018

4.5 マリーナでの災害への対応	2019	5.9.1 ローディングアーム	2042
5 超大型石油タンカー用施設	2022	5.9.2 ゴムホースの設計	2042
5.1 総則	2022	5.9.3 送油導管等	2042
5.1.1 適用範囲	2022	5.10 主な附帯設備の設計	2043
5.1.2 定義	2022	5.10.1 消火設備等	2043
5.2 位置の選定と施設計画	2022	5.10.2 漏出油処理設備	2043
5.2.1 位置の選定	2022	5.10.3 滞油払出し及び置換装置	2044
5.2.2 バースの法線	2023	6 海底パイプライン	2045
5.2.3 航路の法線、幅員及び水深	2024	6.1 総則	2045
5.2.4 泊地の面積	2024	6.1.1 適用範囲	2045
5.3 規模の決定	2025	6.1.2 定義	2045
5.4 構造形式	2025	6.2 路線の選定	2045
5.5 設計の基本方針	2029	6.3 設計の基本方針	2046
5.6 設計外力及び荷重	2032	6.4 設計外力及び荷重	2048
5.6.1 外力及び荷重の種類	2032	6.4.1 外力及び荷重の種類	2048
5.6.2 船舶の接岸力	2033	6.4.2 風圧力	2049
5.6.3 係留中の船舶による作用	2033	6.4.3 波力及び流れの力	2049
5.6.4 風圧力	2033	6.4.4 地震力	2051
5.6.5 波力	2034	6.4.5 土圧	2052
5.6.6 流れの力	2034	6.4.6 水圧	2053
5.6.7 地震力	2035	6.4.7 自重及び載荷重	2054
5.6.8 土圧及び水圧	2035	6.4.8 内圧	2055
5.6.9 自重及び載荷重	2035	6.4.9 投錨による衝撃荷重	2055
5.7 固定式係留施設の設計	2036	6.4.10 振動の影響	2056
5.7.1 一般	2036	6.4.11 温度変化の影響	2057
5.7.2 ドルフィン配置及び天端高	2036	6.4.12 敷設時の荷重	2057
5.7.3 ドルフィンに作用する外力及び荷重	2038	6.5 材料	2059
5.7.4 栈橋式係留施設に作用する外力及び荷重	2039	6.6 導管の設計	2059
5.7.5 杭の設計	2039	6.6.1 導管の最小厚さ	2059
5.7.6 ジャケット、鋼矢板セル及びケーソンの設計	2039	6.6.2 導管の許容応力度	2060
5.7.7 防衝設備	2040	6.6.3 導管に生じる応力度の算定	2061
5.7.8 係船設備	2040	6.6.4 座屈	2063
5.8 浮標式係留施設の設計	2041	6.6.5 管継手の設計	2064
5.8.1 設計手順	2041	6.6.6 曲がり部の設計	2064
5.8.2 浮標式係留施設に作用する外力及び荷重	2041	6.6.7 弁の設計	2066
5.8.3 浮標の安定	2041	6.6.8 立ち上がり部の設計	2066
5.8.4 係留アンカー及びシンカー等の設計	2041	6.7 防食	2069
5.8.5 アンカーチェーンの設計	2042	6.7.1 防食被覆	2069
5.8.6 防衝設備	2042	6.7.2 電気防食	2070
5.9 荷さばき施設の設計	2042	6.8 導管等の敷設	2070
		6.8.1 一般	2070
		6.8.2 導管等の交差	2071
		6.8.3 既設の導管等との水平距離	2071
		6.8.4 埋設深さ	2071
		6.8.5 洗掘防止のための措置	2072

6.8.6 掘削及び埋戻し	2072	1.3 ピーク月/ピーク曜日を想定して発生集中 交通量を都市計画等の交通量に上乘せする 方法	2099
6.8.7 浮揚の防止	2074	1.4 計画時間交通量の推計におけるK値の推計 方法	2102
6.8.8 非埋設の導管等	2074	1.5 道路の車線数の決定におけるD値の推計 方法	2108
6.9 導管等の試験検査	2075		
6.9.1 溶接部の非破壊試験	2075	第4章 設計における参考図表	2109
6.9.2 耐圧試験	2075	1 波の回折図	2109
6.9.3 既設の海底パイプラインの健全性評価	2075	2 版の曲げモーメントの計算数表	2151
第3章 臨港交通施設の計画手法	2077	3 K値=1~7の場合の船種別の風向角度ごとの 必要舵角・漂流角	2173
1 港湾の道路の車線数の設定	2077	4 波の線形分散関係	2181
1.1 港湾の道路の発生集中交通量の推計方法	2077		
1.2 緑地・マリーナ、フェリーに関する交通量 の日単位交通量への変換方法	2097		
索引	2183		

第6章 地震

【告示】(地震動)

第十六条 レベル1地震動については、地震動の実測値をもとに、震源特性、伝播経路特性及びサイト特性を考慮して、確率論的時刻歴波形を適切に設定するものとする。

2 レベル2地震動については、地震動の実測値、想定される地震の震源パラメータ等をもとに、震源特性、伝播経路特性及びサイト特性を考慮して、時刻歴波形を適切に設定するものとする。

(解釈)

7. 自然状況等の設定

(6) 地震に関する事項(基準省令第6条、基準告示第16、17条関係の解釈)

①地震動を設定する深度

レベル1地震動及びレベル2地震動の時刻歴波形を設定する深度を②で定める工学的基盤とすることを標準とする。なお、技術基準対象施設の性能照査において工学的基盤以外の深度における地震動の設定が必要な場合には、一次元の地震応答計算等の方法により工学的基盤における地震動に基づいた当該深度における地震動を設定する。

②工学的基盤

工学的基盤は、それよりも下方にある全ての土層が以下のいずれかである土層の上面とする。

- ・岩盤
- ・標準貫入試験値(N値)が50以上の砂質土層
- ・一軸圧縮強さが $650 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ 以上の粘性土層
- ・せん断波(S波)速度が 300 [m/s] 以上の土層

③サイト特性

サイト特性の設定に当たっては、対象の区域内及びその周辺地域における地震動の実測値を適切に考慮する必要がある。

④時刻歴波形

技術基準対象施設の性能照査に当たっては、必要に応じて、レベル1地震動及びレベル2地震動を、地震動の実測値に基づき、当該施設を設置する地点の地盤の特性を考慮して、工学的基盤における加速度、速度、又は変位の時刻歴波形として適切に設定する。

⑤レベル1地震動

イ) レベル1地震動

レベル1地震動は、地震動の再現期間を、対象港湾の周辺における個々の地震が定常ポアソン過程に従って過去の履歴に関わらず時間的に無作為に発生するものであるとの仮定の上で設定する。したがって、このレベル1地震動の定義によれば、南海トラフ地震等のように過去の履歴を踏まえて近い将来の発生が懸念される地震であっても、その平均発生間隔がレベル1地震動の再現期間に比べてある程度長ければ、その地震による地震動をレベル1地震動として考慮しないことがある。

ロ) 確率論的時刻歴波形

確率論的時刻歴波形とは、地震の発生確率を考慮した確率論的地震危険度解析により設定される地震動の時刻歴波形のことである。レベル1地震動としての確率論的時刻歴波形の設定に当たっては、地震動の周波数特性を適切に考慮するために、いずれの周波数成分においても再現期間が同一となる一様ハザードフーリエスペクトルに基づくことを標準とする。

⑥再現期間

レベル1地震動の設定における一様ハザードフーリエスペクトルの再現期間は75年とすることを標準とする。

⑦レベル2地震動

イ) レベル2 地震動

レベル2地震動の設定に当たっては、次のi) からvi) に掲げる想定地震の中から、それらの想定地震によりもたらされる地震動の最大振幅、周期、継続時間、構造物に与える影響の大きさ等を考慮して、レベル2地震動を設定するための地震を選定する。なお、想定地震の選定に当たっては、中央防災会議や地震調査研究推進本部等の国の機関における調査の結果、又は地域防災計画等を踏まえて総合的に判断する。

i) 過去に大きな被害をもたらした地震の再来

ii) 活断層の活動による地震

iii) 地震学的あるいは地質学的観点から発生が懸念されるその他の地震

iv) 中央防災会議や地震調査研究推進本部等の国の機関の想定地震

v) 地域防災計画の想定地震

vi) M6.5の直下地震

ロ) 震源パラメータ

レベル2地震動の設定に当たっては、想定する地震の特性を考慮して、巨視的震源パラメータ及び微視的震源パラメータを適切に設定する。

1 地震動

1.1 一般

地震動に影響を及ぼす要因として重要なのは、震源断層の破壊過程の影響（震源特性）と震源から地震基盤に至る伝播経路の影響（伝播経路特性）、それに地震基盤上に存在する堆積層の影響（サイト特性）の三者である（図-1.1.1）。ここに地震基盤とは一般に花崗岩でS波速度が3km/s以上の地層をいう。このうち、堆積層の存在が地震動に及ぼす影響は非常に大きいので、将来の地震による揺れの推定を行う場合、対象施設設置地点におけるサイト特性を正確に把握することが重要である。このときサイト特性としては、工学的基盤面より上方の表層地盤の影響のみならず、工学的基盤面より下方の深層地盤の影響も重要であることが認識されるようになってきている¹⁾。このサイト特性を把握するための有用な手段となるものが地震観測と常時微動観測である。なお、堆積層は地震動の振幅のみならず経時特性にも影響を及ぼすものであるが、このうち、地震動の振幅に及ぼす影響を本書では「サイト増幅特性」と呼び、地震動に及ぼす影響全般を本書では「サイト特性」と呼ぶ。

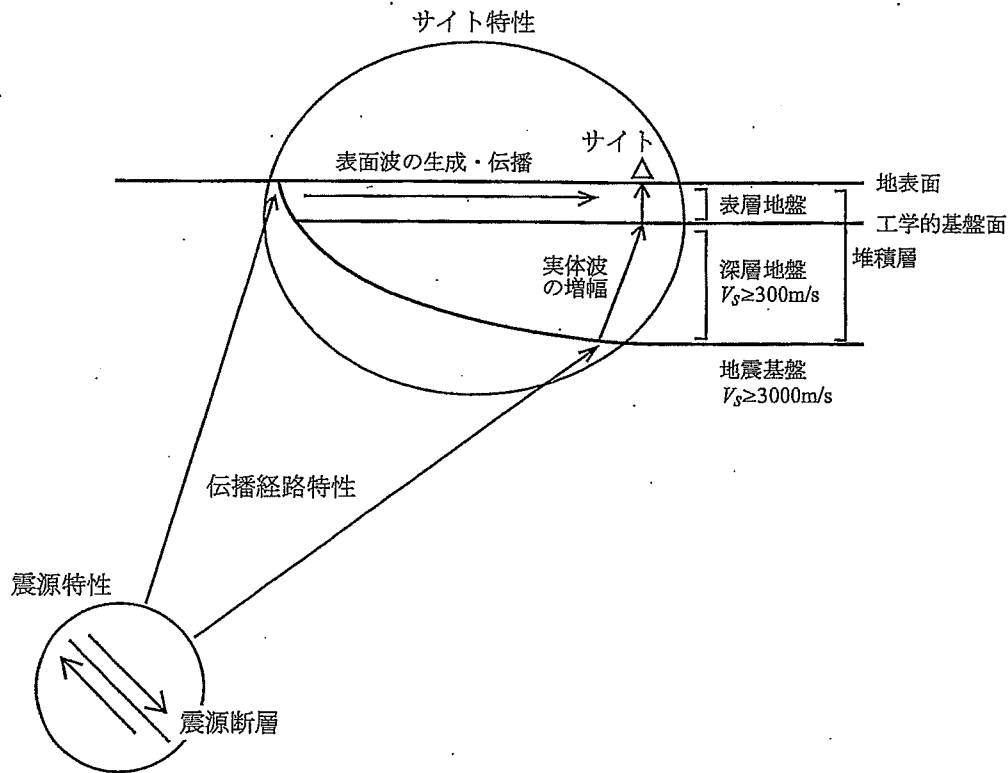


図-1.1.1 震源特性・伝播経路特性・サイト特性

1.1.1 震源特性

(1) ω^{-2} モデル (オメガスクエア・モデル)

地震動の震源特性に関する有力なモデルとして ω^{-2} モデル²⁾がある。 ω^{-2} モデルでは、震源から放射される地震波の加速度フーリエ振幅スペクトル (加速度震源スペクトル) は次式で表される。

$$S(f) = C \frac{M_0}{4\pi\rho V_s^3} \frac{(2\pi f)^2}{1+(f/f_c)^2} \quad (1.1.1)$$

ここで

$S(f)$: 加速度震源スペクトル

M_0 : 地震モーメント

f : 周波数

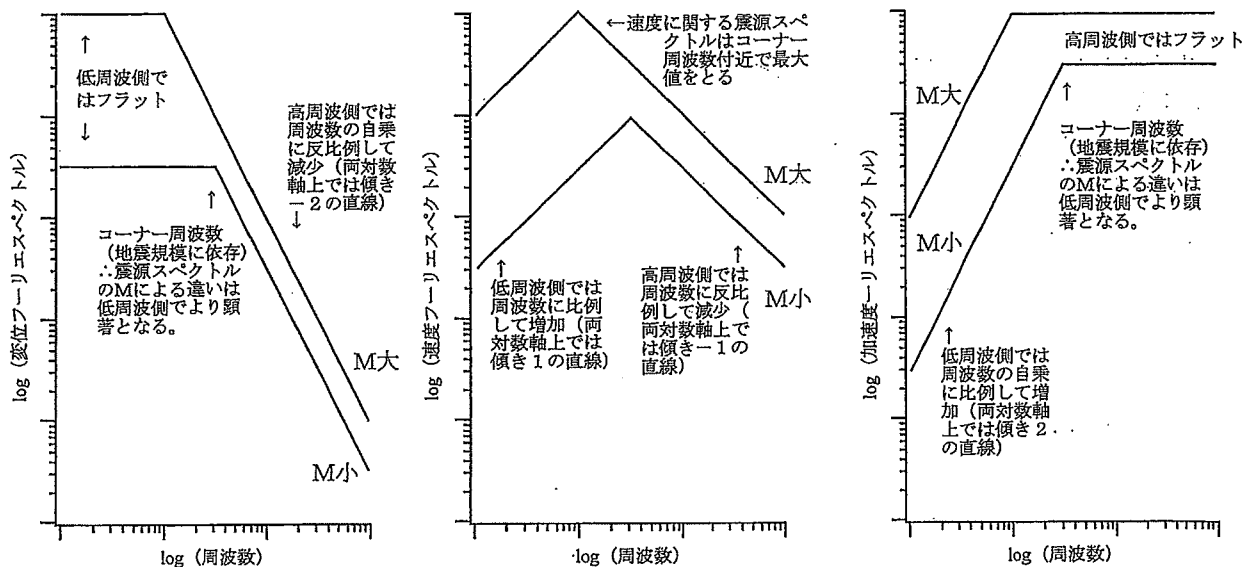
f_c : コーナー周波数

ρ : 地震基盤の密度

V_s : 地震基盤のS波速度

C : 定数 (式 (1.3.5) 参照)

ω^{-2} モデルに従う変位、速度、加速度の震源スペクトルを図示したものが図-1.1.2である。式 (1.1.1) 及び図-1.1.2からわかるように、 ω^{-2} モデルに従う加速度震源スペクトルは、 f_c よりも低周波側では周波数の自乗に比例し、 f_c よりも高周波側ではフラットとなる。このようにコーナー周波数 f_c は震源スペクトルの曲がりに対応する周波数である。

図-1.1.2 ω^{-2} モデルに従う変位、速度、加速度の震源スペクトル

地震モーメント M_0 は地震の規模を表す物理的尺度であり、次式で定義される³⁾。

$$M_0 = \mu A D_0 \quad (1.1.2)$$

ここで

μ : 震源付近の岩盤のせん断弾性係数

A : 震源断層の面積

D_0 : 震源断層における最終滑り量の平均値

コーナー周波数 f_c は平均的には M_0 の $1/3$ 乗に反比例する。したがって ω^{-2} モデルでは、震源から放射される地震波のフーリエ振幅スペクトルは、長周期側（低周波側）では地震モーメントに比例し、短周期側（高周波側）では地震モーメントの $1/3$ 乗に比例する。マグニチュードが1大きくなる毎に M_0 は約30倍となるので、震源から放射される地震動の長周期成分は M_0 に比例して約30倍、短周期成分は M_0 の $1/3$ 乗に比例して約3倍となる。つまり、地震の規模が大きくなるにつれて、とりわけ長周期成分が大きくなることがわかる。地震動の長周期成分の影響を受けやすい長周期構造物（高層建築物や長大橋梁、石油タンク、免震構造物等）を検討の対象とする場合には、特にマグニチュードの大きな地震に注意する必要がある。

(2) 指向性 (directivity)

大地震の震源は点ではなく、一定の広がりを持つ断層面である。破壊は断層面の一点で始まり、周辺に拡大していく。このとき、震源付近のS波速度と破壊伝播速度は同程度であるという性質があるため、破壊伝播方向にある港湾では、断層面上で次々に解放された地震波のエネルギーがほぼ同時に到来するので大振幅の地震動となる。このことを地震動の指向性 (directivity) という。1995年兵庫県南部地震の際、明石海峡下に始まった破壊が神戸市内に向かって伝播したことが、神戸市内で揺れが強かった一因であるとされている⁴⁾。

このことに関連して、指向性の影響で大振幅となる領域では、断層の走向に直交する向きの揺れが強い傾向のあることが知られている^{5) 6) 7) 8)}。この性質を利用して、活断層の震源近傍に耐震強化バース等重要な係留施設を計画する際、想定される地震動の卓越方向に対して最も有利となるように係留施設を配置すれば、当該施設の地震時の被害を大幅に軽減することができる^{9) 10)}。具体的には、港湾の近くに将来地震を引き起こす恐れのある活断層があるとき、係留施設の法線方向が活断層に対して直交するように配置すればよい。

もともとこのような配置がなされていたために、地震動の作用時に深刻な被害を免れた施設の例として、1995年兵庫県南部地震の際の摩耶埠頭の耐震強化バースがある。このとき、神戸港の多くの施設では、数m程度の大変位が生じたのに対し、摩耶埠頭の耐震強化バースは、耐震性が強化されていたことに加え、震源断層である六甲一淡路断層系に対して直交する向きに配置されていたため、強い地震動の作用を免れ1m程度の変形にとどまった。

(3) アスペリティ

大地震の震源断層面上のすべりは一様ではなく不均質であることが明らかにされてきている。内陸地殻内地震において、震源断層面の中で特にすべりの大きい領域はアスペリティと呼ばれる。1995年兵庫県南部地震の際に神戸市内で観測されたような強い地震動を説明するためにはアスペリティを考慮することが必要である⁴⁾。断層面上における最終滑り量の不均質な分布を表現するモデルとしては、最終滑り量を連続関数として表現するモデル(variable slip model)と、断層面上に矩形のアスペリティを複数配置し、その内部では滑り量などが一様であるとするモデル(特性化震源モデル)がある。ただし、海溝型巨大地震については、断層面上ですべりの大きい領域と強震動を生成する領域が一致しないことがわかってきている¹¹⁾。

また、2011年東北地方太平洋沖地震を始めとする海溝型地震では、震源付近の観測点において、周期1～数秒程度のパルス状の地震動が数多く観測されている^{12) 13) 14)}。SPGAモデル^{12) 13)}は、これらのパルスを含め、工学的に重要性の高い周期帯域における波形の特徴を十分再現できるように設定された海溝型地震のための震源モデルである。これは、海溝型地震の断層面上に、SPGA (Strong-motion Pulse Generation Area、強震動パルス生成域)と呼ばれる一辺が数km程度の領域を(複数)配置した震源モデルである。

1.1.2 伝播経路特性

伝播経路特性が地震動の振幅に与える影響に関しては、震源から球面状に広がる実体波の幾何減衰($1/r$)と非弾性減衰の組み合わせを考慮することが多い。これを式で表現すると次式となる。

$$P(f) = \frac{1}{r} \exp(-\pi f r / QV_s) \quad (1.1.3)$$

ここで

$P(f)$: 伝播経路特性

r : 震源距離

Q : 伝播経路における Q 値

Q 値とは地震波の伝播経路における散乱や熱への転化に起因する非弾性減衰の大きさを表す量であり、 Q 値が大きいほど、伝播経路における非弾性減衰が小さいことを意味する。震源から遠方では L_g 波(地殻内を反射しながら伝播する地震波の一種)等の影響で、実体波的な幾何減衰はあてはまらなくなることにも注意が必要である¹⁵⁾。

1.1.3 サイト特性

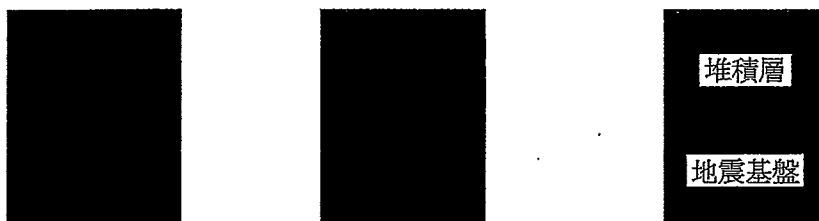
(1) サイト特性の基本的性質

地震基盤上に存在する堆積層(図-1.1.1)は、地震波の振幅・周期特性・継続時間などに大きく影響する。この堆積層の影響はサイト特性と呼ばれる。地下構造と地震動の性質とのおよその関係は図-1.1.3のようになっている。

- ①地震基盤あるいはそれに近い岩盤が露出している場所では、地震動は相対的に小さい。
- ②地震基盤上に薄い堆積層がある場所では、堆積層の固有周期が短いので、短周期成分の卓越した地震動となりやすい。
- ③地震基盤上に厚い堆積層がある場所では、堆積層の固有周期が長いので、長周期成分の卓越した地震動となりやすい。

④堆積層が閉じた形をしている場所では、地震波のエネルギーが捕捉されて堆積層の中で反射を繰り返すので、継続時間の長い地震動となりやすい。

- ①地震基盤が露頭 →あまり揺れない ②地震基盤上に薄い堆積層 →短周期の卓越した地震動 ③地震基盤上に厚い堆積層 →長周期の卓越した地震動



- ④地震基盤上に堆積層があり →継続時間の長い揺れ
地形的に閉じている。



図-1.1.3 地下構造と地震動の性質との関係

堆積層が地震の揺れに大きな影響を与えた事例は数多く知られている。例えば1995年兵庫県南部地震の際、周期1～2秒のパルス状の地震動が、神戸市直下の堆積層の影響で増幅されたことが、震災の帯の成因であるとされている⁴⁾。また、2000年鳥取県西部地震の際、重要港湾境港とその周辺の複数地点(図-1.1.4)で観測された地震動を比較すると、弓ヶ浜半島の堆積層上に位置している港湾の観測点(境港-G)と気象庁観測点では、島根半島の山麓に位置している防災科学技術研究所の観測点(SMN001とSMNH10)に比べ、最大速度が4倍も大きかった(図-1.1.5)。これは、弓ヶ浜半島の地下にある堆積層が地震動を増幅させたためである。このとき、被害も境港市内に集中している。このように、堆積層の存在が地震動に及ぼす影響は非常に大きいため、将来の地震による揺れの推定を行う場合、対象地点周辺の堆積層が地震動に及ぼす影響、すなわちサイト特性を適切に考慮することが重要である。このとき、サイト特性としては、工学的基盤面より上方の表層地盤の影響のみならず、工学的基盤面より下方の深層地盤の影響も重要である¹⁾。

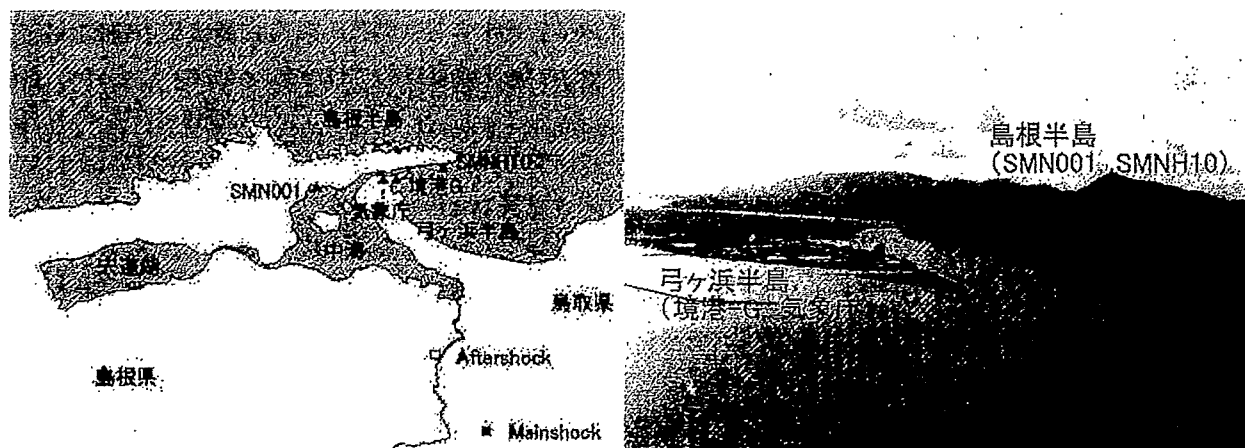


図-1.1.4 境港周辺の地形と強震観測点の位置(写真は第八管区海上保安本部提供)

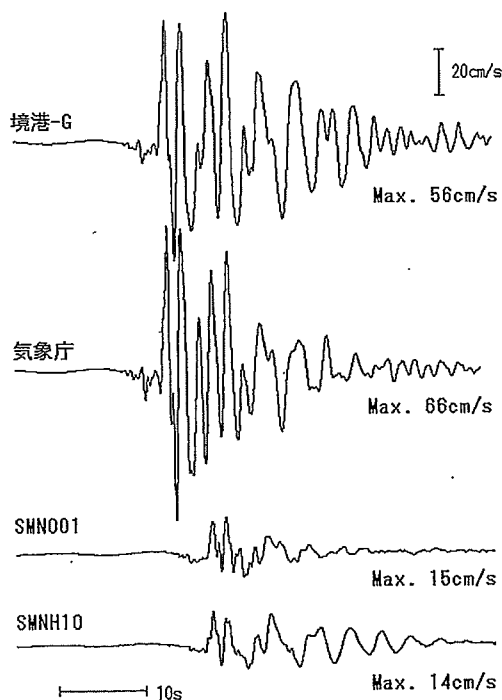


図-1.1.5 2000年鳥取県西部地震の際に境港周辺で観測された速度波形(断層直交成分)

サイト特性は地震動の周期特性にも大きく影響する。例えば図-1.1.6は八戸港と関西国際空港で得られた大地震の記録のフーリエスペクトルを比較したものである。八戸港では1968年十勝沖地震と1994年三陸はるか沖地震の強震記録が得られており、2つの大地震で、いずれも周期2.5秒(周波数0.4Hz)の成分が卓越している。八戸港で周期2.5秒の成分が卓越しやすいのは、八戸港周辺の深層地盤の影響であることが明らかにされている¹⁶⁾。一方、関西国際空港では1995年兵庫県南部地震と2000年鳥取県西部地震の記録が得られており、いずれも周期5秒(周波数0.2Hz)の成分が卓越している。このように、特定の周期の地震動が卓越しやすいのはサイト特性の影響である。構造物の設計を実施しようとする地点における地震動の卓越周期を把握することは、構造物の固有周期と地震動の卓越周期の一致を回避することなどを通じ、より安全な構造物の実現に寄与する。

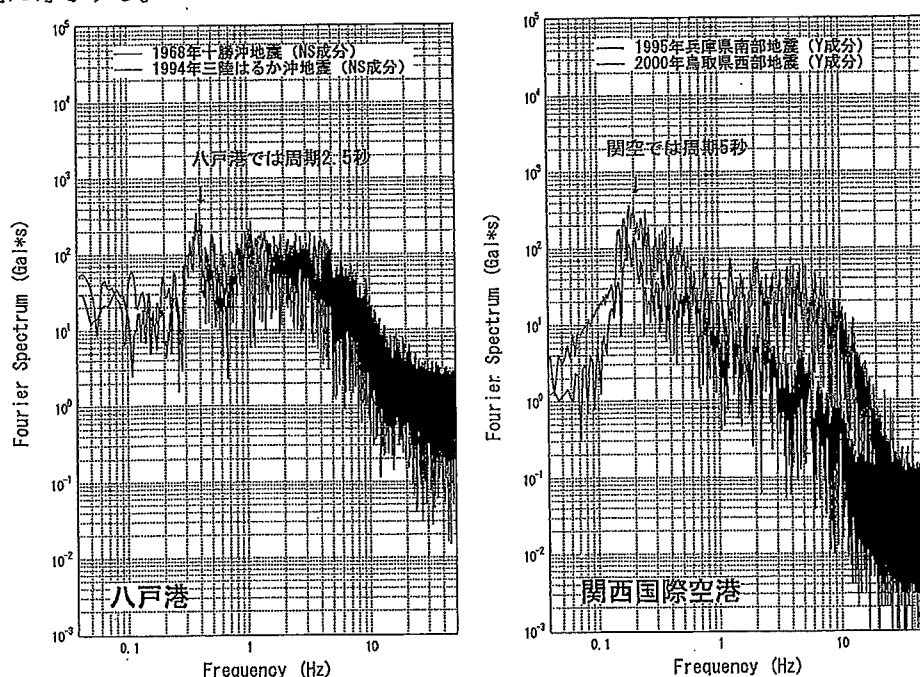


図-1.1.6 八戸港と関西国際空港で観測された強震記録のフーリエスペクトルの比較

(2) 各地のサイト特性

サイト特性を評価する上で最も信頼性の高い方法は地震観測による方法である。現在、我が国の主な港湾では強震観測が実施されている(図-1.1.7)。強震観測とは地震観測の一種であり、大地震による強い揺れに対しても振り切れない計器等を用いて実施する観測のことである。港湾地域強震観測の最大の目的は、大地震時に港湾施設に作用した外力を把握することであるが、日常的に得られる中小地震記録は、サイト特性の評価にも活用できる。港湾地域強震観測の観測記録は国土交通省港湾局のホームページ(<http://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm>)よりダウンロード可能である。

文献17)では、港湾地域強震観測の強震記録にK-NET¹⁸⁾、KiK-net¹⁹⁾等の強震記録を加えたデータセットに対してスペクトルインバージョンと呼ばれるある種の回帰分析を適用し、港湾を始めとする各地の強震観測地点でのサイト増幅特性(地震基盤～地表)を求めている。この結果は文献17)の付録CD及び港湾空港技術研究所のホームページ(http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bst/taisin/siteamplification_jpn.html)で公開されており、利用可能である。文献17)で解析の対象となった強震観測地点を図-1.1.8に示す。

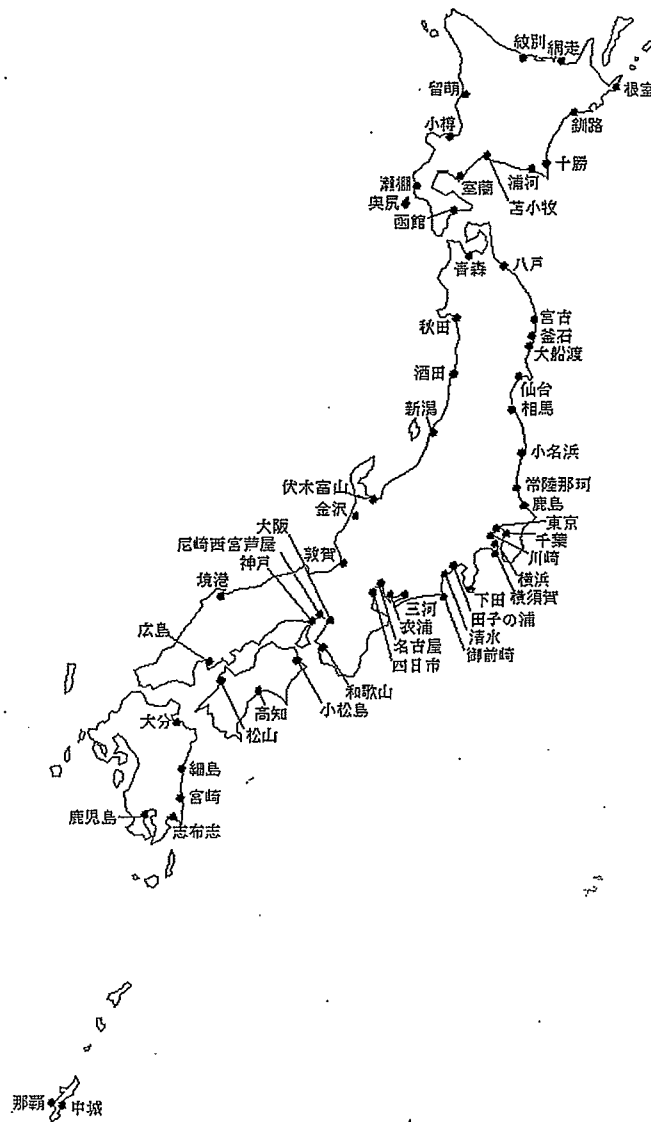


図-1.1.7 港湾地域強震観測網

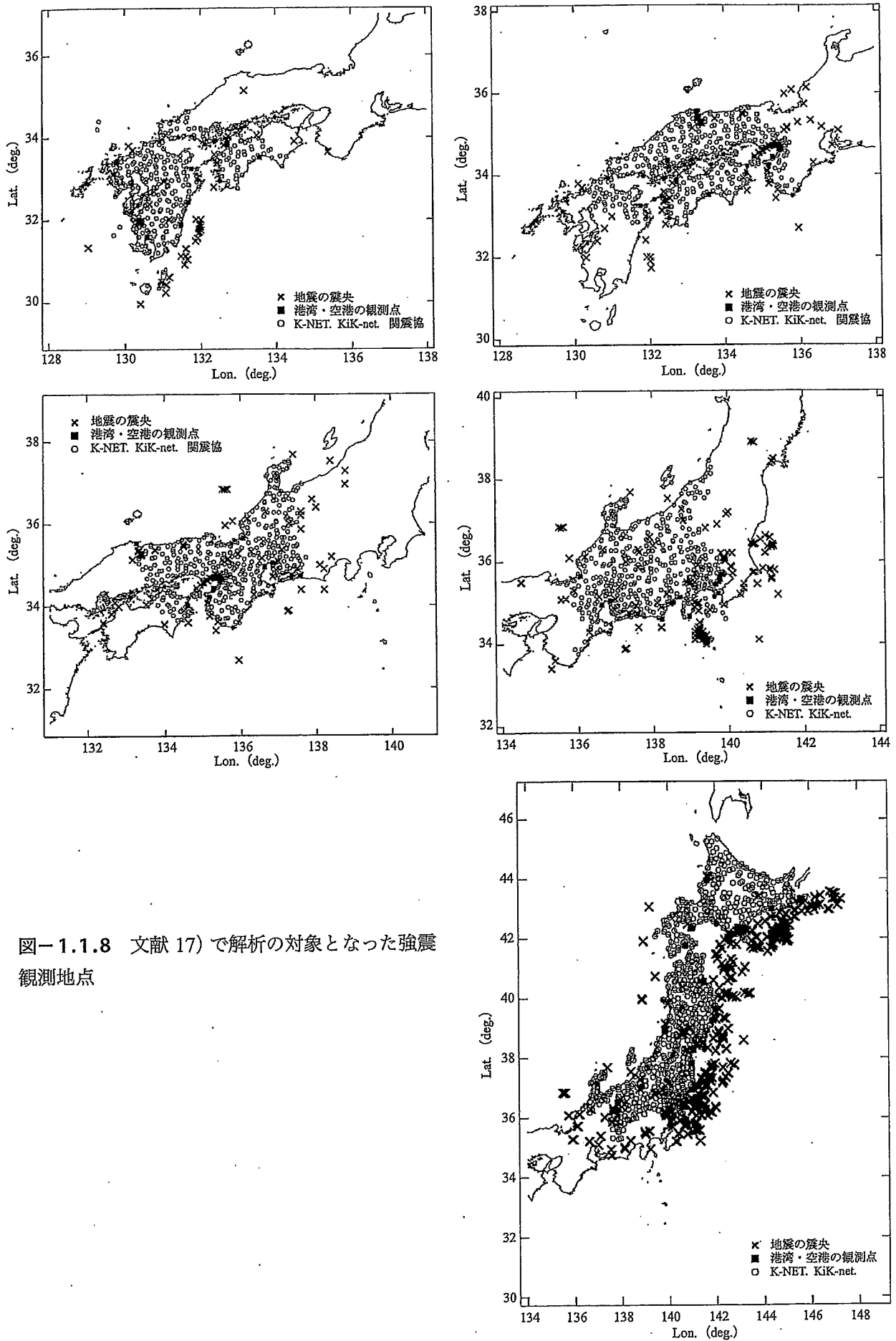


図-1.1.8 文献 17) で解析の対象となった強震観測地点

文献17)の解析で得られている典型的な結果を図-1.1.9及び図-1.1.10に示す。

鳥取県から島根県にかけての日本海側には、中海と宍道湖を取り囲むように沖積平野が分布している(米子、境港、松江、出雲等を含む地域)。図-1.1.9(左)に示す沖積平野とその南の中国山地に位置する観測点に対して算定されたサイト増幅特性を図-1.1.9(右)に示す。沖積平野に位置する港湾地域強震観測の境港-G、K-NETのTTR008(米子)、SMN002(松江)、SMN005(出雲)では、地点によってピークの横軸上の位置は異なるものの、いずれも0.5-2Hzの範囲に10を超えるピークを有する。一方、山地に位置するTTR007(江府)、TTR009(日南)、SMN003(横田)、SMN004(木次)、SMN016(掛合)では、図-1.1.9(右)に灰色線で示すように、いずれも1Hz以下の範囲ではサイト増幅特性は1~2の範囲にあり、岩盤に近い条件であることがわかる。このように、平野と山地ではサイト増幅特性に著しい相違がある。沖積平野の観測点で、地点によって横軸上のピーク的位置が異なるのは、それぞれの地点における堆積層の厚さを反映したものと考えられる。

埼玉県のK-NET観測点(図-1.1.10(左))におけるサイト増幅特性を図-1.1.10(右)に示す。これを見ると、西部の山間部に位置するSIT004、SIT005、SIT012、SIT014(灰色線で表示)ではサイト増幅特性は小さな値を示すのに対し、東部の低地に位置するSIT003、SIT008、SIT010、SIT011(黒太線で表示)ではサイト増幅特性は大きな値を示すことがわかる。西部の山間部でも、山間の小盆地である秩父(SIT006)では、周辺の観測点より多少大きなサイト増幅特性を示すこともわかる。武村²⁰⁾によると、1923年関東地震の際、埼玉県東部では震度6に相当する著しい被害が生じたとされているが、大きな被害の生じた地域と、図-1.1.10で大きなサイト増幅特性の算定されている地域は類似している。

強震観測点におけるサイト増幅特性に関する資料としては、以上の他にも、南西諸島や道北におけるサイト増幅特性に関する評価結果が公表されている^{21) 22)}。

日本地図上に示された強震観測点の分布(図-1.1.8)はかなり密であるように見えるが、これらの強震計の設置間隔は概ね20km~30km程度であり、施設の設計を実施しようとする地点でのサイト増幅特性が明らかにされている場合はむしろ少ない。そこで、臨時の地震観測や常時微動観測を実施し、その結果に基づいてサイト増幅特性を評価することが必要となる。その具体的な方法については本章1.2.2 サイト増幅特性の評価で述べる。

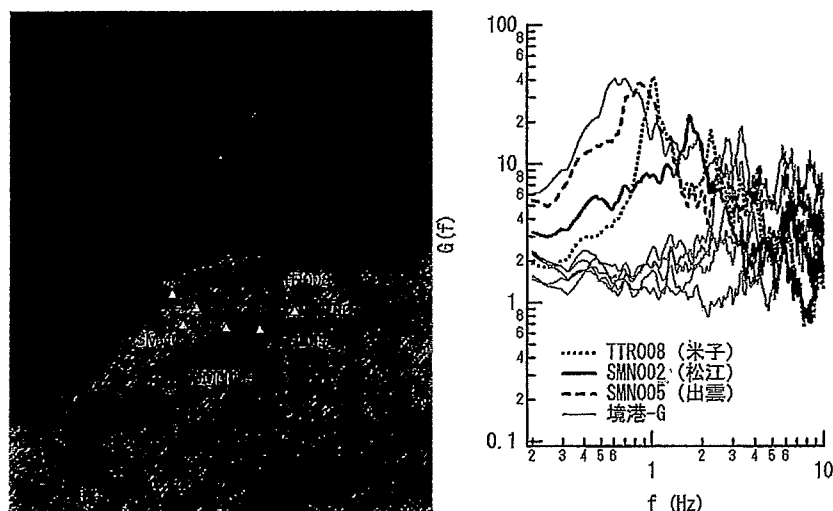


図-1.1.9 中海・宍道湖周辺の観測点とそこでのサイト増幅特性

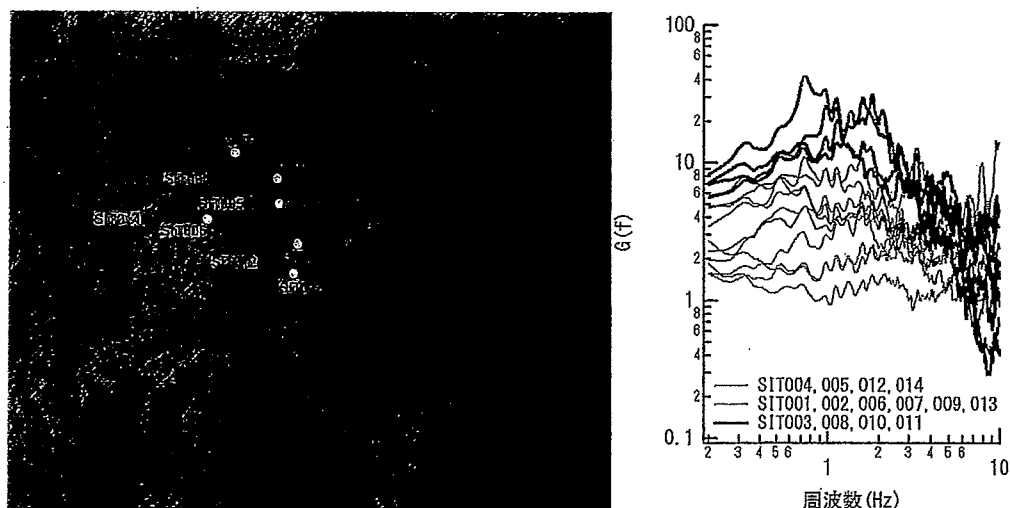


図-1.1.10 埼玉県におけるK-NET観測点と当該地点におけるサイト増幅特性
(サイト増幅特性の大きい地点を黒太線, 中程度の地点を黒細線, 小さい地点を灰色線で示している)

1.1.4 表層地盤の非線形挙動

一般に表層地盤の物性はひずみレベルに応じて変化し、強い地震動が作用する場合には、せん断弾性係数は小さくなり、減衰定数は大きくなる。このことを表層地盤の非線形挙動という。地表と地中で同時に得られた強震記録のスペクトル比をとれば、実際に非線形挙動の生じていることを確かめることができる。図-1.1.11は2003年に釧路港で取得されたすべての強震記録(M5以上)に対し、原記録のフーリエスペクトルを移動平均によって平滑化し、東西成分と南北成分のベクトル和をとった上で、地表と地中のスペクトル比を求めたものである。実線は2003年9月26日十勝沖地震(M8.0)の記録である。十勝沖地震以外のスペクトル比はちょうど1Hzと3Hzにピークを有するが、十勝沖地震ではピークの位置が低周波側に移動している。これは表層地盤の非線形挙動を示すものである。

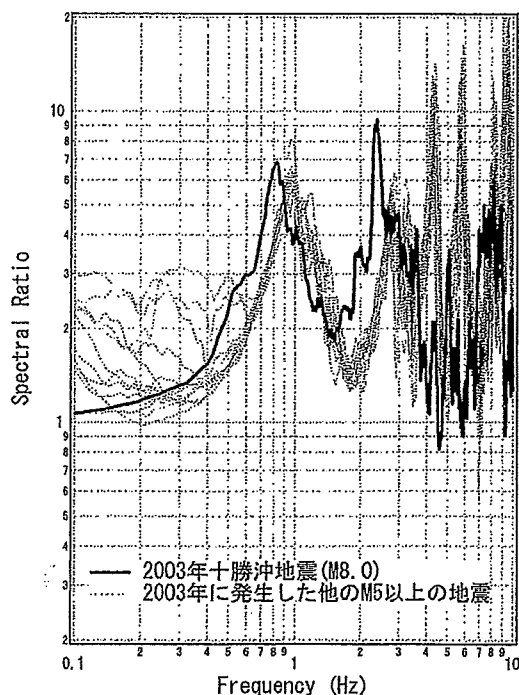


図-1.1.11 釧路港の地表と地中のフーリエスペクトルの比
(2003年に得られたM5.0以上のすべての記録)

1.1.5 地震動の空間的変動

沈埋トンネルや埋設パイプラインのように延長が長く空間的に大きな範囲を占める施設の耐震性を検討する場合、地震動の空間的変動は重要な検討項目となる。構造物の占める範囲内において、地盤の水平方向の不均質性が著しい場合には、それによって地震動の空間的変動がもたらされる場合がある。一方、地盤の水平方向の不均質性が著しくない場合、水平方向の波動伝播効果が地震動の空間的変動の至たる要因となる。詳細については本章1.4施設の性能照査で考慮する地震動の空間的変動を参照することができる。

1.2 施設の性能照査に用いるレベル1地震動

1.2.1 概要

レベル1地震動は、一般に、震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性（地震基盤～工学的基盤）を考慮した確率論的地震危険度解析により設定する。設定される地震動は工学的基盤の上面に下方から入射する地震波の2倍の振幅をもつ波（2E波）²³⁾である。

レベル1地震動については、地域毎の震源特性、伝播経路特性を考慮した重要港湾等の工学的基盤における時刻歴波形が国土技術政策総合研究所のホームページ（<http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html>）で公開されている。その詳しい算定手順は文献24)を参照することができる。ただし、公開されているレベル1地震動の算定に用いられたサイト増幅特性と対象施設設置地点でのサイト増幅特性が同等であるかは確認されていない場合もあり、その場合、これが同等であることを常時微動観測結果に基づいて判断する必要がある。その具体的な方法については【参（作）】第1章4.2 対象施設設置地点周辺の既存強震観測記録の利用可能性の検討で述べる。同等と判断される場合は公開されているレベル1地震動をそのまま使用できるが、同等でないと判断される場合は、地震観測（本章1.2.2 サイト増幅特性の評価（1）参照）または常時微動観測（本章1.2.2 サイト増幅特性の評価（2）参照）に基づいて対象施設設置地点でのサイト増幅特性を評価し、これに基づいて、公開されているレベル1地震動を補正してから用いる必要がある（本章1.2.4 レベル1地震動の補正参照）。

工期が差し迫っているなどの理由で地震観測や常時微動観測ができない場合には、周辺の観測点におけるサイト増幅特性から、経験的な関係（本章1.2.2 サイト増幅特性の評価（3）参照）を利用して、対象施設設置地点でのサイト増幅特性を推定してもよい。また、そのようにして推定されたサイト増幅特性を用いてすでに算定されたレベル1地震動があればそれを用いてもよい。ただし、その場合の地震動の評価精度は地震観測や常時微動観測に基づく場合と比較して大きく低下することに注意する必要がある。

各施設の具体的な性能照査の手順など、詳細については、施設編の各施設の性能照査の記述を参照することができる。

1.2.2 サイト増幅特性の評価

(1) 地震観測に基づくサイト増幅特性の評価

対象施設設置地点でのサイト増幅特性は地震観測に基づいて評価することが望ましい。我が国には港湾地域強震観測（本章1.1.3 サイト特性）、K-NET¹⁸⁾、KiK-net¹⁹⁾、震度情報ネットワークなどの強震観測点が存在するので、まずはこれらの観測点の記録が利用できないか検討する。そのためには、対象施設設置地点及び周辺の強震観測点で常時微動観測を行い（図-1.2.1）、両地点の常時微動特性が類似しているならば、両地点の地盤震動特性は類似していると判断し、周辺の強震観測点でのサイト増幅特性を対象施設設置地点に適用する。その具体的な方法については【参（作）】第1章4.2 対象施設設置地点周辺の既存強震観測記録の利用可能性の検討で述べる。

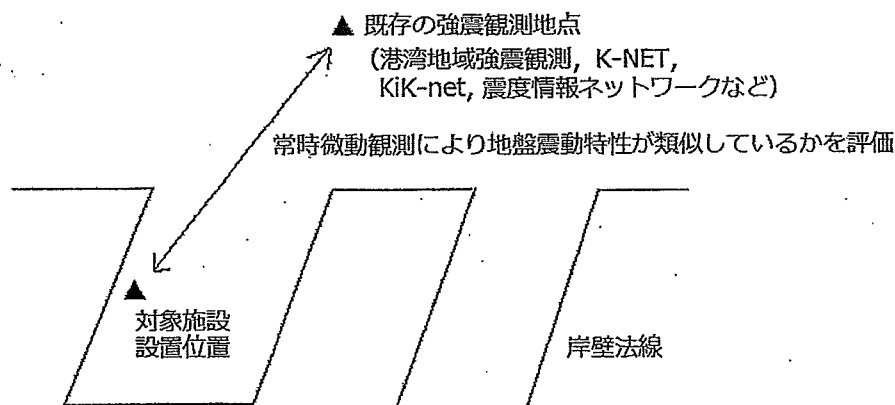


図-1.2.1 対象施設設置地点及び周辺の強震観測点での常時微動観測

しかし、常時微動観測の結果から、対象施設設置地点とその周辺の強震観測点で地盤震動特性が異なると判断される場合は、対象施設の重要度に応じ、対象施設設置地点の近傍で臨時の地震観測を実施することにより、サイト増幅特性の評価を行うことが望ましい。この場合、臨時に設ける観測点と対象施設設置地点とで地盤震動特性が大きく異なることをあらかじめ常時微動観測で確認しておく必要がある。地震観測に基づくサイト増幅特性評価の詳細については【参(作)】第1章4.3 臨時の地震観測に基づくサイト増幅特性の評価で述べる。

なお、地震観測に基づいてサイト増幅特性（地震基盤～地表）を求めた後で、サイト増幅特性（地震基盤～工学的基盤）を求める場合には、地震観測点における土質データに基づき、工学的基盤～地表の増幅特性を線形の重複反射理論（本章1.2.3 表層地盤の地震応答計算参照）²³⁾²⁵⁾により評価し、これでサイト増幅特性（地震基盤～地表）を除くことにより求めることができる。その際は、減衰定数を3%程度としてよい。この減衰定数の値は、既存の土質試験結果^{例えば26)}をもとに、サイト増幅特性（地震基盤～工学的基盤）の評価結果が安全側となるよう、土質試験結果よりもやや大きめの値を設定したものである。

(2) 常時微動観測に基づくサイト増幅特性の評価

常時微動とは、地震が発生していない状態での、一般には感じるできないほどの小さなレベルの地盤の振動である。

常時微動観測の結果得られる常時微動H/Vスペクトル（上下動に対する水平動のフーリエスペクトル比）²⁷⁾は、地震観測から得られるサイト増幅特性とよく対応することが知られている²⁸⁾。例えば図-1.2.2は高知港とその周辺の強震観測地点において常時微動観測を実施し、その結果得られた常時微動H/Vスペクトルを、強震観測記録から評価されたサイト増幅特性¹⁷⁾と比較したものである。ここで常時微動H/Vスペクトルは【参(作)】第1章4.4 常時微動観測に基づくサイト増幅特性の評価で述べる方法で算定を行っている。高知-Gでは常時微動H/Vスペクトルが1.3Hz付近に明瞭なピークを有しているが、サイト増幅特性もほぼ同じ周波数にピークを有している。K-NET高知では常時微動H/Vスペクトルが1.6Hz付近に明瞭なピークを有しているが、サイト増幅特性もほぼ同じ周波数にピークを有している。K-NET土佐山田では、常時微動H/Vスペクトルが明瞭なピークを有していないが、サイト増幅特性も同様に明瞭なピークを有していない。このように常時微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性との間には良好な対応関係が認められる。図-1.2.3は和歌山港とその周辺の強震観測地点を対象に同様の検討を実施したものである。ここでも常時微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性との間には一定の対応関係が認められる。

このように、常時微動観測は対象地点のサイト増幅特性を概略的に把握する上で非常に有効である。例えば、「対象地点は堆積層による地震波の増幅が懸念される場所か」「その場合どのような周波数の地震波が増幅されやすいか」といった情報を常時微動観測から得ることができる。

なお、常時微動H/Vスペクトルからのサイト増幅特性の推定には、以下に述べるように、いくつかの問題

が存在することも事実である。第一に、ピークの高さの問題がある。図-1.2.2、図-1.2.3に示すように、常時微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性のピーク周波数には良好な対応関係が認められる。しかしながら、ピーク高さの相関性については様々な議論がある。実際、図-1.2.2に示す高知-GとK-NET高知のようピーク高さの大小関係が逆転している例も存在する。第二に、サイト増幅特性に見られる2次以上の（つまり低周波側から数えて二つ目以上の）ピークが常時微動H/Vスペクトルに見られないことが多いという問題がある。上記の例でも、高知-Gのサイト増幅特性に見られる3.3Hz付近のピークと和歌山-Gのサイト増幅特性に見られる1.2Hz付近のピークはH/Vスペクトルには明確には現れていない。

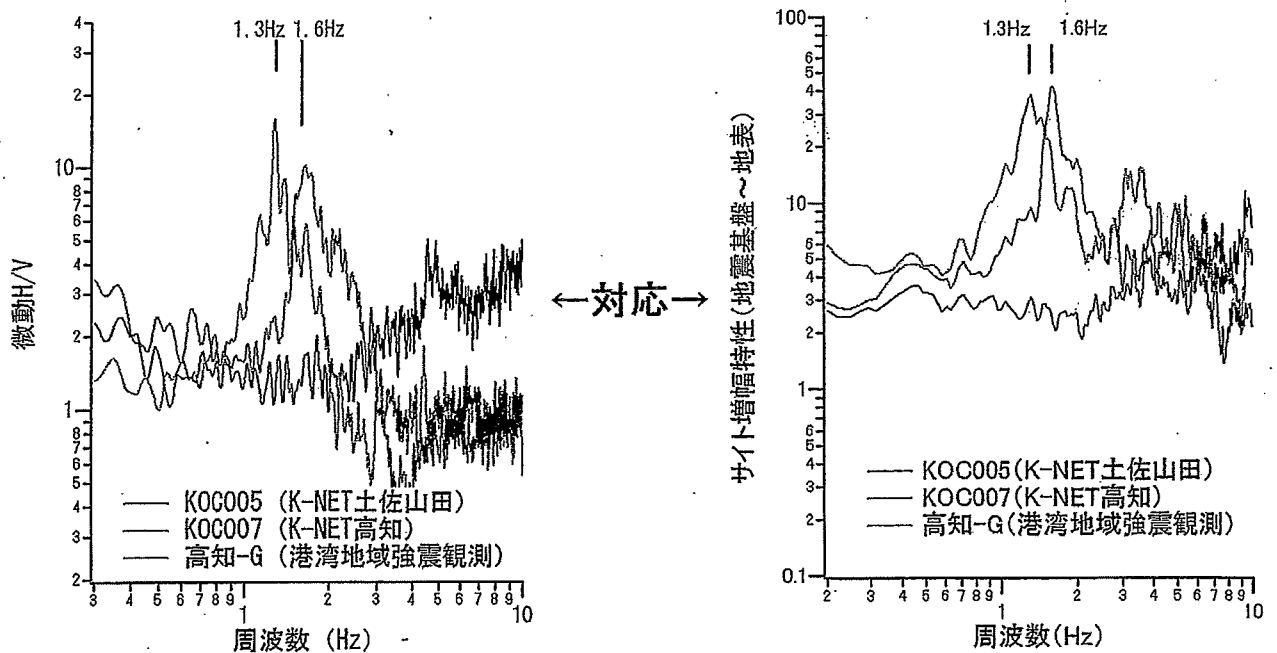


図-1.2.2 高知港とその周辺の強震観測点における微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性¹⁷⁾の関係
(ここに示す微動H/Vは3区間の平均値)

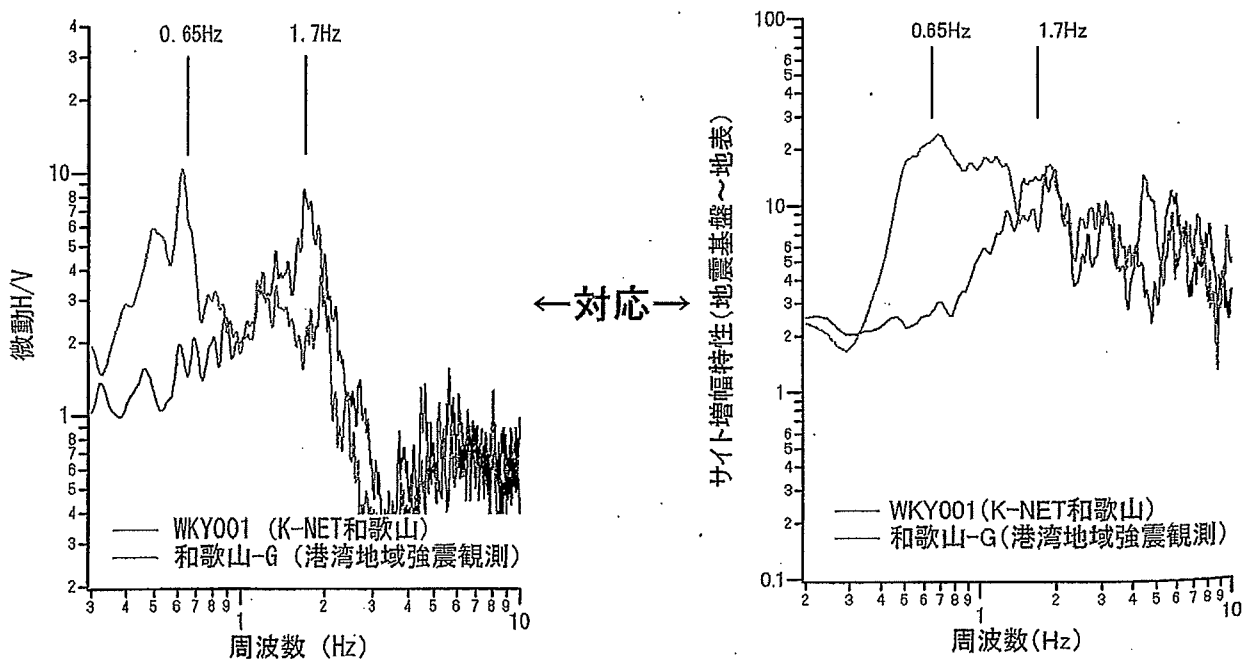


図-1.2.3 和歌山港とその周辺の強震観測点における微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性¹⁷⁾の関係
(ここに示す微動H/Vは3区間の平均値)

以上のように、常時微動H/Vスペクトルからのサイト増幅特性の推定は不確実性を伴うのが現状である。したがって、極めて重要な構造物の設計のために照査用地震動を設定する場合には、現地での地震観測に基づいてサイト増幅特性を評価することが望ましい。しかし、多数の施設を対象にサイト増幅特性を評価する場合などに、常時微動観測は有用な手段である。常時微動観測に基づくサイト増幅特性評価の詳細については【参(作)】第1章4.4 常時微動観測に基づくサイト増幅特性の評価で述べる。

なお、常時微動観測に基づいてサイト増幅特性(地震基盤～地表)を求めた後でサイト増幅特性(地震基盤～工学的基盤)を求める方法は、地震観測に基づいてサイト増幅特性(地震基盤～地表)を求めた場合と同様である(本章1.2.2 サイト増幅特性の評価(1) 参照)。

(3) 地震観測及び常時微動観測のいずれにもよらないサイト増幅特性の評価

地震観測及び常時微動観測のいずれにもよらないサイト増幅特性の評価方法として、港湾と周辺のK-NETまたはKiK-netの観測地点のサイト増幅特性の経験的関係を利用する方法¹⁷⁾がある。ただし、この方法による場合の地震動の評価精度は、地震観測や常時微動観測に基づく場合と比較して大きく低下することに注意する必要がある。この経験的関係による補正が係船岸の変形量評価に及ぼす影響については、文献29)を参照できる。経験的関係は次式で示される。

$$y = A + Bx$$

$$y = \log(GP(f)/GK(f)) \quad (1.2.1)$$

$$x = \log GK(f)$$

ここに、

GP : 港湾での地震基盤～工学的基盤のサイト増幅特性

GK : 周辺のK-NET (またはKiK-net) の観測地点での地震基盤～工学的基盤のサイト増幅特性

係数AとBは周波数の関数であり、図-1.2.4のように与えられる。これらの係数は、全国の港湾及びその周辺のK-NET (またはKiK-net) の観測点におけるサイト増幅特性の一般的傾向を考慮して定めたものである。

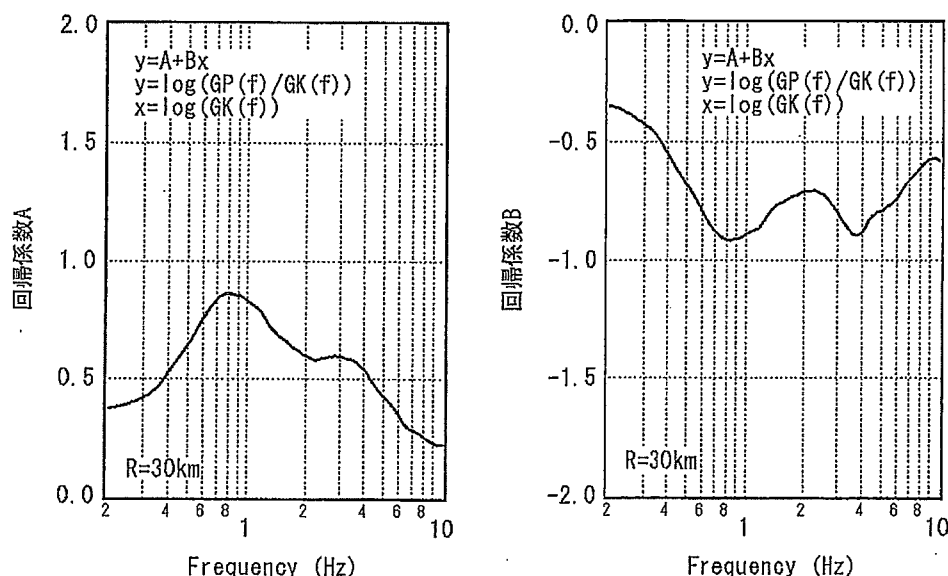


図-1.2.4 港湾とその周辺のK-NET (またはKiK-net) 観測点における
サイト増幅特性の経験的関係を示す係数

図-1.2.4の回帰係数を用いてK-NET(またはKiK-net)の観測点におけるサイト増幅特性(地震基盤～工学的基盤)から港湾のサイト増幅特性(地震基盤～工学的基盤)を推定すると、一般的な傾向として、1Hzよりも低周波側でサイト増幅特性が大きくなる。これは、K-NET(またはKiK-net)の観測点よりも港湾の方が地震基盤が深い場合が多いことに対応している。このことからわかるように、図-1.2.4の回帰係数は、港湾以外の地点におけるサイト増幅特性を推定することには適していない。

1.2.3 表層地盤の地震応答計算

一般にレベル1地震動は工学的基盤面への入射波(2E波)として設定されるが、表層地盤の他の深度における加速度・速度・変位・せん断応力・せん断ひずみ等を必要とする場合には、表層地盤の地震応答計算によりそれらを求めることができる。ここではそのための地震応答計算について記述している。施設の耐震性能照査のための地震応答計算については【参(施)】第1章2 地震応答解析に関する基本事項を参照することができる。なお、表層地盤の地震応答計算は一般に工学的基盤より上方の地盤をモデル化することにより行われるが、一口に工学的基盤といってもそのS波速度はかなりの幅があるので、レベル1地震動設定時に工学的基盤とみなした地層のS波速度と、地震応答計算時に工学的基盤とみなす地層のS波速度がある程度整合していることを確認する必要がある。また、液状化の予測・判定を目的として地震応答計算を実施する場合、かつてはSMAC-B2相当の波形に変換してから入力していたが、こうした変換操作は現在必要ない(かつては既往の強震記録の振幅を調整した波形を入力しており、その際に参照される最大加速度がSMAC-B2相当のものであったため、SMAC-B2相当の波形に変換していた)。

(1) 表層地盤の地震応答計算の種類

① 計算対象領域による分類

計算の対象とする領域によって1次元から3次元までの地震応答計算がある。一般に、地盤の地震応答のみを検討する場合、平面的に広いところに水平に堆積した地層構造をもつ自然地盤や人工地盤を対象にする場合には1次元の地震応答計算が行われることが多い。臨海部では水平層に仮定できる成層地盤が卓越している場合が多い。このような場合には、1次元モデルによっても実用上満足できる精度の計算結果が得られると考えられる。

また、このことに関連して、計算の対象とする地震波の種類は鉛直方向に伝播するS波とすることが多い。一般に臨海部では表層付近のS波速度は小さいため、地震波の波線は表層付近では鉛直に近くなる(図-1.1.1)。また、同様の傾向は表面波を対象とする場合にも認められる(表面波も、表層地盤内ではP波、S波の重なりあったものと見なすことができる。このときのP波、S波の波線も、表層付近では鉛直に近づく)。そのため、鉛直方向に伝播するS波を考えることで、実用上十分な精度で計算ができるものと考えられる。

② 土の応力-ひずみ関係のモデル化による分類

表層地盤の地震応答計算は、土の応力-ひずみ関係のモデル化の観点から、等価線形解析と非線形解析に分類される。等価線形解析は、地盤のせん断弾性係数と減衰定数が地震動の振幅(厳密に言えば地盤のひずみ)に依存する(【作】第3章2.4.1 動的変形定数 図-2.4.2)ことを考慮するが、地震動継続時間中はそれらの値が一定であると仮定する計算方法である。もちろんこれは実際と異なる仮定であるが、等価線形解析が開発された当時は電子計算機の性能が今ほど高くなかったため、計算の都合上こうした仮定を行っていた。それに対して非線形解析では地盤のせん断弾性係数等が地震動継続時間中に時々刻々変化することを考慮して計算を行う。実際の現象にできるだけ忠実であろうとすれば非線形解析を実施する必要があるが、等価線形解析も、地盤のひずみがあまり大きくない場合、ある程度実際に近い応答計算結果を与えると考えられている。等価線形解析が適用可能なひずみレベルは、手法にもよるが、約0.5～1%以下である³⁰⁾³¹⁾。したがって、等価線形解析を行った結果、これを超えるひずみが得られた場合には、解析手法を非線形解析に変更する必要がある。

等価線形解析では次のような繰り返し計算を行う。まず、あるステップで計算された各層毎(2次元以上の場合には各要素毎)の最大せん断ひずみから次式により有効せん断ひずみを求める。

$$\gamma_{\text{eff}} = \alpha \gamma_{\text{max}} \quad (1.2.2)$$

ここで

γ_{max} : 最大せん断ひずみ

γ_{eff} : 有効せん断ひずみ

α : 係数 (通常 0.65)

次に、有効せん断ひずみから【作】第3章2.4.1 動的変形定数 図-2.4.2のひずみ依存性を考慮してせん断弾性係数と減衰定数を更新し、次のステップに進む。この操作をせん断弾性係数が収束するまで繰り返す。等価線形解析による地震応答計算プログラムとして最も早く開発されたものがSHAKE³²⁾である。SHAKEは、開発当初は他に競合するプログラムが無かったこともあり、設計実務に広く用いられることとなった。またSHAKEの2次元版であるFLUSH³³⁾も広く用いられている。ただし、近年では、SHAKEによる計算結果と実際の地震観測記録との比較などからSHAKEの持つ問題点も次第に明らかにされてきている³⁴⁾。その一つとして、高周波成分が過小評価されるという問題がある(地表で観測された地震波をもとに工学的基盤への入射波を推定しようとする場合には逆に高周波成分が過大評価される)。この点に関してSHAKEを改良したFDEL³⁵⁾、DYNEQ³⁶⁾等のプログラムが提案されている。これらのプログラムでは、式(1.2.2)から得られる有効せん断ひずみの代わりに、周波数依存型の有効せん断ひずみを用いることにより、高周波成分の過小評価の問題を解決している。

非線形解析は、地盤のひずみが大きい場合(約0.5~1%以上)にも適用可能な解析手法である。ただし、当然ながら、非線形解析が実際に正しい結果を与えるかどうかは、採用する構成則と土質定数が適切であるかどうか依存する。非線形解析のための解析プログラムには種々のものがあり、構成則も様々である。過去に類似の条件(土質、ひずみレベル)で得られた鉛直アレー観測記録を精度良く再現した実績を有する解析プログラムを用いることが重要である³⁰⁾。

非線形解析は、有効応力解析と全応力解析に分けることができる。地盤に過剰間隙水圧が発生すると有効応力が減少する。その結果、土の応力状態が変化するため、土の復元力特性や減衰特性が変化し、地盤の応答特性も変化する。有効応力解析はこのような状態を表現でき、地盤に発生する過剰間隙水圧を計算により直接求めることができる方法である。一方、全応力解析では、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。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。したがって、実際の現象に忠実な解析を実施しようとするれば有効応力解析を行う必要がある。

有効応力解析のための解析プログラムの一つにFLIP³⁷⁾がある。図-1.2.5は1995年兵庫県南部地震の際に神戸港のポートアイランドで得られた鉛直アレー観測記録について、FLIPver.3.3による再現計算³⁸⁾を行った結果である。ポートアイランドではGL-83m, GL-32m, GL-16m及び地表の4つの深度で記録が得られている。ここではGL-83mの観測波(NS成分)を入力し、他の深度(GL-32m, GL-16m及び地表)における波形を計算して観測波と比較しているが、再現性は良好である。こうした結果、及び1993年釧路沖地震に関する解析結果³⁹⁾などから、FLIPは、土質定数さえ適切に設定されていれば、精度の良い結果を与える解析プログラムの一つであると判断される。

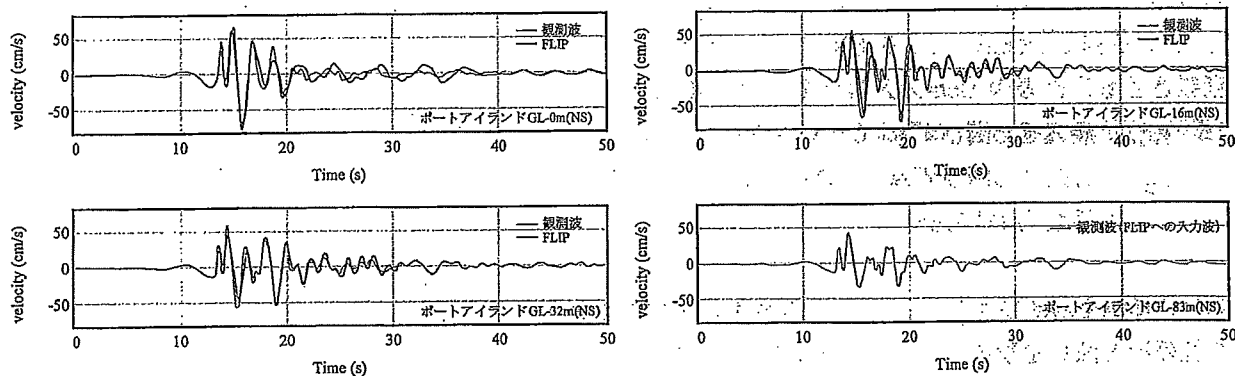


図-1.2.5 FLIPによる1995年兵庫県南部地震ポートアイランド鉛直アレー観測記録の再現³⁸⁾

③数値解法による分類

表層地盤の地震応答計算は、数値解法の観点から、重複反射理論によるもの、有限要素法によるもの等に分類される。

重複反射理論は、図-1.2.6に示すように、地盤を水平な土層の重なりとみなし、基盤から垂直に入射したせん断波が上方に進行し各層の境界で透過と反射を繰返すと仮定して、境界条件が満足されるように、各層における解析解の係数を決定する方法である。定式化については例えば文献²⁵⁾にわかりやすい記述がある。重複反射理論による計算では、一般に土の応力-ひずみ関係の取り扱いが線形もしくは等価線形に限定される。計算は周波数領域で行われるのが一般的である。SHAKE³²⁾、FDEL³⁵⁾、DYNEQ³⁶⁾等は数値解法として重複反射理論を利用している。

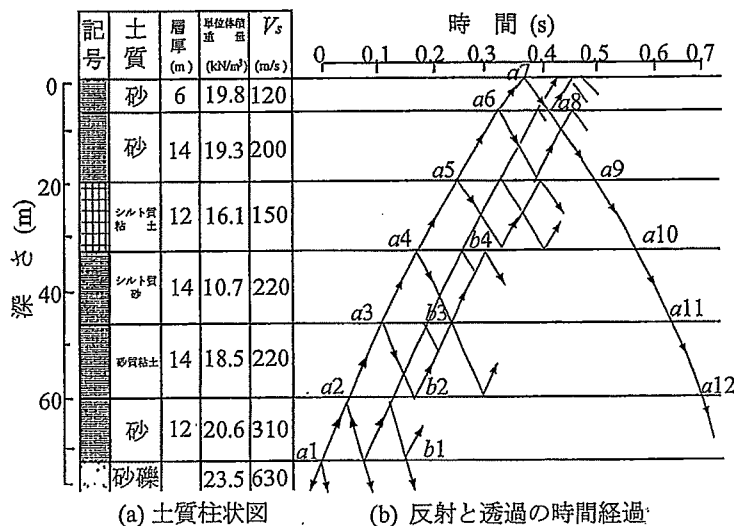


図-1.2.6 重複反射理論²³⁾

有限要素法は、図-1.2.7に示すように、地盤を有限個数の要素に分割し、系の応答を支配する微分方程式を節点での応答値に関する代数方程式に置き換えて解を求める方法であり、地盤に限らず広く各分野で利用されている。この方法の特徴は、地盤の層厚や物性の2次元～3次元的な変化にも対応できることにある。FLUSH³³⁾、FLIP³⁷⁾等は数値解法として有限要素法を利用している。計算は周波数領域で行われるものと時間領域で行われるものがある。

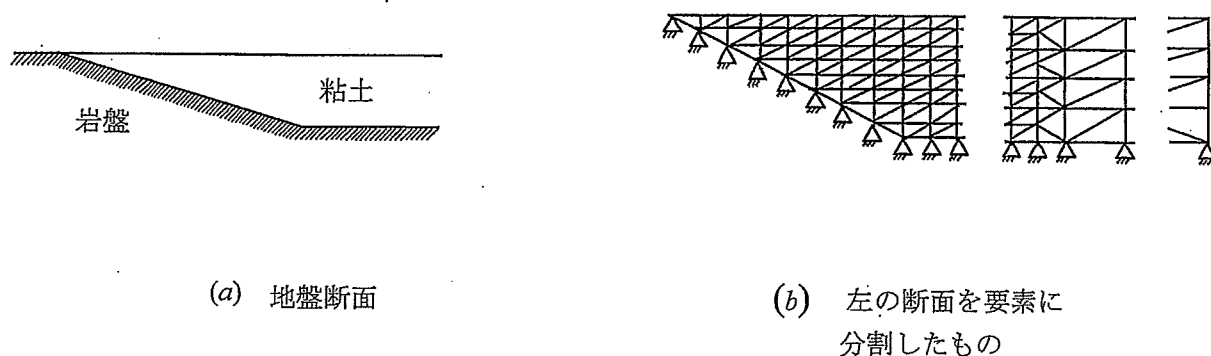


図-1.2.7 有限要素法

(2) 表層地盤の地震応答計算のための地盤のモデル化

ここでは表層地盤の地震応答計算のための地盤のモデル化及び解析に必要なパラメータの決め方について1次元の場合を中心に説明する。

①概要

表層地盤の地震応答計算を行うには、対象地点の地盤を幾つかの層に分割してモデル化する。各層の層厚、密度及び微小ひずみ時のせん断弾性係数は解析手法によらず必要なパラメータである。これに加えて、等価線形解析の場合、せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存特性が必要となる。非線形解析に必要なパラメータは、土の応力～ひずみ関係のモデル化手法にもよるが、FLIPの場合には、前述のものに加え、体積弾性係数、せん断抵抗角、履歴減衰の上限値、それに液状化特性を規定するパラメータが必要である。これらのうち、液状化特性を規定するパラメータは、有効応力解析を実施する場合に限り必要となるパラメータである。

②モデル化の手順

土質調査結果を参考にして工学的基盤を設定する。このとき工学的基盤として選定する地層のS波速度は、地震動を設定した際に工学的基盤として選定した地層のS波速度と大きく異なってはならない。土質の変化に応じて地盤を層分割する。この場合、同じ土質でもS波速度やN値、 q_u 値が大幅に異なる部分では、それらを別な層とみなす。各層の土を砂質土、粘性土、及び礫のいずれかに分類する。実際の地盤は砂質土あるいは粘性土のみによって構成されていることは少なく、礫、砂、シルト、粘土がいろいろの割合で混じっている場合が多いが、ここでは細粒分（粒径 75μ 以下）の含有率が20%未満の土を砂質土とみなし、他は粘性土とみなすこととする。マウンドを構成する捨石、及び裏込めは礫とみなすこととする。

各層の土の密度は、乱さない試料のサンプリングが行われ、その試料の密度が測定されている場合には、その値を用いる。ただし、密度が測定されていない場合には便宜的に、表-1.2.1に示す値を用いることができる。なお、表-1.2.1の標準値は地震応答計算のための標準値を示したものであり、密度が支配要因となる他の解析に転用できるものではないという点に注意が必要である。

表-1.2.1 土の密度の標準的な値⁴⁰⁾

土質等の種類	条件	密度 (g/cm^3)
粘性土	含水比60%以上	1.5
	含水比60%以下	1.7
砂質土	地下水位以上	1.8
	地下水位以下	2.0
捨石裏込め		2.0

応答計算に用いられる土の微小ひずみ時（せん断ひずみ 10^{-6} 程度）のせん断弾性係数は、PS検層などより求まるS波速度を用いて次式により算定できる。

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (1.2.3)$$

ここで

G_0 : 微小ひずみ時のせん断弾性係数

ρ : 密度

V_s : S波速度

砂質土地盤でPS検層によりS波速度が得られていない場合には、以下の式によりN値からせん断弾性係数が推定される。

$$G_0 = 14100 N^{0.68} \quad (\text{kN/m}^2) \quad (1.2.4)$$

ただし、この関係式は多数の実測データから求められた平均的な値を示しており、実際にはかなりのばらつきがあることに注意する必要がある⁴¹⁾。なお、詳細については、【作】第3章2.4.1 (6) せん断弾性係数及び減衰定数の簡易推定を参照することができる。

粘性土の一軸圧縮強さ (q_u 値) が得られている場合には次式によりせん断弾性係数を推定することができる²⁶⁾。

$$G_0 = 170 q_u \quad (1.2.5)$$

なお、N値を用いてS波速度を推定する際に、壁体直下の地盤のように施工前の地盤のN値しか入手できない場合には、壁体やマウンドによる有効上載圧力の増加による影響を考慮して、施工後のN値を推定する。推定にあたっては次式を利用することができる。

$$N = \frac{(0.0041\sigma_v' + 0.7355)N_0 + 0.019(\sigma_v' - \sigma_{v0}')}{0.0041\sigma_{v0}' + 0.7355} \quad (1.2.6)$$

ここで

N : 施工後のN値

N_0 : 施工前のN値

σ_v' : 施工後の有効上載圧力 (kN/m^2)

σ_{v0}' : 施工前の有効上載圧力 (kN/m^2)

施工の前後で地盤条件が変化する場合で、施工前にのみPS検層が実施されている時は、施工後のS波速度は、有効上載圧力の変化の影響を考慮して、施工前に測定されたS波速度を用い、次式により推定することができる。

$$V_s = V_{s0} \left(\frac{\sigma_v'}{\sigma_{v0}'} \right)^B \quad (1.2.7)$$

ここで

V_s : 施工後のS波速度

V_{s0} : 施工前のS波速度

σ_v' : 施工後の有効上載圧力 (kN/m^2)

σ_{v0}' : 施工前の有効上載圧力 (kN/m^2)

B は砂質土並びに塑性指数 $I_p = 30$ 以下の粘性土の場合は0.25、塑性指数 $I_p = 30$ 以上の粘性土の場合は0.5である。

マウンドの捨石や裏込めのS波速度の測定は困難であり実測例も数少ないが、水深-10m程度の大型岸壁における捨石及び裏込めのS波速度としては、混成堤における地震測定結果による算定式⁴²⁾から得られた次の値を用いることができる。

マウンド捨石のS波速度 : $V_s=300\text{m/s}$

裏込めのS波速度 : $V_s=225\text{m/s}$

また、基準平均有効拘束圧 98kN/m^2 に対する値として、マウンド捨石及び裏込めのS波速度を共に 300m/s とした事例もある⁴³⁾。

ケーソンも地盤の一種とみなして解析する場合には、ケーソンのS波速度として以下の値を用いることができる。

ケーソンのS波速度 : $V_s=2000\text{m/s}$

土の微小ひずみ時のせん断弾性係数は有効拘束圧のべき乗に比例することが知られている。せん断弾性係数とS波速度は式(1.2.3)の関係があるので、S波速度は有効拘束圧のべき乗に比例すると読みかえてもよい。この関係は既往の要素試験^{26) 44)}から、次のように与えられている。

(a) 塑性指数 $I_p=30$ 以上の粘性土のせん断弾性係数は有効拘束圧の1乗に比例する。

(b) 砂質土並びに塑性指数 $I_p=30$ 以下の粘性土のせん断弾性係数は有効拘束圧の0.5乗に比例する。

一方、図-1.2.8は、24cm層厚の豊浦標準砂からなる地盤に10Gから50Gまでの異なる遠心力を与え、人為的に有効拘束圧を変化させる遠心力模型振動実験を実施し、平均的S波速度を砂地盤中間点の拘束圧に対してプロットした結果⁴⁵⁾である。図中の実線は $V_s=K(\sigma'_c)^a$ として回帰した曲線である。砂地盤のS波速度の平均値は遠心加速度が大きくなるとともに速くなり、拘束圧依存性が顕著に現れている。図-1.2.9は、同じ試料に対して深さ方向のS波速度の分布を同定したものである。図中の破線は、S波速度が拘束圧の0.25乗に比例するとした場合の曲線であり、この曲線は砂地盤の中間層のS波速度を基準にして求められている。S波速度は2ケースとも深くなるにつれて速くなっており、深さに対する傾きは0.25乗に近いと言える。

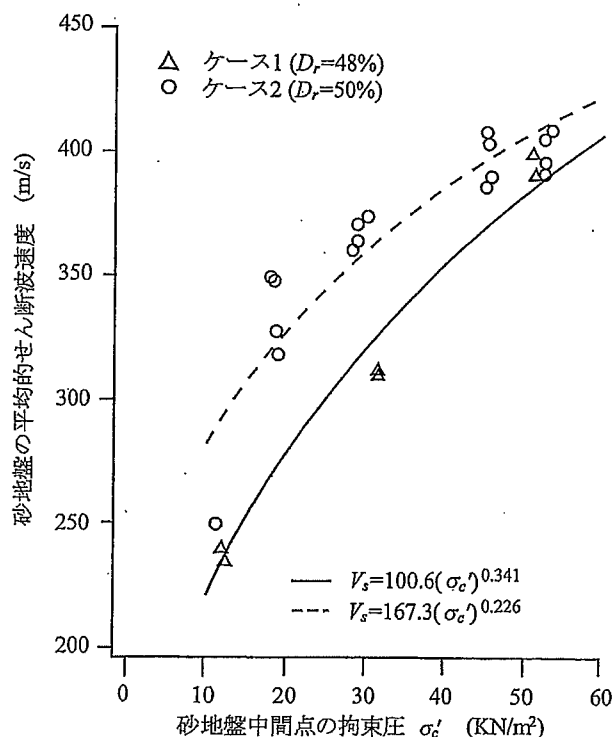
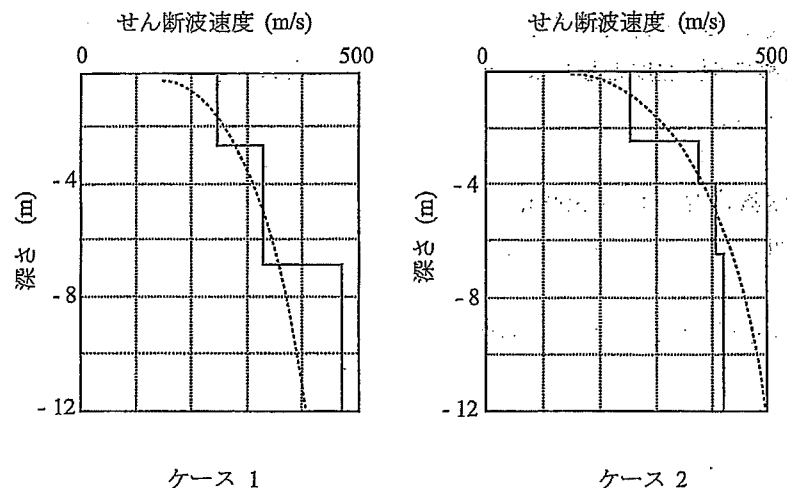


図-1.2.8 砂地盤の平均的S波速度と有効拘束圧の関係⁴⁵⁾

図-1.2.9 砂地盤のS波速度の分布⁴⁵⁾

③せん断弾性係数と減衰定数のひずみ依存性

一般にせん断ひずみが小さいときはせん断弾性係数は大きく減衰定数は小さいが、ひずみの増大に伴い前者は減少し後者は増大する（〔作〕第3章2.4.1 動的変形定数 図-2.4.2）。せん断弾性係数と減数定数のひずみ依存特性は、個々の土層の拘束圧や土質などにより異なる。したがって可能な限り土質試験によるせん断ひずみレベルに応じたせん断弾性係数と減衰定数の値を用いるのがよい。

④非線形解析に必要なパラメータ

非線形解析に必要なパラメータは〔参（施）〕第1章2 地震応答解析に関する基本事項に基づいて設定することができる。

1.2.4 レベル1地震動の補正

国土技術政策総合研究所のホームページ (<http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html>) で公開されているレベル1地震動の算定に用いられたサイト増幅特性と対象施設設置地点でのサイト増幅特性が同等でないと判断される場合は、地震観測（本章1.2.2 サイト増幅特性の評価（1）参照）または常時微動観測（本章1.2.2 サイト増幅特性の評価（2）参照）に基づいて評価された対象施設設置地点でのサイト増幅特性を用い、公開されているレベル1地震動を補正してから用いる必要がある。ここではその方法について述べる。

まず、補正前の工学的基盤におけるレベル1地震動①を入手し、加速度フーリエスペクトル②に変換する。次に、同じ地点のサイト増幅特性（地震基盤～工学的基盤）③を入手し、②を③で除すことにより、地震基盤におけるレベル1地震動の加速度フーリエスペクトル④を求める。①と③はいずれも国土技術政策総合研究所のホームページから入手できる。

次に、地震基盤におけるレベル1地震動の加速度フーリエスペクトル④に、新たに評価した対象施設設置地点のサイト増幅特性（地震基盤～工学的基盤）を乗じ、対象施設設置地点の工学的基盤におけるレベル1地震動の加速度フーリエスペクトルを求める。

レベル1地震動の位相特性を決めるための地震波データは、対象施設設置地点の特性を考慮するため、対象施設設置地点のサイト増幅特性を地震観測結果に基づいて評価したときは、対象施設設置地点における中小地震観測記録から選定して使用する。複数のデータが利用可能な場合は、群遅延時間が平均的となるようなデータを選択する。選定した地震波を地震観測点での土質データにより工学的基盤の2E波に変換し、その位相特性を用いる。対象施設設置地点のサイト増幅特性を常時微動観測結果に基づいて評価したときは、もとのレベル1地震動の位相特性をそのまま用いても良い。

対象施設設置地点の工学的基盤におけるレベル1地震動の加速度フーリエスペクトルと上記の位相特性を組み合わせ、フーリエ逆変換し、工学的基盤におけるレベル1地震動の加速度波形を求める。

1.3 施設の性能照査に用いるレベル2地震動

1.3.1 概要

レベル2地震動は、当該地点で生じうると推定される最大級の強さを持つ地震動であり、一般に、震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性（地震基盤～工学的基盤）を考慮した強震波形計算により設定する。レベル2地震動は、ISO 23469³¹⁾における「安全性」を照査するための地震動と位置づけられるが、そこでいうところの「安全性」とは、地震後の緊急対応に必要な施設の機能が維持されることも含む概念であり、[共]第1章4.4要求性能における「安全性」（使用性、修復性に対する安全性）よりもやや広い概念であると理解することができる。設定される地震動は工学的基盤の上面に下方から入射する地震波の2倍の振幅をもつ波（2E波）²³⁾である。レベル2地震動の算定は次の各手順からなる（図－1.3.1）。

①レベル2対象地震の選定（本章1.3.2）

②震源パラメータの設定（本章1.3.3）

③サイト増幅特性の評価（本章1.3.4）

④強震波形計算（本章1.3.5）

対象施設設置地点でのサイト増幅特性は地震観測に基づいて評価することが望ましい（本章1.2.2 サイト増幅特性の評価（1）参照）。また、対象施設設置地点でのサイト増幅特性を常時微動観測に基づいて評価することも可能である（本章1.2.2 サイト増幅特性の評価（2）参照）が、その場合、常時微動H/Vスペクトルからのサイト増幅特性の推定は不確実性を伴うことに注意する必要がある。

工期が差し迫っているなどの理由で地震観測や常時微動観測ができない場合には、周辺の観測点におけるサイト増幅特性から、経験的な関係（本章1.2.2 サイト増幅特性の評価（3）参照）を利用して、対象施設設置地点でのサイト増幅特性を推定してもよい。ただし、その場合の地震動の評価精度は地震観測や常時微動観測に基づく場合と比較して大きく低下することに注意する必要がある。

なお、以下に述べる方法による地震動の評価結果と、類似の震源を想定した他機関による地震動の評価結果とは一致しない場合もあるが、これは主にサイト特性の評価手法の違いに起因するものである。港湾施設の耐震性能評価のための地震動は、以下に述べる方法で算定したものを採用して良い。

各施設の具体的な性能照査の手順など、詳細については、施設編の各施設の性能照査の記述を参照することができる。

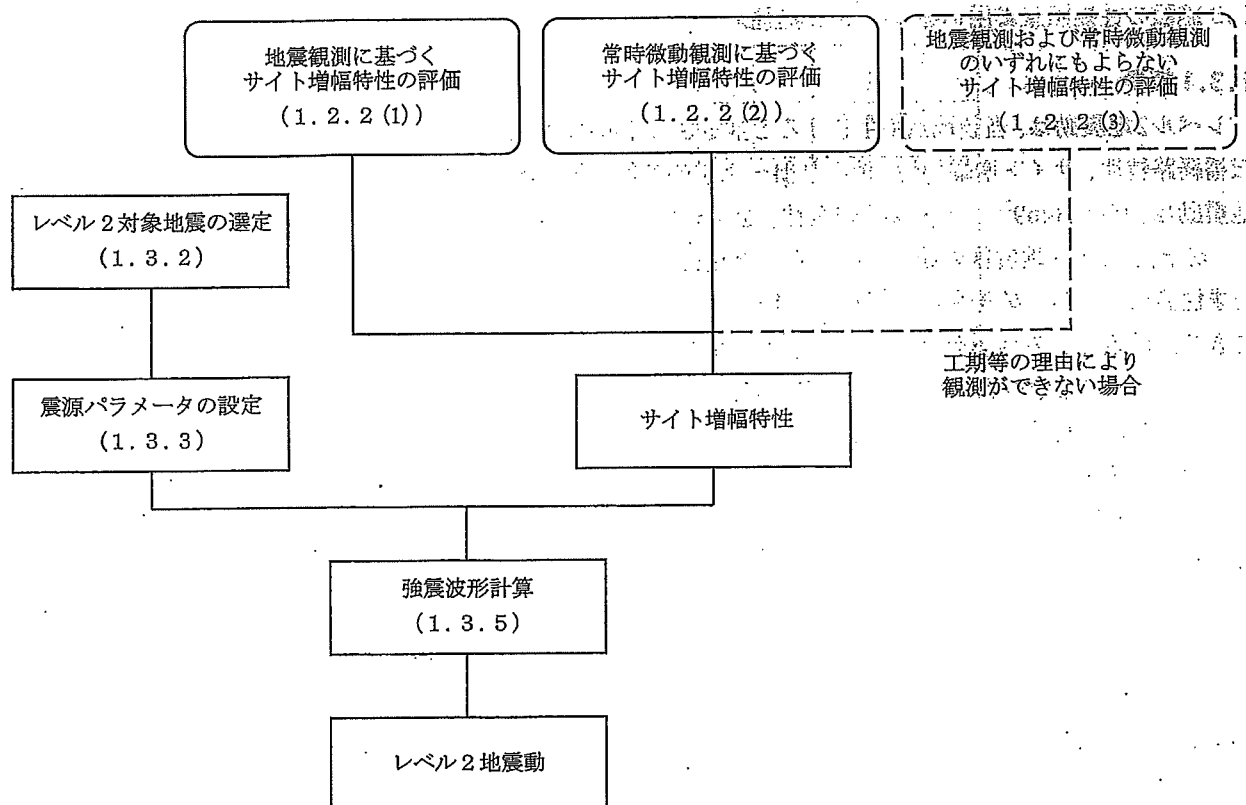


図-1.3.1 レベル2地震動の算定手順

1.3.2 レベル2対象地震の選定

レベル2対象地震は、過去の地震に関する情報や活断層に関する情報を総合的に考慮して選定する必要がある。特に、活断層については、施設の性能を照査する時点での最新の調査結果を踏まえる。過去の地震に関する網羅的な資料としては文献46)及び47)がある。過去の主要な地震の断層パラメータをとりまとめた資料としては文献48)がある。活断層に関する網羅的な資料としては文献49)及び50)がある。これらに加え、1995年兵庫県南部地震以降、活断層に関する積極的な調査が行われており、その成果は地震調査研究推進本部や自治体から公表されている。以上の資料を参照した上で

- (a) 過去に大きな被害をもたらした地震の再来
- (b) 活断層の活動による地震
- (c) 地震学的あるいは地質学的観点から発生が懸念されるその他の地震
- (d) 中央防災会議や地震調査研究推進本部など国の機関の想定地震
- (e) 地域防災計画の想定地震
- (f) M6.5の直下地震¹⁾

を考慮する((a)～(f)の中には重複するものもあり得る)。その中で、対象港湾に最大級の強さの地震動をもたらす地震をレベル2対象地震として選定する。(a)～(f)の想定地震のうち、いずれの地震が港湾に最大級の強さの地震動をもたらすかについては、判断が難しい場合もある。例えば、近くで生じる比較的小さい地震と遠くで生じる比較的大きい地震とで、いずれが港湾により強い地震動をもたらすか判断することは、必ずしも容易でない。また、地震動には振幅、周波数特性、継続時間など様々な側面があり、どの地震が施設に最も大きな影響を及ぼすかは、まず地震動を評価し、次に地震応答計算を行って初めてわかるという場合もある。このようなことから、この段階では無理にレベル2対象地震を一つに絞る必要はなく、候補となる地震を複数選定しておけばよい。その場合、地震応答計算の結果を踏まえ、当該施設に最も影響の大きい地震による地震動が最終的なレベル2地震動となる。対象とすべき地震の数が多い場合、あらかじめ距離減衰式により地震動の簡易評価を行い、明らかに影響の小さい地震を棄却することも一つの方法である。

なお、(d) の想定地震については以下のホームページが参考になる。

中央防災会議：<http://www.bousai.go.jp/jishin/index.html>

地震調査研究推進本部：http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02.htm

M6.5の直下地震を考慮する理由は次のとおりである¹⁾。過去の大地震の際に地表に出現した地震断層（地表地震断層という）の痕跡を活断層というが、比較的小規模な地震では地表地震断層は出現しないので、活断層が見つからない場所でも比較的小規模な地震は発生する可能性がある。武村⁵¹⁾は1885年から1995年までに我が国の内陸で発生した $M \geq 5.8$ の地殻内地震について、地震の規模と地表地震断層の出現率の関係、及び地震の規模と被害程度⁵²⁾の関係を調べている（図-1.3.2）。それによると、 $M \leq 6.5$ の地震では地表地震断層の出現率は極めて低いが、 $M \geq 6.8$ の地震では出現率は100%近い値を示す。また、 $M=6.6$ と6.7の地震が非常に少ないことにも注目し、これは、震源断層が地表につきぬけるためではないかと推測している。このことから、活断層のない場所で想定する直下地震の規模はM6.5程度とすることが適当であるとされている。

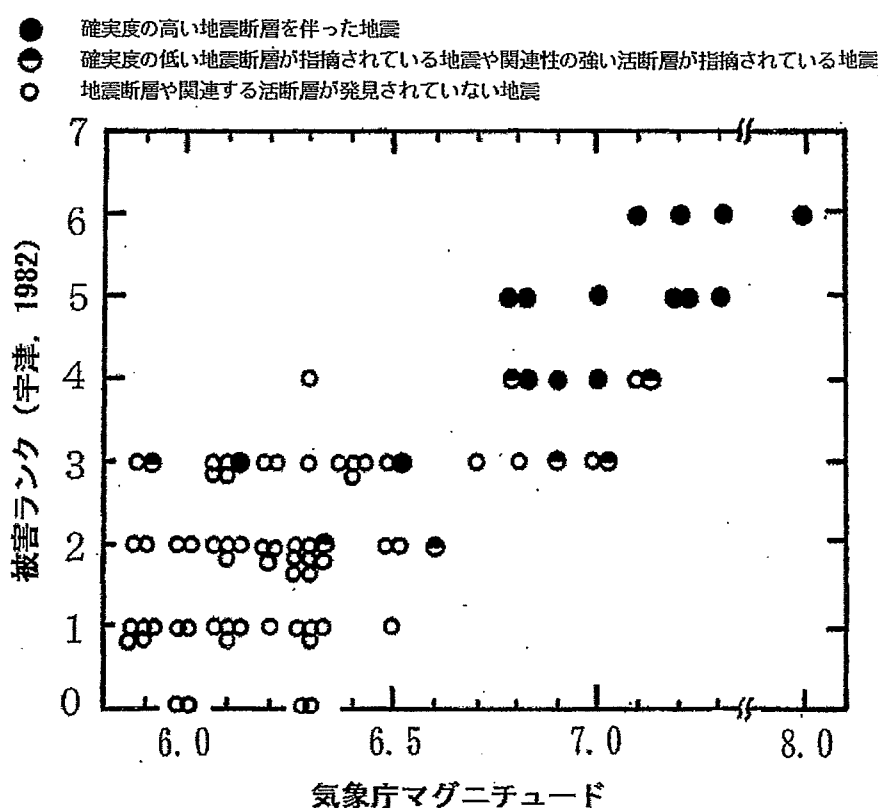
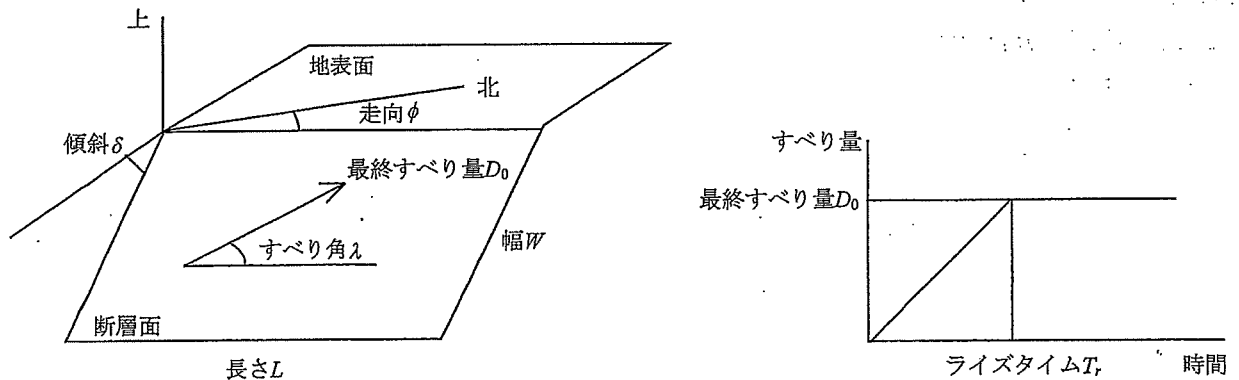


図-1.3.2 地震規模と地表地震断層出現率の関係⁵¹⁾

なお、設計津波を設定し、設計津波とそれに先行する地震動に対して性能を規定する場合、設計津波と組み合わせる地震動は、必ずしも、当該港湾で想定される最も強い地震動（レベル2地震動）ではない場合がある。例えば、ある港湾で、内陸活断層地震と海溝型地震の両者が想定され、内陸活断層地震の方がより強い揺れをもたらすと想定されるものとする。このとき、内陸活断層地震は津波を伴わないので、内陸活断層地震による地震動の直後に津波が到来するといった状況を想定することは不合理であり、過大な投資につながる。そこで、レベル2地震動とは別に、設計津波に先行する地震動を評価する必要がある場合がある。その場合の地震動の評価方法は、対象地震がレベル2対象地震から設計津波の原因となる地震に変更されるだけであり、以下に述べる評価方法はそのまま適用することができる。

1.3.3 震源パラメータの設定

レベル2地震動の評価に必要な震源パラメータには巨視的震源パラメータ(基準点位置、走向、傾斜、長さ、幅、面積、地震モーメント)、微視的震源パラメータ(アスペリティ等の数、面積、地震モーメント、ライズタイムなど)及びその他のパラメータ(破壊開始点、破壊伝播速度、破壊伝播様式)がある。それらのパラメータの意味するところを図-1.3.3に示す。震源パラメータは、以下に示す標準的な設定方法にしたがって設定するか、もしくは別途詳細な調査を行って設定する。



(a) 断層パラメータの説明(その1)

(b) 断層パラメータの説明(その2)

図-1.3.3 震源パラメータの意味

(1) 過去に大きな被害をもたらした地震の再来を想定する場合

海溝型地震などで、過去に大きな被害をもたらした地震の再来を想定する場合には、過去に発生した地震(過去のイベントという)に関する資料を可能な限り活用することが望ましい。

巨視的震源パラメータについては、過去のイベントのパラメータが明らかにされている場合には、それらのパラメータを用いることができる。過去の多くの地震の巨視的震源パラメータについて文献(48)に記載がある。地震モーメント M_0 と断層面積 S のうち、一方のみが与えられ他方を推定しようとする場合には、次式^{53) 54)}により推定することができる(式(1.3.1)と Esheryby⁵⁵⁾による円形クラックの式を組み合わせると断層面全体の平均的な応力降下量は3MPaとなる)。

$$S(\text{km}^2) = 1.88 \times 10^{-15} \times M_0^{2/3} (\text{dyne} \cdot \text{cm}) \quad (1.3.1)$$

微視的震源パラメータ(アスペリティ等の位置など)については、過去のイベント(地震)に関するデータの多寡に応じて異なる対応が必要となる。まず、波形データ等に基づいて過去のイベントの微視的震源パラメータがよく調べられている場合には、それらのパラメータを用いることができる。例えば1968年十勝沖地震³⁸⁾の再来や1978年宮城県沖地震³⁸⁾の再来を考える場合がこれに相当する。次に、過去のイベントの波形データは残されていない場合、歴史資料から各地の震度がわかっていれば、その震度情報と整合するように設定された微視的震源パラメータを用いることができる。

その他のパラメータ(破壊開始点など)についても微視的震源パラメータと同様に求めることができる。

活断層で発生する地震の場合、活動間隔が長いために、過去のイベントを参考にできないことがほとんどである。しかし、例外として1995年兵庫県南部地震の再来を想定する場合などでは、(2)活断層で発生する地震を想定する場合によらず上記の考え方によることができる。

なお、海溝型地震を対象とする場合には、波形データまたは震度情報に適合させる震源モデルとしてSPGAモデルを用いることができる。SPGAモデルの一例として、2011年東北地方太平洋沖地震の波形データに適合するように設定されたSPGAモデル^{12) 13) 56) 57)}を図-1.3.4に示す。

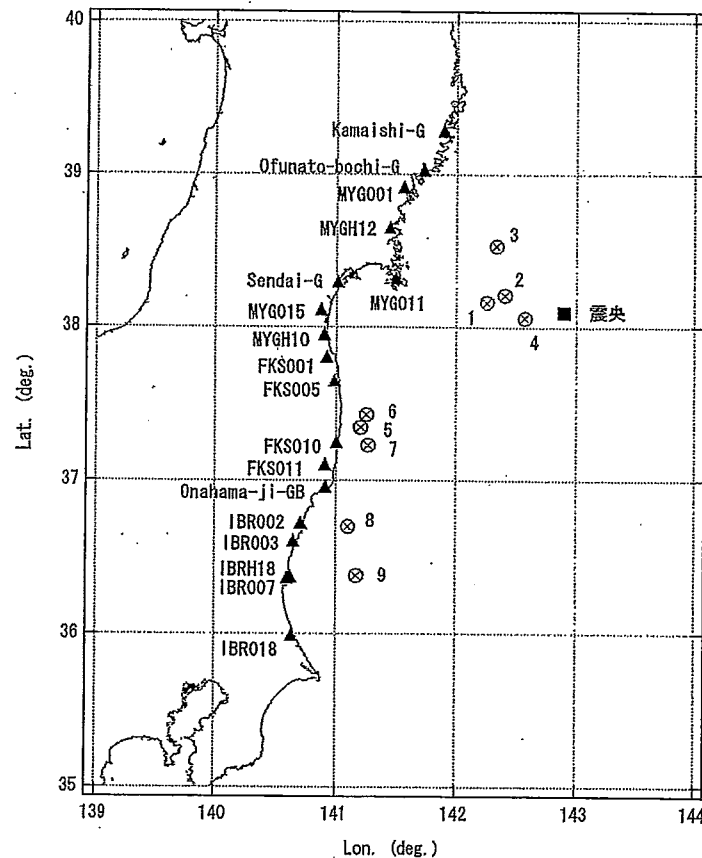


図-1.3.4 2011年東北地方太平洋沖地震を対象とするSPGAモデル^{12) 13) 56) 57)}

(2) 活断層で発生する地震を想定する場合

活断層で発生する地震の巨視的震源パラメータは次の考え方で定めることができる。まず、地質・地形・地理学的調査の結果に基づき、断層の走向 ϕ と傾斜角 δ を設定する。また、断層またはその区間の長さを L とする。傾斜角 δ が不明の場合、横ずれ断層であれば 90° 、高角逆断層であれば 60° 、低角逆断層であれば 30° 、高角とも低角とも記載のない逆断層であれば 45° とすることができる。活断層で発生する地震の断層幅 W は上部地殻の地震発生層の厚さ H によって制限されることから、 $L < H/\sin \delta$ の場合には $W=L$ 、 $L > H/\sin \delta$ の場合には、 $W=H/\sin \delta$ とすることができる^{54) 58)}。地震発生層の厚さ H が不明の場合20kmとすることができる。長さ L と幅 W から断層面積 S が求まる。地震モーメント M_0 は断層面積 S から次の経験的関係式⁵⁹⁾により求めることができる。

$$S(\text{km}^2) = 2.23 \times 10^{-15} \times M_0^{2/3} (\text{dyne} \cdot \text{cm}) \quad (1.3.2)$$

活断層で発生する地震の微視的震源パラメータは次の考え方で定めることができる。複数の断層または区間の運動を考える場合は各々の断層または区間に以下の考え方を適用する。まず、アスペリティ総面積の全断層面積に占める割合は22%とする^{54) 58) 59) 60) 61)}。アスペリティの個数は1個または2個とする⁵⁴⁾。対象地震の規模がM7以上の場合、アスペリティの個数は2個とする。アスペリティが2個の場合、アスペリティ面積の全断層面積に占める割合は大きい方が16%、小さい方が6%とする^{54) 60)}。アスペリティはなるべく正方形に近い形状をとるものとする^{54) 59)}。アスペリティにおける地震モーメントの全地震モーメントに占める割合は44%とする^{54) 59) 60)}。アスペリティが2個の場合、アスペリティにおける地震モーメントの全地震モーメントに占める割合は大きい方が36%、小さい方が8%とする^{54) 60)}。アスペリティのライズタイム τ はアスペリティの幅 W_a と破壊伝播速度 V_r から次式⁵⁴⁾により定める。

$$\tau = (W_a/V_r)/4$$

(1.3.3)

アスペリティの配置は、後述の破壊開始点との関係で、アスペリティ（のうちの一つ）の破壊が対象港湾に向かって進展するような配置とする。これは、指向性の影響により、アスペリティの破壊が進展する方向に向かって特に強い地震波が出ること、また、このようにして生成された強い地震波が1995年兵庫県南部地震の大被害に結びついたこと⁴⁾を考慮したものである。具体的には図-1.3.5に示す配置とする。アスペリティの中心点深さは10kmとする。アスペリティが2個の場合、断層の片側にアスペリティが集中するような配置は避ける。

その他のパラメータのうち破壊開始点は、アスペリティ位置との関連で、図-1.3.5に示す位置とする。破壊伝播速度は震源付近のS波速度の80%⁵⁴⁾とする。破壊伝播様式は同心円状とする。

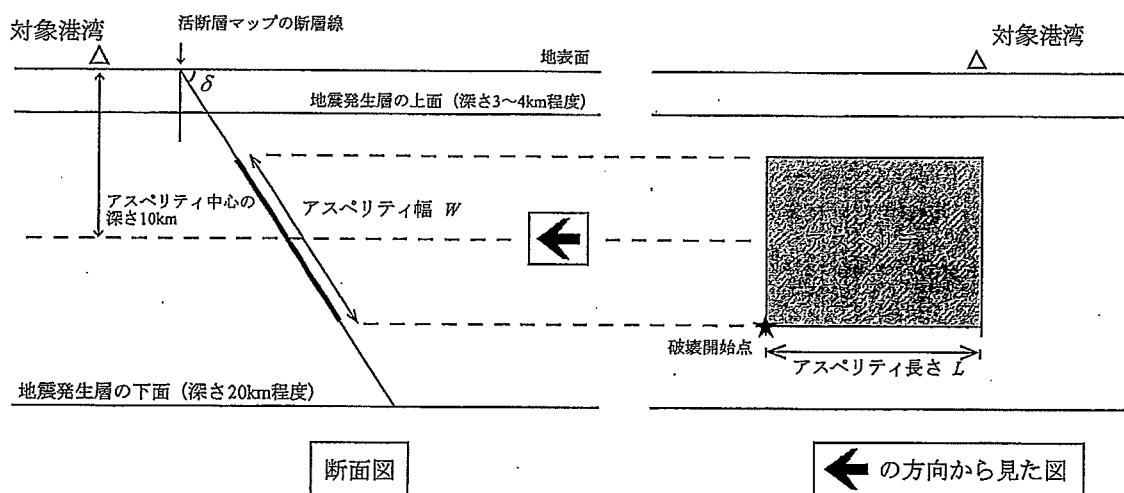


図-1.3.5 アスペリティと破壊開始点の配置

(3) 歴史地震を越える規模の海溝型巨大地震を想定する場合

2011年東北地方太平洋沖地震の発生をきっかけとして、他の地域においても、歴史地震を越える規模の海溝型巨大地震を想定した強震動評価が行われるようになってきた。その場合の震源モデルとしては、東北地方太平洋沖地震など既往の巨大地震への高い適用性が確認されているSPGAモデル^{12) 13) 56) 57)}を用いることができる。その微視的震源パラメータは、東北地方太平洋沖地震と同程度の規模の巨大地震を想定する場合には、東北地方太平洋沖地震のSPGAモデル(図-1.3.4)のパラメータを参照して設定することができる^{62) 63)}。また、これとは異なる規模の巨大地震を想定する場合の微視的震源パラメータを設定するための経験式も提案されている^{12) 13)}。歴史地震を越える規模の海溝型巨大地震を想定する場合には、歴史地震の震度分布からSPGAの位置を推定することができないため、SPGAの位置に不確実性があるという点に注意する必要がある。したがって、文献62) 63)で行われているように、極めて多数のSPGA配置を検討した上で、いずれかの配置を選択する。例えば、南海トラフの巨大地震(M_w 9.0)を想定する場合においては、それら多数の検討ケースの中で、内閣府⁶⁴⁾の想定する震度分布と全体的に整合するレベルの地震動を採用する方法も考えられる。SPGAモデルによる震度分布と内閣府による震度分布の比較を行っている事例として文献65)がある。

(4) M6.5の直下地震を想定する場合

地震モーメント M_0 は次式⁶⁶⁾によりマグニチュード M から算定することができる。

$$\log M_0 = 1.17M + 17.72 \text{ (dyne} \cdot \text{cm)}$$

(1.3.4)

よって、断層面積 S は式(1.3.2)より求めることができる。傾斜角 δ は 90° とすることができる。以下は(2)活断層で発生する地震を想定する場合と同様である。アスペリティの個数は1個とする。

1.3.4 サイト増幅特性の評価

サイト増幅特性については、レベル1地震動に準じて本章1.2.2 サイト増幅特性の評価によることができる。

1.3.5 強震波形計算

(1) 概要

震源特性・伝播経路特性・サイト特性を考慮した強震動評価手法として理論的手法と半経験的手法がある。このうち理論的手法は、震源から港湾に至る媒質を弾性体としてモデル化し、弾性波動論に基づいて港湾における地震動を評価する方法である。半経験的手法のうち経験的グリーン関数法は、発震機構(走向・傾斜・滑り角)や伝播経路を大地震と共有する中小地震の観測波形をグリーン関数とみなし、これを重ね合わせて大地震の波形を合成する方法である^{67) 68) 69)}。このとき用いるべき適切な中小地震記録が存在しない場合に、中小地震記録を人工的に作成してこれを重ね合わせる統計的グリーン関数法が提案されているが⁷⁰⁾、これも半経験的手法に分類される場合がある。その他、地震動の長周期成分を理論的手法で計算し、短周期成分を半経験的手法で計算して重ね合わせる広帯域ハイブリッド法がある⁷¹⁾。

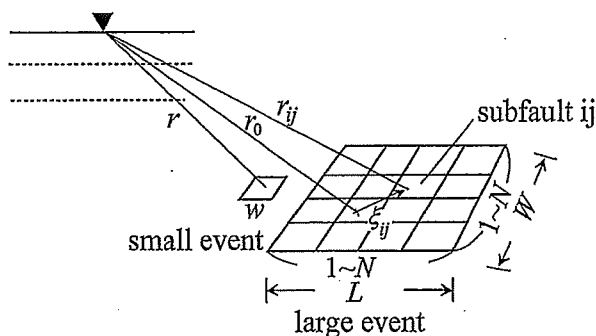
以上の各手法のうち、理論的手法は、地下構造の比較的良くわかっている地域に適用した場合、およそ1秒より長い周期帯域において、観測される地震動を高精度で再現できることがわかっている⁷²⁾。しかしながら、地下構造情報の積極的な収集が図られているとはいえ⁷³⁾、理論的手法を適用できるほど地下構造が十分にわかっている地域は、非常に限定されているのが実状である。一方、半経験的手法のうち経験的グリーン関数法は、中小地震の記録に含まれる地下構造の影響が直接予測結果に反映される。また、同じく半経験的手法に分類される統計的グリーン関数法においても、地震観測記録に基づいて評価したサイト増幅特性を予測結果に生かすための方法^{38) 74)}が提案されている(本編ではこの方法を修正経験的グリーン関数法とよぶ)。以上のことを踏まえると、強震記録の蓄積が比較的進んでいる港湾では、地震動評価に半経験的手法を用いることが望ましい。地下構造の比較的良くわかっている地域では、理論的手法や広帯域ハイブリッド法を用いることができるが、その場合、地下構造モデルの妥当性を、強震記録の再現性の観点から事前に検証すべきである。

強震波形計算の結果を類似の条件で得られた強震記録と比較することは有用である。例えば内陸活断層の震源近傍という条件で計算された波形を1995年兵庫県南部地震や2004年新潟県中越地震の震源近傍での記録と比較することは一つの目安を与える。ただし、一般に地震動は震源特性やサイト特性に大きく依存するものであるから、それらの条件によっては、算定された地震動の振幅が既往の強震記録と大きく異なることはあり得る。既往の強震記録と振幅の大きく異なる算定結果が得られた場合には、震源特性の違い(地震の規模の違い)あるいはサイト特性の違いからその差違を合理的に説明できないか検討し、合理的に説明できる場合にはその結果を採用する。合理的な説明が困難な場合には、入力ミスが無いかな等の検討を行う。このように、既往の強震記録との比較は、単純な誤りを防止するという観点から有用である。

なお、既往の強震記録との比較を行う場合に、最大加速度による比較は避けた方がよい。これは、一般に地震動の最大加速度は2Hz以上の高周波成分の影響を受けやすいが、2Hz以上の高周波成分は港湾施設に対してあまり影響を及ぼさないの、最大加速度の比較を行っても、港湾施設に対して影響の大きい周波数帯域で計算結果を検証したことにはならないためである。一般に最大加速度よりは最大速度の方が良い指標となる。なお、1995年兵庫県南部地震及び2004年新潟県中越地震の際、震源近傍の平野部(地表)で観測された地震動の最大速度は100~150 cm/s程度である。

(2) 修正経験的グリーン関数法^{38) 74)}

修正経験的グリーン関数法では、まず、小規模な地震による対象地点での地震動を評価する。このとき評価された地震動をグリーン関数という。そして、このグリーン関数を重ね合わせるにより、大地震による揺れを評価する。具体的な手順としては次のようになる。

図－1.3.6 グリーン関数の重ね合わせ (L はアスペリティ等の長さ、 W は幅)

まず、想定地震のアスペリティ等 (の一つ) に注目し (図－1.3.6の large event)、これを $N \times N$ に分割し、分割後の各々の小断層と同じ面積の小地震 (図－1.3.6の small event) を考える。小地震の震源特性 (式 (1.3.5))、伝播経路特性 (式 (1.3.6)) 及びサイト増幅特性の積として、地表における小地震波形 (グリーン関数) のフーリエ振幅を定める⁷⁵⁾。

$$S(f) = R_{\theta\phi} FS \cdot PRTITN \cdot \frac{M_{0e}}{4\pi\rho V_s^3} \frac{(2\pi f)^2}{1 + (f/f_c)^2} \quad (1.3.5)$$

$$P(f) = \frac{1}{r} \exp(-\pi f r / QV_s) \quad (1.3.6)$$

ここに、

$S(f)$: 震源特性

$P(f)$: 伝播経路特性

M_{0e} : 小地震の地震モーメント

f_c : 小地震のコーナー周波数

ρ : 地震基盤の密度

V_s : 地震基盤のS波速度

$R_{\theta\phi}$: ラディエーション係数

FS : 自由表面による増幅の効果 (=2)

$PRTITN$: 地震動エネルギーの水平2成分への分散を表す係数

r : 小地震の震源距離

Q : 伝播経路における媒質の Q 値

活断層で発生する地震を対象とする場合、 $\rho=2.7\text{g/cm}^3$ 、 $V_s=3.5\text{km/s}$ とすることができる。 $R_{\theta\phi}$ としては全方位への平均値0.63を用いることができる。活断層で発生する地震の震源近傍 (断層面からの距離が概ね10km以内) での地震動を推定する場合には、走向直交成分に対して $PRTITN=0.85$ 、走向平行成分に対して0.53とすることができる。これらの値は、活断層で発生する地震の震源近傍で、走向直交成分のフーリエ振幅が走向平行成分の約1.6倍⁸⁾となることを考慮して定めたものである。活断層で発生する地震による遠方での地震動を評価する場合、及び、それ以外の地震による地震動を評価する場合には、地震動のエネルギーが水平2成分に等しく分配されると仮定して $PRTITN=0.71$ とすることができる。いずれにしても $PRTITN$ は水平2成分の自乗和が1となるように設定する必要がある。表－1.3.1に $PRTITN$ の標準値を示す。

表-1.3.1 PRTITNの標準値

	震源近傍	震源近傍以外
海溝型地震	0.71	0.71
内陸活断層地震	0.85 (走向直交成分) 0.53 (走行平行成分)	0.71
M6.5の直下地震	0.71	0.71

小地震の地震モーメント M_{0e} はアスペリティ等の地震モーメントを N^3 で除すことにより求めることができる (N は分割数)。小地震のコーナー周波数 f_c は Brune⁷⁶⁾ の次式により求めることができる。

$$f_c = \frac{0.66V_s}{\sqrt{S_e}} \quad (1.3.7)$$

ここに、

S_e : 小地震の破壊領域の面積

式 (1.3.7) は Brune⁷⁶⁾ の論文中的式 (36) に相当する式である。式 (1.3.7) と Eshery⁵⁵⁾ による円形クラックの式を組み合わせると、コーナー周波数を地震モーメントと応力降下量の関数として表現する式⁷⁵⁾を導くことができる。式 (1.3.6) において伝播経路における媒質の Q 値は地域に応じて適切な値を用いる。地域毎に推定されている Q 値の例として、東日本の海溝型地震に対して推定⁷⁸⁾ されている $Q=114f^{0.92}$ 、西日本の海溝型地震に対して推定⁷⁸⁾ されている $Q=152f^{0.38}$ 、東日本の内陸部に対して推定⁷⁸⁾ されている $Q=166f^{0.76}$ 、関西地方に対して推定⁷⁹⁾ されている $Q=63.8f^{1.00}$ 、鹿児島県・熊本県に対して推定⁸⁰⁾ されている $Q=104f^{0.63}$ 等がある。

以上により定まる地表でのフーリエ振幅と、対象施設設置地点またはその周辺での中小地震記録のフーリエ位相を組み合わせ、フーリエ逆変換することで、地表におけるグリーン関数を求める^{38) 74)}。この手順を具体的に式で書くと次のようになる。

$$A(f) = S(f)P(f)G(f) \frac{O(f)}{|O(f)|_p} \quad (1.3.8)$$

ここに、

$A(f)$: 地表におけるグリーン関数のフーリエ変換 (複素数)

$S(f)$: 震源特性 (実数)

$P(f)$: 伝播経路特性 (実数)

$G(f)$: サイト増幅特性 (地震基盤～地表) (実数)

$O(f)$: 対象地点で得られた中小地震記録のフーリエ変換 (複素数)

$|O(f)|_p$: $O(f)$ の絶対値をとりバンド幅 0.05 Hz の Parzen ウィンドウを施したもの

なお、このとき用いる対象地点の中小地震記録は、対象サイトへの入射角ができるだけ対象地震と類似したものを用いることが望ましい。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。

以上の方法で地表におけるグリーン関数を評価する場合、あらかじめサイト増幅特性 $G(f)$ を評価しておく必要がある。サイト増幅特性を求めるにあたって主に二つの考え方がある。一つは観測された地震動から何らかの方法で S 波部分を抜き出し、その増幅特性を求める考え方である⁸¹⁾。もう一つは、S 波だけでなく表面波も解析対象として、波形後半まで含めたフーリエスペクトルの増幅特性を求める考え方である¹⁷⁾。いずれの立場をとるかは目的にもよるが、S 波のみならず表面波の寄与も考慮して強震動予測を行う場合には後者の立場をとる必要がある。特に、修正経験的グリーン関数法を用いることを前提に考えると、現地で取

得された中小地震記録の群遅延時間にはS波の寄与と表面波の寄与が渾然一体となっていることから、振幅についても両者の寄与を考慮することが必要となる。

アスペリティ等からの地震動は、地表におけるグリーン関数を次式⁸²⁾により重ね合わせることで算定できる(図-1.3.6)。この重ね合わせを行うことにより、破壊伝播方向で揺れの強い指向性の効果が考慮される。

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(r/r_{ij} \right) f(t) * u(t-t_{ij}) \quad (1.3.9)$$

$$f(t) = \delta(t) + \frac{1}{n' \left(1 - \frac{1}{e} \right)} \sum_{k=1}^{(N-1)n'} \left[e^{-(k-1)/(N-1)/n'} \delta \left\{ t - \frac{(k-1)\tau}{(N-1)n'} \right\} \right] \quad (1.3.10)$$

$$t_{ij} = \frac{r_{ij} - r_0}{V_s} + \frac{\xi_{ij}}{V_r} \quad (1.3.11)$$

ここに、

$U(t)$: アスペリティ等からの地震動

$u(t)$: 地表におけるグリーン関数

$f(t)$: 大地震と小地震の滑り速度時間関数の違いを補正するための関数

r : 小地震の震源距離

r_{ij} : ij 要素から対象地点までの距離

N : 分割数(図-1.3.6)

τ : ライズタイム

n' : 波形の重ね合わせの際に現れる見かけの周期性を除去するための整数

r_0 : アスペリティ等の破壊開始点から対象地点までの距離

ξ_{ij} : 破壊開始点から ij 要素までの距離

V_s : 地震基盤のS波速度

V_r : 破壊伝播速度

アスペリティ等が複数あるときには、各アスペリティ等について同様の作業を行い、各アスペリティ等からの寄与を加え合わせるにより、地表における(線形時の)レベル2地震動を算定する。最後に、表層地盤の地震応答計算により、工学的基盤におけるレベル2地震動(2E波)を算定する。背景領域(アスペリティ等以外の部分)からの寄与は一般的な港湾施設の性能照査が目的の場合には無視しても差し支えない。

上記の算定の過程で、地表における(線形時の)レベル2地震動が算定されるが、これは大地震時の表層地盤の非線形挙動の影響を含まないため、一般には過大評価となっていることに注意が必要である。本来の地表におけるレベル2地震動を算定するためには、いったん工学的基盤におけるレベル2地震動を求めた後で、表層地盤の非線形挙動を考慮した地震応答計算により、あらためて求めることが一般的である。

また、上記においては地表でのグリーン関数を用いる手順を説明したが、式(1.3.9)で工学的基盤におけるグリーン関数(2E波)を用いることにより、直接、工学的基盤におけるレベル2地震動(2E波)を算定することもできる。ただしその場合、式(1.3.8)において、サイト増幅特性として地震基盤～工学的基盤のものをを用いるだけでなく、中小地震記録も工学的基盤の2E波に変換したものをを用いる必要がある。

なお、ここで述べた強震波形計算手法により既往の大地震記録の再現を試みた事例が文献38)で紹介されている。また、ここで述べた強震波形計算手法による計算プログラムが文献38)の付録CD及び港湾空港技術研究所のホームページ(http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bst/taisin/sourcemodel/somodel_program.html)で公開されている。

(3) 経験的グリーン関数法

経験的グリーン関数法は、対象地震の震源断層のそばで発生した小地震の記録が対象地点で取得できてい

る場合に、これを重ね合わせるにより、大地震による対象地点の揺れを評価する方法である。このとき重ね合わせに用いられる小地震記録は経験的グリーン関数と呼ばれる。対象地点で取得された記録には伝播経路特性とサイト特性の影響が自然に含まれているため、それらに関する評価を行うこと無しに、大地震による揺れを精度良く評価できる点が大きな特徴であるが、対象地点で適切な小地震記録が取得できていない場合には適用できない。また、以下に述べるように、やや専門的配慮を必要とする事項もある。

波形の重ね合わせには、修正経験的グリーン関数法の式(1.3.9)～式(1.3.11)をほぼそのまま用いることができる。ただし式(1.3.9)については、小地震の特性を適切に反映できるよう、補正係数 C を含む次式に置き換える必要がある⁸²⁾。

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (r/r_{ij}) f(t) * (Cu(t-t_{ij})) \quad (1.3.12)$$

重ね合わせに関連するパラメータ N と C は次式を満足するように定める。

$$\begin{aligned} M_{0a}/M_{0e} &= CN^3 \\ S_a/S_e &= N^2 \end{aligned} \quad (1.3.13)$$

ここに、

M_{0a} : アスペリティ等の地震モーメント

M_{0e} : 小地震の地震モーメント

S_a : アスペリティ等の面積

S_e : 小地震の破壊領域の面積

以上からわかるように、経験的グリーン関数法の適用にあたっては、小地震のパラメータを適切に見積もる必要がある。小地震の地震モーメント M_{0e} についてはCMT解⁸³⁾(例えば防災科学技術研究所のF-netによるもの)を参考にすることができる。小地震の破壊領域の面積 S_e は、小地震のコーナー周波数 f_c から式(1.3.7)により求めることができる。小地震のコーナー周波数を求めるには、近傍で発生した規模の異なる地震とのスペクトル比をとる方法^{2) 84)}を用いることができる。

経験的グリーン関数法を適用する際の他の注意点としてラディエーション係数の設定の問題がある。震源からの地震波のラディエーション係数は理論上方位依存性があり^{83) 85)}、小地震の発震機構(走向・傾斜・滑り角)によっては、観測点がたまたまラディエーション係数の小さい方位に相当していることも考えられる。その場合、得られた記録をそのまま重ね合わせると、大地震による揺れを過小評価してしまう可能性がある。したがって、採用する小地震の発震機構には十分に注意を払う必要がある。

以上のように、経験的グリーン関数法による地震動の評価には専門的な判断を要する部分も少なくないため注意が必要である。

1.3.6 表層地盤の地震応答計算

表層地盤の地震応答計算については、本章1.2.3 表層地盤の地震応答計算の例によることができる。ただし、レベル2地震動の作用時には、表層地盤のひずみレベルが特に大きくなる傾向があるので、解析手法の選定には特に留意する必要がある。

1.4 施設の性能照査で考慮する地震動の空間的変動

(1) 概要

埋設パイプラインや沈埋トンネルなどのように比較的延長の大きい施設では、施設の各部分に異なる地震動が作用することが耐震設計上問題となる。

一般に地震動の空間的変動とは、地震動が水平方向に一樣でないことを指す場合が多い。空間的変動が生じる場合としては、そもそも地盤が水平方向に一樣でないために地震動が場所毎に異なる場合がまず考えられるが、それだけではなく、地盤が水平方向にほぼ一樣であっても、地震波が水平方向に見かけ上伝播するために、施設の各部分に地震動が位相差を伴って作用する場合もある。本項ではその両者の評価方法について述べている。

ただし、施設の各部分に異なる地震動が作用する原因は、いわゆる地震動の空間的変動だけではない。沈埋トンネルなどのように延長方向に深度が著しく変化する施設では、地盤の浅部と深部で地震動が異なることがむしろ問題となる場合もあり、その影響を適切に考慮することが必要である。

(2) 地盤の水平方向の不均質性が著しい場合

構造物の占める範囲内において、地盤の水平方向の不均質性が著しい場合には、それによって地震動の空間的変動がもたらされる場合がある。したがって、構造物の占める範囲内において、地盤の水平方向の不均質性を適切に評価し、不均質性が著しい場合には、その影響を考慮して地震動の空間的変動を評価することが望ましい。その際、工学的基盤面よりも下方における地盤の水平方向の不均質性の影響も考慮することが望ましい。

地盤の水平方向の不均質性が著しい場合に、地震動の空間的変動を評価するための具体的方法としては、複数地点に設置された地震計の記録をもとに、本章1.3.5 強震波形計算 (2) 及び (3) に述べた方法で複数地点の地震動を評価する方法が最も有効である。また、それ以外の方法として、地下構造が十分把握できている場合には、有限要素法・有限差分法などの適切な数値解析手法により評価することもできる。なお、本章1.3.5 強震波形計算 (2) で述べた方法を適用する場合、複数地点で評価された地震動の位相差の物理的意味が失われないよう、十分注意する必要がある。本章1.3.5 強震波形計算 (2) に述べた方法で評価された地震動の位相差の物理的意味が失われる場合としては、複数地点の地震基盤における統計的グリーン関数が個別に評価され、かつ、統計的グリーン関数の位相が乱数を用いて生成されている場合⁷⁵⁾や、式(1.3.8)で用いる中小地震記録の時間軸の原点が地点間でずれている場合(例えばトリガー時刻が地点間で異なる場合)などが考えられる。前者に対する対処方法として、あまり距離の離れていない2点では、地震基盤における統計的グリーン関数を同一としておくなどの方法が考えられる。

(3) 地盤の水平方向の不均質性が著しくない場合

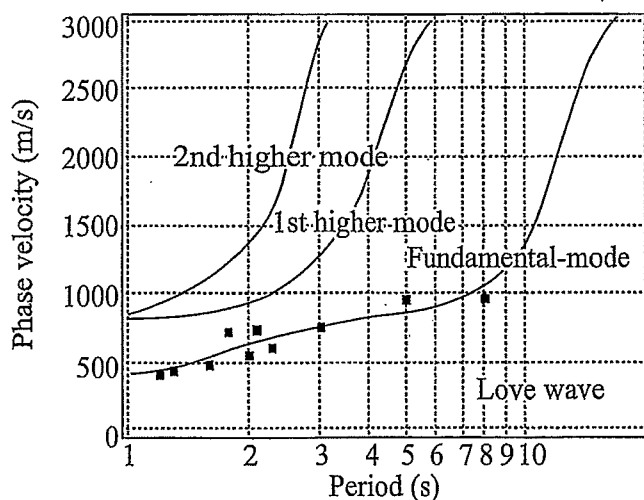
地盤の水平方向の不均質性が著しくない場合にも上記の考え方は適用できるが、以下に述べるようにより簡便な考え方³¹⁾も適用できる。

地盤の水平方向の不均質性が著しくない場合、水平方向の波動伝播効果が地震動の空間的変動の主たる要因となる。波動伝播効果により生じる地盤のひずみ $\varepsilon(\omega)$ は地動速度の振幅 $v(\omega)$ と見かけの伝播速度 $c(\omega)$ の関数である。ここに、 ω は角周波数である。

$$\varepsilon(\omega) = v(\omega)/c(\omega) \quad (1.4.1)$$

式(1.4.1)からわかるように $\varepsilon(\omega)$ は $c(\omega)$ の減少関数なので、 $c(\omega)$ が小さいほど、構造物にとっては不利となることがわかる。波動伝播効果をもたらす地震波には表面波とS波があるが、任意の ω に対して表面波の位相速度はS波の位相速度よりも小さい。また、表面波の中では、ラブ波基本モードもしくはレイリー波基本モードのいずれかの位相速度が最も小さい。したがって、 $c(\omega)$ としてラブ波基本モードもしくはレイリー波基本モードの位相速度を考慮することが、構造物にとっては最も不利となる。

表面波の位相速度は周波数に依存する。一例として、図-1.4.1に東京湾岸のある場所でのラブ波の位相速度と周波数との関係を示す。実線は表-1.4.1のS波速度構造モデルから計算される理論位相速度である(fundamental modeは基本モードを、higher modeは高次モードを意味する)。図-1.4.1の■はアレー観測結果から求めた位相速度である。この対象地点ではラブ波基本モードの位相速度は周期1秒で約400m/s、周期3秒で約750m/sであり、周波数に依存していることがわかる。

図－1.4.1 東京湾岸のある場所でのラブ波の位相速度と周波数との関係⁸⁶⁾表－1.4.1 S波速度構造モデル⁸⁶⁾

層厚 (m)	S波速度 (m/s)	密度 (t/m^3)
50	250	1.8
120	410	1.9
1580	800	1.9
1250	1200	2.1
3100	2600	2.6
—	3400	2.6

見かけの伝播速度 $c(\omega)$ は地域性が大きく、図－1.4.1に示したような数値は、任意の地点に適用可能なものではない。施設の性能照査に用いる $c(\omega)$ は地点特性を考慮して設定することを標準とする。

一般に本章1.2施設の性能照査に用いるレベル1地震動及び本章1.3施設の性能照査に用いるレベル2地震動の方法で評価された地震動は表面波やS波など様々な種類の地震波を含んでいる。従って、施設の性能照査に用いる $c(\omega)$ は、評価された地震動に含まれる地震波の種類を考慮して定めることが理想であるが、それは必ずしも容易ではない。そこで、施設にとって最も不利となる条件を考え、ラブ波基本モードとレイリー波基本モードの位相速度の小さい方を $c(\omega)$ として用いることが一つの方法である。この場合の位相速度は、常時微動または地震動の現地アレー観測結果（【参（作）】第1章3.8.4微動アレー探査参照）に基づいて評価することが望ましい。

ただし、実際の地震動には表面波基本モード以外の成分も多く含まれており、地盤のひずみに関してより実情に即した評価を行うためには、それらの影響も併せて考える必要があると考えられる。こうした観点から、シールドトンネルでの地震観測結果に基づき、より実情に即した $c(\omega)$ の設定方法に関する研究も行われており、ラブ波基本モードの2倍の位相速度をもつ波がトンネル軸に対して斜め45度から入射するとした場合にトンネルの軸ひずみを比較的良く再現したことが報告されている⁸⁷⁾。

見かけの伝播速度 $c(\omega)$ の周波数依存性については、これを考慮することは設計の合理化につながる。ただし、設計上の簡便さを考慮し、周波数によらない見かけの伝播速度を与える方法も利用されている。シールドトンネルでの地震観測結果を利用した上述の検討で得られた見かけの伝播速度は1km/sよりやや大きい程度であった⁸⁷⁾。

なお、 $c(\omega)$ の周波数依存性を考慮して地震動の空間変動を評価しようとする場合は次の方法によることができる。本章1.2施設の性能照査に用いるレベル1地震動及び本章1.3施設の性能照査に用いるレベル2地震動の方法に基づいて、水平成層地盤内の対象深度における基準点($x=0, y=0$)で評価された地震動の時刻

歴を $a_0(t)$ とする。また $c(\omega)$ を対象地点に応じた周波数依存の位相速度とする。このとき、同じ深度における任意の点 (x, y) の地震動の時刻歴 $a(t)$ は次のように定めることができる。

① $a_0(t)$ をフーリエ変換する。

② $a(t)$ のフーリエ変換を次式で計算する。

$$A(\omega) = A_0(\omega) \exp\{-i(k_x x + k_y y)\} \quad (1.4.2)$$

$$k_x = \{\omega/c(\omega)\} \cos \theta \quad (1.4.3)$$

$$k_y = \{\omega/c(\omega)\} \sin \theta \quad (1.4.4)$$

ここに、

$A_0(\omega)$: $a_0(t)$ のフーリエ変換

$A(\omega)$: $a(t)$ のフーリエ変換

θ : x 軸の正方向と地震波の進行方向とのなす角

③ $A(\omega)$ をフーリエ逆変換して $a(t)$ を得る。

【参考文献】

- 1) 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する提言「第三次提言」解説，2000。
- 2) Aki, K. : Scaling law of seismic spectrum, *J. Geophys. Res.*, Vol. 72, pp. 1217~1231, 1967.
- 3) Aki, K. : Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964. 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from G wave spectrum, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol. 44, pp. 23~88, 1966.
- 4) 入倉孝次郎：阪神大震災を引き起こした強震動，京都大学防災研究所年報 No. 39 A, pp. 229~245, 1996.
- 5) 瀧澤一：カリフォルニアの被害地震と兵庫県南部地震，*科学*, Vol. 66 No. 2, pp. 93~97, 1996.
- 6) 武村雅之，諸井孝文，八代和彦：明治以後の内陸浅発地震の被害からみた強震動の特徴，*地震* 2, Vol. 50, pp. 485~505, 1998.
- 7) Somerville, P.G., N.F. Smith, R.W. Graves and N.A. Abrahamson : Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity, *Seismological Research Letters* 68, pp. 199~222, 1997.
- 8) 野津厚，井合進，W.D. Iwan : 震源近傍の地震動の方向性に関する研究とその応用，*港湾技術研究所報告* Vol. 40 No. 1, pp. 107~167, 2001.
- 9) 野津厚，池田薫：直下型地震の揺れの向きを考慮した耐震強化岸壁の配置計画，*港湾*，第78巻 第9号，pp. 48~51, 2001.
- 10) 国土交通省港湾局，独立行政法人港湾空港技術研究所：港湾計画のための地震動の方向性ハンドブック，CD-ROM, 2003.
- 11) Lay, T., H. Kanamori, C.J. Ammon, K.D. Koper, A.R. Hutko, L. Ye, H. Yue and T.M. Rushing: Depth-varying rupture properties of subduction zone megathrust faults, *J. Geophys. Res.*, Vol. 117, B04311, 2012.
- 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*, Vol. 12, No. 4, pp. 209-228, 2012.
- 13) 野津厚，長尾毅：海溝型巨大地震による地震動の予測のための震源パラメーターの経験式—強震動パルスの生成に着目して—，*港湾空港技術研究所資料* No. 1257, 2012.
- 14) Kurahashi, S. and K. Irikura : Short-period source model of the 2011 Mw9.0 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 103, pp. 1373~1393, 2013.
- 15) Street, R., R. Herrmann and O. Nuttli : Spectral characteristics of the Lg wave generated by central United States earthquakes, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, Vol. 41, pp. 51~63, 1975.
- 16) 工藤一嘉：強震動予測を中心とした地震工学研究のあゆみ，*地震* 2, Vol. 46, pp. 151~159, 1993.
- 17) 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.
- 18) Kinoshita, S. : Kyoshin Net (K-net) , *Seim. Res. Lett.*, Vol. 69, pp. 309~332, 1998.
- 19) Aoi, S., K. Obara, S. Hori, K. Kasahara and S. Okada : New strong-motion observation network: KiK-net, *EOS. Trans.*

- Am. Geophys. Union, Vol. 329, 2000.
- 20) 武村雅之：関東大震災—大東京圏の揺れを知る，鹿島出版会，2003.
 - 21) 野津厚，菅野高弘：スペクトルインバージョンに基づく南西諸島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.1149，2007.
 - 22) 野津厚，菅野高弘：スペクトルインバージョンに基づく道北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.1214，2010.
 - 23) 土田肇，井合進：建設技術者のための耐震工学，山海堂，1991.
 - 24) 竹信正寛，野津厚，宮田正史，佐藤裕司，浅井茂樹：確率論的時刻歴波形として規定される港湾におけるレベル1地震動の設定に関する包括的整理，国土技術政策総合研究所資料，No.812，2014.
 - 25) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994.
 - 26) 善功企，山崎浩之・梅原靖文：地震応答解析のための土の動的特性に関する実験的研究，港湾技術研究所報告 Vol.26 No.1，pp.41～113，1987.
 - 27) 中村豊：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定，鉄道総研報告，Vol.2，No.4，pp.18-27，1988.
 - 28) 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.
 - 29) 長尾毅，森下倫明，野津厚：レベル1地震動の評価におけるサイト特性の影響に関する研究，海洋開発論文集 第22巻，2006.
 - 30) Yoshida, N. and S. Iai : Nonlinear site response and its evaluation and prediction, The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Irikura, Kudo, Okada & Sasatani (eds) , Balkema, 1998.
 - 31) International Organization for Standardization: ISO23469, Bases for design of structures - Seismic actions for designing geotechnical works, 2005.
 - 32) Shnabel, P.B., J. Lysmer and H.B. Seed : SHAKE, A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California at Berkeley, 1972.
 - 33) Lysmer, J., T. Udaka, C.F. Tsai and H.B. Seed : FLUSH, A computer program of approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems, Report No. EERC75-30, University of California at Berkeley, 1975.
 - 34) 吉田望：実用プログラム SHAKE の適用性，軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム発表論文集，土質工学会軟弱地盤における地震動増幅と被害に関する研究委員会，pp.14～31，1994.
 - 35) 杉戸真太，合田尚義，増田民夫：周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察，土木学会論文集 493/III-27，pp.49～58，1994.
 - 36) 吉田望，末富岩雄：DYNEQ：等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム，佐藤工業（株）技術研究所報，pp.61～70，1996.
 - 37) Iai, S., Y. Matsunaga and T. Kameoka : Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, pp.1～15, 1992.
 - 38) 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—因果性と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.
 - 39) Iai, S., T. Morita, T. Kameoka, Y. Matsunaga and K. Abiko: Response of a dense sand deposit during 1993 Kushiro Oki earthquake, Soils and Foundations, Vol.35, pp.115～132, 1995.
 - 40) 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），1997.
 - 41) Imai, T. and K. Tonouchi : Correlation of N value with S wave velocity and shear modulus, Proc. 2nd ESOPT, 1982.
 - 42) 上部達生，土田肇，倉田栄一：大型混成式防波堤の強震記録に基づく水-構造物連成系の地震応答解析，港湾技術研究所報告 Vol.22 No.2，pp.289～326，1983.
 - 43) 一井康二，井合進，森田年一：有効応力解析によるケーソン式岸壁の被災原因分析，土木学会，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.397～404，1996.
 - 44) 国生剛治，桜井彰雄，江刺靖行：三軸試験装置を用いた微小ひずみから大ひずみまでの土質動的試験法の開発と砂の物性試験への適用，第14回土質工学研究発表会発表講演集，pp.513～516，1979.
 - 45) 薄井治利，風間基樹，稲富隆昌：初期せん断剛性の拘束圧依存性が等価線形地震応答解析結果に及ぼす影響について，土質工学会，地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム発表論文集，pp.219～224，1989.
 - 46) 国立天文台編：理科年表（平成30年），2017.
 - 47) 宇佐美龍夫：最新版日本被害地震総覧[416]-2001，東京大学出版会，2003.
 - 48) 佐藤良輔編：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック，鹿島出版会，1989.
 - 49) 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，1991.
 - 50) 中田高，今泉俊文編：活断層詳細デジタルマップ，東京大学出版会，2002.
 - 51) 武村雅之：日本列島における地殻内地震のスケーリング則-地震断層の影響および地震被害との関連，地震2，Vol.51，pp.211～228，1998.
 - 52) 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，地震研究所彙報 Vol.57，pp.401～463，1982.
 - 53) 金森博雄編：地震の物理，岩波書店，1991.
 - 54) 片岡正次郎，日下部毅明，村越潤，田村敬一：想定地震に基づくレベル2地震動の設定手法に関する研究，国土技術政

- 策総合研究所研究報告 No.15, 2003.
- 55) Eshery, J.D. : The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems, Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A 241, pp.376~396, 1957.
 - 56) 野津厚 : 東北地方太平洋沖地震を対象とするスーパースペリシティモデルの提案, 日本地震工学会論文集 Vol.12, No.2, pp.21~40, 2012.
 - 57) 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, pp.23~53, 2012.
 - 58) 入倉孝次郎 : 強震動予測レシピー大地震による強震動の予測手法一, 京都大学防災研究所年報 No.47 A, 2004.
 - 59) Somerville, P.G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith and A. Kowada : Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seismological Research Letters, Vol.70, pp.59~80, 1999.
 - 60) 入倉孝次郎, 三宅弘恵 : シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌 Vol.110, No.6, pp.849~875, 2001.
 - 61) 入倉孝次郎, 三宅弘恵 : 予測のための震源のモデル化, 月刊地球号外 No.37, pp.213~223, 2002.
 - 62) 野津厚 : 南海トラフの地震 (M_w 9.0) を対象としたSPGAモデルによる強震動評価事例, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学) Vol.69, No.4, pp.I_872-I_888, 2013.
 - 63) 野津厚, 若井淳 : 南海トラフの地震 (M_w 9.0) 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.
 - 64) 内閣府南海トラフの巨大地震モデル検討会 : 南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について (第一次報告), <http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/>, 2012.
 - 65) 野津厚, 若井淳, 長坂陽介 : 表層地盤の非線形挙動を考慮した2011年東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレーション, 港湾空港技術研究所資料 No.1284, 2014.
 - 66) 武村雅之 : 日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, 地震2, Vol.43, pp.257~265, 1990.
 - 67) Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's functions, Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., pp.151~156, 1986.
 - 68) Takemura, M. and T. Ikeura : A semi-empirical method using a hybrid stochastic and deterministic fault models: Simulation of strong ground motions during large earthquakes, J. Phys. Earth, 36, pp.89~106, 1988.
 - 69) Dan, K., T. Watanabe and T. Tanaka : A semi-empirical method to synthesize earthquake ground motions based on approximate far-field shear-wave displacement, J. Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), 396, pp.27~36, 1989.
 - 70) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長 : 地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測—統計的波形合成法による予測—, 日本建築学会構造系論文報告集, Vol.430, pp.1~9, 1991.
 - 71) Kamae, K., Irikura, K. and Pitarka, A. : A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.88, pp.357~367, 1998.
 - 72) 松島信一, 川瀬博 : 1995年兵庫県南部地震の複数スーパースペリシティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集 Vol.534, pp.33~40, 2000.
 - 73) 科学技術庁 : 第1回堆積平野地下構造調査報告会予稿集, 2000.
 - 74) 古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎 : 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集 Vol.514, pp.97~104, 1998.
 - 75) 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.
 - 76) Brune, J.N. : Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake, J. Geophys. Res., Vol.75, pp.4997~5009, 1970.
 - 77) Brune, J.N. : Correction, J. Geophys. Res., Vol.76, p.5002, 1971.
 - 78) 佐藤智美, 巽誉樹 : 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集 第556号, pp.15~24, 2002.
 - 79) 鶴来雅人, 澤田純男, 宮島昌克, 北浦勝 : 関西地域におけるサイト増幅特性の再評価, 構造工学論文集 Vol.48 A, pp.577~586, 2002.
 - 80) 加藤研一 : K-NET強震記録に基づく1997年鹿児島県西北部地震群の震源・伝播経路・地盤増幅特性評価, 日本建築学会構造系論文集 第543号, pp.61~68, 2001.
 - 81) 岩田知孝, 入倉孝次郎 : 観測された地震波から震源特性, 伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震2, Vol.39, pp.579~593, 1986.
 - 82) 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子 : 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会講演予稿集, No.2, B25, 1997.
 - 83) Aki, K. and P.B. Richards : Quantitative Seismology, Second Edition, University Science Books, 2002.
 - 84) Miyake, H., Iwata, T. and Irikura, K. : Source characterization for broadband ground-motion simulation: kinematic heterogenous source model and strong motion generation area, Bulletin of the Seismological Society of America,

Vol.93, pp.2531~2545, 2003.

- 85) 理論地震動研究会編：地震動-その合成と波形処理, 鹿島出版会, 1994.
- 86) 野津厚, 安中正, 佐藤陽子, 菅野高弘：羽田空港の地震動特性に関する研究（第1報）表面波の特性, 港湾空港技術研究所資料 No.1022, 2002.
- 87) 野津厚, 高橋英紀, 遠藤敏雄：シールドトンネルにおける地震観測結果から地震波の見かけの伝播速度を評価する試み, 土木学会論文集A1（構造・地震工学） Vol.66, No.1, pp.61-72, 2010.

2 地殻変動

大地震の際、断層運動に伴い、地殻に弾性変形が生じ、それにより、周辺のかかなり広い地域に地盤の永久変位が生じる場合がある。これを地殻変動という。

この永久変位には水平成分と鉛直成分があり、このうち鉛直成分は、断層運動の向きや断層と対象地点の位置関係により、上向きの場合と下向きの場合がある。最近では、2011年東北地方太平洋沖地震の際、牡鹿半島で1.2mの沈下が生じた例がある¹⁾。1707年宝永地震の際には、高知市の市街地が最大2m沈下したとされる²⁾。また、同じ地震の際、室津では1.8mの隆起があり大型船の入港が不可能になったとされる²⁾。

地震による地殻変動については、必要に応じて、以下に述べる事項について配慮することが望ましい。

①地震による地殻変動に伴い隆起の生じる港湾では、緊急物資輸送用の耐震強化バースの前面水深が確保できなくなる可能性がある。したがって、海溝型巨大地震の発生が想定される地域の港湾において、緊急物資輸送用の耐震強化バースの計画を行う場合には、必要に応じて、想定される地震が発生した場合の地盤の隆起の可能性と隆起量について十分に検討を行い、隆起発生後にも必要な前面水深が確保されるように配慮することが望ましい。同様のことは関係する航路や泊地についてもいえる。

②地震による地殻変動に伴い沈降の生じる港湾では、津波対策として期待されている護岸・防潮堤等の天端高が確保できなくなる可能性があるとともに、津波荷重が増加する恐れがある。したがって、海溝型巨大地震の発生が想定される地域の港湾において、これらの施設の整備を行う場合には、必要に応じて、想定される地震が発生した場合の地盤の沈降の可能性と沈降量について十分に検討を行い、沈降発生後にも必要な天端高が確保されるように配慮するとともに、津波荷重の算定においてこれを考慮することが望ましい。

地殻変動に伴う永久変位の向きと大きさは、想定する地震の位置と規模を考慮した数値計算により求めることができる他、過去に当該地域で発生した大地震による永久変位の値を参考にすることもできる。例えば、過去に南海トラフで発生した大地震による各地の隆起・沈降の大きさは宇佐美によりまとめられている²⁾。

ただし、過去の地震のデータはあらゆる港湾で利用可能ということではなく、また、津波シミュレーションにおいて過去の地震よりも大きな規模の地震を想定することも多くなってきている。したがって、過去の地震のデータが得られていない地点で隆起・沈降を推定する場合や、過去に発生した地震よりも大きな規模の地震を想定する場合には、数値計算により地殻変動を推定する必要がある。その場合、半無限媒質を仮定して理論的に弾性変形を計算する方法³⁾が用いられることが多い。そのためのパッケージプログラムが防災科学技術研究所から提供されている⁴⁾。数値計算の際に想定する断層面上のすべり分布が津波シミュレーションにおける想定と整合していることは重要である。なお、南海トラフ巨大地震については、地殻変動に伴う永久変位の向きと大きさは内閣府によっても推定されており、こうした推定結果を用いることもできる。

なお、大地震後の余効変動（大地震の後に長期間にわたりゆっくりと進行する地殻変動）においては地震時とは逆向きの変動が生じた事例もある。例えば、東北地方太平洋沖地震の牡鹿半島付近の例では、地震時の沈降の4割程度の隆起が5年間で発生している⁵⁾。これは、地震時には比較的沖合で、余効変動時には海岸線付近ですべりが生じたためであり、地域性が大きく、他の地域で同じ現象が見られるとは限らないという点に注意を要する。

【参考文献】

- 1) 国土地理院：GPS連続観測から得られた電子基準点の地殻変動，平成23年（2011年）東日本大震災に関する情報提供，<http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html>，2011。
- 2) 宇佐美龍夫：最新版日本被害地震総覧[416]-2001，東京大学出版会，2003。
- 3) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 75, pp. 1135-1154, 1985。
- 4) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：断層モデルによる地殻変動計算プログラムDC3D0/DC3D, http://www.bosai.go.jp/study/application/dc3d/DC3Dhtml_J.html
- 5) 国土地理院：GEONETによる観測結果，特集・平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震から5年，http://www.gsi.go.jp/kanshi/h23touhoku_5years.html，2016。

3 地震作用

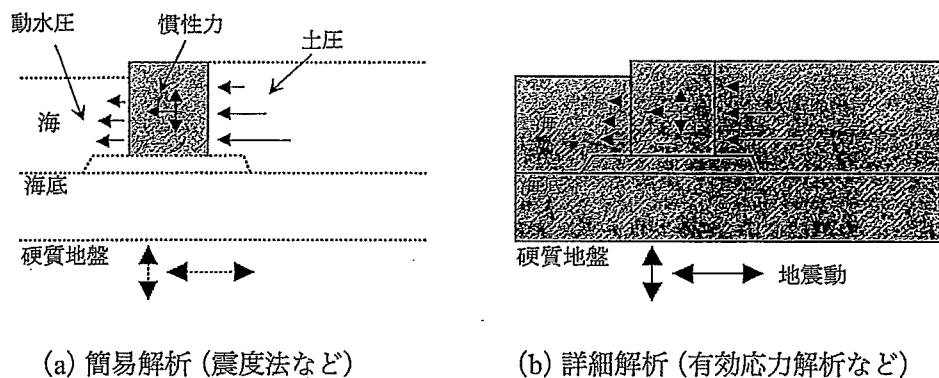
3.1 地盤－構造物系のモデル化と地震作用

本節においては、港湾の施設の耐震性能の照査に用いられる種々の解析法と、それに応じた地震作用について述べる。

はじめに、「地震作用」という言葉と「地震動」という言葉の違いについて、ISO 23469¹⁾の記述に即して説明する。まず、「地震動」は構造物が無くても存在するものであるが、地震作用は構造物があつてはじめて存在するものである。例えば栈橋上部工の慣性力は地震作用の例であるが、これは栈橋上部工があつてはじめて存在する。また、壁体に作用する地震時土圧も地震作用の例であるが、これも壁体があつてはじめて存在するものである。

さらに、ISO 23469¹⁾での整理によると、同じ構造物を対象とした場合でも、解析法の選択によって「作用」は変わりうるものである。例えば図－3.1.1 (a) に示すように「ケーソン」に着目してその滑動安定性を論じるときは、ケーソンに外部から作用する慣性力・地震時土圧及び動水圧を「作用」と捉える。しかし、図－3.1.1 (b) に示すようにケーソン・裏込土・海水・ケーソン直下の基礎地盤からなる全体系の挙動について解析を行う場合は、地震時土圧や動水圧は応答解析の結果として算定されるものであり、作用として設定されるものではない。この場合の「作用」は解析領域下端から入力する地震動である。すなわち、図－3.1.1のそれぞれの図において灰色に着色した部分が着目する部分であり、それと外部との境界において「作用」は定義されることになる。

図－3.1.1 (a) に示すように、地盤－構造物系の一部に注目し、その挙動について解析を行うものを簡易解析、図－3.1.1 (b) に示すように、地盤－構造物系全体の挙動について解析を行うものを詳細解析という（表－3.1.1）。さらに、その各々は静的解析と動的解析に分類されるため、耐震性能の照査に用いられる解析法は $2 \times 2 = 4$ 通りに分類されることになる（表－3.1.1）。本節で述べる解析法のうち、震度法、修正震度法、応答変位法は静的簡易解析に該当する。また、地盤－構造物系の地震応答解析（有効応力解析など）は動的詳細解析に該当する。



図－3.1.1 簡易解析及び詳細解析における地震作用（ケーソン式係船岸の例）

表－3.1.1 港湾の施設の耐震性能の照査に用いられる解析法

	簡易解析	詳細解析
静的解析	静的簡易解析 ・震度法（3.2参照） ・修正震度法（3.3参照） ・応答変位法（3.4参照）	静的詳細解析 ・地盤－構造物系の静的解析
動的解析	動的簡易解析 ・ニューマーク法	動的詳細解析 ・地盤－構造物系の地震応答解析（3.5参照） （有効応力解析など）

3.2 震度法²⁾における地震作用

図-3.2.1に示すように、剛な地盤上に剛体状の物体がある場合を考える。物体の質量を m 、重量を $W(=mg)$ とする。ここに g は重力加速度である。いま、地盤が加速度 α で右向きに運動するとき、物体には左向きに $m\alpha$ なる慣性力が作用する。このとき、物体に滑動が生じないためには、底面に $m\alpha$ なる摩擦力が作用しなければならない。もしも底面の静止摩擦係数が十分大きくなければ、物体には滑動が生じ、多くの場合(加速度のその後の変化にもよるが)残留変位が生じる。このとき、滑動が生じるかどうかの検討は、物体に $m\alpha$ なる静的な力を作用させることにより行うことができる。これが震度法の基本的考え方である。

震度法で作用させる慣性力の大きさ F を式で書くと次のようになる。

$$F = (\alpha/g)W \quad (3.2.1)$$

α/g の代わりに k_h と書くと次式を得る。

$$F = k_h W \quad (3.2.2)$$

すなわち、施設の重量に係数 k_h を乗じると地震動による慣性力が求まる。この k_h を震度と呼ぶ。性能照査のために設定する震度を照査用震度と呼ぶ。ここでいう震度は、気象庁の発表する震度とは全く別物である。

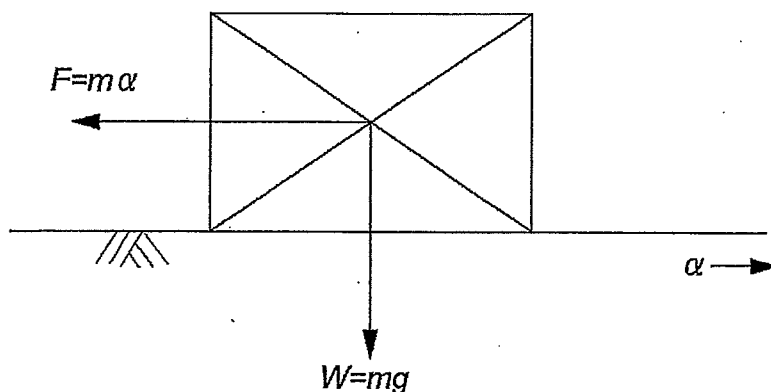


図-3.2.1 震度法概念

震度法は1916年に佐野により提案された³⁾。本章3.1 地盤-構造物系のモデル化と地震作用で述べた解析法の分類では静的簡易解析に分類される。施設の地震時安定性の問題を、静的な力の釣り合いの問題に置き換えて簡便に解析できるため、港湾に限らず各分野で広く用いられてきている。港湾の分野ではレベル1地震動に対する重力式係船岸、矢板式係船岸、セル式係船岸等の性能照査に用いられる。重力式係船岸に適用した場合には、地震作用として、図-3.1.1(a)に示すように、壁体に作用する慣性力その他、地震時土圧及び動水圧を考慮する必要がある。

レベル1地震動に対する性能照査を行う際、地盤の最大加速度を重力加速度で除した値を照査用震度とすると大きめの値となるが、実際にはそのような大きな値を照査用震度として用いる必要はない。例えば、式(3.2.1)に $\alpha=215\text{Gal}$ を代入すると $k=0.22$ となるが、照査用震度0.22の係船岸に最大加速度215Galを越える地震動が作用したからといって、必ずしも係船岸に残留変形が生じるわけでないことが経験的に知られている²⁾⁴⁾。この点については、たとえ215Galの加速度が作用しても、その作用が一瞬であれば、目に見えるほどの残留変位が係船岸に生じにくいことが一つの理由であると考えられる。想定されるレベル1地震動の加速度時刻歴から照査用震度への換算方法は、係留施設の構造形式により異なる。具体的には【参(施)】第1章1 照査用震度に関する詳細事項を参照することができる。

一般に震度法では壁体の背後地盤や基礎地盤に液状化が生じないことを前提としており、地震時土圧や基

礎地盤の物性は、そうした前提に基づいて与えられる。したがって、レベル1地震動に対し、震度法により耐震性能の照査を行う場合には、背後地盤及び基礎地盤に対して液状化の予測・判定を行い、液状化すると判定された場合には対策を実施する必要がある（【作】第7章 地盤の液状化参照）。

震度法は、その原理からもわかるように、滑動・転倒・基礎地盤の支持力不足など、特定のモードによる変形が生じるか否かを、静的な力の釣り合いに基づいて判定するための手法であり、変形が生じるとなった場合にどの程度の残留変形が生じるかを震度法により計算することはできない。震度法にはこのような限界があるため、震度法をレベル2地震動に対して適用することは現実的でない。一般に、レベル2地震動のような非常に強い地震動に対しては、施設に損傷が生じることを前提に、その損傷過程に立ち入って耐震性能の照査を行うことが求められる⁵⁾⁶⁾。係留施設等の港湾の施設も同様であり、レベル2地震動に対しては、変形が生じることを前提に、その変形が許容値以下に収まるように設計することが求められる。このような要請に応えるためには、震度法でなく、後に述べるように、地盤－構造物系の地震応答解析を実施する必要がある。

3.3 修正震度法²⁾における地震作用

震度法の場合、図-3.2.1に示すように、地盤と構造物の一体的な挙動を想定している。これに対し、図-3.3.1に示すようなたわみ性構造物の場合、施設に作用する加速度 α' は地盤の加速度 α とは一致しない。この場合、施設の固有周期等の振動特性と地盤加速度の時刻歴が与えられれば、施設の応答加速度を計算することができ、その最大値に施設の質量 m を乗じて得られる静的な力を施設に作用させることにより、実際の現象を静的な力の釣り合いに置き換えて耐震設計を行うことができる。このように、震度法の適用範囲をたわみ性構造物まで拡張したものが修正震度法である。想定する地盤加速度の時刻歴を用いて、様々な固有周期の施設に対してあらかじめ応答計算を実施し、施設の応答加速度の最大値を固有周期の関数として整理したものを加速度応答スペクトルという。

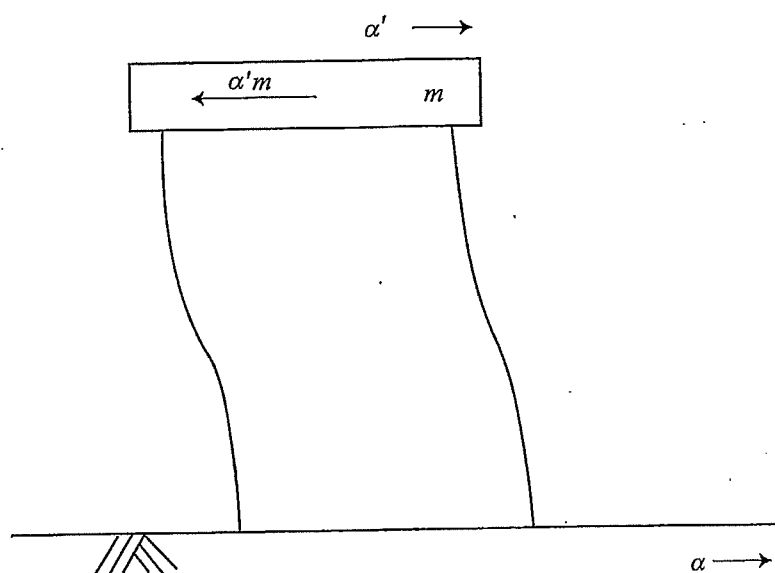


図-3.3.1 修正震度法概念

修正震度法は、本章3.1 地盤－構造物系のモデル化と地震作用で述べた解析法の分類では静的簡易解析に分類される。修正震度法で施設の応答加速度を求める場合、施設の復元力特性は線形であると仮定することが多い。しかし、非常に強い地震動が作用する場合、構造部材の塑性化により、実際には施設の復元力特性は非線形となるので、線形性を仮定して求めた応答加速度自体が無意味となってしまう。そのため、修正震度法は、レベル2地震動のような非常に強い地震動に対しては不向きである。

3.4 応答変位法²⁾における地震作用

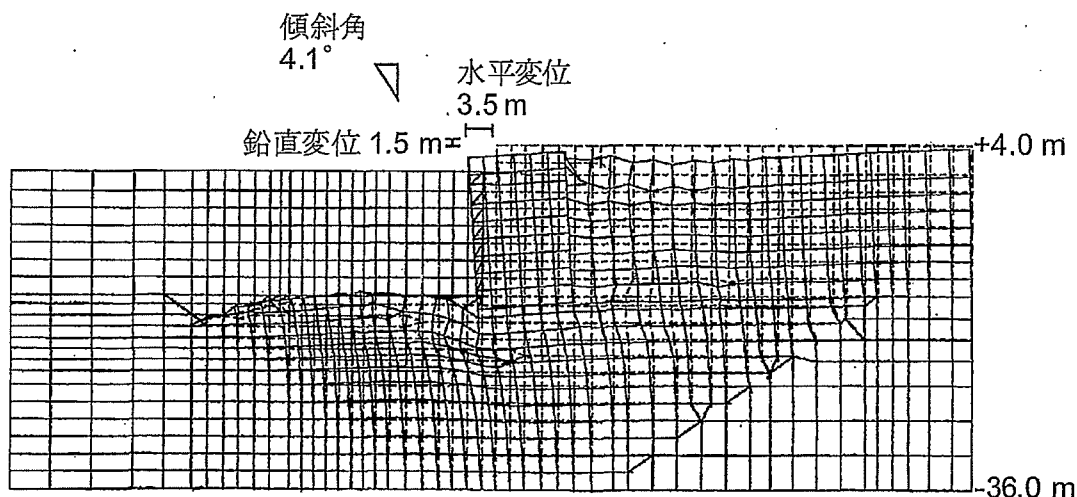
埋設パイプラインや沈埋トンネルなどのように、見かけの単位体積重量や剛性が比較的小さく延長の大きい施設では、施設に生じる加速度が問題となることは少ない。これらの施設は、重量と剛性が小さいため、その存在が周辺地盤の変位に及ぼす影響は小さく、施設の変位は周辺地盤の変位に支配される傾向にある。周辺地盤の変位が一様でない場合には、施設にひずみが生じる。このことが耐震設計上問題となる。

応答変位法では、まず、施設が存在しないものとして地盤の変位を求め、次に、地盤が変位するのと同じように施設が変位すると考えて、施設の変位や応力を求める。すなわち、震度法では地震作用として静的な力を施設に作用させるのに対し、応答変位法では地震作用として地震時の地盤変位を施設に作用させる。地中構造物の剛性がやや大きく、施設が地盤と全く同じように変形するとしたのでは誤差が大きい場合には、地盤の変位をバネを介して施設に作用させる場合もある。応答変位法は、本章3.1地盤－構造物系のモデル化と地震作用で述べた解析法の分類では静的簡易解析に分類される。

3.5 地盤－構造物系の地震応答解析における地震作用

ここまで述べた手法は、いずれも、実際の現象を単純化したものであるが、地盤－構造物系全体の挙動をより忠実に再現することを意図した地震応答解析が行われることがある。これは、本章3.1地盤－構造物系のモデル化と地震作用で述べた解析法の分類では動的詳細解析に分類される。地盤－構造物系の地震応答解析は図－3.5.1に示すような有限要素法（特に有効応力法）に基づくことが多い。この場合の地震作用は、解析領域下端への入力地震動である。

一般に、解析領域下端における地震動は上昇波（E）と下降波（F）の和で与えられる。解析領域の下端に入力地震動を与える方法には、解析領域下端における実際の地震動（E+F）を入力する方法（E+F波入力）と、解析領域の下端に下方から入射する地震波の2倍の振幅を有する地震波（2E）を入力する方法（2E波入力）とがある。実際に生じた被害の再現計算を行う場合や、模型振動実験のシミュレーションを行う場合には、上昇波と下降波を併せた解析領域下端での地震動が観測されている場合もあり、この場合にはE+F波入力とすることもできるが、耐震性能の照査のために行う地盤－構造物系の地震応答解析では2E波入力を行う。この場合、解析領域の直下に工学的基盤と見なすことのできる地盤が存在する場合には、本章1地震動で求めた工学的基盤における地震動をそのまま用いることができるが、解析領域の直下に工学的基盤と見なすことのできる地盤が存在しない場合には、工学的基盤で定義された地震動を、表層地盤の地震応答計算により、解析領域直下での2E波に変換した上で、これを入力する必要がある。



図－3.5.1 有効応力解析により計算された重力式岸壁の残留変形の例

【参考文献】

- 1) International Organization for Standardization: ISO 23469, Bases for design of structures - Seismic actions for designing geotechnical works, 2005.
- 2) 土田肇, 井合進: 建設技術者のための耐震工学, 山海堂, 1991.
- 3) 佐野利器: 家屋耐震構造論(上・下), 震災予防調査会報告, 第83号, 1916.
- 4) 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.
- 5) 土木学会: 土木学会耐震基準等に関する提言集, 1996.
- 6) 土木学会: 土木構造物の耐震基準等に関する提言「第三次提言」と解説, 2000.

