ISSN 1346-7328
国総研資料　第979号
平 成 ２ ９ 年 ７ 月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.979　July 2017

重力式岸壁・矢板式岸壁を対象とした 照査用震度式の適用水深の拡張と被災検証に基づく 震度修正法の提案

福永勇介・野津厚・宮田正史・竹信正寛・小濱英司

New Equations for Calculating Design Seismic Coefficients
for Deeper Gravity-type and Sheet Pile Quaywalls
and Their Correction Based on Case Histories in Japan

Yusuke FUKUNAGA, Atsushi NOZU, Masafumi MIYATA,
Masahiro TAKENOBU, Eiji KOHAMA

国土交通省　国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

国土技術政策総合研究所資料
No.979　　　　2017 年 7 月
(YSK-N-372)

重力式岸壁・矢板式岸壁を対象とした照査用震度式の適用水深の拡張と被災検証に基づく震度修正法の提案

福永勇介*・野津厚**・宮田正史***・竹信正寛*・小濱英司****

要　旨

レベル1地震動に対する震度算定式の妥当性を評価する手法として著者らは被災検証法を提案し，その方法を平成19年に発行された港湾の施設の技術上の基準・同解説に記載の照査用震度式に適用した．その結果，重力式岸壁については被災検証結果が良好であったが，矢板式岸壁については控え直杭式と控え組杭式の両方において良好ではないということが分かった．

以上の状況を踏まえ，本稿では，現行の照査用震度式の適用範囲外であった –16.0 [m]以深の水深の構造物についても適用できるよう，照査用震度式の適用水深の拡張を行う．さらに，適用水深を拡張した照査用震度式においても被災検証結果が依然良好ではなかった矢板式岸壁を主たる対象として，被災検証結果を改善するような，照査用震度式の修正法を提案する．併せて，照査用震度式の定式化及び照査用震度の算出の上で必要な各種パラメータの変更に伴う被災検証結果への影響と，算出される震度について考察し，被災検証結果の観点から適切な各種パラメータの選択を行う．

キーワード：被災検証法，SVM［サポートベクターマシン］，作用震度，限界震度，照査用震度

* 港湾研究部　港湾施設研究室　主任研究官
** 港湾空港技術研究所　地震防災研究領域　領域長
*** 港湾研究部　港湾施設研究室　室長
**** 港湾空港技術研究所　耐震構造研究グループ　グループ長
〒239-0826　横須賀市長瀬3-1-1　国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5019　Fax：046-842-9265　　e-mail: ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

Technical Note of NILIM
No.979 July 2017
(YSK-N-372)

New Equations for Calculating Design Seismic Coefficients for Deeper Gravity-type and Sheet Pile Quaywalls and Their Correction Based on Case Histories in Japan

Yusuke FUKUNAGA*
Atsushi NOZU**
Masafumi MIYATA***
Masahiro TAKENOBU*
Eiji KOHAMA****

Synopsis

In NILIM Technical Note No.920, we proposed a new scheme to validate an equation for calculating design seismic coefficient based on case histories of earthquake damage in Japan, the Damage Validation Method, and applied it to the existing equations for design seismic coefficient, called seismic coefficient for verification, written in the present design code, Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan, published in 2007. The results showed that the existing equation for gravity-type quaywalls were very consistent with the above case histories, but those for sheet pile quaywalls required some correction irrespective of the anchorage type (vertical pile and coupled pile).

In this research, we first propose new equations for calculating seismic coefficient for verification that are applicable to structures with a water depth up to −20.0 [m]. Then we propose a new correction method for the equation of seismic coefficient for verification to improve the validation results especially for sheet pile quaywalls because the new equations are not consistent with the above case histories as well as the existing one. In addition, we show an influence of various parameters in the equation on the validation results and the calculated seismic coefficient for verification. In consequence, we finally propose the most proper set of parameters in terms of the result of the damage validation.

Key Words : Damage Validation Method, SVM [support vector machine], design seismic coefficient, critical seismic coefficient, seismic coefficient for verification

---

* Senior Researcher, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM
** Director of Earthquake Disaster Prevention Engineering Division, PARI
*** Head, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM
**** Group Leader, Earthquake and Structural Dynamics Group, PARI
National Institute of Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5019 Fax : +81-46-842-9265 e-mail: ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

目　　次

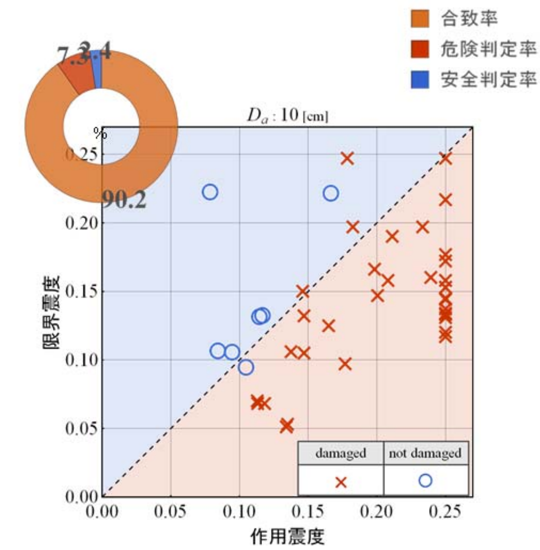
1. 序論

国総研資料 No.920[1)]において，著者らは，レベル1地震動に対する重力式岸壁，控え直杭式矢板式岸壁，控え組杭式矢板式岸壁の震度算定式の妥当性を評価する方法として被災検証法を提案した．被災検証法とは，重力式岸壁，控え直杭式矢板式岸壁，控え組杭式矢板式岸壁の実際に存在している，或いは実際に存在した施設を対象に，設計計算上の被災判定と実被害による被災判定が一致するかどうかを調べることにより，設計計算上，作用震度を算出する時に用いた震度算定式の妥当性を評価する方法である．

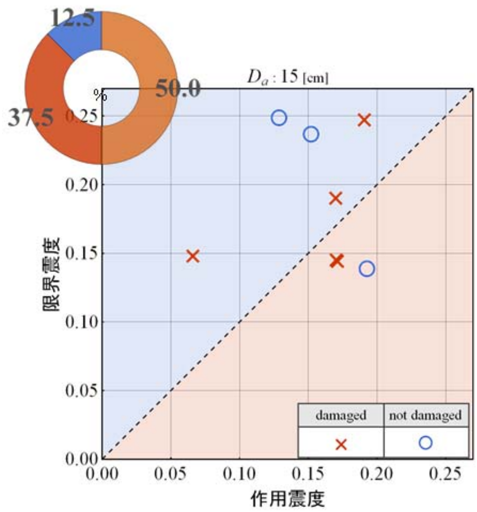
文献[1)]では，水深 –7.5 ～ –14.6 [m]の重力式岸壁41施設，控え直杭式矢板式岸壁8施設，控え組杭式矢板式岸壁7施設を対象に，平成19年に刊行された港湾の施設の技術上の基準・同解説[2)]（以後，現行基準と呼称する）の照査用震度式（以後，H19照査用震度式と呼称する）を用いて作用震度を算出し，被災検証を行ったところ，**図-1.1**の被災判定グラフで示すとおり，重力式岸壁では被災検証結果は良好であったものの，控え直杭式矢板式岸壁では合致率が低く，危険判定率が高く，また控え組杭式矢板式岸壁では合致率が低く，安全判定率が高く，被災検証結果は良好ではなかった（合致率，危険判定率，安全判定率の定義は2.2を参照のこと）．

以上の結果を踏まえ，本稿では，まず，現行の照査用震度式の適用範囲外であった –16.0 [m]以深の水深の構造物についても適用できるよう，照査用震度式の適用水深の拡張を行い，次に，矢板式岸壁の被災検証結果を改善する，すなわち合致率を増加させ，危険判定率を低減させるような震度の修正方法について検討を行い，その結果を取りまとめた．

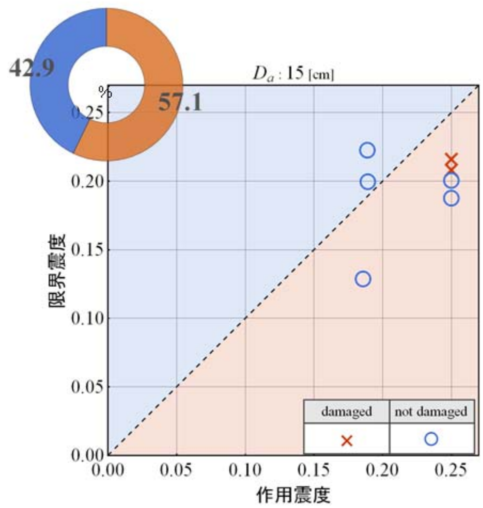
本稿の次章以降の構成であるが，第2章ではまず，被災検証結果を改善する震度の修正方法を提案する前に，H19照査用震度式の適用水深を –16.0 [m]以深の水深へ拡張する．第3章では，本研究において提案するSVM［サポートベクターマシン］を用いた震度の修正方法について解説を行う．第4章では，第2章で提案したフィルター関数，照査用震度式を対象に，式中に現れる各パラメータを変更した場合や第3章のSVMによる震度修正法を適用した場合の被災検証結果への影響について述べる．第5章では，第4章で考察した各種パラメータの変更に伴う被災検証結果への影響，震度への影響等の観点から適切な各種パラメータの選択について述べる．そして第6章において，本研究の成果をまとめ，今後の研究の方向について触れる．なお，本稿において，定数や変数のベクトル



a) 重力式岸壁（41施設）



b) 控え直杭式矢板式岸壁（8施設）



c) 控え組杭式矢板式岸壁（7施設）

図-1.1 H19 照査用震度式の被災検証結果 [1)]

に文字を使用する際，太字で表し，列ベクトルを表すものとする．よって，その文字を用いた行ベクトルは，その文字に対して転置記号を添えて表現する．

2. H19照査用震度式における適用水深の大水深への拡張

H19照査用震度式は，水深 –7.5 ～ –16.0 [m]の数値計算用のモデル断面を対象に2D FLIP解析（2次元有効応力有限要素法による地震応答解析）を行い，その結果に対し統計解析を行って定式化された[3)]．よって，基本的にはH19照査用震度式の適用水深はこのモデル断面の水深の範囲と考えるのが妥当である．本研究では，大水深構造物にも適用可能な照査用震度式を定式化することを目的として，新たに水深 –16.0 ～ –20.0 [m]の数値計算用のモデル断面を作成し，H19照査用震度式を定式化した時と同様の2次元有効応力有限要素法による地震応答解析を行った．その結果に対し統計解析を行い，水深 –7.5 ～ –20.0 [m]の重力式岸壁，控え直杭式矢板式岸壁，控え組杭式矢板式岸壁の b 値の関数，フィルター関数，p 値の関数，照査用震度式を算出した．

2.1 照査用震度式の定式化のフローと定式化に用いたデータ

照査用震度式の適用水深の拡張を行うに当たって実施した数値解析は，国総研資料 No.310[3)]に示された方法に則っている．

図-2.1に示す解析フロー及び解析条件の詳細を以下に示す．

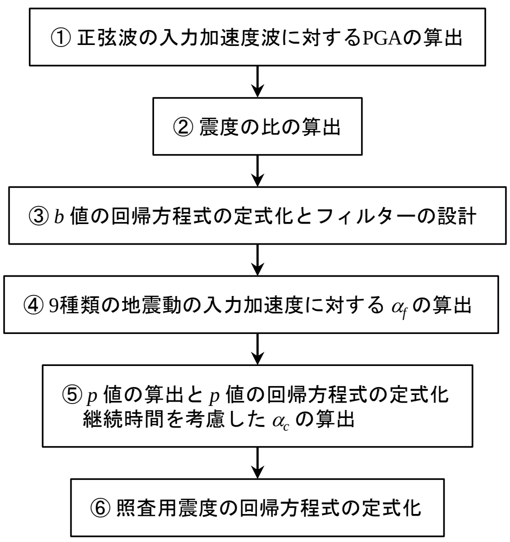


図-2.1　解析フロー

① 正弦波の入力加速度波に対するPGA（地表面の応答加速度波の絶対値最大値）の算出

モデル断面に対して工学的基盤から単一周波数の加速度波を入力し，2D FLIP 解析を行い，岸壁天端の残留水平変位が 20 [cm]となる時の入力加速度波の振幅を算出する．そしてその振幅になるよう振幅を調整した上記の単一周波数の加速度波を工学的基盤に入力し，1D FLIP 解析（1 次元有効応力有限要素法による地震応答解析）により，地表面での地盤の応答加速度波を求め，そのPGA を算出する．モデル断面の設計震度は，水深によらず，重力式岸壁と控え直杭式矢板式岸壁は 0.10，控え組杭式矢板式岸壁は 0.15 とした．工学的基盤から入力した加速度波は，継続時間は 40 秒で，継続時間の振動開始後と終了前にテーパーを掛け，かつ振幅調整を行った単一周波数の正弦関数を用いた．その周波数は，重力式岸壁では 0.2，0.3，0.4，0.6，0.8，1.0，1.5，2.0 [Hz]の 8 種類，矢板式岸壁は控え直杭式，控え組杭式ともに，0.4，0.6，0.8，1.0，1.5，2.0 [Hz]の 6 種類とした．地盤物性は，全構造形式において，case 1～3 の 3 種類とした．計算ケース数は，2D FLIP 解析，1D FLIP 解析のいずれにおいても，重力式岸壁では，144 ケース（= 入力加速度波の周波数 8 種類 × 設計震度と水深の組合せ 6 種類 × 地盤物性 3 種類)，矢板式岸壁では，108 ケース（= 入力加速度波の周波数 6 種類 × 設計震度と水深の組合せ 6 種類 × 地盤物性 3 種類）となる．モデル断面の設計震度と水深の組合せ，断面諸元，地盤物性については，それぞれ**表-2.1～2.3** に，モデル断面の概略図は**図-2.2** に示す．ただし，解析ケースの内，**表-2.1** に●で示す設計震度と水深の組合せのケースについては，文献 [3)]で H19 照査用震度式を定式化するに当たり用いた計算結果をそのまま用いているため，今回新たに計算を行ったのは〇で示したケースのみとなる．

② 震度の比の算出

①で算出したPGAを重力加速度で除して震度に換算したものに対するモデル断面の設計震度の比を震度の比と定義し，①の入力加速度波の各周波数で震度の比を算出する．

③ b 値の回帰方程式の定式化とフィルターの設計

②で算出した震度の比を周波数の関数として表現するためのフィルターの設計を行う．文献[3)]と同様に，ある周波数を境界として周波数の領域を2つの領域に分割し，その周波数以下の領域では零位相特性を有する定実数関数，その周波数より大きな領域ではSMACフィルターの関数を参考にした関数を採用し，式(2.1)で表される区分関数をフィルターとして設定する．以後，境界となる周波数を本稿ではコーナー周波数 f_c と呼称する．

表-2.1 解析フロー（**図-2.1**）の①，④の計算に用いたモデル断面の設計震度と水深

a) 重力式岸壁

		水深 h [m]					
		–7.5	–11.0	–14.5	–16.0	–18.0	–20.0
設計震度 k_h	0.10	●	●	●	○	○	○
	0.15						
	0.20						
	0.25						
	0.27						

b) 控え直杭式矢板式岸壁

		水深 h [m]					
		–7.5	–11.0	–14.5	–16.0	–18.0	–20.0
設計震度 k_h	0.10	●	●	○	○	○	○
	0.15						
	0.20						
	0.25						
	0.27						

c) 控え組杭式矢板式岸壁

		水深 h [m]					
		–7.5	–11.0	–14.5	–16.0	–18.0	–20.0
設計震度 k_h	0.10						
	0.15	●	●	○	○	○	○
	0.20						
	0.25						
	0.27						

※ ●: 文献[3)]において計算されたケース
○: 本研究において計算したケース

$$
a(f;\mathfrak{b}, f_c)=\begin{cases}\mathfrak{b} & \text{if } 0.0\le f\le f_c\\ \dfrac{\mathfrak{b}}{1-\left(g(f)\right)^2+c_1\, j\, g(f)} & \text{if } f>f_c\end{cases}
$$
$$
g(f)=c_0\,(f-f_c) \tag{2.1}
$$

ここに

- a ：フィルター関数
- f ：周波数 [Hz]
- $\mathfrak{b}$ ：フィルター関数のb値; 区分関数として表されるフィルターの実定数関数となる部分の関数の値
- f_c ：コーナー周波数 [Hz]
- j ：虚数単位
- c_0, c_1 ：実係数

各周波数領域の具体的な関数の設定方法であるが，コーナー周波数以下の領域では，文献[3)]と同様に，震度の比を被説明変数，モデル断面の壁高，構造物の背後の地盤の固有周期，構造物下部の地盤の固有周期をそれぞれの基準値で除して無次元化したものを説明変数として，回帰分析により式(2.2)で表される回帰方程式を求める．なお，被説明変数の震度の比には，震度の比算出時の周波数が0.8 [Hz]のもののみ，あるいは1.0 [Hz]のもののみのいずれかを使用する．以後，これら0.8，1.0 [Hz]の震度の比算出時の周波数を，特別にb 値算出時の周波数 f_b と呼称する．

$$
\begin{aligned}\mathfrak{b}&=b\left(H, T_b, T_u\right)\\ &=\left[\frac{H}{H_R}, \frac{T_b}{T_{bR}}, \frac{T_u}{T_{uR}}, 1\right]\boldsymbol{c}_2\end{aligned} \tag{2.2}
$$

ただし

・重力式岸壁

$$\max\left\{0.04\,H+0.08,\,0.28\right\}\le\mathfrak{b}\le 0.04\,H+0.44$$

・控え直杭式矢板式岸壁

$$\max\left\{0.12\,H-0.78,\,0.41\right\}\le\mathfrak{b}\le 0.12\,H-0.24$$

・控え組杭式矢板式岸壁

$$\max\left\{0.12\,H-0.78,\,0.41\right\}\le\mathfrak{b}\le 0.12\,H-0.04$$

ここに

- $\mathfrak{b}$ ：フィルター関数の b 値
- b ：フィルター関数の b 値を値とする関数
- H ：岸壁の壁高 [m]
- T_b ：背後地盤の初期固有周期 [s]
- T_u ：海底面下の地盤の初期固有周期 [s]
- H_R ：岸壁の壁高の基準値（= 15） [m]
- T_{bR} ：背後地盤の初期固有周期の基準値（= 0.8）[s]
- T_{uR} ：海底面下の地盤の初期固有周期の基準値（= 0.4） [s]
- $\boldsymbol{c}_2$ ：回帰係数のベクトル（$\in\mathbb{R}^4$）
- $\max\left\{h_1(x),\cdots,h_n(x)\right\}$ ：変数 x の各値に対する集合 $\left\{h_1(x),\cdots,h_n(x)\right\}$ の最大値

一方，コーナー周波数より大きな領域では，②で算出したその領域の震度の比と，それに対応する周波数の2つ組 $(f_k, \mathfrak{b}_k)$ をデータとして，コーナー周波数より大き

な領域上の関数（式(2.1)の $f > f_c$ で定義された関数）のデータ f_k による値と，データ $\mathfrak{b}_k$ の残差2乗和が最小になるように，式(2.1)の係数 c_0，c_1 を決定する．すなわち，次の式で表される無制約最適化問題を解いて，係数 c_0，c_1 を決定する．

$$\underset{[c_0,c_1]^T\in\mathbb{R}^2}{\text{Minimize}} \quad \sum_{k\in I}\left|\mathfrak{b}_k-\left|\frac{b(H_k,T_{bk},T_{uk})}{1-g(f_k)^2+c_1\,j\,g(f_k)}\right|\right|^2 \tag{2.3}$$

ここに

g ：周波数の関数; $g(f)=c_0(f-f_c)$

$\underset{\text{cond.}}{\text{Minimize}}(\cdot)$ ：最適化問題において，条件 cond. の下で目的関数 $(\cdot)$ を最小化することを意味する

$|(\cdot)|$ ：$(\cdot)$ の絶対値

I ：データに付された添字の集合

$\sum_{k\in I}h(f_k)$ ：添字 k で表される周波数 f_k における関数 h の値の，添字 k に関する総和

$\mathfrak{b}_k$ ：2D FLIP解析により算出した震度の比のデータ

H_k ：$\mathfrak{b}_k$ を算出した際のモデル断面の岸壁の壁高 [m]

T_{bk} ：$\mathfrak{b}_k$ を算出した際のモデル断面の背後地盤の初期固有周期 [s]

T_{uk} ：$\mathfrak{b}_k$ を算出した際のモデル断面の海底面下の地盤の初期固有周期 [s]

f_k ：$\mathfrak{b}_k$ に対応する周波数のデータ [Hz]

j ：虚数単位

f_c ：コーナー周波数 [Hz]

c_0, c_1 ：回帰係数（$\in\mathbb{R}$）

表-2.2 モデル断面の断面諸元

a) 重力式岸壁

水深 [m]	設計震度	地盤種別 case	堤体幅 [m]
		1	
	0.10	2	3.2
		3	
		1	
−7.5	0.15	2	4.6
		3	
		1	
	0.20	2	7.2
		3	
		1	
	0.10	2	5.4
		3	
		1	
	0.15	2	7.4
		3	
		1	
−11.0	0.20	2	11.4
		3	
		1	13.4
	0.25	2	
		3	13.2
		1	15.2
	0.27	2	
		3	15
		1	
	0.10	2	7.8
		3	
		1	
	0.15	2	10.4
		3	
		1	
−14.5	0.20	2	15.4
		3	
		1	20.4
	0.25	2	
		3	19.6
		1	22.8
	0.27	2	
		3	22.2

水深 [m]	設計震度	地盤種別 case	堤体幅 [m]
		1	
	0.10	2	8.8
		3	
		1	
	0.20	2	17.1
		3	
−16.0		1	23.2
	0.25	2	
		3	22.4
		1	26.1
	0.27	2	
		3	25.4
		1	
	0.10	2	10.1
		3	
		1	
−18.0	0.20	2	19.5
		3	
		1	30.5
	0.27	2	
		3	29.4
		1	
	0.10	2	11.4
		3	
		1	
−20.0	0.20	2	21.8
		3	
		1	34.9
	0.27	2	
		3	33.5

b) 控え直杭式矢板式岸壁

括弧内の数字は許容応力 [MN/m^2]

鋼　矢　板： SY295 (270)　　鋼管矢板 : SKY490 (278)

H　型　鋼 : SHK490 (278)　　直　　杭 : SKK490 (278)

水深	設計震度	地盤種別	前面矢板				控えH鋼				タイロッド		
		case	設置座標*1) [m]	根入れ長 [m]	下端高 [m]	型式	設置座標*1) [m]	杭長 [m]	下端高 [m]	型式	径 ϕ [mm]	材質	許容応力 [MN/m^2]
[m]													
–7.5	0.10	1	0.0	7.12	–14.62	Ⅳ型	16.8	16.31	–15.21	413 × 404 × 17 × 27	70	SS400	129
		2	0.0	6.91	–14.41	Ⅳ型	15.3	13.91	–12.81	402 × 400 × 12 × 24	70	SS400	129
		3	0.0	6.32	–13.82	Ⅳ型	13.3	11.32	–10.22	385 × 385 × 12 × 20	65	SS400	129
	0.15	1	0.0	7.50	–15.00	Ⅳ型	18.6	17.32	–16.22	426 × 405 × 18 × 34	75	SS400	129
		2	0.0	7.29	–14.79	Ⅳ型	16.8	14.66	–13.56	414 × 405 × 18 × 28	75	SS400	129
		3	0.0	6.65	–14.15	Ⅳ型	14.6	11.86	–10.76	400 × 400 × 14 × 23	60	高張力鋼490	195
–11.0	0.10	1	0.0	10.92	–21.92	ϕ800 × t 7	21.4	19.39	–18.29	448 × 427 × 40 × 45	85	SS400	129
		2	0.0	9.10	–20.10	ϕ508 × t 10	19.3	16.22	–15.12	428 × 422 × 35 × 35	80	SS400	129
		3	0.0	8.39	–19.39	ϕ508 × t 10	17.1	13.27	–12.17	418 × 407 × 20 × 30	75	SS490	153
	0.15	1	0.0	12.11	–23.11	ϕ914.4 × t 8	24.2	21.08	–19.98	478 × 422 × 35 × 60	75	高張力鋼490	195
		2	0.0	11.77	–22.77	ϕ900 × t 8	21.9	17.80	–16.70	458 × 422 × 35 × 50	75	高張力鋼490	195
		3	0.0	9.39	–20.39	ϕ609.6 × t 10	19.0	13.99	–12.89	428 × 422 × 35 × 35	80	SS490	153
	0.20	1	0.0	13.42	–24.42	ϕ1117.6 × t 8	27.2	22.21	–21.11	498 × 452 × 65 × 70	95	SS490	153
		2	0.0	13.06	–24.06	ϕ1110 × t 8	25.0	19.15	–18.05	488 × 432 × 45 × 65	75	高張力鋼590	234
		3	0.0	10.38	–21.38	ϕ700 × t 11	21.7	14.96	–13.86	448 × 432 × 45 × 45	80	高張力鋼490	195
–14.5	0.10	1	0.0	11.29	–25.79	ϕ600 × t 16	26.0	22.28	–21.18	488 × 437 × 50 × 65	85	SS490	153
		2	0.0	11.05	–25.55	ϕ600 × t 16	24.7	18.88	–17.78	468 × 427 × 40 × 55	85	SS490	153
		3	0.0	10.10	–24.60	ϕ600 × t 15	24.7	15.23	–14.13	438 × 422 × 35 × 45	85	SS490	153
	0.20	1	0.0	14.99	–29.49	ϕ1000 × t 16	33.0	25.13	–24.03	602 × 515 × 65 × 75	75	高張力鋼740	324
		2	0.0	14.09	–28.59	ϕ900 × t 17	30.3	21.32	–20.22	582 × 500 × 50 × 65	75	高張力鋼740	324
		3	0.0	12.95	–27.45	ϕ900 × t 16	27.3	17.66	–16.56	508 × 432 × 45 × 75	75	高張力鋼740	324
	0.25	1	0.0	16.63	–31.13	ϕ1219.2 × t 16	38.7	27.95	–26.85	760 × 510 × 60 × 75	80	高張力鋼740	324
		2	0.0	15.31	–29.81	ϕ1000 × t 19	35.0	23.41	–22.31	730 × 505 × 55 × 60	90	高張力鋼690	264
		3	0.0	14.12	–28.62	ϕ1000 × t 18	30.8	18.34	–17.24	582 × 495 × 45 × 65	80	高張力鋼740	324
–16.0	0.10	1	0.0	13.23	–29.23	ϕ800 × t 16	27.7	23.26	–22.16	562 × 495 × 45 × 55	85	高張力鋼490	195
		2	0.0	12.95	–28.95	ϕ800 × t 16	26.5	19.64	–18.54	542 × 495 × 45 × 45	85	高張力鋼490	195
		3	0.0	11.64	–27.64	ϕ800 × t 14	26.5	15.85	–14.75	522 × 485 × 35 × 35	90	SS490	153
	0.20	1	0.0	15.79	–31.79	ϕ1000 × t 20	36.2	27.37	–26.27	740 × 510 × 60 × 65	90	高張力鋼590	234
		2	0.0	15.29	–31.29	ϕ1000 × t 19	33.2	23.26	–22.16	720 × 505 × 55 × 55	90	高張力鋼590	234
		3	0.0	14.07	–30.07	ϕ1000 × t 18	29.2	18.20	–17.10	572 × 495 × 45 × 60	90	高張力鋼590	234
	0.25	1	0.0	17.60	–33.60	ϕ1200 × t 21	42.1	29.38	–28.28	785 × 525 × 76 × 86	90	高張力鋼740	324
		2	0.0	16.66	–32.66	ϕ1200 × t 22	38.4	24.94	–23.84	760 × 505 × 55 × 75	85	高張力鋼740	324
		3	0.0	15.39	–31.39	ϕ1100 × t 21	33.9	19.57	–18.47	612 × 500 × 50 × 80	85	高張力鋼740	324
	0.27	1	0.0	18.35	–34.35	ϕ1300 × t 21	39.9	24.44	–23.34	ϕ1300 × t 23	90	高張力鋼740	324
		2	0.0	17.99	–33.99	ϕ1300 × t 21	40.7	25.57	–24.47	770 × 520 × 70 × 80	90	高張力鋼740	324
		3	0.0	16.63	–32.63	ϕ1300 × t 20	36.6	20.78	–19.68	740 × 505 × 55 × 65	90	高張力鋼740	324
–18.0	0.10	1	0.0	14.89	–32.89	ϕ1000 × t 16	30.2	24.83	–23.73	582 × 505 × 55 × 65	90	高張力鋼490	195
		2	0.0	14.58	–32.58	ϕ1000 × t 16	28.9	21.02	–19.92	562 × 500 × 50 × 55	90	高張力鋼490	195
		3	0.0	13.34	–31.34	ϕ1000 × t 15	28.9	17.11	–16.01	542 × 490 × 40 × 45	90	高張力鋼490	195
	0.20	1	0.0	17.79	–35.79	ϕ1200 × t 22	35.9	24.05	–22.95	ϕ1300 × t 20	85	高張力鋼740	324
		2	0.0	17.43	–35.43	ϕ1200 × t 22	37.0	25.12	–24.02	750 × 515 × 65 × 70	85	高張力鋼740	324
		3	0.0	16.08	–34.08	ϕ1200 × t 21	32.6	19.69	–18.59	602 × 515 × 65 × 75	85	高張力鋼740	324
	0.27	1	0.0	21.33	–39.33	ϕ1700 × t 22	44.3	25.97	–24.87	ϕ1500 × t 22	100*2)	高張力鋼740	324
		2	0.0	20.92	–38.92	ϕ1700 × t 22	40.9	22.34	–21.24	ϕ1400 × t 22	100*2)	高張力鋼740	324
		3	0.0	19.35	–37.35	ϕ1700 × t 21	37.4	18.29	–17.19	ϕ1300 × t 20	100*2)	高張力鋼740	324
–20.0	0.10	1	0.0	16.87	–36.87	ϕ1200 × t 18	33.3	26.63	–25.53	612 × 515 × 65 × 80	90	高張力鋼590	234
		2	0.0	16.52	–36.52	ϕ1200 × t 18	31.3	22.64	–21.54	592 × 505 × 55 × 70	85	高張力鋼590	234
		3	0.0	15.15	–35.15	ϕ1200 × t 17	31.3	18.29	–17.19	562 × 505 × 55 × 55	85	高張力鋼590	234
	0.20	1	0.0	20.21	–40.21	ϕ1500 × t 23	39.1	25.69	–24.59	ϕ1300 × t 25	95*2)	高張力鋼740	324
		2	0.0	19.81	–39.81	ϕ1500 × t 23	36.2	21.79	–20.69	ϕ1300 × t 21	95*2)	高張力鋼740	324
		3	0.0	18.29	–38.29	ϕ1500 × t 22	36.2	21.83	–20.73	750 × 515 × 65 × 70	90	高張力鋼740	324
	0.27	1	0.0	23.93	–43.93	ϕ2000 × t 25	49.1	27.74	–26.64	ϕ1600 × t 25	110*2)	高張力鋼740	324
		2	0.0	23.46	–43.46	ϕ2000 × t 25	45.4	23.74	–22.64	ϕ1500 × t 24	110*2)	高張力鋼740	324
		3	0.0	21.52	–41.52	ϕ2000 × t 23	41.8	19.57	–18.47	ϕ1300 × t 25	105*2)	高張力鋼740	324

*1) 「設置座標」とは，前面矢板の設置地点を原点とし，陸側に水平に正の向きを取った座標系において，該当する部材が設置された座標を意味する

*2) 高張力鋼 740 のタイロッドはϕ90 以下の径の規格しか現時点では存在しないが，数値計算上それより大きな径を設定した

c–1) 控え組杭式矢板式岸壁（水深 –7.5 ～ –16.0 [m]）

括弧内の数字は許容応力 [MN/m^2]

鋼 矢 板 : SY295 (270)　　鋼管矢板 : SKY490 (278)
組 杭 : SKK400 (210)

水深	設計震度	地盤種別	前面矢板				組杭			タイロッド		
		case	設置座標[*1)] [m]	根入れ長 [m]	下端高 [m]	型式	設置座標[*1)] [m]	下端高 [m]	型式	径 ϕ [mm]	材質	許容応力 [MN/m^2]
[m]												
–7.5	0.15	1	0.0	7.50	–15.00	Ⅳ型	19.3	–15.3 –21.7	ϕ700 × t 7 ϕ900 × t 8	75	SS400	129
		2	0.0	7.29	–14.79	Ⅳ型	19.3	–10.6 –15.9	ϕ450 × t 6 ϕ600 × t 7	75	SS400	129
		3	0.0	6.65	–14.15	Ⅳ型	19.3	–5.70 –13.4	ϕ400 × t 6 ϕ400 × t 6	60	高張力鋼490	195
–11.0	0.15	1	0.0	12.11	–23.11	ϕ914.4 × t 8	24.8	–17.0 –25.2	ϕ800 × t 8 ϕ1300 × t 9	75	高張力鋼490	195
		2	0.0	11.77	–22.77	ϕ900 × t 8	24.8	–12.0 –21.8	ϕ500 × t 6 ϕ700 × t 7	75	高張力鋼490	195
		3	0.0	9.39	–20.39	ϕ609.6 × t 10	24.8	–6.30 –14.9	ϕ450 × t 6 ϕ600 × t 7	80	SS490	153
	0.20	1	0.0	13.42	–24.42	ϕ1117.6 × t 8	25.7	–19.0 –26.3	ϕ812.8 × t 8 ϕ1500 × t 9	95	SS490	153
		2	0.0	13.06	–24.06	ϕ1100 × t 8	24.8	–15.0 –24.4	ϕ500 × t 6 ϕ700 × t 7	75	高張力鋼590	234
		3	0.0	10.38	–21.38	ϕ700 × t 11	24.8	–5.60 –16.0	ϕ500 × t 6 ϕ700 × t 7	80	高張力鋼490	195
–14.5	0.15	1	0.0	13.72	–28.22	ϕ900 × t 14	30.2	–19.1 –32.9	ϕ900 × t 9 ϕ1400 × t 14	85	高張力鋼490	195
		2	0.0	13.44	–27.94	ϕ900 × t 14	30.2	–20.2 –21.2	ϕ400 × t 6 ϕ800 × t 8	85	高張力鋼490	195
		3	0.0	12.30	–26.80	ϕ900 × t 13	30.2	–13.0 –21.8	ϕ400 × t 6 ϕ500 × t 6	85	高張力鋼490	195
	0.20	1	0.0	14.99	–29.49	ϕ1000 × t 16	30.2	–20.4 –31.3	ϕ900 × t 8 ϕ1700 × t 12	75	高張力鋼740	324
		2	0.0	14.09	–28.59	ϕ900 × t 17	30.2	–18.0 –27.2	ϕ500 × t 6 ϕ800 × t 8	75	高張力鋼740	324
		3	0.0	12.95	–27.45	ϕ900 × t 16	30.2	–9.40 –23.5	ϕ500 × t 6 ϕ600 × t 7	75	高張力鋼740	324
	0.25	1	0.0	16.63	–31.13	ϕ1219.2 × t 16	33.3	–22.3 –32.5	ϕ914.4 × t 8 ϕ1900 × t 12	85	高張力鋼740	324
		2	0.0	15.31	–29.81	ϕ1000 × t 19	30.2	–16.4 –31.9	ϕ600 × t 7 ϕ812.8 × t 8	90	高張力鋼690	264
		3	0.0	14.12	–28.62	ϕ1000 × t 18	30.2	–11.5 –25.5	ϕ500 × t 6 ϕ609.6 × t 7	80	高張力鋼740	324
	0.27	1	0.0	17.00	–31.50	ϕ1200 × t 18	34.9	–23.0 –32.5	ϕ914.4 × t 8 ϕ2000 × t 12	85	高張力鋼740	324
		2	0.0	16.10	–30.60	ϕ1100 × t 19	30.2	–17.0 –31.1	ϕ600 × t 7 ϕ900 × t 8	85	高張力鋼740	324
		3	0.0	14.90	–29.40	ϕ1100 × t 18	30.2	–12.6 –26.1	ϕ500 × t 6 ϕ609.6 × t 7	85	高張力鋼740	324
–16.0	0.15	1	0.0	14.54	–30.54	ϕ900 × t 18	32.6	–20.0 –33.6	ϕ1000 × t 10 ϕ1600 × t 16	90	高張力鋼490	195
		2	0.0	14.24	–30.24	ϕ900 × t 18	32.6	–20.6 –20.8	ϕ400 × t 6 ϕ900 × t 9	90	高張力鋼490	195
		3	0.0	13.08	–29.08	ϕ900 × t 17	32.6	–13.9 –20.9	ϕ400 × t 6 ϕ600 × t 6	90	高張力鋼490	195
	0.20	1	0.0	15.79	–31.79	ϕ1000 × t 20	33.3	–20.5 –33.5	ϕ1000 × t 10 ϕ1900 × t 19	90	高張力鋼590	234
		2	0.0	15.29	–31.29	ϕ1000 × t 19	32.6	–19.8 –29.6	ϕ500 × t 6 ϕ800 × t 8	90	高張力鋼590	234
		3	0.0	14.07	–30.07	ϕ1000 × t 18	32.6	–16.0 –23.7	ϕ400 × t 6 ϕ600 × t 6	90	高張力鋼590	234
	0.25	1	0.0	17.60	–33.60	ϕ1200 × t 21	36.7	–22.3 –34.5	ϕ1000 × t 9 ϕ2100 × t 12	90	高張力鋼740	324
		2	0.0	16.66	–32.66	ϕ1100 × t 22	32.6	–18.0 –32.5	ϕ600 × t 7 ϕ900 × t 8	85	高張力鋼740	324
		3	0.0	15.39	–31.39	ϕ1100 × t 21	32.6	–10.6 –24.9	ϕ550 × t 7 ϕ800 × t 8	85	高張力鋼740	324
	0.27	1	0.0	18.40	–34.40	ϕ1300 × t 21	38.7	–22.1 –33.7	ϕ1016 × t 9 ϕ2300 × t 12	90	高張力鋼740	324
		2	0.0	17.60	–33.60	ϕ1219.2 × t 22	32.6	–18.7 –31.9	ϕ700 × t 7 ϕ1000 × t 8	90	高張力鋼740	324
		3	0.0	16.20	–32.20	ϕ1200 × t 21	32.6	–11.3 –25.7	ϕ550 × t 7 ϕ812.8 × t 8	90	高張力鋼740	324

c–2) 控え組杭式矢板式岸壁（水深 –18.0 ～ –20.0 [m]）

水深 [m]	設計震度	地盤種別 case	前面矢板 設置座標*1) [m]	前面矢板 根入れ長 [m]	前面矢板 下端高 [m]	前面矢板 型式	組杭 設置座標*1) [m]	組杭 下端高 [m]	組杭 型式	タイロッド 径φ [mm]	タイロッド 材質	タイロッド 許容応力 [MN/m²]
–18.0	0.15	1	0.0	16.94	–34.94	φ1200 × t 18	35.7	–23.5	φ900 × t 9	90	高張力鋼590	234
								–34.8	φ1700 × t 17			
		2	0.0	16.60	–34.60	φ1200 × t 18	35.7	–20.5	φ500 × t 6	90	高張力鋼590	234
								–32.6	φ700 × t 7			
		3	0.0	15.26	–33.26	φ1200 × t 17	35.7	–18.0	φ400 × t 6	90	高張力鋼590	234
								–30.3	φ400 × t 6			
	0.20	1	0.0	17.79	–35.79	φ1200 × t 22	35.7	–23.4	φ1000 × t 10	85	高張力鋼740	324
								–36.5	φ2000 × t 20			
		2	0.0	17.43	–35.43	φ1200 × t 22	35.7	–15.8	φ800 × t 8	85	高張力鋼740	324
								–25.0	φ1400 × t 14			
		3	0.0	16.08	–34.08	φ1200 × t 21	35.7	–15.4	φ400 × t 6	85	高張力鋼740	324
								–19.8	φ900 × t 9			
	0.27	1	0.0	21.33	–39.33	φ1700 × t 22	43.6	–24.7	φ1100 × t 11	100*2)	高張力鋼740	324
								–38.5	φ2500 × t 25			
		2	0.0	20.92	–38.92	φ1700 × t 22	35.7	–19.9	φ600 × t 6	100*2)	高張力鋼740	324
								–33.5	φ1100 × t 11			
		3	0.0	19.95	–37.95	φ1700 × t 21	35.7	–18.1	φ400 × t 6	100*2)	高張力鋼740	324
								–27.1	φ800 × t 8			
–20.0	0.15	1	0.0	18.83	–38.83	φ1400 × t 20	42.9	–22.7	φ1700 × t 17	85	高張力鋼740	324
								–39.9	φ2100 × t 21			
		2	0.0	18.45	–38.45	φ1400 × t 20	38.8	–15.5	φ600 × t 6	85	高張力鋼740	324
								–31.0	φ1000 × t 10			
		3	0.0	16.99	–36.99	φ1400 × t 19	38.8	–16.0	φ400 × t 6	90	高張力鋼690	264
								–21.7	φ800 × t 6			
	0.20	1	0.0	20.21	–40.21	φ1500 × t 23	47.7	–23.1	φ1800 × t 18	95*2)	高張力鋼740	324
								–41.0	φ2500 × t 25			
		2	0.0	19.81	–39.81	φ1500 × t 23	38.8	–17.7	φ800 × t 8	95*2)	高張力鋼740	324
								–26.0	φ1500 × t 15			
		3	0.0	18.29	–38.29	φ1500 × t 22	38.8	–17.4	φ400 × t 6	90	高張力鋼740	324
								–22.4	φ900 × t 9			
	0.27	1	0.0	23.93	–43.93	φ2000 × t 25	56.4	–24.5	φ1800 × t 18	110*2)	高張力鋼740	324
								–52.6	φ2500 × t 25			
		2	0.0	23.46	–43.46	φ2000 × t 25	38.8	–19.7	φ600 × t 6	110*2)	高張力鋼740	324
								–31.7	φ1400 × t 14			
		3	0.0	21.52	–41.52	φ2000 × t 23	38.8	–18.2	φ500 × t 6	105*2)	高張力鋼740	324
								–31.2	φ800 × t 8			

※ 控え組杭の傾斜角は，何れのケースにおいても，海側及び陸側に鉛直方向からそれぞれ 20[°]

*1) 「設置座標」とは，前面矢板の設置地点を原点とし，陸側に水平に正の向きを取った座標系において，該当する部材が設置された座標を意味する．「組杭」の設置座標は，杭頭部が設置された座標を表す．

*2) 高張力鋼 740 のタイロッドはϕ90 以下の径の規格しか現時点では存在しないが，数値計算上それより大きな径を設定した

表-2.3　モデル断面の地盤物性

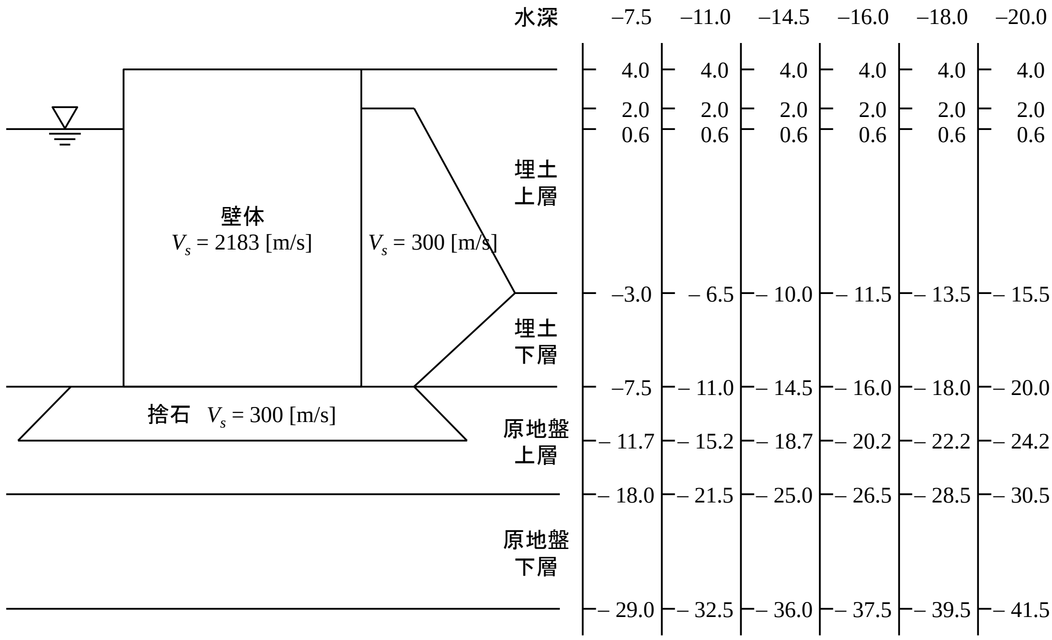
地盤種別	土層区分		湿潤密度 [Mg/m³]	基準有効拘束圧 [kN/m²]	基準初期せん断剛性 [MN/m²]	基準初期体積弾性率 [MN/m²]	粘着力 [kN/m²]	内部摩擦角 [°]	最大減衰	S波速度 [m/s]
case1	埋土	上層（水面上）	1.8	89.8	25.9	67.595	0	37	0.24	120
		上層（水面下）	2.0							
		下層								
	原地盤	上層	2.0	239.8	45.0	117.353	0	38	0.24	150
		下層								
case2	埋土	上層（水面上）	1.8	89.8	58.3	152.089	0	38	0.24	180
		上層（水面下）	2.0							
		下層								
	原地盤	上層	2.0	198.5	72.2	188.286	0	38	0.24	190
		下層		279.2	125.0	325.980		39		250
case3	埋土	上層（水面上）	1.8	72.9	79.4	207.011	0	38	0.24	210
		上層（水面下）	2.0							
		下層		142.3	125.0	325.980		39		250
	原地盤	上層	2.0	198.5	156.8	408.910	0	39	0.24	280
		下層		279.2	405.0	1056.176		44		450
共通材料	基礎捨石		2.0	98.0	180.0	469.412	0	40	0.24	300
	裏込石									

式(2.3)で表される最適化問題を解くために数値計算を行ったところ非常に収束性が悪かったため，本研究では係数 c_0 にH19照査用震度式で用いられている0.34を採用し，係数 c_1 のみを式(2.4)で表される無制約最適化問題を解いて算出した．

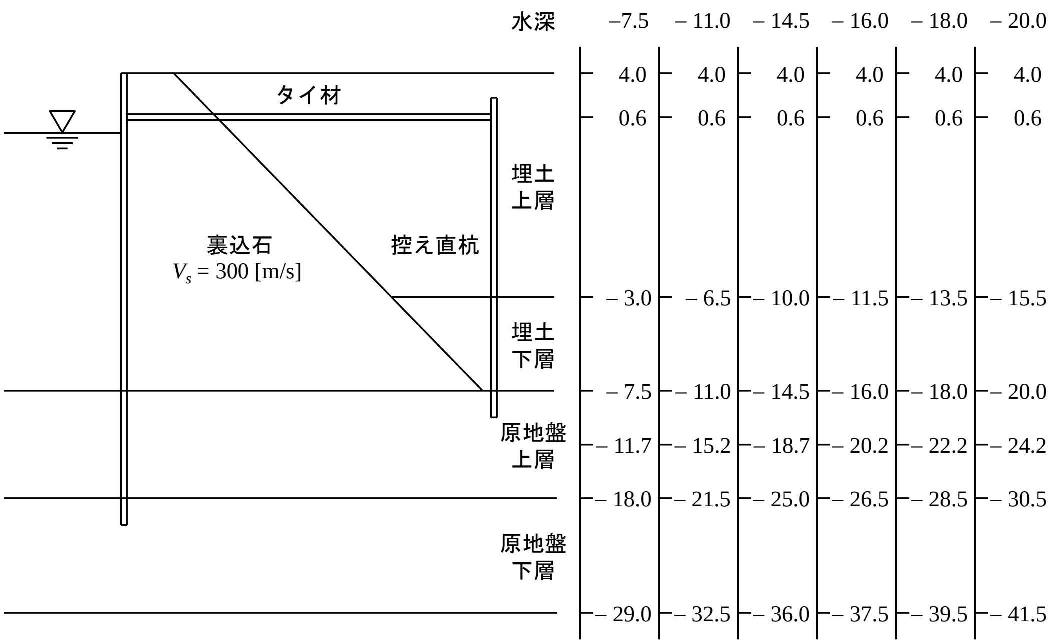
$$\underset{c_1 \in \mathbb{R}}{\text{Minimize}} \quad \sum_{k \in I} \left| h_k - \left| \frac{b\left(H_k, T_{bk}, T_{uk}\right)}{1 - g\left(f_k\right)^2 + c_1 j g\left(f_k\right)} \right| \right|^2 \qquad (2.4)$$

ここに

g　：周波数の関数; $g\left(f\right) = 0.34\left(f - f_c\right)$



a) 重力式岸壁



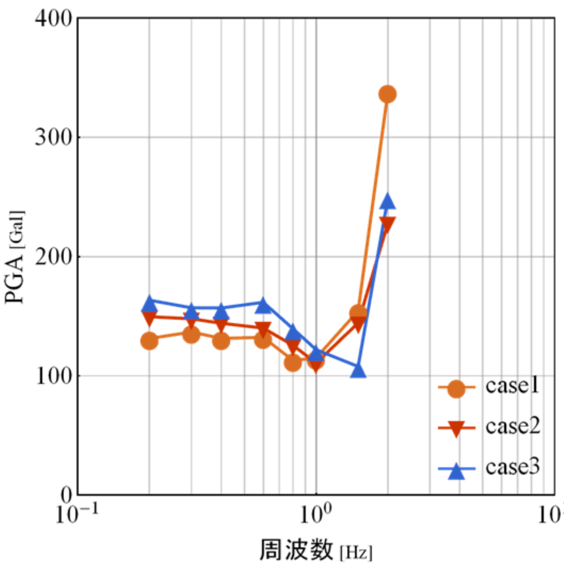
b) 控え直杭式矢板式岸壁

※ 単位が表示されていない数値の単位は m

図-2.2　モデル断面の概略図

図-2.3 に示すとおり，1.0 [Hz]以上の周波数の入力地震波を用いた場合，20 [cm]の岸壁天端の残留水平変位を発生させるのに必要なPGAは，どの構造形式においても急激に増大するため，構造物の変形に効く加速度波は1.0 [Hz]以下の周波数成分のみとみなし，地表面の応答加速度波の離散フーリエ変換に対し 1.0 [Hz]以上で振幅を大きく低減するフィルターを掛けることで，最終的に算出される震度が過大評価となることを防いでいる．

本研究では，コーナー周波数を1.0 [Hz]の他，1.4，1.6，1.8 [Hz]に設定した場合についても検討しているが，これは，1.0 [Hz]以上で岸壁天端の残留水平変位を20 [cm]発生させるのに必要な入力地震動の振幅が急激に増大するという上記の性質が，使用した2D FLILPの特性である可能性を懸念して，その性質を示す周波数の境界がより高周波であった場合を仮定し，その仮説の適否を被災検証により確認するためである．また，コーナー周波数を1.8 [Hz]までとしたのは，2.1の①に示したとおり，単一周波数の入力加速度波による地震応答解析は，どの構造形式においても入力加速度波の周波数が2.0 [Hz]以下の場合でしか行っておらず，2.0 [Hz]以上でコーナー周波数を設定して式(2.4)で表される無制約最適化問題を解いても，コーナー周波数以上で振幅を大きく低減するフィルターを表現できないためである．また，控え組杭式矢板式岸壁についてのみ，b 値算出時の周波数が1.0 [Hz]かつコーナー周波数が1.8 [Hz]のケースにおいて，c_1 を回帰分析で算出する際に数値が収束しなかったため，検討対象から省いた．



※ case 1，2，3 の順に，地盤の固有周期は短くなる

図-2.3 岸壁天端の残留水平変位が 20 [cm]の時の周波数と PGA の関係

（重力式岸壁: 設計震度 0.10，水深 –7.5 [m]の場合）

④ 9種類の地震動の入力加速度波に対する a_f の算出

文献[3]の照査用震度式の定式化において使用された9種類の地震動と同じものを使用し，それらを工学的基盤における入力波として，2D FLIP解析による地震応答計算を行い，岸壁天端の残留水平変位が20 [cm]となる時の入力地震波の振幅をそれぞれ算出する．そしてその振幅になるよう振幅を調整した上記の9種類の地震動の加速度波を工学的基盤に入力し，1D FLIP解析により地表面での地盤の応答加速度波を求め，③で求めたフィルターを適用し，その絶対値最大値 α_f を算出する．計算ケース数は，2D FLIP解析，1D FLIP解析のいずれにおいても，構造形式を問わず，162ケース（= 入力加速度波 9種類 × 設計震度と水深の組合せ 6種類 × 地盤物性 3種類）となる．

⑤ p 値［低減率］の算出と p 値の回帰方程式の定式化，地震動の継続時間を考慮した α_c の算出

表-2.1の設計震度と水深の組合せを有するモデル断面を対象に，p 値（④で算出した α_f を重力加速度で除して震度に換算したものに対するモデル断面の設計震度の比）を算出し，それを被説明変数として，p 値を算出した際の9種類の地震動の*SRSS*（地表面でのフィルタリング後の離散応答加速度波の2乗和平方根），④で算出した α_f を説明変数として，回帰分析により，式(2.5)で表される回帰方程式を求める．

$$p = c_3 \ln \frac{SRSS}{\alpha_f} + c_4$$

ただし (2.5)

$$p \le 1.0$$

$$\alpha_c = p\,\alpha_f \qquad (2.6)$$

ここに

p ：低減率

SRSS ：フィルタリング後の地表面での離散加速度波の2乗和平方根 [Gal]（ただし，サンプリング周期は0.01 [s]とする）

α_f ：フィルタリング後の地表面での応答加速度波の絶対値最大値 [Gal]

α_c ：α_f に p 値を乗じた地盤の加速度 [Gal]

c_3, c_4 ：回帰係数（$\in \mathbb{R}$）

⑥ 照査用震度の回帰方程式の定式化

④と同様，9種類の地震動を工学的基盤における入力波として，**表-2.4**の設計震度と水深の組合せを有するモデル断面を対象に2D FLIP解析による地震応答計算を行い，今度は岸壁天端の残留水平変位が5，10，15，20 [cm]と

なる時の入力地震波の振幅をそれぞれ算出する．そして，その振幅となるように振幅を調整した上記の9種類の地震動の加速度波を工学的基盤に入力し，1D FLIP解析により地表面での地盤の応答加速度波を求め，α_f を算出し，さらに低減率 p を乗じて α_c を算出する．そのデータを基に，照査用震度の回帰方程式の定式化に当たり，文献[3)]の手法に倣い，回帰分析を2段階に分けて行う．

まず第1段階の回帰分析として，**表-2.4**の設計震度と水深の組合せを有するモデル断面を対象に，モデル断面の設計震度を被説明変数，α_c を重力加速度で除したものを説明変数として，回帰分析により，式(2.7)で表される回帰方程式を求める．ただし，解析ケースの内，**表-2.4**に●で示す設計震度と水深の組合せのケースについては，

表-2.4　解析フロー（**図-2.1**）の⑥の計算に用いたモデル断面の設計震度と水深

a) 重力式岸壁

		水深 h [m]					
		–7.5	–11.0	–14.5	–16.0	–18.0	–20.0
設計震度 k_h	0.10	●	●	●	○	○	○
	0.15	●	●	●			
	0.20	●	●	●	○	○	○
	0.25		●	●	●		
	0.27		●	●	●	○	○

b) 控え直杭式矢板式岸壁

		水深 h [m]					
		–7.5	–11.0	–14.5	–16.0	–18.0	–20.0
設計震度 k_h	0.10	●	●	○	○	○	○
	0.15	●	●				
	0.20		●	●	○	○	○
	0.25			●	●		
	0.27				○	○	○

c) 控え組杭式矢板式岸壁

		水深 h [m]					
		–7.5	–11.0	–14.5	–16.0	–18.0	–20.0
設計震度 k_h	0.10						
	0.15	●	●	○	○	○	○
	0.20		●	●	○	○	○
	0.25			●	●		
	0.27			●	●	○	○

※ ●: 文献[3)]において計算されたケース
○: 本研究において計算したケース

文献[3)]でH19照査用震度式を定式化するに当たり用いた計算結果をそのまま用いているため，今回新たに計算を行ったのは○で示したケースのみとなる．文献[3)]の手法に倣い，第1段階の回帰分析では岸壁天端の残留水平変位が10 [cm]の場合の結果のみを用いる．また，ここで算出した c_5 は，回帰分析によって c_6 を算出するために便宜上算出しただけであり，以後の計算では使用しない．

$$k_h = \left[\frac{\alpha_c}{g}, 1\right]\left[c_5, c_6\right]^T \tag{2.7}$$

ここに

k_h　：設計震度
α_c　：α_f に p 値を乗じた地盤の加速度 [Gal]
g　：重力加速度（= 981） [Gal]
c_5, c_6　：回帰係数（$\in \mathbb{R}$）

次に第2段階の回帰分析として，第1段階では10 [cm]の場合の結果しか用いていなかったところ，文献[3)]の手法に倣い，岸壁天端の残留水平変位が5，10，15，20 [cm]の場合の2D FLIP解析による計算結果を全て用いる．式(2.7)の方程式の変形により，設計震度と α_c の関数として表した α_c / g の係数を被説明変数，岸壁天端の残留水平変位を説明変数として，式(2.8)で表される回帰方程式を求める．

$$\left(k_h - c_6\right)\left(\frac{\alpha_c}{g}\right)^{-1} = c_7\left(\frac{D_{\mathrm{resid}}}{D_r}\right)^{c_8} \tag{2.8}$$

ここに

D_{resid}　：岸壁天端の残留水平変位 [cm]
D_r　：岸壁天端の変形量許容値の基準値（= 10）[cm]
c_6　：式(2.7)で算出した回帰係数
c_7, c_8　：回帰係数（$\in \mathbb{R}$）

2段階の回帰分析を経て算出した回帰係数を用いて，照査用震度式を次の式で表す．

$$k_h = c_7\left(\frac{D_a}{D_r}\right)^{c_8}\frac{\alpha_c}{g} + c_6 \tag{2.9}$$

ここに

k_h　：照査用震度
D_a　：岸壁天端の変形量許容値 [cm]
c_6　：式(2.7)で算出した回帰係数（$\in \mathbb{R}$）
c_7, c_8　：式(2.8)で算出した回帰係数（$\in \mathbb{R}$）

2.2 得られた各種回帰方程式とそれに対応する被災検証結果

図-2.1の解析フローに従い，b 値算出時の周波数やコーナー周波数の異なりに応じて定式化した，フィルター関数，p 値の関数，照査用震度式に現れる各係数を**表-2.5**に示す．**表-2.5**には，参考までに，現行基準で用いられている各係数も記しておく．

ここで，被災検証法の流れについて概説する．被災検証法は，2段階の被災判定により構成され，第1段階では個別の構造物を，第2段階では同一構造形式の構造物全体を対象にしている．

(1) 個別の構造物を対象にした被災判定（第1段階）

a) 設計計算上の被災判定

① 対象構造物が過去経験した地震動を推定し，それを基に照査用震度式を通じて算出した震度を作用震度とする．

② 対象構造物に静的な水平力を作用させ，その力を段階的に大きくしていき，ある破壊モードが初めて生じた時，すなわち作用に対する耐力の比で定義される安全率が1.0を切った時の作用を重力加速度で除して震度に換算したものを限界震度とする．

③ ①，②でそれぞれ算出した作用震度，限界震度の大小を比較し，作用震度 > 限界震度であれば被災，作用震度≦限界震度であれば無被災と判定する．

b) 実被害による被災判定

地震被害調査等で得られた対象構造物の変位の実測値と構造物の構造形式ごとに設定されている標準的な変形量許容値の大小を比較し，変位の実測値>変形量許容値の標準値であれば被災，変位の実測値≦変形量許容値の標準値であれば無被災と判定する．

c) 設計計算上の被災判定と実被害による被災判定の比較

a) 設計計算上の被災判定と b) 実被害による被災判定が一致する，すなわち a) で被災，b) でも被災，あるいは a) で無被災，b) でも無被災と判定された場合は，「合致」と判定する．次に，a) で無被災，b) で被災と判定された場合は，実被害による判定では被災となったにもかかわらず，設計計算上は無被災という判定だった場合で，作用震度を過小評価している可能性があることから「危険」と判定する．最後に，a) で被災，b) で無被災と判定された場合は，実被害による判定では無被災となったにもかかわらず，設計計算上は被災という判定だった場合で，作用震度を過大評価している可能性があることから「安全」と判定する．

(2) 同一構造形式の構造物全体を対象にした被災判定（第2段階）

① 同一構造形式別に，全構造物数に対して，第1段階の被災判定で合致，危険，安全とそれぞれ判定された構造物数の割合として定義される，合致率，危険判定率，安全判定率（以後，これらをまとめて被災判定率と呼称する）を計算する．

② 合致率が高く，危険判定率が低ければ被災検証結果は良好であり，作用震度の算出に用いられた震度算定式は被災検証の観点から妥当であるという評価になり，合致率が低く，危険判定率が高ければ被災検証結果は良好ではなく，震度算定式は被災検証の観点から妥当ではないという評価になる．

本節で算出した照査用震度式に対し行った被災検証結果を**図-2.4**に示す．被災検証の実施に当たり，対象施設のデータや作用震度の算出に必要な地震動のデータは，文献 1)の被災検証に使用したデータと全く同じものを用いた．**図-2.4**は，構造形式ごとに，b 値算出時の周波数別，コーナー周波数別に縦軸に被災検証結果による被災判定率を，横軸に変形量許容値を取った折れ線グラフである．a) 重力式岸壁については，現行基準で示されている変形量許容値の標準値の 10 [cm]において，b 値算出時の周波数，コーナー周波数によらず，合致率が 90 [%]前後と高く，危険判定率が約 10 [%]前後と低くなり，H19 照査用震度式と同様，被災検証結果は良好という結果を得た．一方，b) 控え直杭式矢板式岸壁及び c) 控え組杭式矢板式岸壁については，現行基準で示されている変形量許容値の標準値の 15 [cm]において，b 値算出時の周波数，コーナー周波数によらず，控え直杭式矢板式岸壁では合致率が 50 [%]以下と低く，危険判定率が約 30 [%]前後と高くなり，控え組杭式矢板式岸壁では，f_b : 1.0 [Hz]のケースを除き，合致率が約 40 [%]と低く，危険判定率が約 60 [%]と高くなり，H19 照査用震度式と同様，被災検証結果は良好ではないという結果となった．控え直杭式矢板式の f_c : 1.0 [Hz]のケースについては，b 値の回帰方程式の観点上問題があり本研究の検討対象から最終的に省いているが，その理由については第 5 章で詳述する．

表-2.5　b 値の関数，フィルター関数，p 値の関数，照査用震度式の回帰係数

a) 重力式岸壁

構造形式	b 値算出時の周波数 f_b [Hz]	コーナー周波数 f_c [Hz]	item	b 値の関数 c_2^T	ﾌｨﾙﾀｰ関数 c_1	p 値の関数 c_3	c_4	照査用震度式 c_6	c_7	c_8
重力式岸壁	0.8	1.0	回帰係数	[1.05, –0.88, 0.96, –0.23]	6.8	0.36	–0.29	0.04	1.78	–0.55
	0.8	1.0	回帰係数	[1.21, –1.32, 1.37, –0.397]	8.92	0.356	–0.246	–0.0130	2.26	–0.587
			データ数	18	36	162		621	2484	
			標準誤差	[0.139, 0.281, 0.265, 0.143]	0.568	0.0357	0.0905	7.23×10^{-3}	0.0113	8.96×10^{-3}
			t 値	[8.74, –4.70, 5.17, –2.78]	15.7	9.99	–2.71	–1.80	201	–65.5
			P 値	[4.80×10^{-7}, 3.39×10^{-4}, 1.42×10^{-4}, 0.0149]	2.02×10^{-17}	1.44×10^{-18}	0.0738	0.0723	2.17×10^{-1538}	3.73×10^{-543}
			自由度調整済決定係数	0.922	0.920	0.977		0.572	0.950	
		1.4	回帰係数	[1.21, –1.32, 1.37, –0.397]	38.7	0.335	–0.200	8.55×10^{-3}	2.02	–0.602
			データ数	18	36	162		621	2484	
			標準誤差	[0.139, 0.281, 0.265, 0.143]	4.74	0.0442	0.112	7.20×10^{-3}	0.0123	0.0110
			t 値	[8.74, –4.70, 5.17, –2.78]	8.16	7.58	–1.78	1.19	164	–55.0
			P 値	[4.80×10^{-7}, 3.39×10^{-4}, 1.42×10^{-4}, 0.0149]	1.30×10^{-9}	2.66×10^{-12}	0.0767	0.235	1.18×10^{-1334}	8.99×10^{-432}
			自由度調整済決定係数	0.922	0.799	0.973		0.520	0.927	
		1.6	回帰係数	[1.21, -1.32, 1.37, –0.397]	20.1	0.329	–0.224	3.85×10^{-3}	2.07	–0.581
			データ数	18	18	162		621	2484	
			標準誤差	[0.139, 0.281, 0.265, 0.143]	1.00	0.0393	0.102	7.37×10^{-3}	0.0120	0.0104
			t 値	[8.74, -4.70, 5.17, –2.78]	20.0	8.38	–2.19	0.522	173	–55.8
			P 値	[4.80×10^{-7}, 3.39×10^{-4}, 1.42×10^{-4}, 0.0149]	2.92×10^{-13}	2.51×10^{-14}	0.0297	0.602	1.42×10^{-1387}	7.47×10^{-441}
			自由度調整済決定係数	0.922	0.966	0.975		0.520	0.933	
		1.8	回帰係数	[1.21, –1.32, 1.37, –0.397]	40.1	0.321	–0.218	$–1.88\times10^{-3}$	2.14	–0.577
			データ数	18	18	162		621	2484	
			標準誤差	[0.139, 0.281, 0.265, 0.143]	2.01	0.0355	0.0923	7.41×10^{-3}	0.0118	9.97×10^{-3}
			t 値	[8.74, –4.70, 5.17, –2.78]	–20.0	9.04	–2.36	–0.254	181	–57.8
			P 値	[4.80×10^{-7}, 3.39×10^{-4}, 1.42×10^{-4}, 0.0149]	3.10×10^{-13}	4.99×10^{-16}	0.0194	0.800	2.47×10^{-1432}	3.69×10^{-462}
			自由度調整済決定係数	0.922	0.966	0.975		0.532	0.938	
	1.0	1.0	回帰係数	[1.09, –1.55, 1.17, 0.168]	8.47	0.392	-0.329	0.0354	1.70	–0.595
			データ数	18	36	162		621	2484	
			標準誤差	[0.132, 0.268, 0.252, 0.136]	0.447	0.0400	0.102	7.59×10^{-3}	0.0140	0.0148
			t 値	[8.20, –5.76, 4.65, 1.23]	18.9	9.81	–3.24	4.67	122	–40.2
			P 値	[1.02×10^{-6}, 4.91×10^{-5}, 3.75×10^{-4}, 0.237]	5.66×10^{-20}	4.45×10^{-18}	1.48×10^{-3}	3.76×10^{-6}	1.59×10^{-1047}	1.50×10^{-272}
			自由度調整済決定係数	0.900	0.946	0.972		0.415	0.874	
		1.4	回帰係数	[1.09, –1.55, 1.17, 0.168]	35.9	0.389	–0.325	0.0512	1.52	-0.612
			データ数	18	36	162		621	2484	
			標準誤差	[0.132, 0.268, 0.252, 0.136]	4.22	0.0509	0.129	7.35×10^{-3}	0.0147	0.0173
			t 値	[8.20, –5.76, 4.65, 1.23]	8.51	7.64	–2.52	6.96	104	–35.3
			P 値	[1.02×10^{-6}, 4.91×10^{-5}, 3.75×10^{-4}, 0.237]	4.83×10^{-10}	1.90×10^{-12}	0.0128	8.47×10^{-12}	2.46×10^{-905}	6.34×10^{-222}
			自由度調整済決定係数	0.900	0.825	0.966		0.380	0.836	
		1.6	回帰係数	[1.09, –1.55, 1.17, 0.168]	19.3	0.350	–0.267	0.0523	1.51	–0.591
			データ数	18	18	162		621	2484	
			標準誤差	[0.132, 0.268, 0.252, 0.136]	0.597	0.0475	0.124	7.53×10^{-3}	0.0146	0.0175
			t 値	[8.20, –5.76, 4.65, 1.23]	32.3	7.37	–2.16	6.95	103	–33.8
			P 値	[1.02×10^{-6}, 4.91×10^{-5}, 3.75×10^{-4}, 0.237]	1.04×10^{-16}	8.78×10^{-12}	0.0323	9.46×10^{-12}	9.73×10^{-900}	2.05×10^{-206}
			自由度調整済決定係数	0.900	0.987	0.965		0.365	0.832	
		1.8	回帰係数	[1.09, –1.55, 1.17, 0.168]	38.5	0.351	–0.283	0.0523	1.51	–0.587
			データ数	18	18	162		621	2484	
			標準誤差	[0.132, 0.268, 0.252, 0.136]	1.20	0.0438	0.114	7.57×10^{-3}	0.0146	0.0175
			t 値	[8.20, –5.76, 4.65, 1.23]	–32.2	8.01	–2.49	6.91	103	–33.6
			P 値	[1.02×10^{-6}, 4.91×10^{-5}, 3.75×10^{-4}, 0.237]	1.12	2.23×10^{-10}	0.0139	1.22×10^{-11}	4.01×10^{-900}	2.36×10^{-204}
			自由度調整済決定係数	0.900	0.987	0.964		0.362	0.832	

※ 背景色が灰色のセルの数値は現行基準のもの．

b) 控え直杭式矢板式岸壁

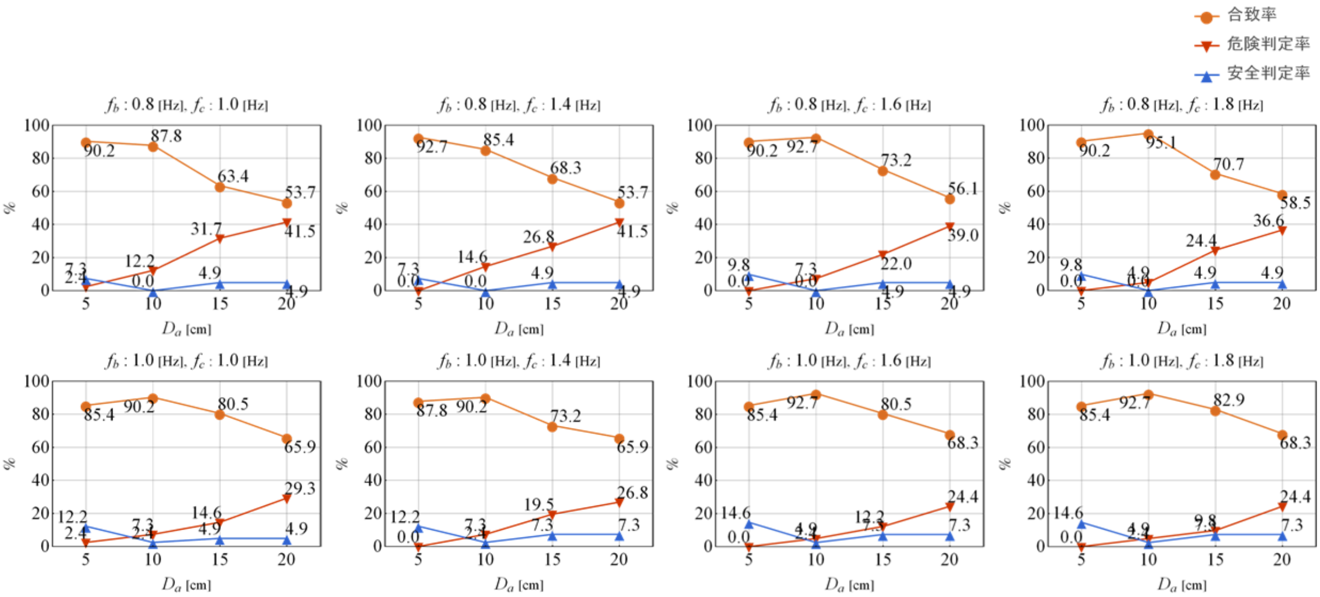
構造形式	b 値算出時の周波数 f_b [Hz]	コーナー周波数 f_c [Hz]	item	b 値の関数	フィルター関数	p 値の関数		照査用震度式		
				$\boldsymbol{c}_2^T$	c_1	c_3	c_4	c_6	c_7	c_8
控え直杭式矢板式岸壁	0.8	1.0	回帰係数	[2.25, –0.88, 0.96, –0.96]	11	0.36	–0.2	0.03	1.91	–0.69
	0.8	1.0	回帰係数	[3.80, –4.85, 4.03, –1.78]	15.2	0.411	–0.421	0.0181	2.10	–0.740
			データ数	18	36	162		486	1944	
			標準誤差	[0.389, 0.788, 0.742, 0.401]	0.652	0.0374	0.930	9.76×10^{-3}	0.0202	0.0168
			t 値	[9.76, –6.15, 5.43, –4.44]	23.3	10.9	–4.61	1.87	107	–44.0
			P 値	$[1.26\times10^{-7}, 2.52\times10^{-5}, 8.94\times10^{-5}, 5.61\times10^{-4}]$	6.72×10^{-23}	4.65×10^{-21}	8.12×10^{-6}	0.0622	7.59×10^{-815}	4.99×10^{-294}
			自由度調整済決定係数	0.921	0.949	0.966		0.370	0.884	
		1.4	回帰係数	[3.80, –4.85, 4.03, –1.78]	74.4	0.414	–0.478	0.0321	1.96	–0.745
			データ数	18	36	162		486	1944	
			標準誤差	[0.389, 0.788, 0.742, 0.401]	7.57	0.0471	0.118	9.59×10^{-3}	0.0209	0.0192
			t 値	[9.76, –6.15, 5.43, –4.44]	9.83	8.80	–4.03	3.35	93.6	–38.8
			P 値	$[1.26\times10^{-7}, 2.52\times10^{-5}, 8.94\times10^{-5}, 5.61\times10^{-4}]$	1.32×10^{-11}	2.06×10^{-15}	8.45×10^{-5}	8.66×10^{-4}	4.87×10^{-722}	1.32×10^{-244}
			自由度調整済決定係数	0.921	0.774	0.959		0.337	0.854	
		1.6	回帰係数	[3.80, –4.85, 4.03, –1.78]	29.2	0.373	–0.415	0.0382	1.86	–0.731
			データ数	18	18	162		486	1944	
			標準誤差	[0.389, 0.788, 0.742, 0.401]	0.897	0.0460	0.118	9.46×10^{-3}	0.0206	0.0200
			t 値	[9.76, –6.15, 5.43, –4.44]	32.5	8.10	–3.51	4.04	90.1	–36.6
			P 値	$[1.26\times10^{-7}, 2.52\times10^{-5}, 8.94\times10^{-5}, 5.61\times10^{-4}]$	9.40×10^{-17}	1.30×10^{-13}	5.81×10^{-4}	6.31×10^{-5}	3.04×10^{-696}	2.69×10^{-223}
			自由度調整済決定係数	0.921	0.985	0.956		0.325	0.843	
		1.8	回帰係数	[3.80, –4.85, 4.03, –1.78]	58.3	0.363	–0.414	0.0361	1.89	–0.725
			データ数	18	18	162		486	1944	
			標準誤差	[0.389, 0.788, 0.742, 0.401]	1.80	0.0397	0.102	9.44×10^{-3}	0.0207	0.0197
			t 値	[9.76, –6.15, 5.43, –4.44]	32.5	9.11	–4.07	3.83	91.3	–36.7
			P 値	$[1.26\times10^{-7}, 2.52\times10^{-5}, 8.94\times10^{-5}, 5.61\times10^{-4}]$	9.68×10^{-17}	3.23×10^{-16}	7.35×10^{-5}	1.46×10^{-4}	7.99×10^{-705}	8.16×10^{-225}
			自由度調整済決定係数	0.921	0.985	0.952		0.332	0.845	
	1.0	1.0	回帰係数	[0.404, –0.614, 0.115, 1.29]	12.5	0.452	–0.479	–0.0544	3.24	–0.732
			データ数	18	36	162		486	1944	
			標準誤差	[0.362, 0.733, 0.690, 0.373]	0.460	0.0280	0.0698	0.0118	0.0192	0.0107
			t 値	[1.12, –0.838, 0.167, 3.45]	27.2	16.1	–6.85	–4.59	169	–68.7
			P 値	$[0.283, 0.416, 0.870, 3.92\times10^{-3}]$	3.80×10^{-25}	2.64×10^{-35}	1.49×10^{-10}	5.62×10^{-6}	1.27×10^{-1162}	5.19×10^{-522}
			自由度調整済決定係数	0.532	0.965	0.984		0.451	0.950	
		1.4	回帰係数	[0.404, –0.614, 0.115, 1.29]	60.3	0.451	–0.504	–0.0309	2.90	–0.739
			データ数	18	36	162		486	1944	
			標準誤差	[0.362, 0.733, 0.690, 0.373]	6.16	0.0383	0.0964	0.0117	0.0203	0.0126
			t 値	[1.12, –0.838, 0.167, 3.45]	9.78	11.8	–5.22	–2.63	143	–58.9
			P 値	$[0.283, 0.416, 0.870, 3.92\times10^{-3}]$	1.51×10^{-11}	1.95×10^{-23}	5.36×10^{-7}	8.70×10^{-3}	5.61×10^{-1034}	4.18×10^{-434}
			自由度調整済決定係数	0.532	0.792	0.978		0.405	0.932	
		1.6	回帰係数	[0.404, –0.614, 0.115, 1.29]	24.6	0.426	–0.489	–0.0208	2.74	–0.723
			データ数	18	18	162		486	1944	
			標準誤差	[0.362, 0.733, 0.690, 0.373]	0.749	0.0396	0.101	0.0116	0.0198	0.0130
			t 値	[1.12, –0.838, 0.167, 3.45]	32.8	10.8	–4.80	–1.80	138	–55.5
			P 値	$[0.283, 0.416, 0.870, 3.92\times10^{-3}]$	8.21×10^{-17}	1.22×10^{-20}	3.69×10^{-6}	0.0725	1.20×10^{-1007}	2.98×10^{-403}
			自由度調整済決定係数	0.532	0.986	0.973		0.389	0.926	
		1.8	回帰係数	[0.404, –0.614, 0.115, 1.29]	49.1	0.404	–0.452	–0.0179	2.69	–0.720
			データ数	18	18	162		486	1944	
			標準誤差	[0.362, 0.733, 0.690, 0.373]	1.5	0.0366	0.0943	0.0115	0.0198	0.0132
			t 値	[1.12, –0.838, 0.167, 3.45]	32.7	11.0	–4.79	–1.56	136	–54.3
			P 値	$[0.283, 0.416, 0.870, 3.92\times10^{-3}]$	8.55×10^{-17}	1.92×10^{-21}	3.70×10^{-6}	0.0120	2.89×10^{-995}	6.26×10^{-392}
			自由度調整済決定係数	0.532	0.986	0.971		0.384	0.924	

※ 背景色が灰色のセルの数値は現行基準のもの.

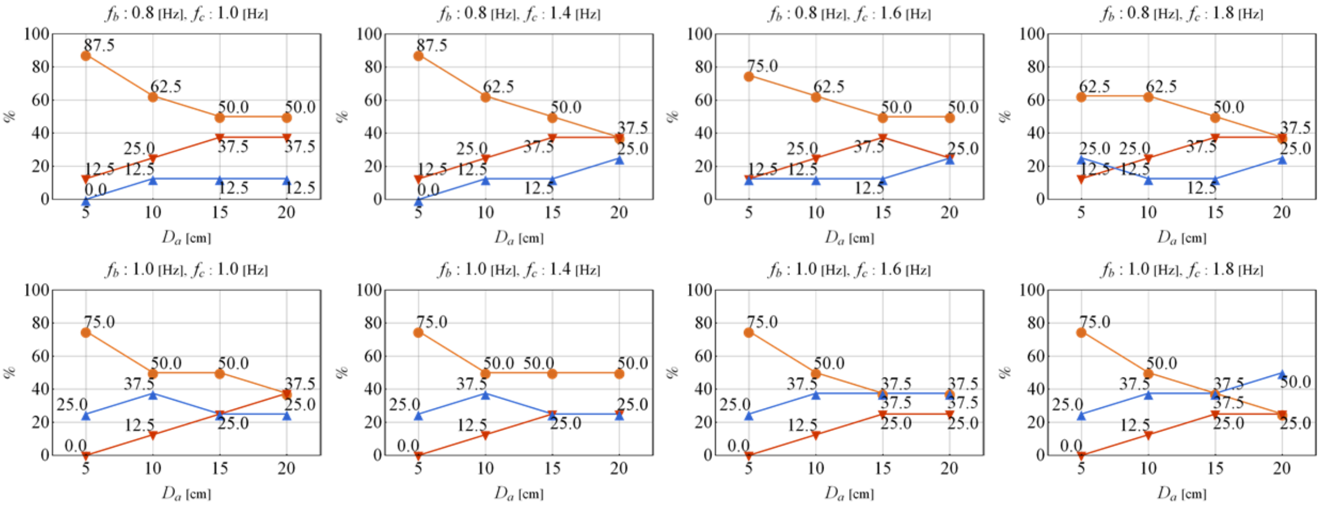
c) 控え組杭式矢板式岸壁

構造形式	b 値算出時の周波数 f_b [Hz]	コーナー周波数 f_c [Hz]	item	b 値の関数	ﾌｨﾙﾀｰ関数	p 値の関数		照査用震度式		
				$\boldsymbol{c}_2^T$	c_1	c_3	c_4	c_6	c_7	c_8
控え組杭式矢板式岸壁	0.8	1.0	回帰係数	[2.25, –0.88, 0.96, –0.76]	11	0.31	–0.1	0.05	1.32	–0.74
	0.8	1.0	回帰係数	[4.01, –5.57, 3.90, –1.01]	14.6	0.431	–0.473	0.130	0.788	–0.829
			データ数	18	36	162		459	1836	
			標準誤差	[0.463, 0.937, 0.882, 0.477]	0.592	0.0358	0.0900	0.0130	0.0141	0.0316
			t 値	[8.66, –5.95, 4.42, –2.12]	24.7	12.0	–5.25	9.96	55.8	–26.3
			P 値	[5.35×10^{-7}, 3.57×10^{-5}, 5.83×10^{-4}, 0.0520]	9.70×10^{-24}	3.57×10^{-24}	4.72×10^{-7}	2.70×10^{-21}	1.25×10^{-397}	1.67×10^{-129}
			自由度調整済決定係数	0.928	0.955	0.971		0.0679	0.710	
		1.4	回帰係数	[4.01, –5.57, 3.90, –1.01]	71.6	0.423	–0.487	0.142	0.658	–0.834
			データ数	18	36	162		459	1836	
			標準誤差	[0.463, 0.937, 0.882, 0.477]	7.28	0.0469	0.119	0.0121	0.0143	0.0384
			t 値	[8.66, –5.95, 4.42, –2.12]	9.82	9.02	–4.10	11.7	45.9	–21.8
			P 値	[5.35×10^{-7}, 3.57×10^{-5}, 5.83×10^{-4}, 0.0520]	1.35×10^{-11}	5.43×10^{-16}	6.65×10^{-5}	5.31×10^{-28}	1.07×10^{-306}	1.67×10^{-93}
			自由度調整済決定係数	0.928	0.777	0.962		0.0561	0.625	
		1.6	回帰係数	[4.01, –5.57, 3.90, –1.01]	28.0	0.382	–0.421	0.146	0.607	–0.817
			データ数	18	18	162		459	1836	
			標準誤差	[0.463, 0.937, 0.882, 0.477]	0.936	0.0476	0.124	0.0115	0.0140	0.0407
			t 値	[8.66, –5.95, 4.42, –2.12]	29.9	8.01	–3.40	12.6	43.3	–20.1
			P 値	[5.35×10^{-7}, 3.57×10^{-5}, 5.83×10^{-4}, 0.0520]	3.90×10^{-16}	2.26×10^{-13}	8.37×10^{-4}	1.32×10^{-31}	9.22×10^{-283}	5.12×10^{-81}
			自由度調整済決定係数	0.928	0.983	0.958		0.0542	0.593	
		1.8	回帰係数	[4.01, –5.57, 3.90, –1.01]	55.9	0.354	–0.373	0.144	0.623	–0.810
			データ数	18	18	162		459	1836	
			標準誤差	[0.463, 0.937, 0.882, 0.477]	1.87	0.0416	0.107	0.0116	0.0139	0.0395
			t 値	[8.66, –5.95, 4.42, –2.12]	29.8	8.50	–3.48	12.4	44.7	-20.5
			P 値	[5.35×10^{-7}, 3.57×10^{-5}, 5.83×10^{-4}, 0.0520]	4.03×10^{-16}	1.28×10^{-14}	6.36×10^{-4}	1.26×10^{-30}	4.82×10^{-296}	1.81×10^{-84}
			自由度調整済決定係数	0.928	0.983	0.955		0.0565	0.606	
	1.0	1.0	回帰係数	[–0.476, 1.51, –2.59, 3.01]	11.8	0.476	–0.496	0.136	0.723	–0.822
			データ数	18	36	162		459	1836	
			標準誤差	[0.693, 1.40, 1.32, 0.714]	0.560	0.0434	0.109	0.0147	0.0141	0.0343
			t 値	[–0.687, 1.08, –1.96, 4.21]	21.0	11.0	–4.53	9.24	51.4	–24.0
			P 値	[0.503, 0.299, 0.0699, 8.69×10^{-4}]	2.06×10^{-21}	3.07×10^{-21}	1.16×10^{-5}	9.42×10^{-19}	4.36×10^{-358}	8.55×10^{-111}
			自由度調整済決定係数	0.685	0.944	0.969		0.0439	0.674	
		1.4	回帰係数	[–0.476, 1.51, –2.59, 3.01]	56.5	0.468	–0.499	0.145	0.631	–0.831
			データ数	18	36	162		459	1836	
			標準誤差	[0.693, 1.40, 1.32, 0.714]	6.29	0.0551	0.140	0.0140	0.0143	0.0399
			t 値	[–0.687, 1.08, –1.96, 4.21]	8.98	8.49	–3.57	10.4	44.1	–20.8
			P 値	[0.503, 0.299, 0.0699, 8.69×10^{-4}]	1.30×10^{-10}	1.36×10^{-14}	4.63×10^{-4}	8.16×10^{-23}	5.52×10^{-290}	1.72×10^{-86}
			自由度調整済決定係数	0.685	0.771	0.963		0.0374	0.605	
		1.6	回帰係数	[–0.476, 1.51, –2.59, 3.01]	22.9	0.449	–0.499	0.151	0.560	–0.812
			データ数	18	18	162		459	1836	
			標準誤差	[0.693, 1.40, 1.32, 0.714]	1.00	0.0561	0.146	0.0130	0.0139	0.0439
			t 値	[–0.687, 1.08, –1.96, 4.21]	22.8	8.00	–3.42	11.6	40.2	–18.5
			P 値	[0.503, 0.299, 0.0699, 8.69×10^{-4}]	3.61×10^{-14}	2.42×10^{-13}	7.87×10^{-4}	2.52×10^{-27}	1.07×10^{-253}	4.16×10^{-70}
			自由度調整済決定係数	0.685	0.972	0.957		0.0352	0.554	

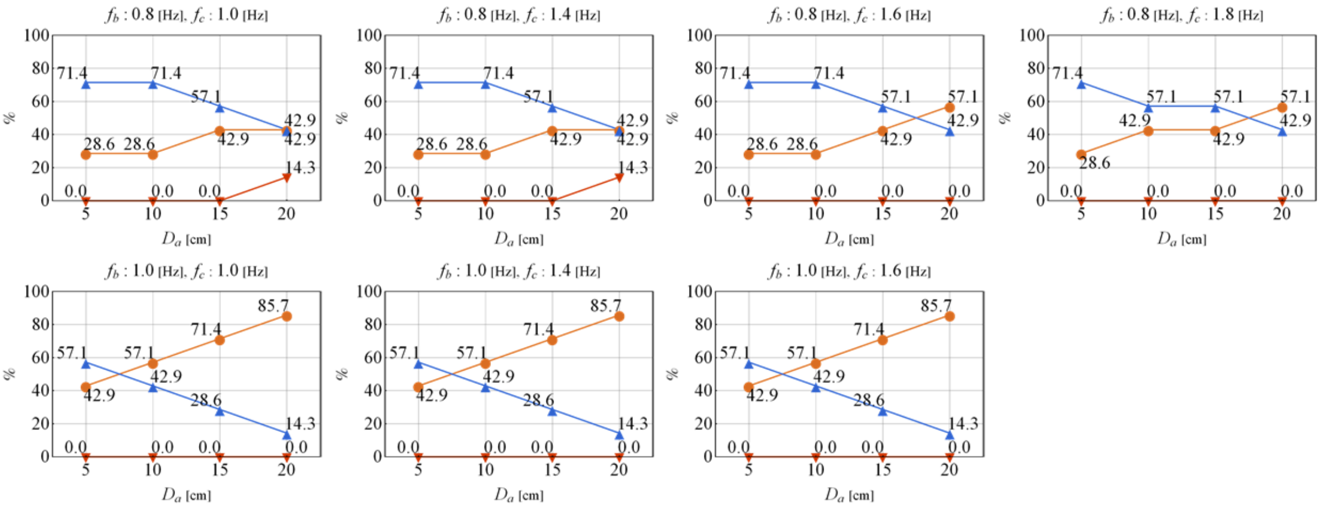
※ 背景色が灰色のセルの数値は現行基準のもの.



a) 重力式岸壁（41 施設）



b) 控え直杭式矢板式岸壁（8 施設）



c) 控え組杭式矢板式岸壁（7 施設）

図-2.4 構造形式別，f_b 別，f_c 別各種被災判定率の比較

3. SVM［サポートベクターマシン］による震度修正法の提案

図-2.4で示したとおり，H19照査用震度式同様，水深を拡張した照査用震度式の被災検証結果が良好でなかった矢板式岸壁を主たる対象として，被災検証結果を改善する方法について考える．その方針として，本稿では限界震度は文献[1)]で重力式岸壁41施設，控え直杭式矢板式岸壁8施設，控え組杭式矢板式岸壁7施設に対し算出したものを真値としてそのまま採用し，作用震度の修正のみよって被災検証結果を改善する方法を採用する．

本章では，サポートベクターマシン［SVM］[4)]という方法を用いて，被災判定グラフ上で，実被害による被災判定（○または×の判定）をうまく分離する境界線を導き，その境界線の傾きにより震度を修正する方法を提案する．なお，本研究では3.3で説明するSVMを適用しており，3.1及び3.2のオリジナルのSVMは適用していないことに注意する必要がある．

3.1　SVMの概要

SVMとは，パターン認識の学術分野で用いられている手法であり，属するクラスが既知のデータを用いて学習したクラスの識別能力を基に，属するクラスが未知のデータのクラスを識別する分類器のことである．ここでいうクラスとは，与えられたデータそれぞれに付されたラベル［名前］を意味し，クラスが 2 つの場合，すなわちそのラベルが 2 種類，例えば○と×，+1 と −1 等しかない場合を想定している．**図-3.1** に示すように，このラベル付けされたデータが平面に分布していて，それらのデータを直線（以後，分離境界線と呼称する）で分離することを考える．分離境界線で分かたれた一方の領域に○のみのデータが，もう一方に×のみのデータができる限り多く存在するように分離境界線を決定する方法がSVMである．

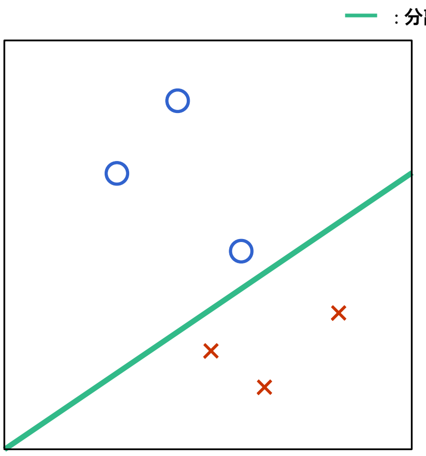


図-3.1　2 つのクラスと SVM による分離境界線

では，SVMではどのように分離境界線を決めているのかについてであるが，それはマージン最大化という考えに基づいている．以降本稿では，本研究で使用する2次元平面上の線型SVMに限って話を進める．2次元平面上の線型SVMでは，分離境界線が直線で表される．この場合マージンとは，求める分離境界線に対し，各クラスのうち分離境界線に最も近いデータの点（2クラス分類なので，○，×に対し1点ずつで，計2点ある）から引いた垂線の長さ，すなわちこのデータの点と分離境界線の距離を意味する．それらの距離が同じになるように分離境界線を決めるので，マージンは与えられた全データに対して1つしか存在しない．そして，この各クラスのうち分離境界線に最寄りの点をサポートベクターと呼ぶ．数理的には，分離境界線に平行な各クラスのサポートベクターを通る直線の方程式がそれぞれ

$$\langle \boldsymbol{w}, \boldsymbol{x} \rangle + b = \pm 1 \tag{3.1}$$

ここに

- $\boldsymbol{x}$　：分離境界線に平行な各クラスのサポートベクターを通る直線上の点の座標（$\in \mathbb{R}^2$）
- $\boldsymbol{w}$　：分離境界線の法線ベクトル（$\in \mathbb{R}^2$）
- b　：閾値（$\in \mathbb{R}$）．幾何学的には，2次元平面上の原点と分離境界線との距離に関わる実定数で，閾値を用いて原点と分離境界線との距離を表すと $\left| \|\boldsymbol{w}\|^{-1} b \right|$ となる
- $\langle \cdot, \cdot \rangle$　：2つのベクトルの内積

となるように，分離境界線の方程式を

$$f(\boldsymbol{x}; \boldsymbol{w}, b) := \langle \boldsymbol{w}, \boldsymbol{x} \rangle + b = 0 \tag{3.2}$$

ここに

- f　：分離境界線の方程式を陰関数で表した場合の関数
- $\boldsymbol{x}$　：分離境界線上の点の座標（$\in \mathbb{R}^2$）

と表した場合，マージンは

$$\|\boldsymbol{w}\|^{-1} \tag{3.3}$$

ここに

$\|\cdot\|$　：ベクトル $(\cdot)$ の大きさ

と表される．SVMではこのマージンを最大化することを考えるが，各クラスのサポートベクターは分離境界線の最寄りの点なので，サポートベクター以外のデータの点は，各クラスのサポートベクターを通る直線で挟まれる領域には入らないという制約が必要である．この制約は，○や×といった数量で表されないものをそのまま数理的には扱えないため，○，×にそれぞれ +1，–1の値を付与した場合

$$1-y_k\, f\left(\boldsymbol{x}_k\right)\le 0 \quad \left(k\in\{1,\cdots,m\}=I\right) \tag{3.4}$$

ここに

$\boldsymbol{x}_k$　：添字 k で表されるデータの座標（$\in\mathbb{R}^2$）

y_k　：添字 k で表されるデータに付与されたクラスを表す量（$\in\{+1,-1\}$）

I　：データに付された添字の集合．要素は m 以下の自然数

と表される．

計算しやすいように，まず式(3.3)で表されるマージンの逆数を取って2乗し，更に $\boldsymbol{w}$ で微分した時に係数のない式となるよう1/2倍した $1/2\|\boldsymbol{w}\|^2$ を最小化するよう，分離境界線の方程式を決定する．つまり，次の式で表される不等式制約付き最適化問題を解くことになる．

$$\begin{aligned}&\underset{\boldsymbol{w}\in\mathbb{R}^2}{\text{Minimize}} && \frac{1}{2}\|\boldsymbol{w}\|^2\\ &\text{subject to} && 1-y_k\, f\left(\boldsymbol{x}_k\right)\le 0 \quad \left(k\in I\right)\end{aligned} \tag{3.5}$$

ここに

subject to $(\cdot)$　：最適化問題において，目的関数に制約 $(\cdot)$ を課すことを意味する

3.2　損失を考慮可能なソフトマージン SVM

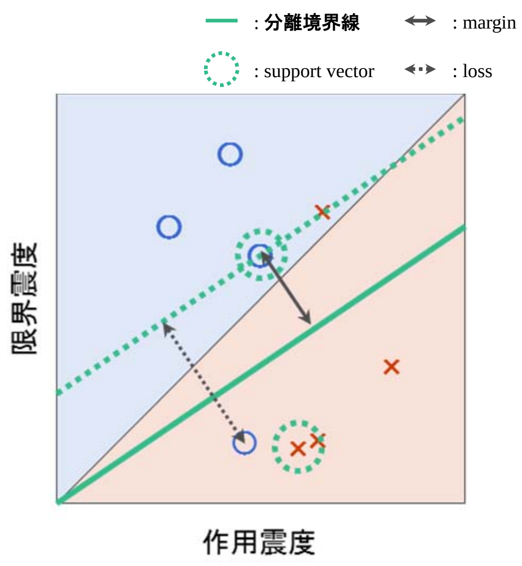
3.1では，**図-3.1**のように，同じクラスのデータが分離境界線に対して同じ側に来るように分離境界線を引くことができる（線型分離可能という）場合について，SVMによる分離境界線の決定方法の流れを解説した．本研究ではSVMを被災判定グラフに適用するに当たり，**図-1.1** b)，c) で示した矢板式岸壁の被災判定グラフのように，線型分離不可能な場合もあるため，既に手法としては存在するソフトマージンSVMに対して，修正を加えた上で用いる．

ソフトマージンSVMでは，本来マージン最大化を考えるSVM（ソフトマージンSVMに対して，3.1で示した手法はハードマージンSVMと呼ばれる）において，式(3.5)の目的関数のマージンに関する項に，損失と呼ばれる項を付加し，これが最小となるように分離境界線を決定する．この損失とは，分離境界線で分かたれた片方の領域に多く存在するデータのクラス，例えば○の方のクラスを対象に考えると，そのクラスのうちのある○のデータの点が分離境界線を越えて×の多く存在する領域に入っていた場合，**図-3.2**のように，そのデータの点と，○側のサポートベクターを通る分離境界線と平行な直線の距離で表される．ソフトマージンSVMでは，式(3.5)の目的関数のマージンに関する項に，分離境界線を越えて存在するデータの点全ての損失に関する項を加えた量を最小化するよう，式(3.6)の無制約最適化問題を解くことになる．なお，3.1で考えたハードマージンSVMの最適化問題における式(3.5)の制約は，ソフトマージンSVMでは分離境界線を越えた領域にデータの点が存在することを認めるので，不要となる．

$$\underset{\boldsymbol{w}\in\mathbb{R}^2,\,b\in\mathbb{R}}{\text{Minimize}} \quad \frac{1}{2}\|\boldsymbol{w}\|^2 + C\sum_{k\in I}\max\left\{1-y_k\, f\left(\boldsymbol{x}_k\right),0\right\} \tag{3.6}$$

ここに

C　：損失をどの程度許すかを制御する正の実係数［正則化パラメータ］$\left(\in(0,\infty]\right)$



※ ○の方のみの損失とマージンをそれぞれ矢印で記載

図-3.2　損失とサポートベクター，マージンの関係

損失を計上すべきデータの点が多い場合，つまりあるデータの点が本来存在すべき領域になく，分離境界線を越えてもう一方のクラスが多く存在する領域に入ってし

まうことが多い場合，式(3.6)で表される括弧内の量が大きくなってしまい，必ずしも式(3.6)の解がハードマージンSVMで考えるべき括弧内の第1項の量の最小値を与えるとは限らない．ソフトマージンSVMは，マージン最大化を考慮しつつ，できるだけ損失の計上対象となるデータの点を生じないように分離境界線を決める手法と言える．正則化パラメータ C についてであるが，正則化パラメータに非常に大きな値を採用すれば，式(3.6)で表される括弧内の量が，損失に関する項の量で決まってしまうことになるので，括弧内の量を最小化するに当たり損失を厳しく見ることになり，幾何学的には，できる限り分離境界線を越えてデータの点が存在しないように分離境界線を決定することになる．逆に正則化パラメータに小さな値を採用すれば，損失を甘く見ることになり，幾何学的には，データの点が分離境界線を越えて存在することを許すように分離境界線を決定することになる．

3.3 SVMの被災判定グラフへの適用を目的としたソフトマージンSVMの修正

本研究では，3.2で解説したオリジナルのソフトマージンSVMに2つの修正を加えたものを分離境界線の決定に使用している．

1つ目の修正事項としては，求める分離境界線に原点を通るという条件を付加している．これは，次の理由による．まず，被災判定グラフ上で原点から縦軸に沿ってわずか上に位置する点については，正の限界震度に相当する耐力を有する施設に対し作用震度に相当する地震による作用が働かなかったことを意味し，その施設は理論上被災しないため，分離境界線はこの点よりも下に来るべきである．一方，原点から横軸に沿ってわずか右に位置する点については，限界震度に相当する耐力が存在しない施設に対し正の作用震度に相当する地震による作用が働いたことを意味し，その施設は理論上被災するため，分離境界線はこの点よりも上に来るべきである．したがって，理論上，分離境界線は被災判定グラフの原点を通るべきであると言える．

2つ目の修正事項としては，被災検証により危険判定，安全判定となったデータの点の損失に，重みを課すことができるように改良を加えている．これは標本サイズが小さい場合，損失の対象となるデータに分離境界線の決定が大きく左右されてしまうため，危険判定率，安全判定率を危険，安全の被災判定となるデータそれぞれに対する重みとして採用することで，分離境界線の決定時におけるそれらのデータの影響を弱めることを目的としている．

これらの修正を加えると，分離境界線を決定するための最適化問題は次の式で表される．この式の導出，この式を数値的に解くためのアルゴリズムの導出については，それぞれ**付録A**，**付録B**で解説する．

$$
\begin{aligned}
&\underset{\boldsymbol{\lambda}\in\mathbb{R}^m}{\text{Maximize}} && -\frac{1}{2}\left\|X\,Y\,\boldsymbol{\lambda}\right\|^2+\boldsymbol{\lambda}^T\boldsymbol{1}\\
&\text{subject to} && 0\le\lambda_k\le C\,p\left(y_k;r,s\right)\quad\left(k\in I\right)
\end{aligned}
\tag{3.7}
$$

ここに

$\underset{\text{cond.}}{\text{Maximize}}(\cdot)$ ：最適化問題において，条件 cond. の下で目的関数 $(\cdot)$ を最大化することを意味する

X ：被災判定グラフ上の各データの座標 $\boldsymbol{x}_k$ を各列に並べた行列 $\left(=\left[\boldsymbol{x}_1,\cdots,\boldsymbol{x}_m\right]\in M_{2,m}(\mathbb{R})\right)$

Y ：各データ $\boldsymbol{x}_k$ に付与されたクラスを表す量からなる対角行列 $\left(=\mathrm{diag}\left(y_1,\cdots,y_m\right)\in M_{m,m}(\mathbb{R})\right)$

$M_{m,n}(\mathbb{R})$ ：(m, n) 型の実行列全体の集合

$\boldsymbol{\lambda}$ ：Lagrangeの乗数法で用いるLagrange乗数からなる実ベクトル $\left(=\left[\lambda_1,\cdots,\lambda_m\right]^T\in\mathbb{R}^m\right)$

$[\cdot]^T$ ：ベクトル $[\cdot]$ の転置

$\boldsymbol{1}$ ：全ての要素が1のみからなるベクトル（$\in\mathbb{R}^m$）

p ：損失に重みを課す関数;

$$p\left(y_k;r,s\right):=\left[y_k,1\right]\left[-\frac{r-s}{2},\frac{r+s}{2}+1\right]^T$$

r ：危険判定率

s ：安全判定率

これより得られた $\boldsymbol{\lambda}$ の値を次の式に代入すれば，分離境界線の法線ベクトルを得る．

$$\boldsymbol{w}=X\,Y\,\boldsymbol{\lambda}\tag{3.8}$$

3.4 ソフトマージンSVMによる震度修正法

本節では，3.3 で得られた分離境界線の法線ベクトルを用いて，照査用震度式により算出された震度を修正する方法について述べる．

図-3.3 a) のように分離境界線の傾きが 1 より大きい場合，設計計算上は無被災でも実際には被災する施設が生じやすい，すなわち，被災検証上危険判定となる施設が生じやすいと考えられる．これは限界震度が正しいと仮定すると作用震度を過小評価していることを意味する．

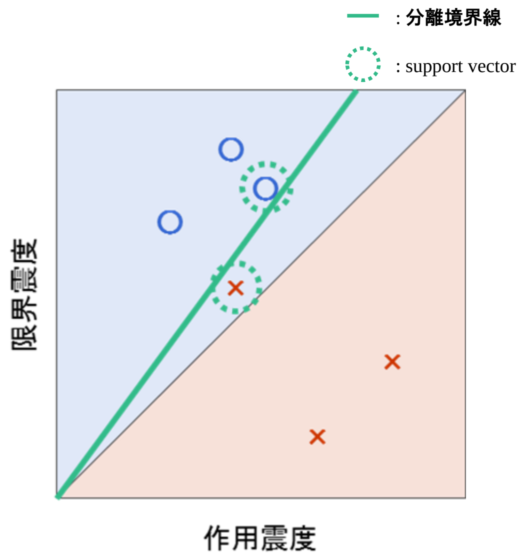
ここで，本来の分離境界線が被災判定グラフ上でどのように引かれるべきかを考える．もし実被害の被災の有無を設計計算上の被災判定により完全に予測可能であるとすれば，本来分離境界線は傾き 1 の原点を通る直線と

なるはずである．なぜなら，そのような理想的な状況の下では，設計計算上の被災判定と実被害による被災判定が同一構造形式を有する全ての構造物において完全に一致するはずであり，この場合の実被害による被災判定の○，×のデータを分かつ分離境界線は，作用震度の方が限界震度よりも大きい領域と限界震度の方が作用震度よりも大きい領域を分かつ境界線，すなわち原点を通る傾き 1 の直線（被災判定グラフの対角線と呼称する）に一致するはずだからである．よって，過小評価をしている可能性のある震度に対し，SVM による傾きが 1 より大きくなる分離境界線が本来の分離境界線である被災判定グラフの対角線になるように，照査用震度式により得られた震度を増加させる必要がある．

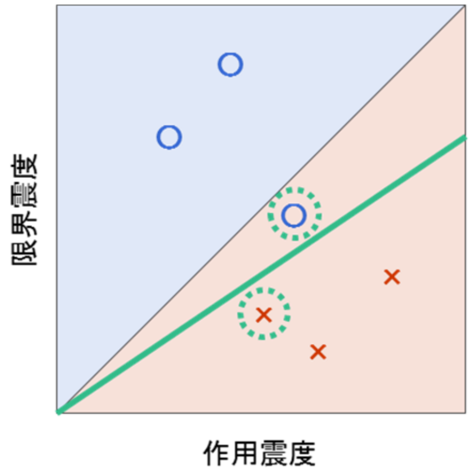
一方，**図-3.3** b) のように分離境界線の傾きが 1 より小さい場合，被災検証上安全判定となる施設が生じやすいと考えられる．これは限界震度が正しいと仮定すると作用震度を過大評価していることを意味する．この場合は，分離境界線の傾きが 1 より大きくなる場合と同様の考えに基づき，SVM による傾きが 1 より小さくなる分離境界線が本来の分離境界線である被災判定グラフの対角線になるように，照査用震度式により得られた震度を減少させる必要がある．

具体的な震度の修正方法であるが，分離境界線の傾きが 1 より大きい場合も小さい場合も，分離境界線の傾きの値を照査用震度式に乗じることにより修正する．例えば，**図-3.3** a) のように分離境界線の傾きが 1 を超える場合について考えると，分離境界線上の点 (k_{act}, k_{crt}) を対象にした場合，それと同じ限界震度を有する被災判定グラフの対角線上の点は (k_{crt}, k_{crt}) となる．上述のとおり限界震度は正しいと仮定しているので，分離境界線を被災判定グラフの対角線に一致させるためには，限界震度を固定したまま，先程の分離境界線上の点 (k_{act}, k_{crt}) を被災判定グラフの対角線上の点 (k_{crt}, k_{crt}) に一致させればよく，そのため，分離境界線上の点の作用震度に k_{crt}/k_{act} を乗じなければならない．よって，この比率を各データの点の作用震度に乗じることで照査用震度式により算出された震度を修正することになるが，この比率は分離境界線の傾きの値そのものとなっている．

なお，以後においては，分離境界線の傾きは D_a : 10 [cm] の場合についてのみ算出し，その値を変形量許容値に関わらず震度の修正に用いる．これは変形量許容値に応じて分離境界線の傾きを算出することは可能であるものの，照査用震度式で震度を算出する際，変形量許容値に応じて異なる分離境界線の傾きを乗じるのは，設計上非常に煩雑になるためである．



a) 分離境界線の傾きが 1 より大きい場合



b) 分離境界線の傾きが 1 より小さい場合

図-3.3　分離境界線の傾きが 1 より大きい場合と小さい場合のデータと分離境界線の位置関係

4. 各種パラメータを変更した時の被災検証結果への影響

本章では，フィルター関数や照査用震度式に関わる各種パラメータを変更して算出した照査用震度や，その震度をSVMにより修正したものを用いて被災検証を行った際に，その結果がH19照査用震度式による被災検証結果からどのように変化するか，その傾向について述べる．なお，矢板式岸壁については，控え直杭式で8施設，控え組杭式で7施設と，あくまでやや少ない標本から導かれた傾向であることをここに断っておく．

4.1 変更するパラメータと検討ケース数

本検討において変更するパラメータは，フィルター関数に関わるものとして，b 値算出時の周波数及びコーナー周波数，照査用震度式に関わるものとして，変形量許容値のみとしている．検討ケースは，b 値算出時の周波数が 0.8，1.0 [Hz]の 2 種類，コーナー周波数が 1.0，1.4，1.6，1.8 [Hz]の 4 種類，変形量許容値が 5，10，15，20 [cm]の 4 種類, それに加え全ての場合において SVM による修正を加えたものと加えなかったものの 2 種類があり，各構造形式において，計 64（= 2 × 4 × 4 × 2）ケースとなる．ただし，2.1 で述べたとおり，控え組杭式矢板式岸壁についてのみ，フィルター関数の設計において，b 値算出時の周波数が 1.0 [Hz]かつコーナー周波数が 1.8 [Hz]のケースにおいて，フィルター関数の c_1 を回帰分析で算出する際に数値が収束しなかったため, 検討から省いており，最終的に検討ケースは 56（= 7 × 4 × 2）ケースとなっている．被災検証に用いた実在している或いは実在した構造物の水深は –7.5 〜 –14.6 [m]となっている．新たな照査用震度式を定式化する際は，前述のとおり –16.0 〜 –20.0 [m]の水深を有するモデル断面の数値解析結果を組み込んでいるが、被災検証ではその領域の水深を有する施設の被災あるいは無被災データが得られなかったため, 本検討においてはその領域の水深の施設に対する被災検証結果を取り扱っていないことに注意する必要がある．SVM による震度の修正を行った結果は, **表-4.1** に示す．なお，正則化パラメータの値は，1.0×10^5 とした．

4.2 コーナー周波数の変更に伴う被災検証結果への影響と適切なコーナー周波数の選択

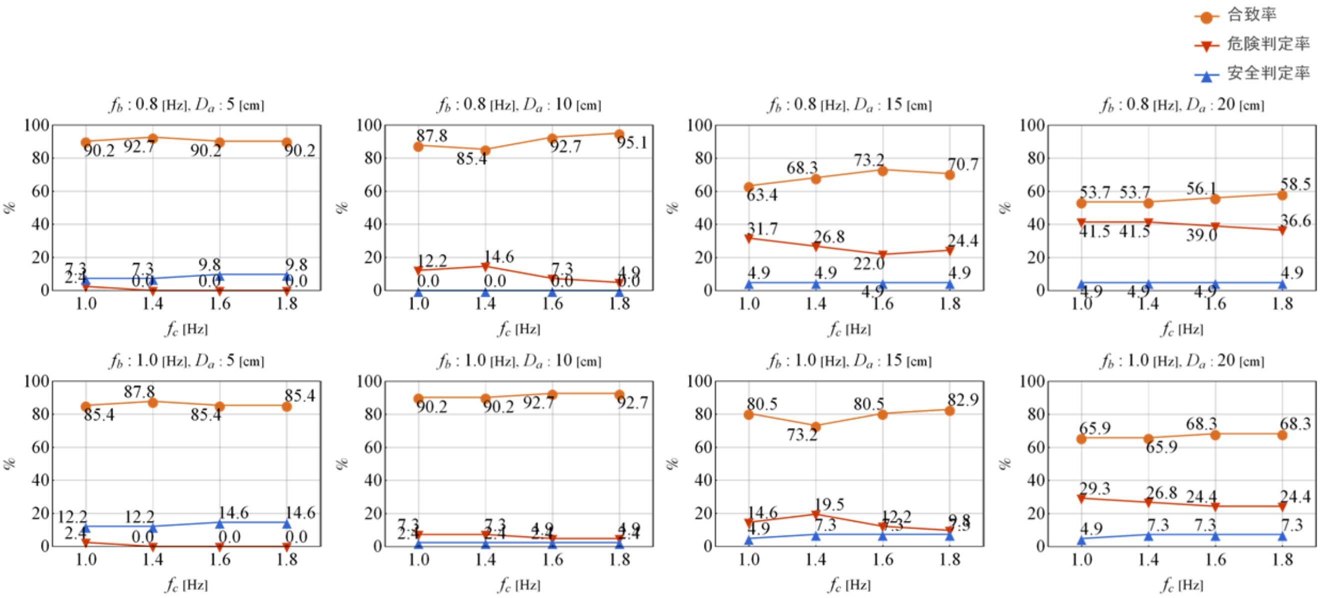
本節では, 第 2 章で定式化した照査用震度式を対象に, フィルターのコーナー周波数の違いが被災検証結果に及ぼす影響について考察する．

図-4.1, 4.2 はそれぞれ, b 値算出時の周波数ごと（0.8，1.0 [Hz]），変形量許容値ごと（5，10，15，20 [cm]）に，縦軸に被災検証結果の各被災判定率（合致率，危険判定率，安全判定率）を，横軸にコーナー周波数を取ったもので，a) 〜 c) に構造形式ごとに示したものである．**図-4.1，4.2** はそれぞれ，SVM による震度の修正なし，ありのグラフとなっている．また，**図-4.1** は**図-2.4** で示したデータと全く同じものを用いており，b 値算出時の周波数と変形量許容値ごとに再整理したものになっている．これらのグラフのうち，b) 控え直杭式矢板式岸壁のいくつかのケースは例外として，全構造形式において概ね，b 値算出時の周波数の違いによらず，また変形量許容値の違いによらず, 各被災判定率は横ばいとなった. これは，構造形式を問わず，フィルター関数のコーナー周波数が被災検証結果に影響を及ぼさないことを示している．もともと本検討においてコーナー周波数として 1.0 [Hz]以外に 1.4，1.6，1.8 [Hz]としたケースを考えたのは，前述のとおり**図-2.3** に示すように 1.0 [Hz]より高い周波数成分が構造物の変形にあまり寄与しないことが単に 2D FLIP 解析の特性に過ぎず，実現象と異なる可能性を懸念したためであるが，**図-4.1，4.2** の結果を見る限り，少なくともコーナー周波数を 1.0 [Hz]より高周波数側に設定することが被災検証結果の改善に結びつくことはないようである．加えて，構造形式を問わず，基本的にコーナー周波数が大きくなるにつれて算出される震度は大きくなる．**図-4.3** は異なるコーナー周波数に対する被災判定グラフの散布図を，**表-4.2** に示す施設に対応する施設番号をプロットマーカーとして描いたものであるが，c) 控え組杭式矢板式岸壁のケースを除き，コーナー周波数の値が大きい方が算出される震度が大きくなっているこ

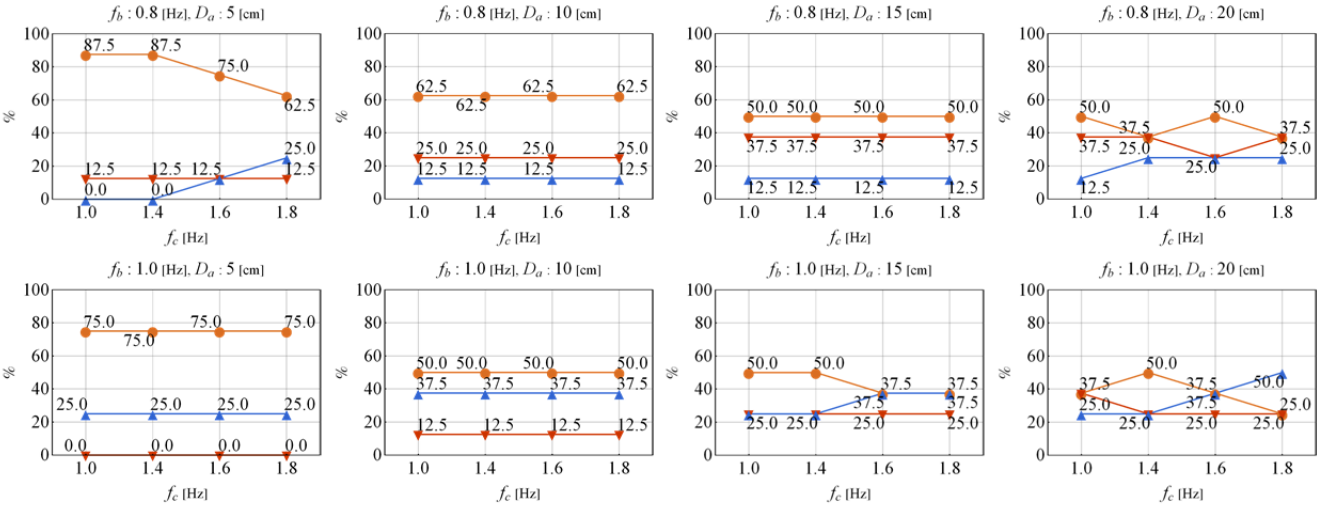
表-4.1　SVM による震度修正係数と修正後の回帰係数（f_c : 1.0 [Hz]の場合）

構造形式	b 値算出時の周波数 f_b [Hz]	コーナー周波数 f_c [Hz]	照査用震度式			震度修正係数	損失に乗じる係数 C	照査用震度式（修正後）		
			c_6	c_7	c_8			c_6	c_7	c_8
重力式岸壁	0.8	1.0	0.04	1.78	–0.55	–	–	–	–	–
	0.8	1.0	–0.0130	2.26	–0.587	1.39	1.0×10^5	–0.0181	3.15	–0.587
	1.0		0.0354	1.70	–0.595	1.16	1.0×10^5	0.0410	1.97	–0.595
控え直杭式矢板式岸壁	0.8	1.0	0.03	1.91	–0.69	–	–	–	–	–
	0.8	1.0	0.0181	2.10	–0.740	1.29	1.0×10^5	0.0234	2.71	–0.740
	1.0		–0.0544	3.24	–0.732	0.638	1.0×10^5	–0.0347	2.07	-0.732
控え組杭式矢板式岸壁	0.8	1.0	0.05	1.32	–0.74	–	–	–	–	–
	0.8	1.0	0.130	0.788	–0.829	0.522	1.0×10^5	0.0678	0.411	–0.829
	1.0		0.136	0.723	–0.822	0.575	1.0×10^5	0.0781	0.415	–0.822

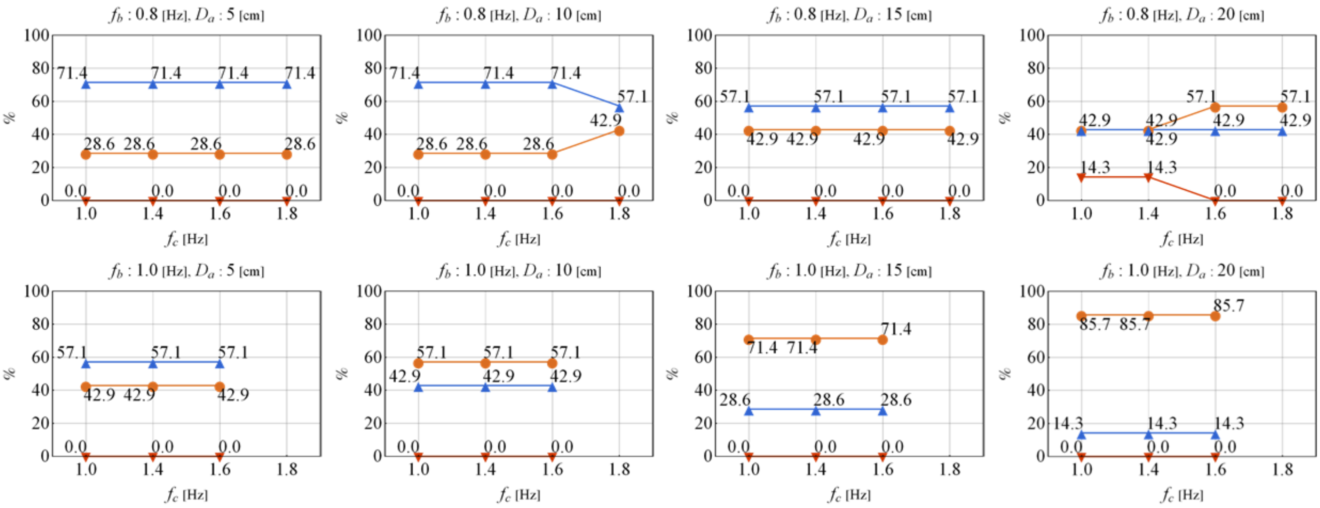
※ 背景色が灰色のセルの数値は現行基準のもの．「–」は文献 [3)]において算出されていないもの．



a) 重力式岸壁（41施設）

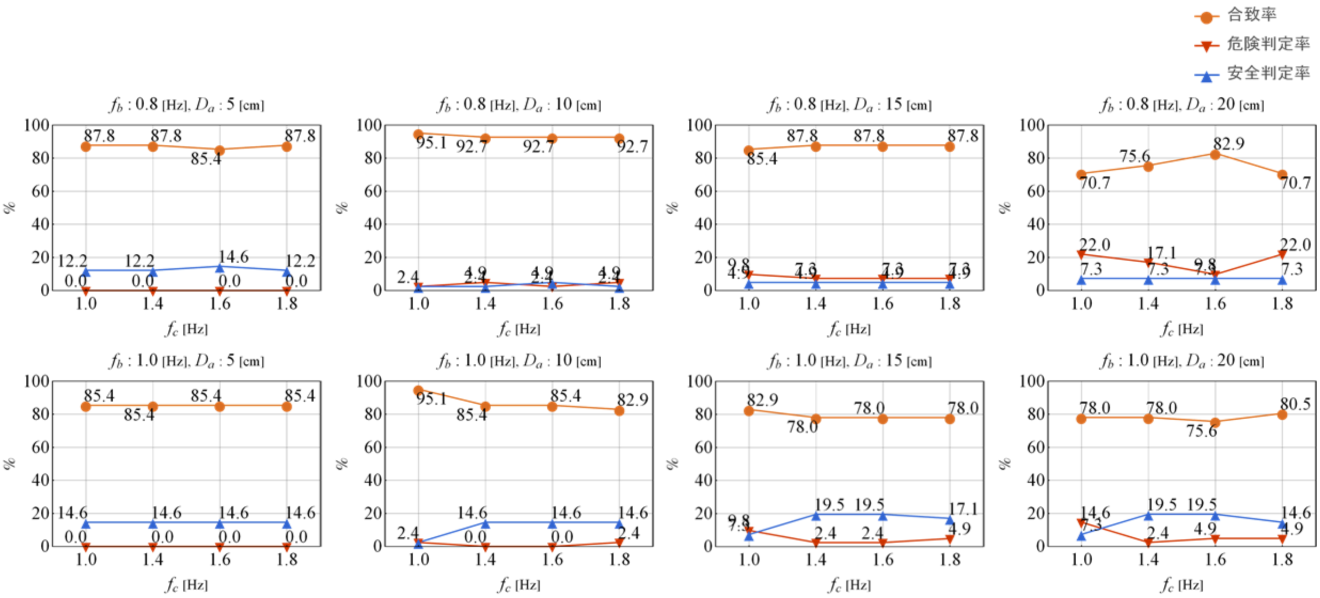


b) 控え直杭式矢板式岸壁（8施設）

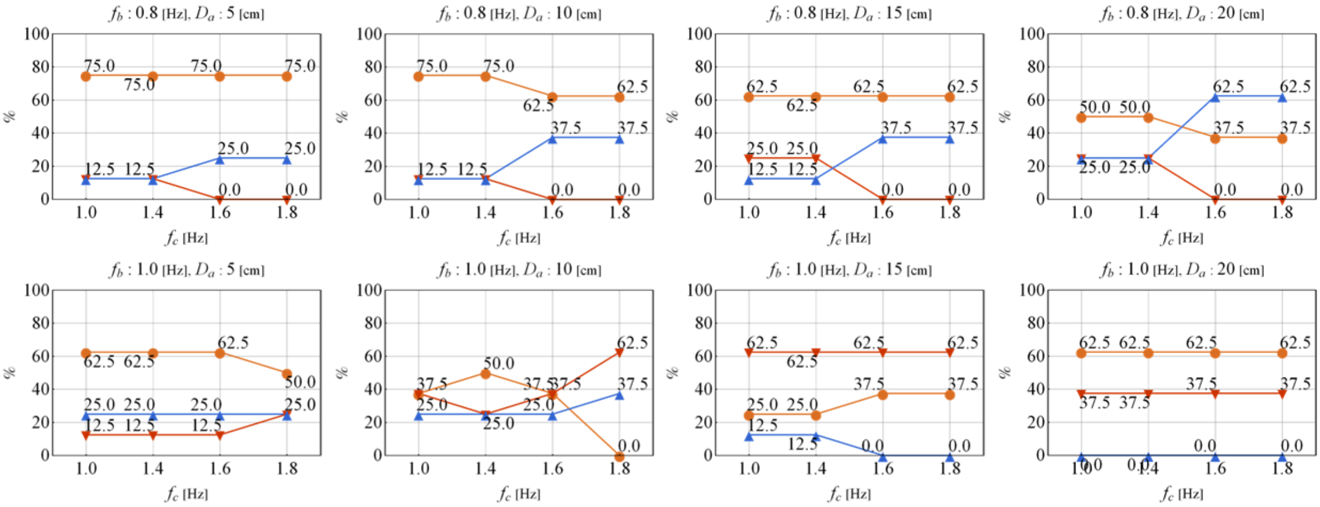


c) 控え組杭式矢板式岸壁（7施設）

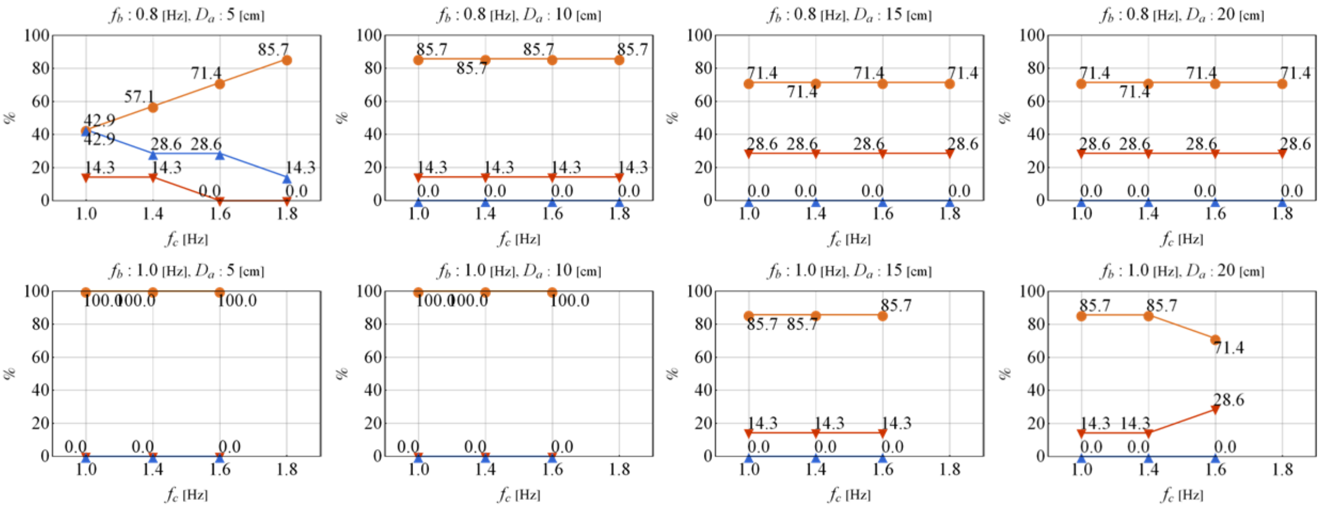
図-4.1 構造形式別，f_b 別，D_a 別各種被災判定率の比較（SVM による震度の修正なし）



a) 重力式岸壁（41施設）

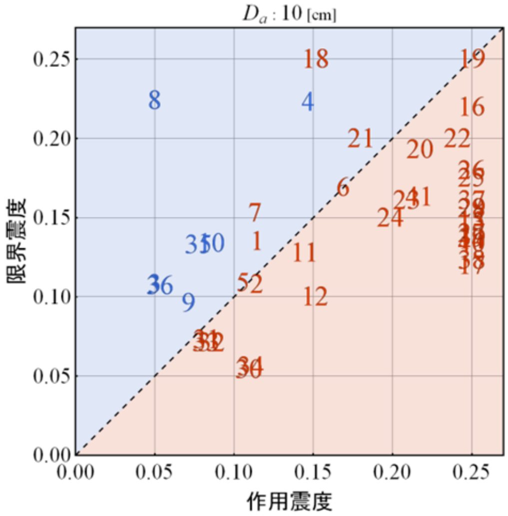


b) 控え直杭式矢板式岸壁（8施設）

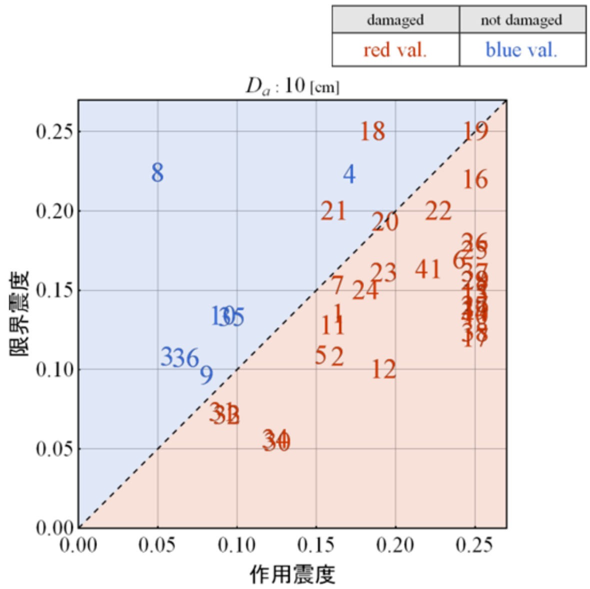


c) 控え組杭式矢板式岸壁（7施設）

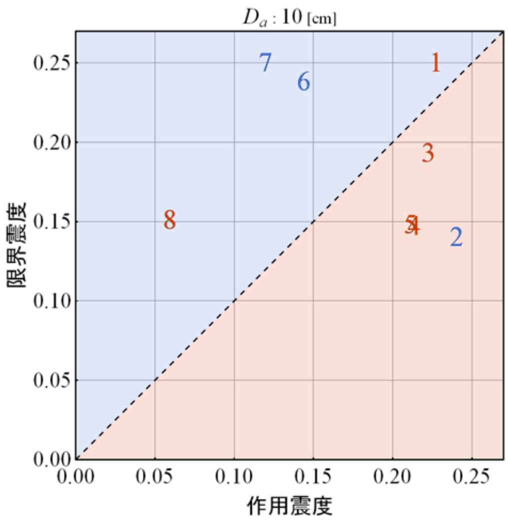
図-4.2　構造形式別，f_b 別，D_a 別各種被災判定率の比較（SVMによる震度の修正あり）



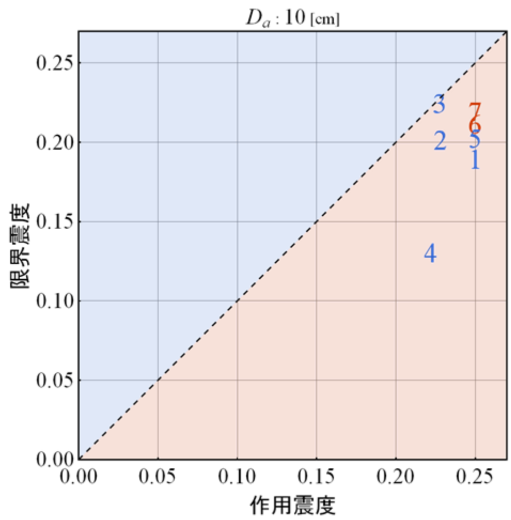
a–1) 重力式岸壁（f_c : 1.0 [Hz]の時）



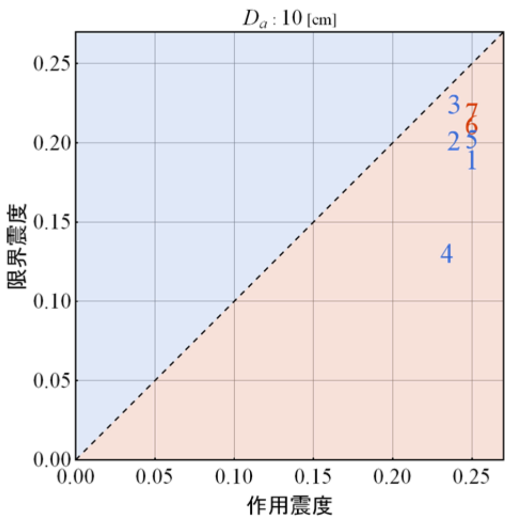
a–2) 重力式岸壁（f_c : 1.8 [Hz]の時）



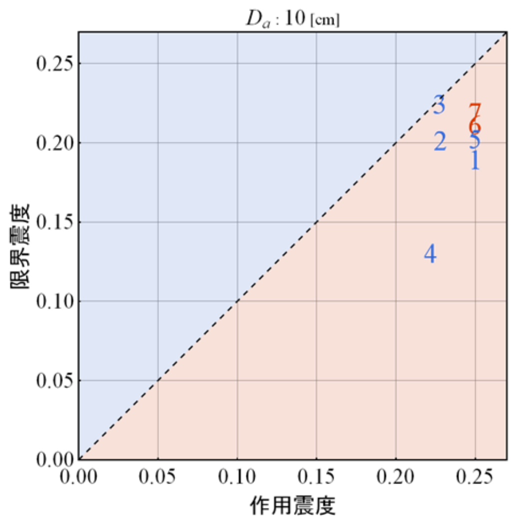
b–1) 控え直杭式矢板式岸壁（f_c : 1.0 [Hz]の時）



b–2) 控え直杭式矢板式岸壁（f_c : 1.8 [Hz]の時）



c–1) 控え組杭式矢板式岸壁（f_c : 1.0 [Hz]の時）



c–2) 控え組杭式矢板式岸壁（f_c : 1.6 [Hz]の時）

図-4.3　異なる f_c に対する被災判定グラフの散布図の比較（f_b : 0.8 [Hz]，SVM による震度の修正なし）

表-4.2　図-4.3のプロットマーカーとしての施設番号に対応する施設名

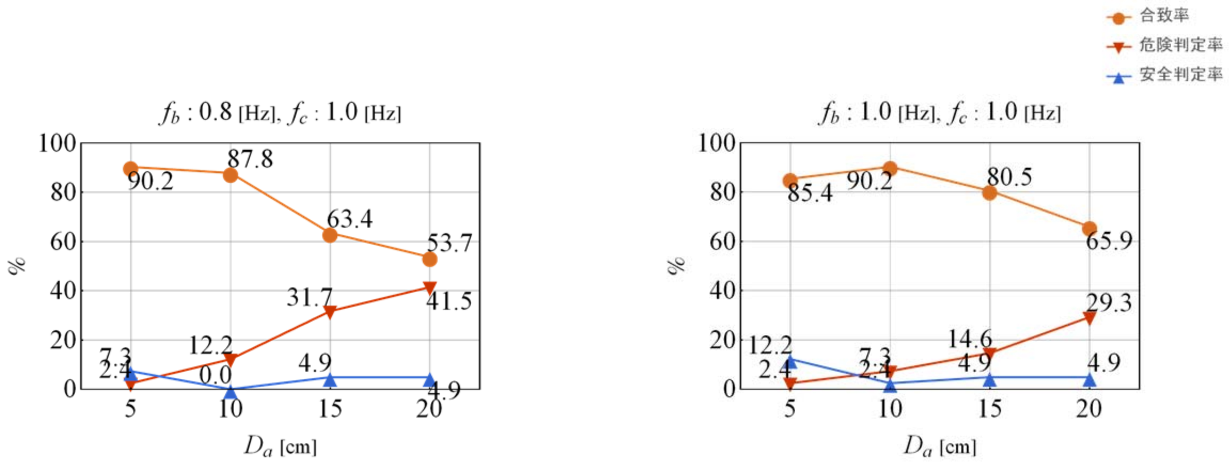
構造形式	施設番号	地震発生年	地震名	港名	地区名	施設名
重力式岸壁	1	1968	十勝沖地震	室蘭港	西2号ふ頭	西側岸壁
	2	1968	十勝沖地震	室蘭港	西2号ふ頭	先端護岸
	3	1982	浦河沖地震	室蘭港	築地地区	西2号ふ頭 –7.5m岸壁
	4	1993	釧路沖地震	釧路港	人舟	岸壁
	5	1993	釧路沖地震	釧路港	北埠頭	東側岸壁
	6	1993	釧路沖地震	釧路港	北埠頭	南側岸壁
	7	1993	釧路沖地震	釧路港	北埠頭	西側岸壁
	8	1993	釧路沖地震	根室港	花咲地区	東岸壁
	9	1993	北海道南西沖地震	函館港	中央埠頭	南側岸壁
	10	1993	北海道南西沖地震	函館港	中央埠頭	北側第一岸壁
	11	1994	三陸はるか沖地震	八戸港	河原木	岸壁（–14m）
	12	1995	兵庫県南部地震	神戸港	中突堤	岸壁（1）
	13	1995	兵庫県南部地震	神戸港	新港	第2突堤西
	14	1995	兵庫県南部地震	神戸港	新港	第3突堤東
	15	1995	兵庫県南部地震	神戸港	新港	第4突堤西
	16	1995	兵庫県南部地震	神戸港	新港	第4突堤岸壁（–12.0m）
	17	1995	兵庫県南部地震	神戸港	新港	第4突堤東
	18	1995	兵庫県南部地震	神戸港	摩耶埠頭	第1突堤第1岸壁
	19	1995	兵庫県南部地震	神戸港	摩耶埠頭	岸壁（–12.0m）2
	20	1995	兵庫県南部地震	神戸港	六甲ｱｲﾗﾝﾄﾞ	岸壁（–10.0m）I
	21	1995	兵庫県南部地震	神戸港	六甲ｱｲﾗﾝﾄﾞ	岸壁（–10.0m）2
	22	1995	兵庫県南部地震	神戸港	六甲ｱｲﾗﾝﾄﾞ	岸壁（–12.0m）
	23	1995	兵庫県南部地震	神戸港	六甲ｱｲﾗﾝﾄﾞ	ｺﾝﾃﾅﾊﾞｰｽ RC–1
	24	1995	兵庫県南部地震	神戸港	六甲ｱｲﾗﾝﾄﾞ	ｺﾝﾃﾅﾊﾞｰｽ RC–5
	25	1995	兵庫県南部地震	神戸港	六甲ｱｲﾗﾝﾄﾞ	ｺﾝﾃﾅﾊﾞｰｽ RC–6
	26	1995	兵庫県南部地震	神戸港	六甲ｱｲﾗﾝﾄﾞ	ﾌｪﾘｰﾊﾞｰｽ RF–2
	27	1995	兵庫県南部地震	神戸港	ﾎﾟｰﾄｱｲﾗﾝﾄﾞ	ｺﾝﾃﾅﾊﾞｰｽ PC–5
	28	1995	兵庫県南部地震	神戸港	ﾎﾟｰﾄｱｲﾗﾝﾄﾞ	ｺﾝﾃﾅﾊﾞｰｽ PC–11
	29	1995	兵庫県南部地震	神戸港	ﾎﾟｰﾄｱｲﾗﾝﾄﾞ	ｺﾝﾃﾅﾊﾞｰｽ PC–12
	30	2005	福岡県西方沖地震	博多港	香椎ﾊﾟｰｸﾎﾟｰﾄ	岸壁（–11m）（5号）
	31	2005	福岡県西方沖地震	博多港	香椎ﾊﾟｰｸﾎﾟｰﾄ	岸壁（取付先端）
	32	2005	福岡県西方沖地震	博多港	香椎ﾊﾟｰｸﾎﾟｰﾄ	–7.5m岸壁
	33	2005	福岡県西方沖地震	博多港	香椎ﾊﾟｰｸﾎﾟｰﾄ	北–7.5m岸壁
	34	2005	福岡県西方沖地震	博多港	ｱｲﾗﾝﾄﾞｼﾃｨ	岸壁（–11m）
	35	2011	東北地方太平洋沖地震	八戸港	八太郎	J岸壁
	36	2011	東北地方太平洋沖地震	八戸港	八太郎	L岸壁
	37	2011	東北地方太平洋沖地震	小名浜港	5号ふ頭	–12m岸壁
	38	2011	東北地方太平洋沖地震	小名浜港	6号ふ頭	–14m岸壁
	39	2011	東北地方太平洋沖地震	小名浜港	7号ふ頭	–13m岸壁
	40	2011	東北地方太平洋沖地震	小名浜港	藤原ふ頭	–12m岸壁
	41	2011	東北地方太平洋沖地震	小名浜港	大剣ふ頭	–10m岸壁
控え直杭式矢板式岸壁	1	1983	日本海中部地震	秋田港	外港	泊地護岸（–13.0m）
	2	1983	日本海中部地震	秋田港	大浜	大浜–10m 3号岸壁
	3	1983	日本海中部地震	秋田港	向港	向浜–10m 1号岸壁
	4	1983	日本海中部地震	秋田港	向港	向浜–10m 2号岸壁
	5	1983	日本海中部地震	秋田港	向港	向浜–10m 3号岸壁
	6	2000	鳥取県西部地震	境港	江島	1号岸壁
	7	2000	鳥取県西部地震	境港	江島	2号岸壁
	8	2007	能登半島地震	七尾港	大田地区	1号岸壁（–10m）
控え組杭式矢板式岸壁	1	1978	宮城県沖地震	仙台港	中野ふ頭	中野ふ頭 5号
	2	1978	宮城県沖地震	仙台港	ﾌｪﾘｰふ頭	第一ﾊﾞｰｽ
	3	1978	宮城県沖地震	仙台港	ﾌｪﾘｰふ頭	第二ﾊﾞｰｽ
	4	1978	宮城県沖地震	仙台港	雷神ふ頭	雷神ふ頭 1号
	5	1978	宮城県沖地震	石巻港	日和ふ頭	–10.0m岸壁
	6	2011	東北地方太平洋沖地震	小名浜港	3号ふ頭	1～2号岸壁
	7	2011	東北地方太平洋沖地震	小名浜港	4号ふ頭	2号岸壁

とが分かる．すなわち，コーナー周波数を高めに設定しても，震度が大きくなるだけで，被災検証結果は改善されず，メリットはないことになるから，現行のフィルター関数で採用されている 1.0 [Hz]をそのままコーナー周波数として用いるのが良いと結論付けられる．

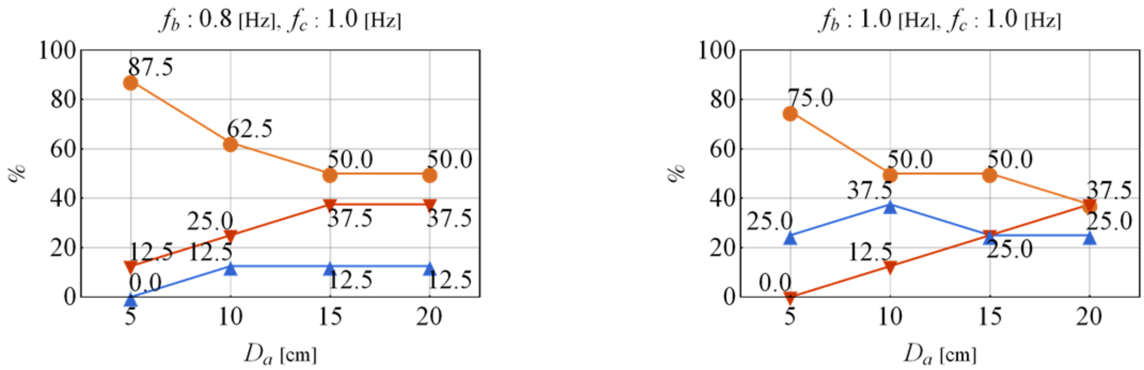
4.3　変形量許容値の変更に伴う被災検証結果への影響

本節では，第 2 章で定式化した照査用震度式（以後，新震度式と呼称する）を対象に，照査用震度式の変形量許容値の違いが被災検証結果に及ぼす影響について考える．4.2 においてコーナー周波数は 1.0 [Hz]が妥当であるという結論を得たので，以後，コーナー周波数が 1.0 [Hz]の場合に限り話を進める．

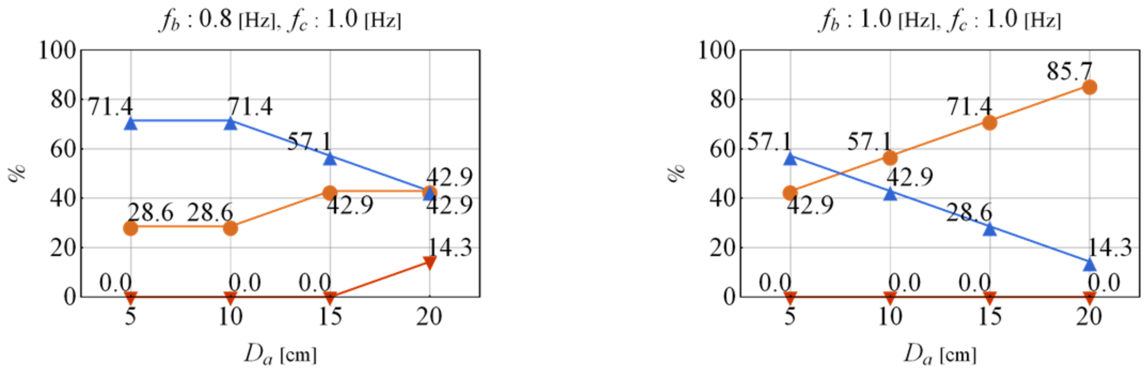
図-4.4 は，b 値算出時の周波数ごと（0.8，1.0 [Hz]）に，縦軸に被災検証結果の各被災判定率（合致率，危険



a) 重力式岸壁（41施設）



b) 控え直杭式矢板式岸壁（8施設）



c) 控え組杭式矢板式岸壁（7施設）

図-4.4　構造形式別，f_b 別，各種被災判定率の比較（SVM による震度の修正なし）

判定率，安全判定率）を，横軸に変形量許容値を取ったもので，a) ～ c) に構造形式ごとに示したものである．a) 重力式岸壁については，b 値算出時の周波数を問わず，変形量許容値に対して合致率はほぼ単調減少，危険判定率は単調増加，安全判定率はほぼ横ばいとなっている．照査用震度式は式(2.9)及び**表-2.5** に示すとおり，変形量許容値 に関する単調減少関数となっているので，変形量許容値が大きくなるにつれて危険判定率が大きくなったのは，**図-4.5** に示すとおり，実被害による判定が被災でかつ被災判定結果が合致となっていた点が，変形量許容値が大きくなるにつれて，作用震度が下がりかつ実際の変位が 20[cm]よりも大きかったため，実被害による判定が被災のまま左上の領域に移り，被災判定結果が危険に変化したことによる．変形量許容値が大きくなっても安全判定率が変化しないのは，施設番号 9 や 10 のように，実際の変位が 5 [cm]よりも小さく，被災判定結果が安全となっていた点が，変形量許容値が大きくなるにつれて左上の領域に移り，被災判定結果が合致に変化したものがある一方で，施設番号 30，34 のように，D_a : 5 [cm]の時は実被害による判定が被災でかつ被災判定結果が合致となっていた点が，実際の変位が 15 [cm]よりも小さかったために，変形量許容値が大きくなるにつれて実被害による判定が無被災に変化したものの，被災判定グラフの散布図の右下の領域に留まり，被災判定結果が安全に変化したことによる．変形量許容値に対して危険判定率が単調増加，安全判定率がほぼ横ばいとなるため，合致率はほぼ単調減少となる．同様の傾向は，b) 控え直杭式矢板式岸壁にも見られる．一方，c) 控え組杭式矢板式岸壁

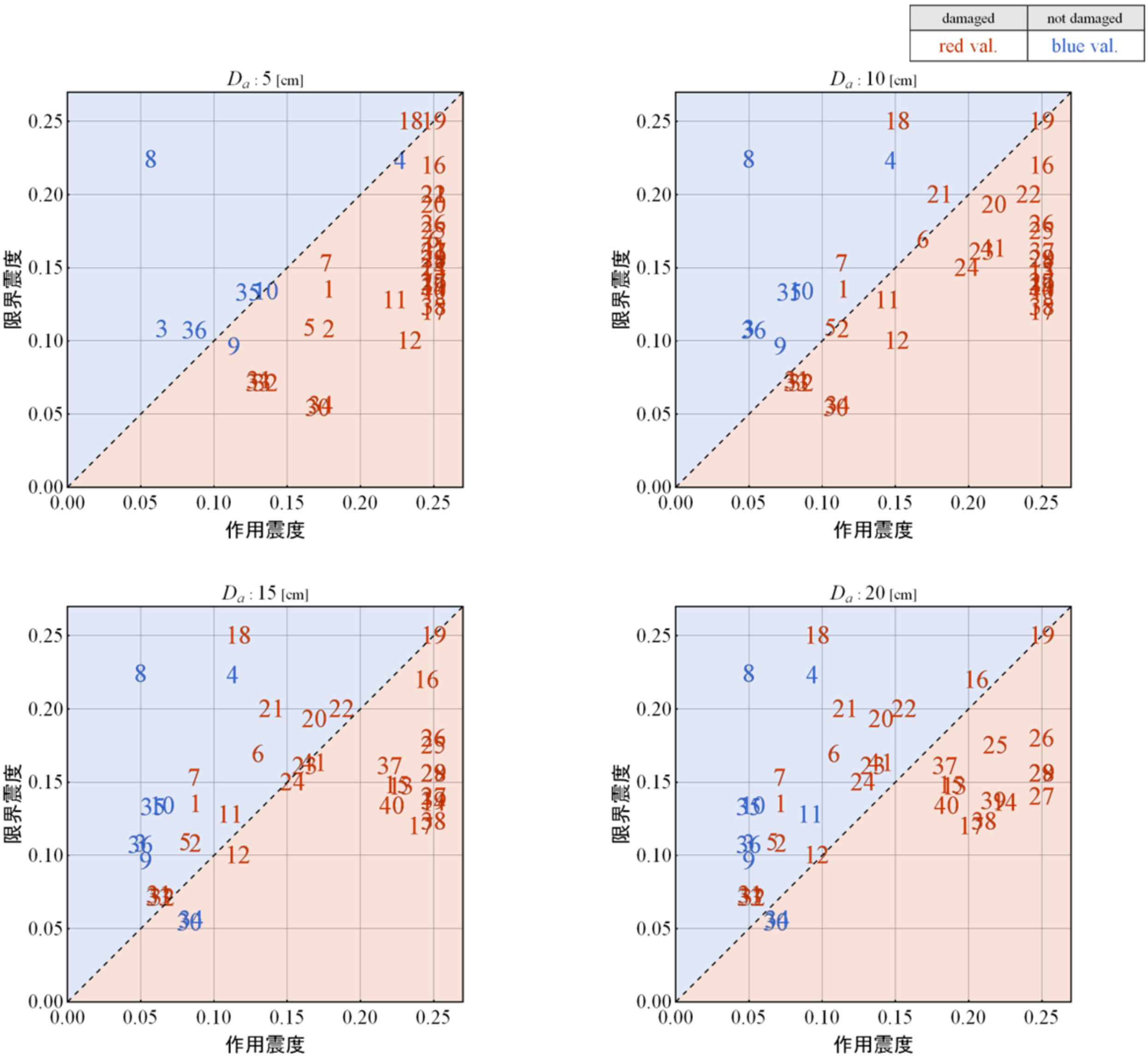


図-4.5 重力式岸壁（41 施設）の異なる D_a に対する被災判定グラフの散布図の比較
（f_b : 0.8 [Hz]，f_c : 1.0 [Hz]，SVM による震度の修正なし）

については，b 値算出時の周波数を問わず合致率は変形量許容値に対して単調増加となっているが，**図-4.6** に示すとおり，D_a : 5 [cm]で被災判定結果が安全となっていた点が，変形量許容値が大きくなるにつれ，作用震度が小さくなり，被災判定グラフの散布図の左上の領域に移って，合致に変化したためである．もともと被災判定結果が危険となった点が存在せず，安全となった点が合致に変化したため，合致率は変形量許容値に対して単調増加となっている．

4.4　SVM による震度の修正の被災検証結果への影響

本節では，第 2 章で定式化した照査用震度式を対象に，SVM による震度の修正の有無が被災検証結果に及ぼす影響について考察する．**図-4.7** はそれぞれ，b 値算出時の周波数ごと（0.8，1.0 [Hz]）に，縦軸に被災検証結果の各被災判定率（合致率，危険判定率，安全判定率）を，横軸に変形量許容値を取った折れ線グラフで，構造形式ごとに示したものである．

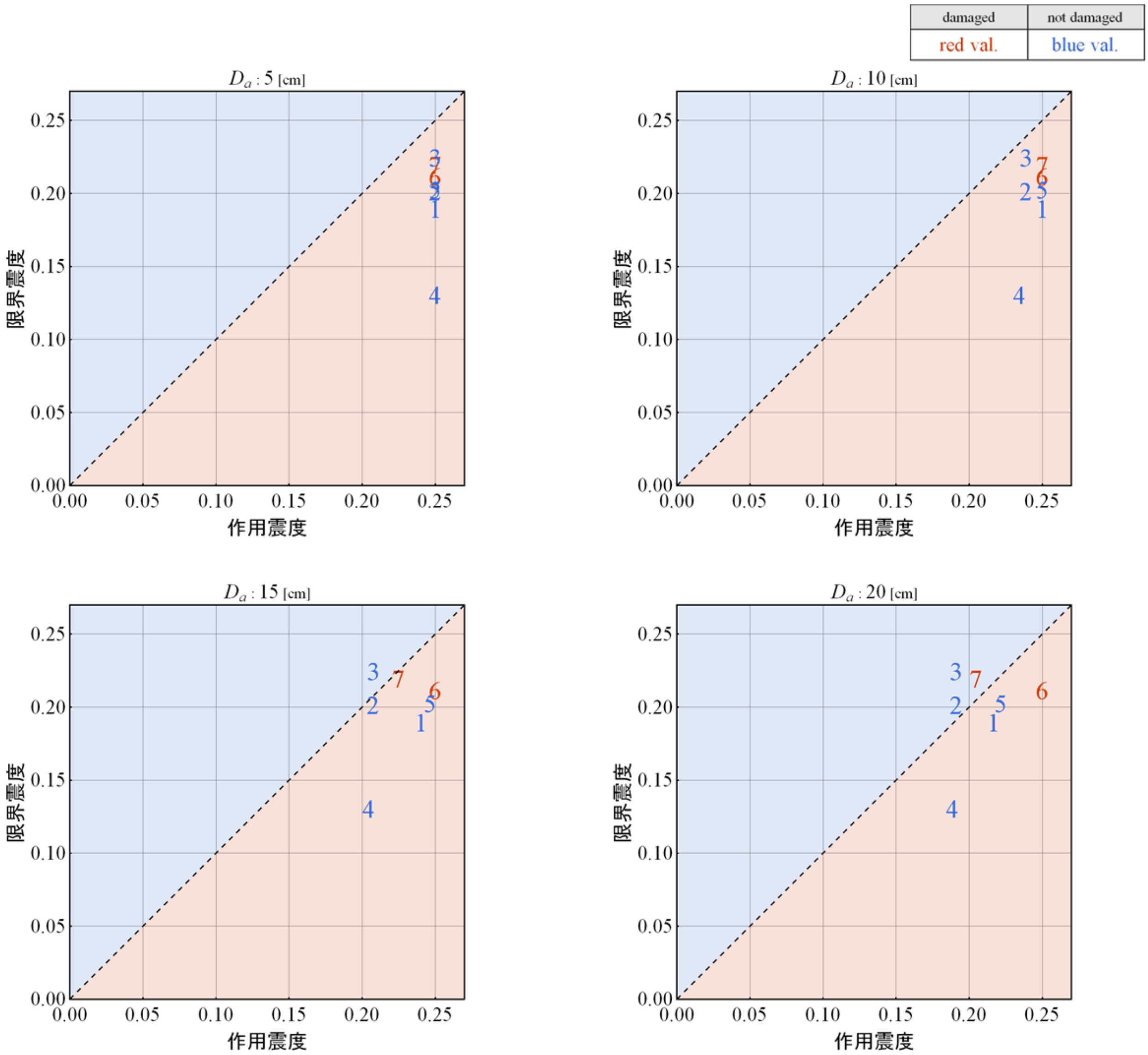
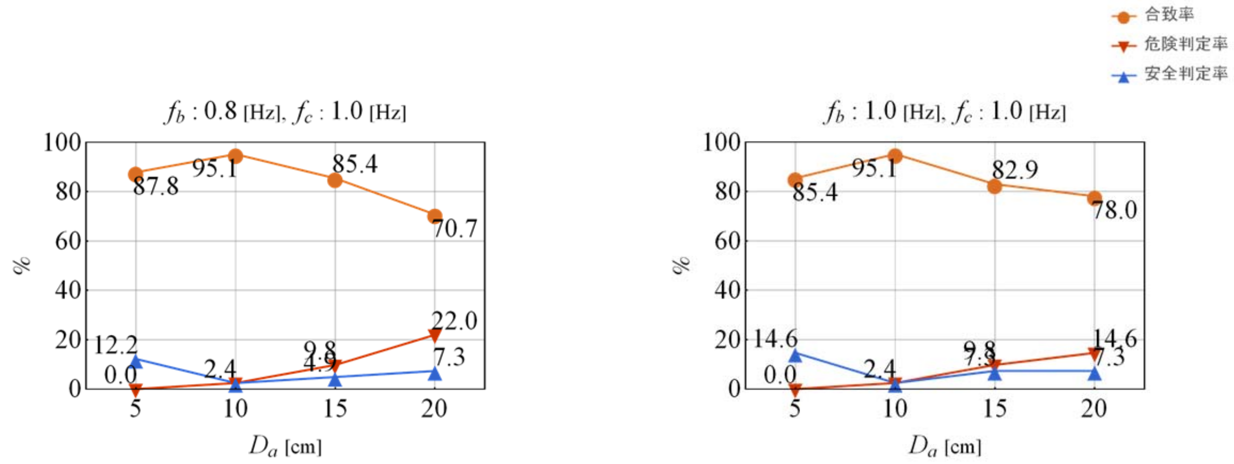
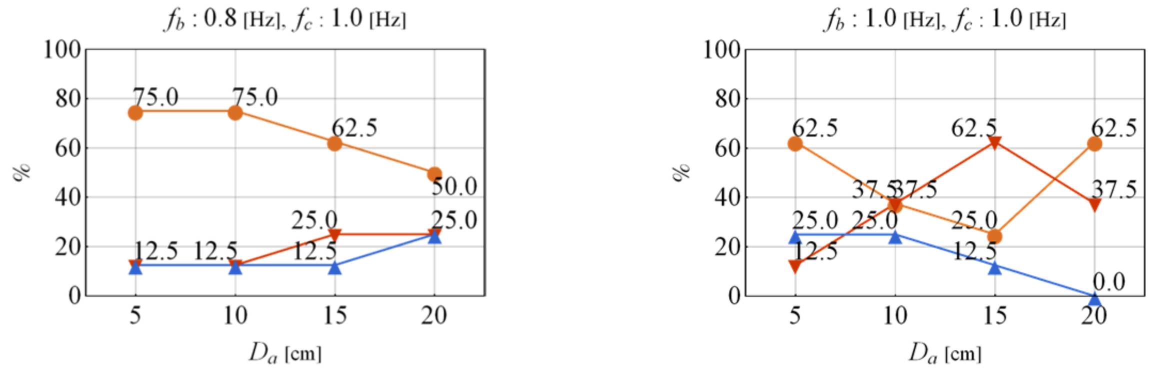


図-4.6　控え組杭式矢板式岸壁（7 施設）の異なる D_a に対する被災判定グラフの散布図の比較

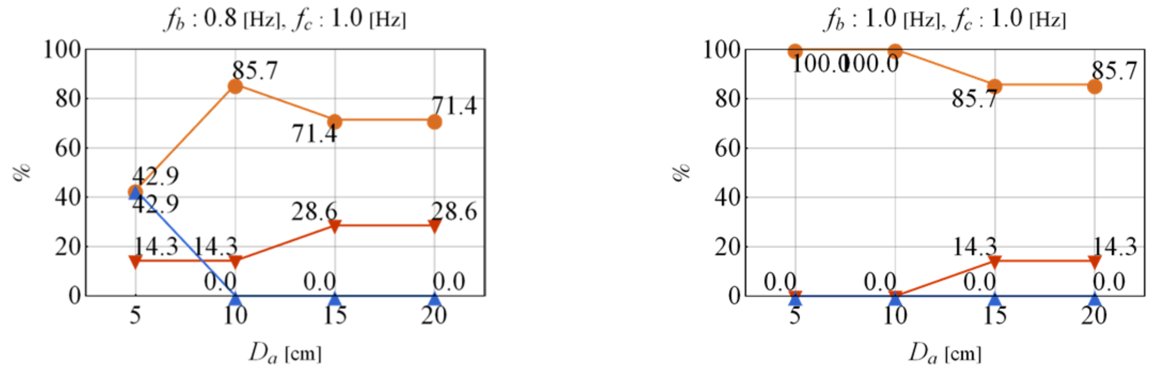
（f_b : 0.8 [Hz]，f_c : 1.0 [Hz]，SVM による震度の修正なし）



a) 重力式岸壁（41施設）



b) 控え直杭式矢板式岸壁（8施設）



c) 控え組杭式矢板式岸壁（7施設）

図-4.7 構造形式別，f_b 別，各種被災判定率の比較（SVMによる震度の修正あり）

次に，SVM による震度の修正の必要性について統計的観点から考察する．その方法として，ここでは Pearson の χ^2 適合度検定を使用する．まず，被災検証結果が良好と言える場合の各被災検証結果の判定率の水準を決定する．今回，H19 照査用震度式に対する重力式岸壁の被災検証結果を参考にし，被災検証結果が良好と言える場合の合致率，危険判定率，安全判定率をそれぞれ 90，5，5 [%]とする．その上で，SVM による震度の修正を行わない場合と行う場合に対応する次の 2 つの帰無仮説 H_{01}，H_{02} を設定し，適合度検定を行う．H_{01} は「被災判定グラフの散布図において，分離境界線は原点を通る傾き 1 の直線とし，被災検証結果が合致，危険，安全となる割合はそれぞれ，90，5，5 [%]である」，H_{02} は「被災判定グラフの散布図において，分離境界線は SVM により決定された原点を通る直線とし, 被災検証結果が合致, 危険，安全となる割合はそれぞれ，90，5，5 [%]である」とする．各々の対立仮説は各々の帰無仮説の否定とし，何れの場合も有意水準を 0.05 とする．

例として，控え直杭式矢板式岸壁を対象に，f_b : 0.8 [Hz]，f_c : 1.0 [Hz]，D_a : 15 [cm]として，H_{01} を帰無仮説とした場合の適合度検定の手順を示そう．

① 全 8 データについて，各被災判定結果の度数を数え上げる．

合致: 4，危険: 3，安全: 1

② 全 8 データについて，各被災判定結果の期待度数を算出する．

合致: 8×0.9，危険: 8×0.05，安全: 8×0.05

③ 次の式で表される検定統計量の実現値 u を算出する．

$$u = \sum_{i=1}^{3} \frac{(e_i - f_i)^2}{e_i} = 19.22 \tag{4.1}$$

ここに

u　: 検定統計量の実現値

i　: 被災検証結果の種類にラベルとして付したシリアル（$i \in \{1, 2, 3\}$）（1: 合致，2: 危険，3: 安全）

e_i　: 被災検証結果 i の期待度数

f_i　: 被災検証結果 i の度数

④ 式(4.1)で表される検定統計量が自由度 2（= 被災検証結果の種類の全数 3 － 1）の χ^2 分布に従うと仮定し，次の式で表される c を算出する．

$$P(u \le c) = 1 - \alpha \tag{4.2}$$

$$c = 5.991$$

ここに

$P(\cdot)$　: 条件 $(\cdot)$ が真の場合の確率を算出する関数

c　: 自由度2の χ^2 分布の $100\,(1-\alpha)$ %点

α　: 有意水準（= 0.05）

⑤ u，c の大小を比較し，帰無仮説の採否を決定する．

$u > c$: 帰無仮説は棄却される

$u \le c$: 帰無仮説は受容される

今の場合，$u = 19.22 > 5.991 = c$ より帰無仮説 H_{01} は棄却されるので，「被災判定グラフの散布図における分離境界線は原点を通る傾き 1 の直線とし，被災検証結果が合致，危険，安全となる確率はそれぞれ，90，5，5 [%]である」とは言えない．

同様に，控え直杭式矢板式岸壁 8 施設を対象にもう一方の帰無仮説と，重力式岸壁 41 施設，控え組杭式矢板式岸壁 7 施設を対象に 2 つの帰無仮説について適合度検定を実施した結果を**表−4.3** に示す．この仮説検定の結果において，棄却となった場合は被災検証結果が良好ではないと解釈でき，受容となった場合は被災検証結果が良好であることは否定されないと解釈でき，被災検証結果が良好であるともないとも言えないということになる．しかし，本研究では受容となった場合を被災検証結果が良好であると判断することにする．そうすると，同一の構造形式，b 値算出時の周波数，変形量許容値における仮説検定の結果を比較した場合，H_{01} が棄却，H_{02} が受容となった場合は SVM による震度の修正が必要ということになり，H_{01} が受容，H_{02} が棄却となった場合は SVM による震度の修正は不要ということになる. 例えば,**表−4.3** a−2)（f_b : 0.8 [Hz]，f_c :1.0 [Hz]，D_a :10 [cm]）においては，構造形式を問わず H_{01} が棄却, H_{02} が受容となっているので，SVM による震度の修正が必要ということになる．しかし，同一の構造形式において，b 値算出時の周波数，変形量許容値の 2 つの観点のうちいずれかの観点の値を固定して結果を見ても，棄却，受容の結果の組合せはさまざまであり，b 値算出時の周波数がどの値の時には SVM による震度の修正を行った方が良いというような，観点別の傾向を見出すことはできない．

表-4.3　Pearson の χ^2 適合度検定の結果

a) f_b : 0.8 [Hz]，f_c : 1.0 [Hz] の場合

a−1) D_a : 5 [cm]

		重力式岸壁		控え直杭式矢板式岸壁		控え組杭式矢板式岸壁	
		H_{01}	H_{02}	H_{01}	H_{02}	H_{01}	H_{02}
度数	合致	37	36	7	6	2	3
	危険	1	5	1	1	0	1
	安全	3	0	0	1	5	3
期待度数	合致	36.90		7.200		6.300	
	危険	2.050		0.4000		0.3500	
	安全	2.050		0.4000		0.3500	
u		0.9783	6.317	1.306	2.000	65.06	23.00
検定結果		受容	棄却	受容	受容	棄却	棄却

a−2) D_a : 10 [cm]

		重力式岸壁		控え直杭式矢板式岸壁		控え組杭式矢板式岸壁	
		H_{01}	H_{02}	H_{01}	H_{02}	H_{01}	H_{02}
度数	合致	36	39	5	6	2	6
	危険	5	1	2	1	0	1
	安全	0	1	1	1	5	0
期待度数	合致	36.90		7.200		6.300	
	危険	2.050		0.4000		0.3500	
	安全	2.050		0.4000		0.3500	
u		6.317	1.195	7.972	2.000	65.06	1.571
検定結果		棄却	受容	棄却	受容	棄却	受容

a−3) D_a : 15 [cm]

		重力式岸壁		控え直杭式矢板式岸壁		控え組杭式矢板式岸壁	
		H_{01}	H_{02}	H_{01}	H_{02}	H_{01}	H_{02}
度数	合致	26	35	4	5	3	5
	危険	13	4	3	2	0	2
	安全	2	2	1	1	4	0
期待度数	合致	36.90		7.200		6.300	
	危険	2.050		0.4000		0.3500	
	安全	2.050		0.4000		0.3500	
u		61.71	1.954	19.22	7.972	40.14	8.397
検定結果		棄却	受容	棄却	棄却	棄却	棄却

a−4) D_a : 20 [cm]

		重力式岸壁		控え直杭式矢板式岸壁		控え組杭式矢板式岸壁	
		H_{01}	H_{02}	H_{01}	H_{02}	H_{01}	H_{02}
度数	合致	22	30	4	4	3	5
	危険	17	8	3	2	1	2
	安全	2	3	1	2	3	0
期待度数	合致	36.90		7.20		6.30	
	危険	2.050		0.40		0.35	
	安全	2.050		0.40		0.35	
u		115.0	19.00	19.22	14.22	23.00	8.397
検定結果		棄却	棄却	棄却	棄却	棄却	棄却

b) f_b : 1.0 [Hz]，f_c : 1.0 [Hz] の場合

b−1) D_a : 5 [cm]

		重力式岸壁		控え直杭式矢板式岸壁		控え組杭式矢板式岸壁	
		H_{01}	H_{02}	H_{01}	H_{02}	H_{01}	H_{02}
度数	合致	35	35	6	5	3	7
	危険	1	0	2	1	0	0
	安全	5	6	0	2	4	0
期待度数	合致	36.90		7.200		6.300	
	危険	2.050		0.4000		0.3500	
	安全	2.050		0.4000		0.3500	
u		4.881	9.759	7.000	7.972	40.14	0.7778
検定結果		受容	棄却	棄却	棄却	棄却	受容

b−2) D_a : 10 [cm]

		重力式岸壁		控え直杭式矢板式岸壁		控え組杭式矢板式岸壁	
		H_{01}	H_{02}	H_{01}	H_{02}	H_{01}	H_{02}
度数	合致	37	39	4	3	4	7
	危険	3	1	1	3	0	0
	安全	1	1	3	2	3	0
期待度数	合致	36.90		7.200		6.300	
	危険	2.050		0.4000		0.3500	
	安全	2.050		0.4000		0.3500	
u		0.9783	1.195	19.22	25.75	21.25	0.7778
検定結果		受容	受容	棄却	棄却	棄却	受容

b−3) D_a : 15 [cm]

		重力式岸壁		控え直杭式矢板式岸壁		控え組杭式矢板式岸壁	
		H_{01}	H_{02}	H_{01}	H_{02}	H_{01}	H_{02}
度数	合致	33	34	4	2	5	6
	危険	6	4	2	5	0	1
	安全	2	3	2	1	2	0
期待度数	合致	36.90		7.200		6.300	
	危険	2.050		0.4000		0.3500	
	安全	2.050		0.4000		0.3500	
u		8.02	2.523	14.22	57.56	8.397	1.571
検定結果		棄却	受容	棄却	棄却	棄却	受容

b−4) D_a : 20 [cm]

		重力式岸壁		控え直杭式矢板式岸壁		控え組杭式矢板式岸壁	
		H_{01}	H_{02}	H_{01}	H_{02}	H_{01}	H_{02}
度数	合致	27	32	3	5	6	6
	危険	12	6	3	3	0	1
	安全	2	3	2	0	1	0
期待度数	合致	36.90		7.20		6.30	
	危険	2.050		0.40		0.35	
	安全	2.050		0.40		0.35	
u		50.95	8.702	25.75	17.97	1.571	1.571
検定結果		棄却	棄却	棄却	棄却	受容	受容

※ c: 自由度 2 の χ^2 分布の $100\left(1-\alpha\right)$ %点，$\alpha = 0.05$ とした（$= 5.991$）

5. 被災検証結果等に基づく適切な各種パラメータの選択

本章では，4.3，4.4 を踏まえ，被災検証の観点から適切な，変形量許容値，b 値算出時の周波数，SVM による震度の修正の有無の組合せの選択について考察する．

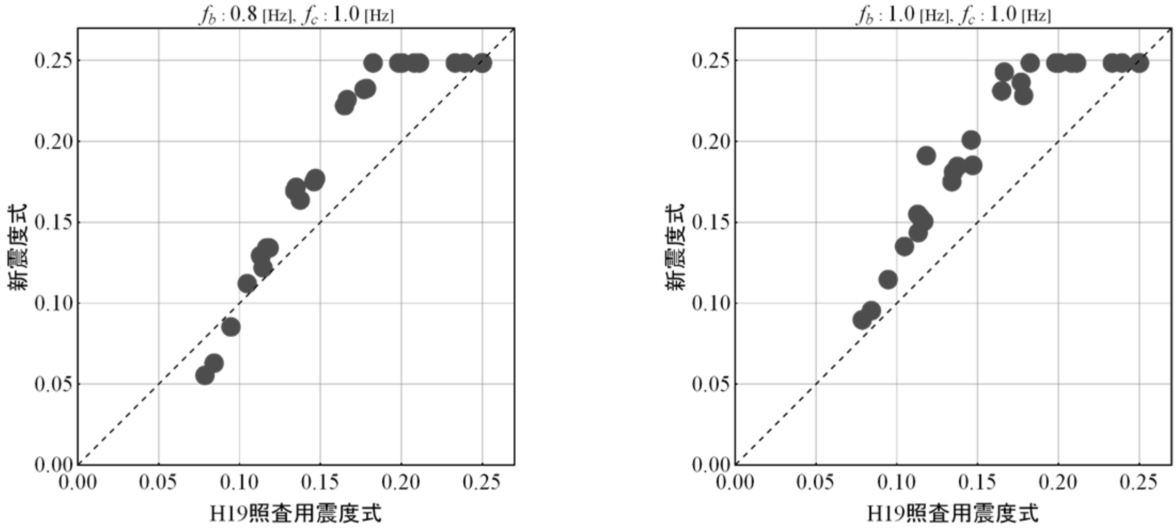
図-5.1～5.8 は，重力式岸壁 41 施設，控え直杭式矢板式岸壁 8 施設，控え組杭式矢板式岸壁 7 施設について，縦軸に新震度式により算出される震度（以後，新震度と呼称する）を，横軸に H19 照査用震度式により算出される震度（以後，現行震度と呼称する）を取った散布図である．

各種パラメータの組合せの選択は，**図-4.4，4.7** の被災検証結果，**表-4.3** の適合度検定の結果，**図-5.1～5.8** の算出される震度の大きさの観点に基づいて行う．被災検証結果については，基本的には合致率が 85 [%]以上となるパラメータの組合せから選択するが，矢板式岸壁については，控え直杭式が 8 施設，控え組杭式が 7 施設と標本サイズがやや小さいことに鑑みて条件を緩和し，合致率が 75 [%]以上のものから選択した．適合度検定については，4.4 で述べたとおり，その結果が受容となった場合を被災検証結果が良好であると判断するため，受容となったパラメータの組合せから選択する．震度については,最も小さく算出されるケースを選択する．これは，震度が大きくなれば建設コストも増大するため，被災検証結果が良好であればあえて大きな震度を採用する必要がないためである．上記 3 つの観点に基づいて選択したパラメータの組合せを構造形式別，変形量許容値別に k_h の値の昇順に並べ，**表-5.1** に示す．

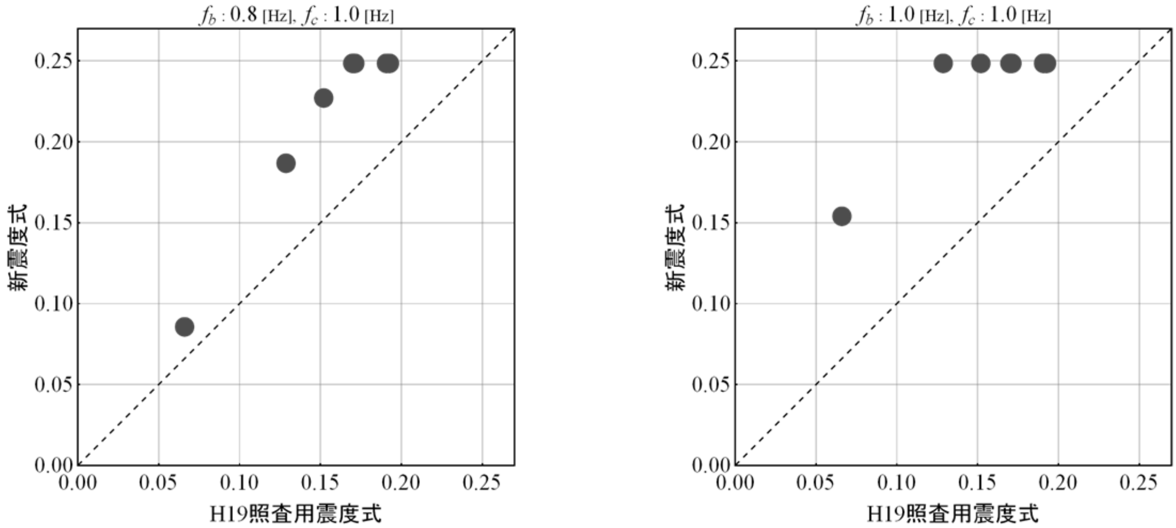
ここで，**表-5.1** の「b 値の回帰方程式の妥当性」の列について断っておく．**表-2.5** によると，控え組杭式矢板式岸壁の b 値算出時の周波数が 1.0 [Hz]の場合において，b 値の回帰方程式中の水深に掛かる係数である $\boldsymbol{c}_2$ の第 1 成分が負値となっているが，通常水深が大きくなると構造物は同一の作用に対し変形しやすくなり，物体の変形のし易さの指標である b 値が大きくなるため，この値は本来正値でなければならない．**表-5.1** の「b 値の回帰方程式の妥当性」の列では，水深に掛かる係数が正値であれば○，負値であれば×と表示しており，パラメータの組合せはこの列で○となっているものを選択する．

D_a : 5 [cm]の場合は，重力式岸壁，控え直杭式矢板式岸壁共に，f_b : 0.8 [Hz]，SVM による震度の修正なしの組合せが被災検証結果，適合度検定，算出される震度の大小の観点から最適という結果となった．控え組杭式矢板式岸壁においては，D_a : 5 [cm]の場合に b 値の回帰方程式の妥当性が得られなかったので，上記 3 つの観点から最適なパラメータの組合せは存在しないことになる．D_a : 10 [cm]の場合は，構造形式を問わず，f_b : 0.8 [Hz]，SVM による震度の修正ありの組合せが上記 3 つの観点から最適という結果となった．D_a : 15 [cm]の場合は，重力式岸壁のみについて上記の 3 つの観点から適切なパラメータの組合せが存在し，f_b : 0.8 [Hz]，SVM による震度の修正ありの組合せが最適という結果となった．

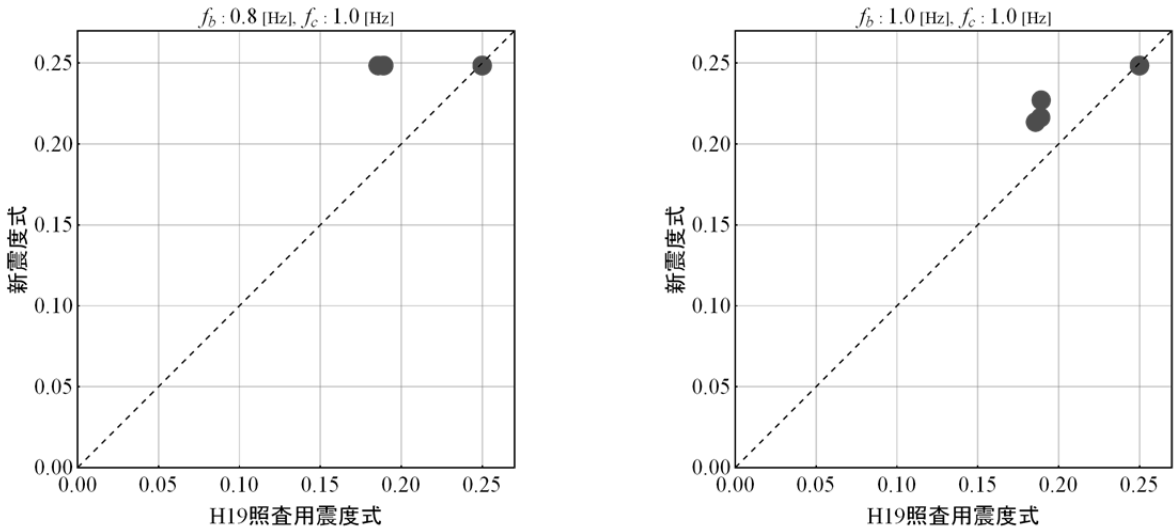
表-5.1 に示すとおり，重力式岸壁，控え直杭式矢板式岸壁共に，D_a : 5 [cm]，f_b : 0.8 [Hz]の場合において，SVM による震度の修正なしの場合の方が修正ありの場合よりも適切という結果となっている．これは，次の理由による．**図-4.4** に示すとおり，D_a : 5 [cm]の場合は他の変形量許容値の場合に比して高めの作用震度を算出する上，**表-4.1** に示すとおり，重力式岸壁，控え直杭式矢板式岸壁共に震度修正係数が f_b : 0.8 [Hz]の場合は 1.0 より大きい（重力式岸壁は 1.39，控え直杭式矢板式岸壁は 1.29）ため，SVM による震度の修正により，震度が上昇して被災判定結果が合致となっていた点が安全に転じ，安全判定率が上昇する傾向にある．よって，SVM による震度の修正なしの場合が上記 3 つの観点から適切であるならば，たとえ SVM による震度の修正ありの場合も適切であったとしても，SVM による震度の修正なしの場合の方が算出される震度が小さくなるため，より適切であるということになる．これは重力式岸壁の D_a : 10 [cm]の場合も同様で，**表-5.1** に示すとおり，f_b : 1.0 [Hz]の場合，SVM による震度の修正なしの場合の方が修正ありの場合よりも適切という結果になっている．



a) 重力式岸壁（41施設）

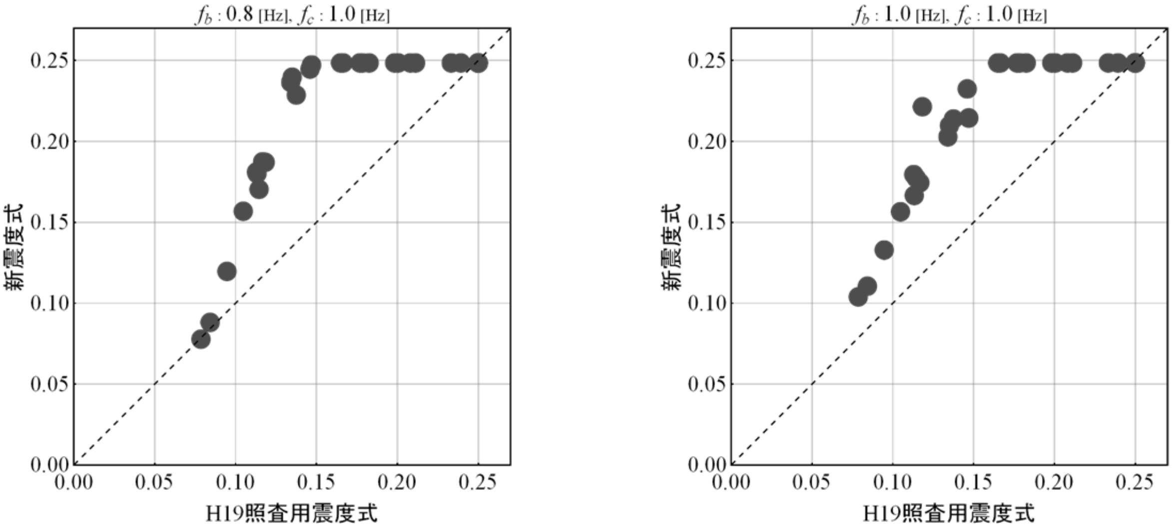


b) 控え直杭式矢板式岸壁（8施設）

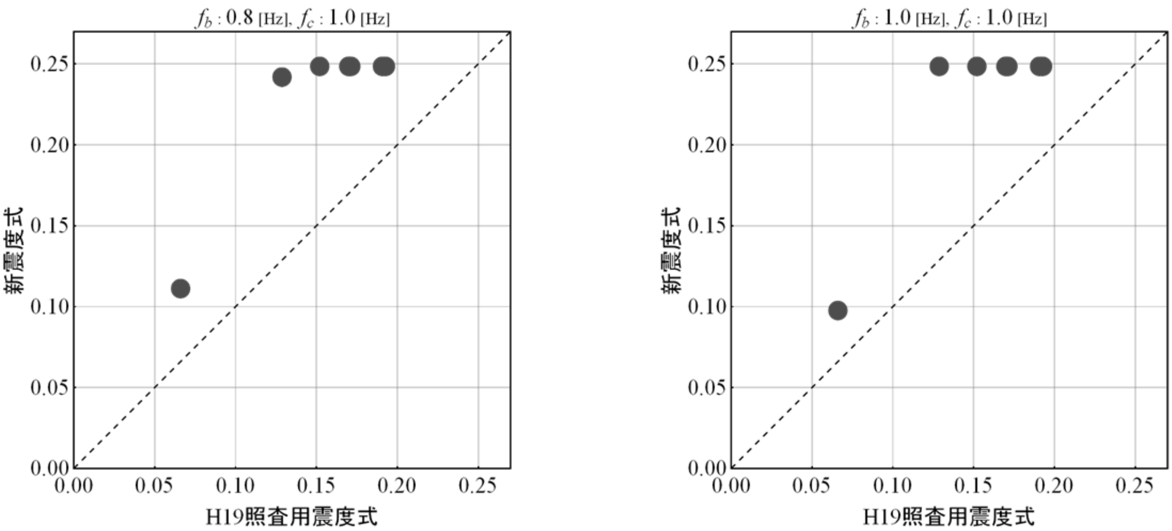


c) 控え組杭式矢板式岸壁（7施設）

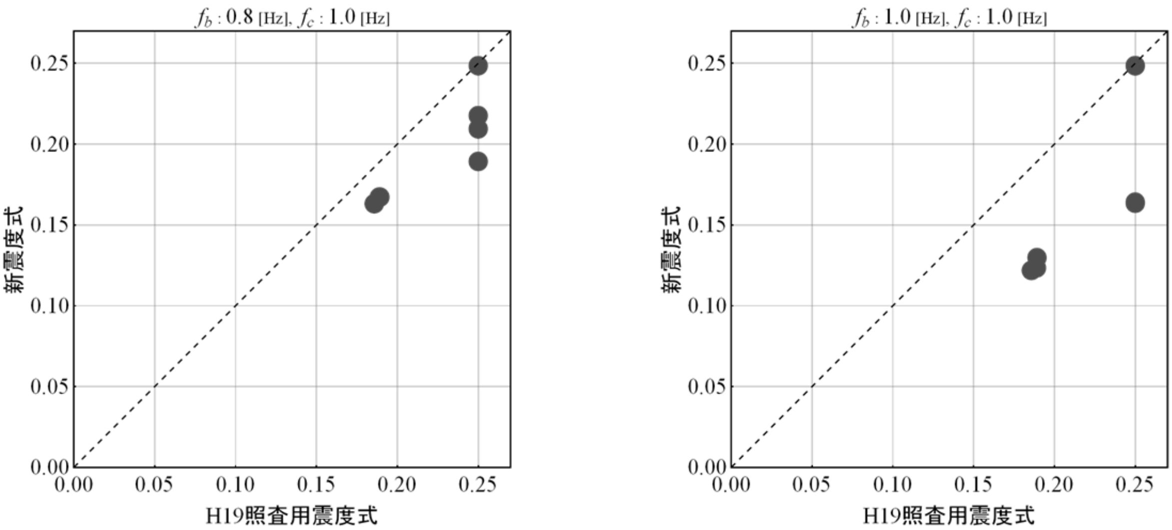
図-5.1　新旧震度比較（D_a : 5 [cm]，f_c : 1.0 [Hz]，SVM による震度の修正なし）



a) 重力式岸壁（41施設）

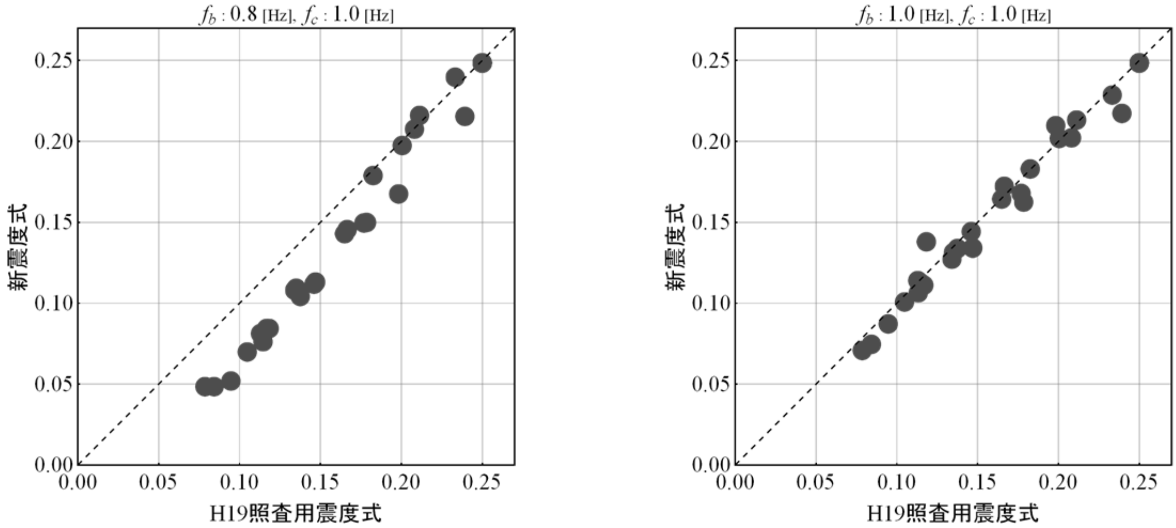


b) 控え直杭式矢板式岸壁（8施設）

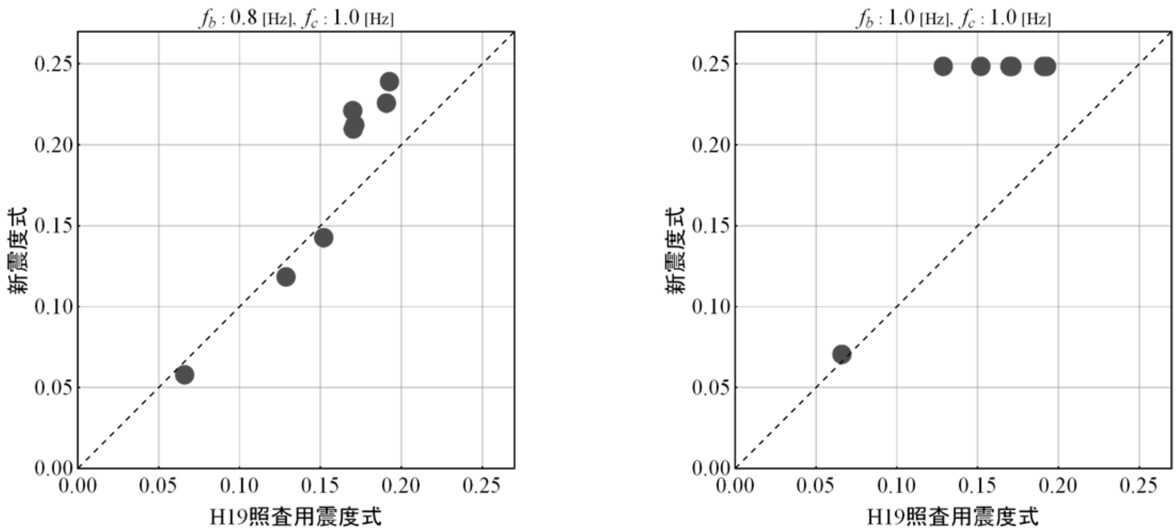


c) 控え組杭式矢板式岸壁（7施設）

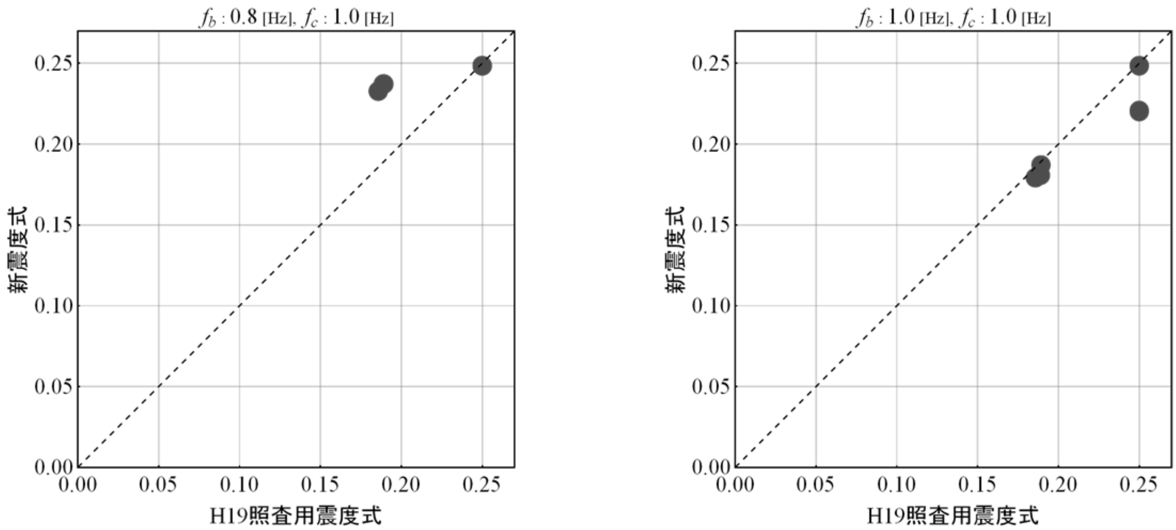
図-5.2　新旧震度比較（D_a : 5 [cm]，f_c : 1.0 [Hz]，SVM による震度の修正あり）



a) 重力式岸壁（41施設）

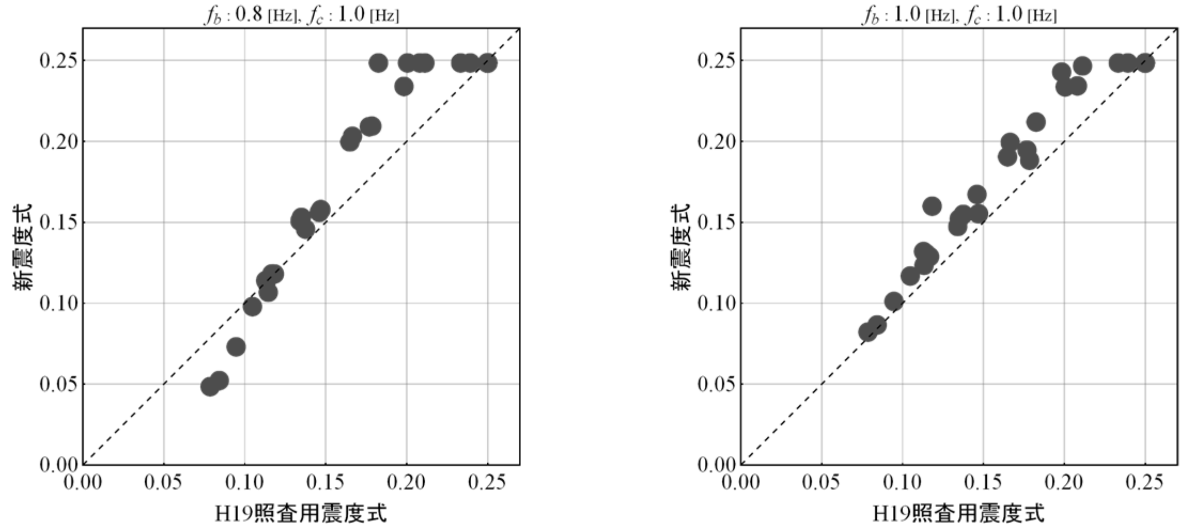


b) 控え直杭式矢板式岸壁（8施設）

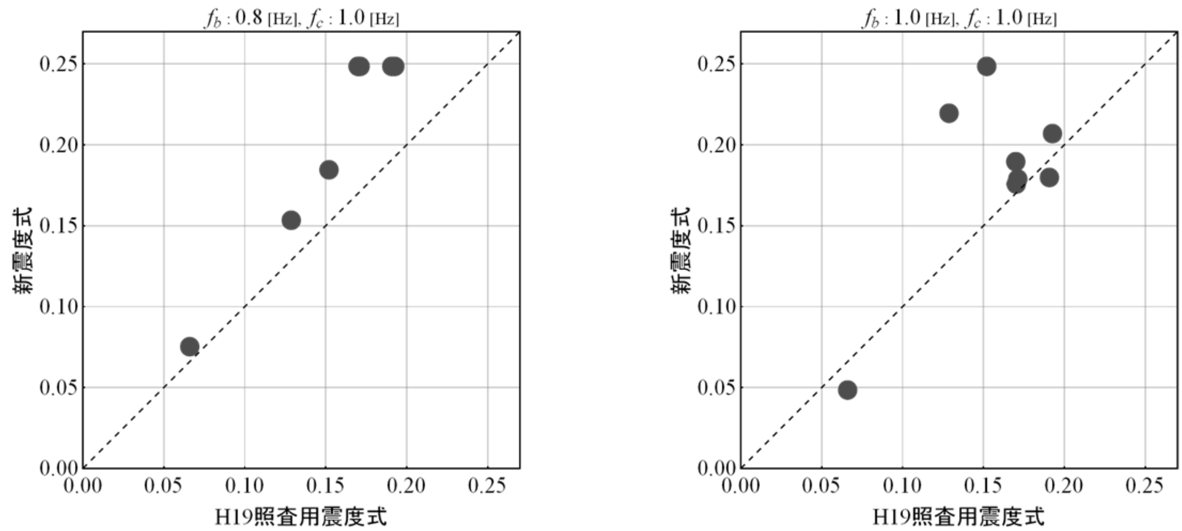


c) 控え組杭式矢板式岸壁（7施設）

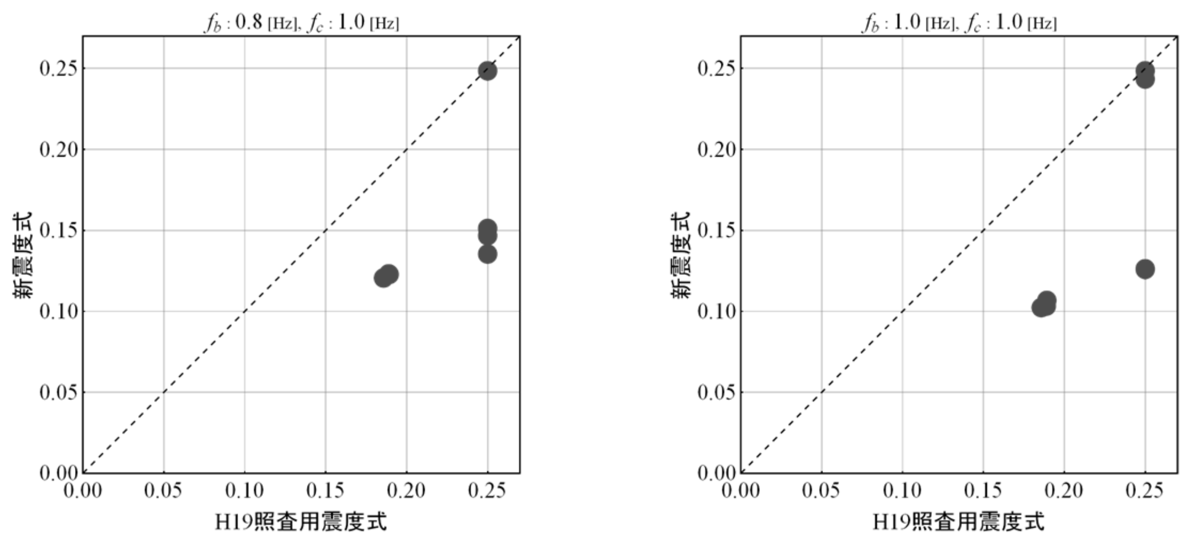
図-5.3 新旧震度比較（D_a : 10 [cm]，f_c : 1.0 [Hz]，SVM による震度の修正なし）



a) 重力式岸壁（41施設）

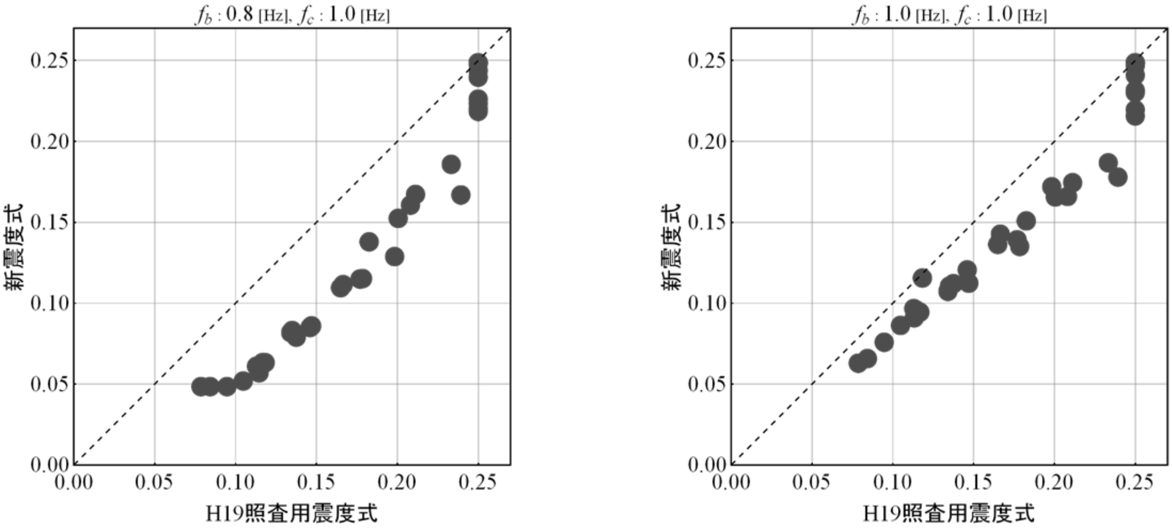


b) 控え直杭式矢板式岸壁（8施設）

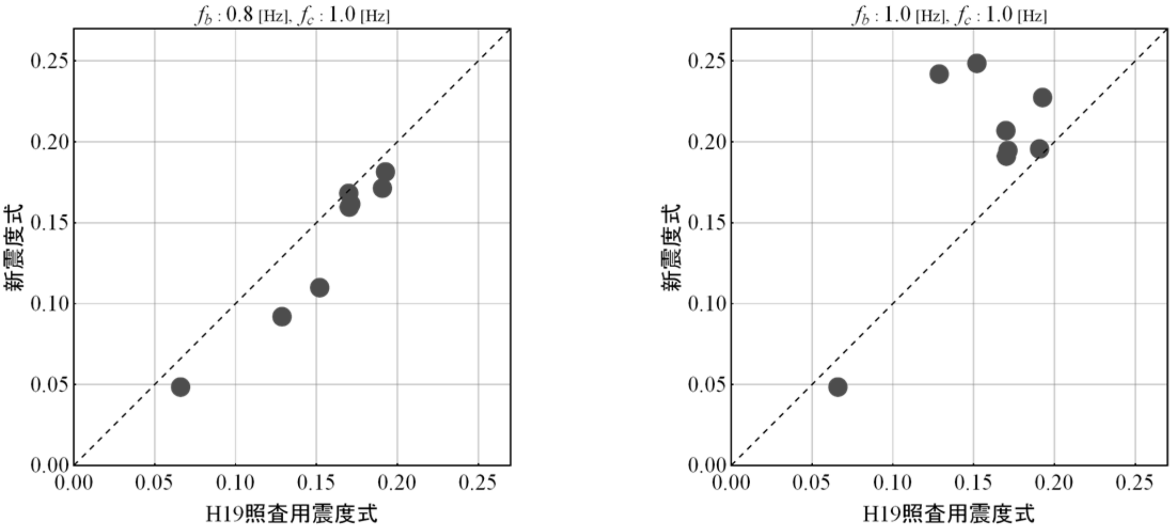


c) 控え組杭式矢板式岸壁（7施設）

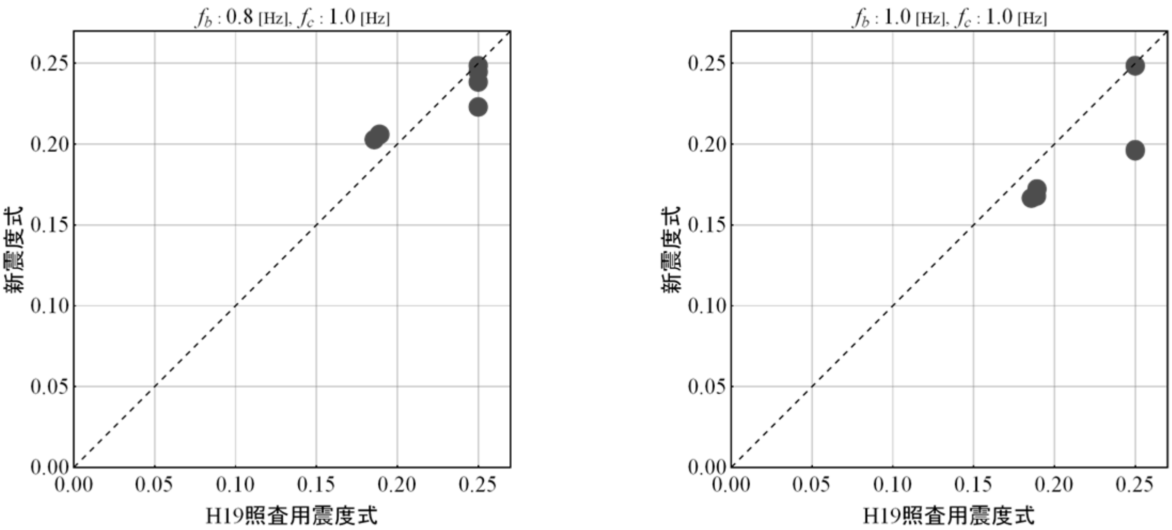
図-5.4 新旧震度比較（D_a : 10 [cm]，f_c : 1.0 [Hz]，SVM による震度の修正あり）



a) 重力式岸壁（41施設）

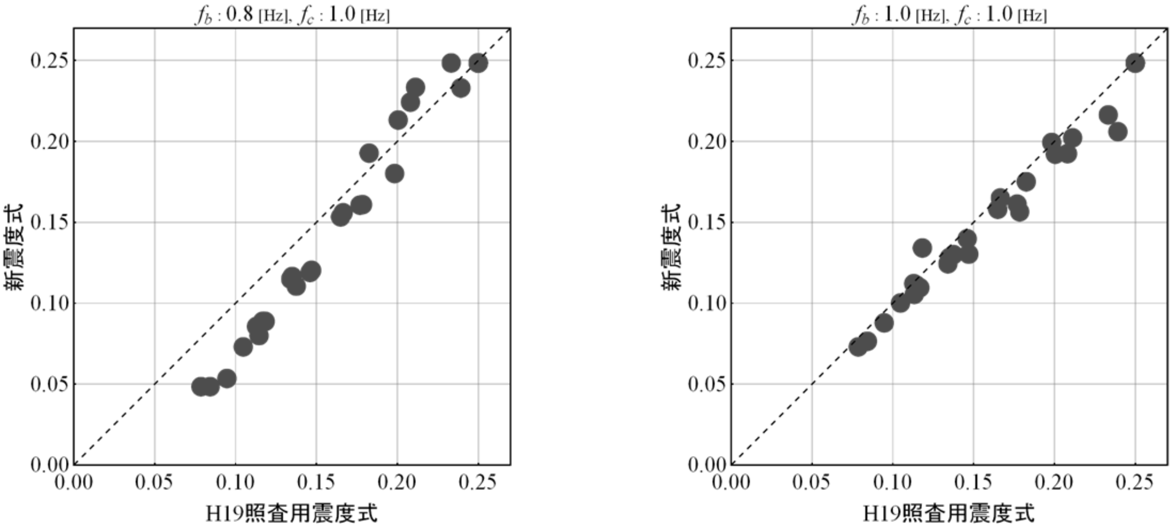


b) 控え直杭式矢板式岸壁（8施設）

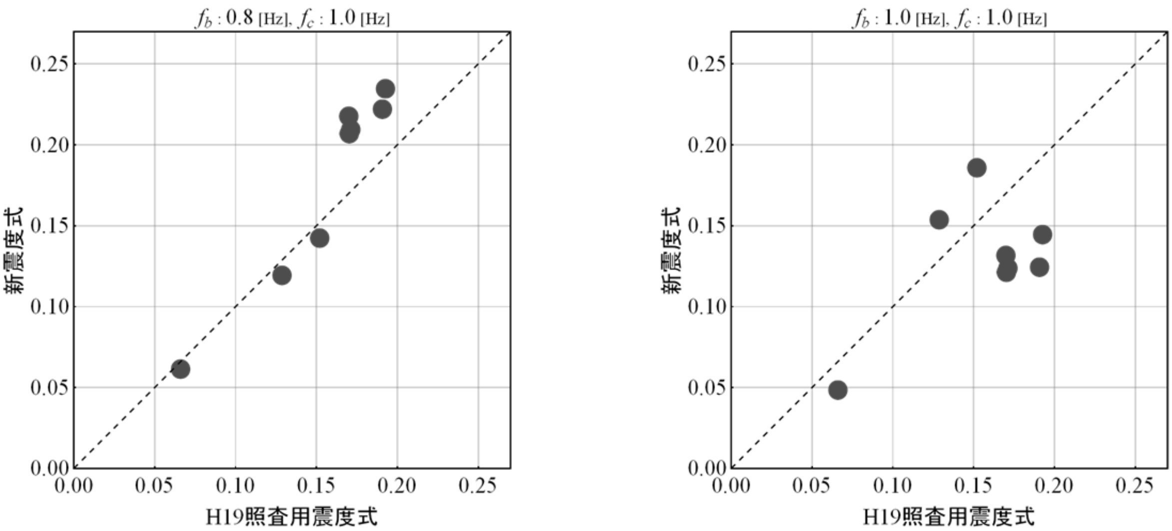


c) 控え組杭式矢板式岸壁（7施設）

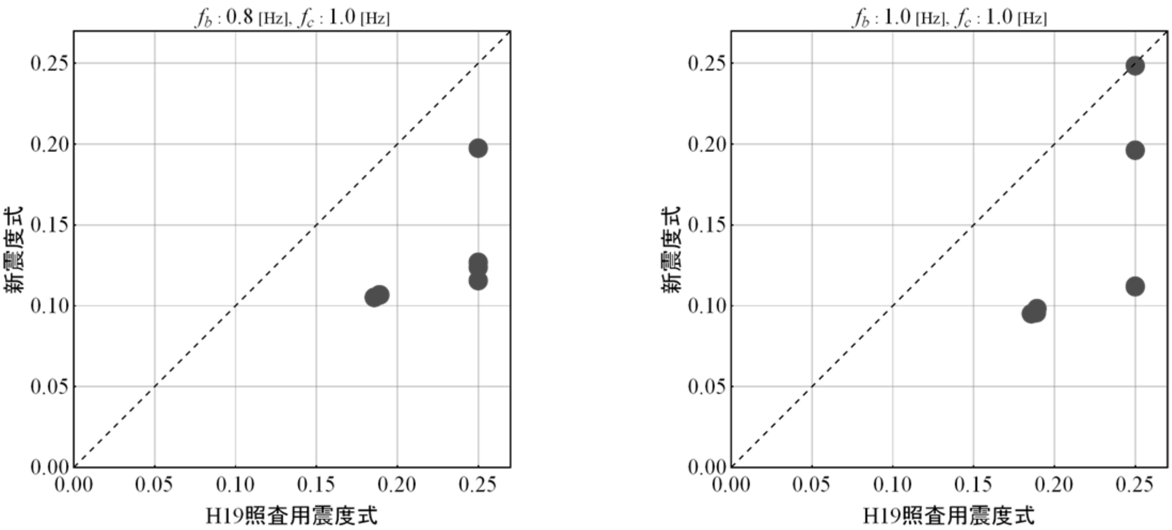
図-5.5 新旧震度比較（D_a : 15 [cm]，f_c : 1.0 [Hz]，SVMによる震度の修正なし）



a) 重力式岸壁（41施設）

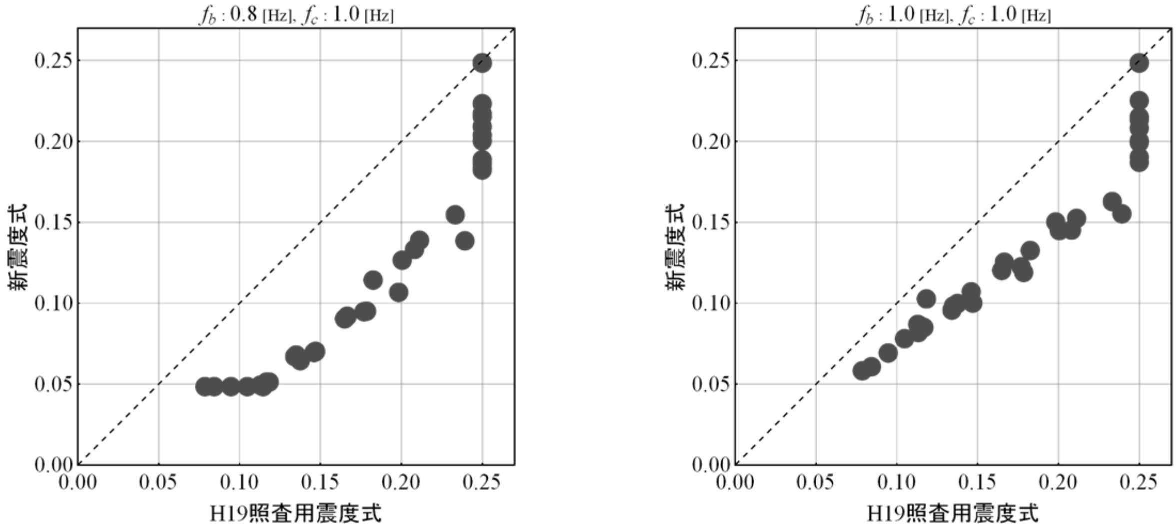


b) 控え直杭式矢板式岸壁（8施設）

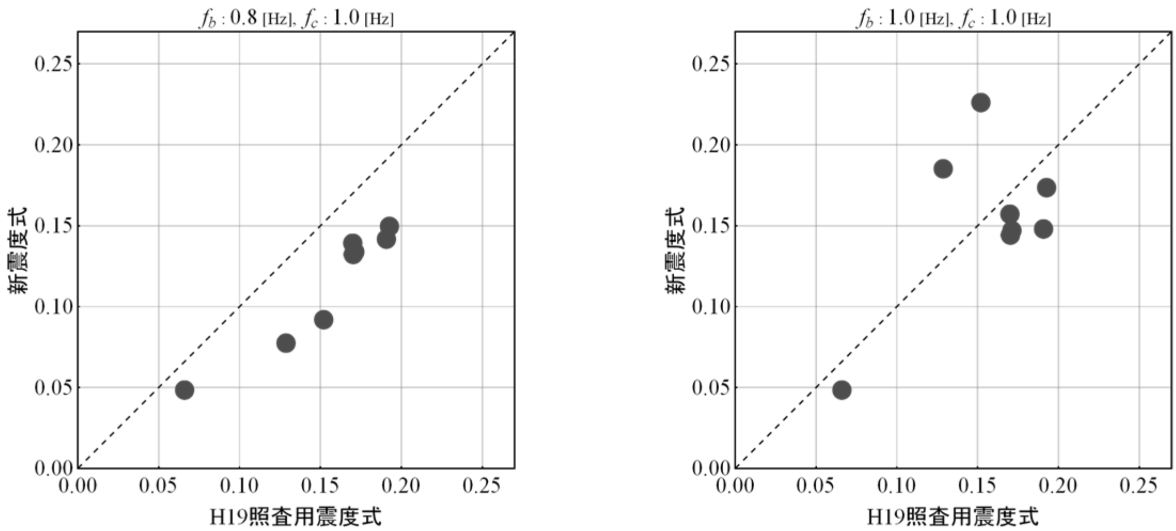


c) 控え組杭式矢板式岸壁（7施設）

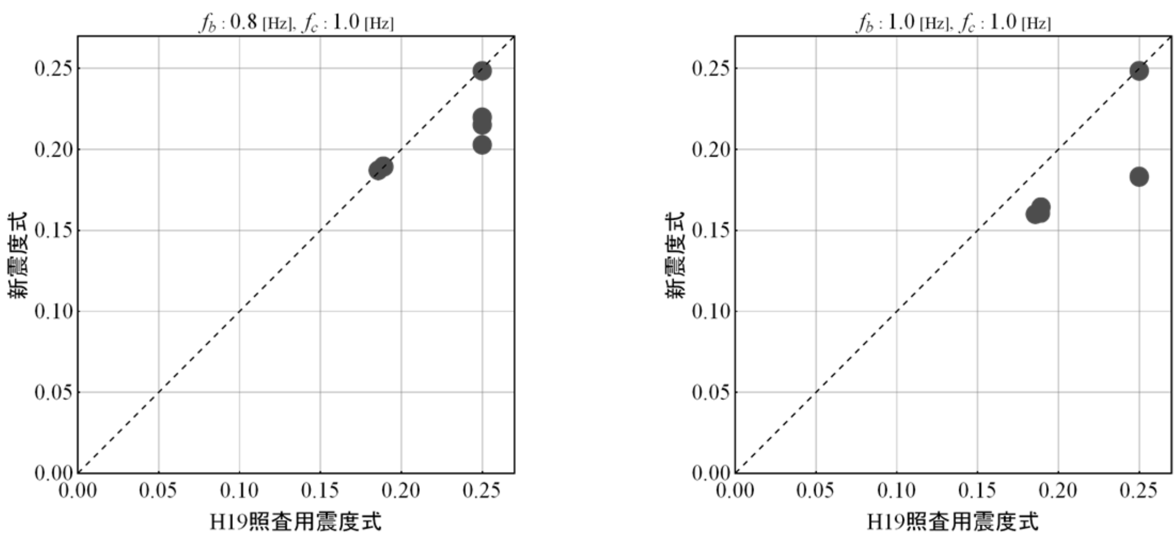
図-5.6 新旧震度比較（D_a : 15 [cm]，f_c : 1.0 [Hz]，SVMによる震度の修正あり）



a) 重力式岸壁（41施設）

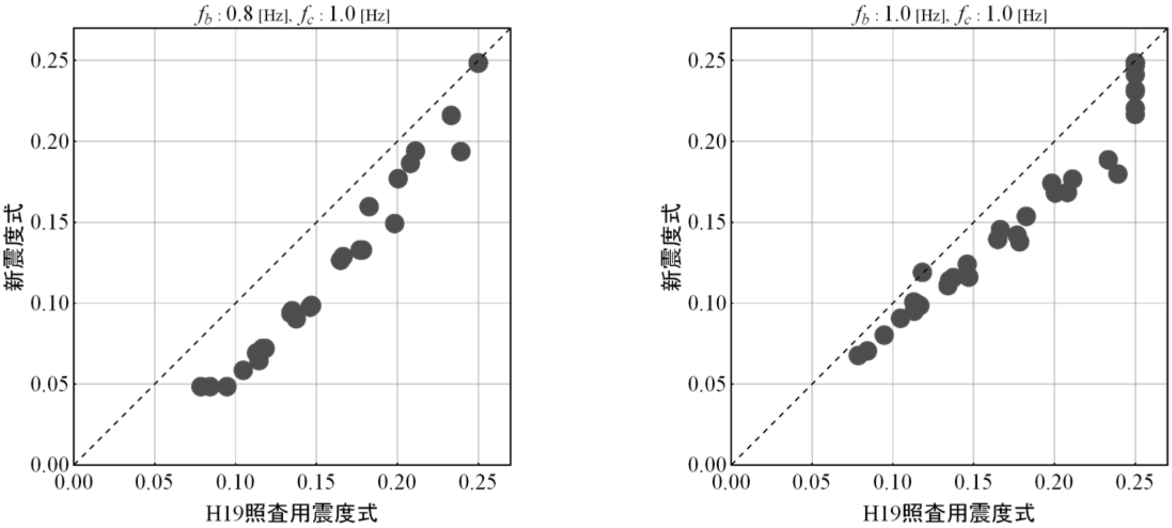


b) 控え直杭式矢板式岸壁（8施設）

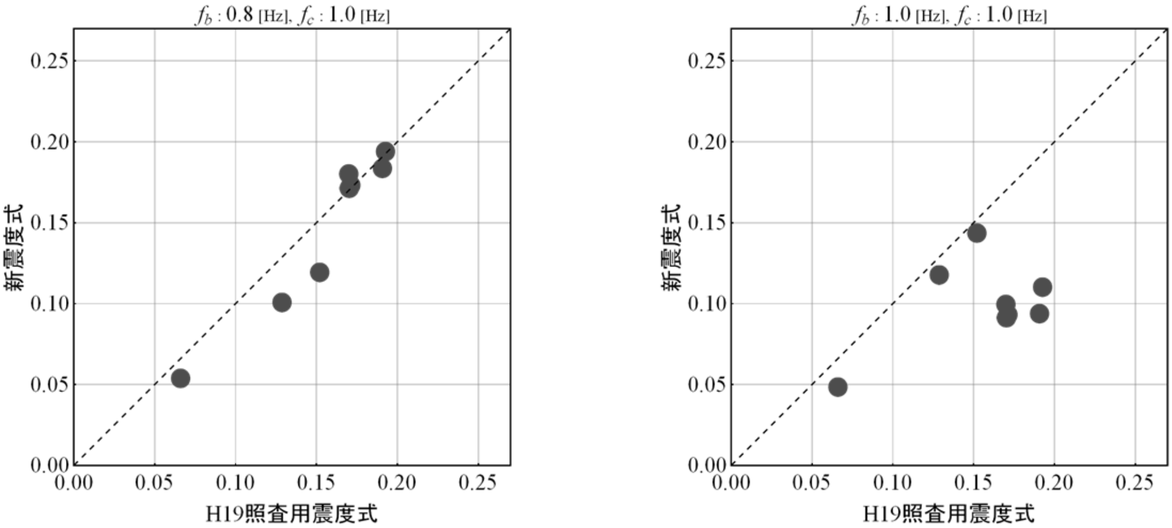


c) 控え組杭式矢板式岸壁（7施設）

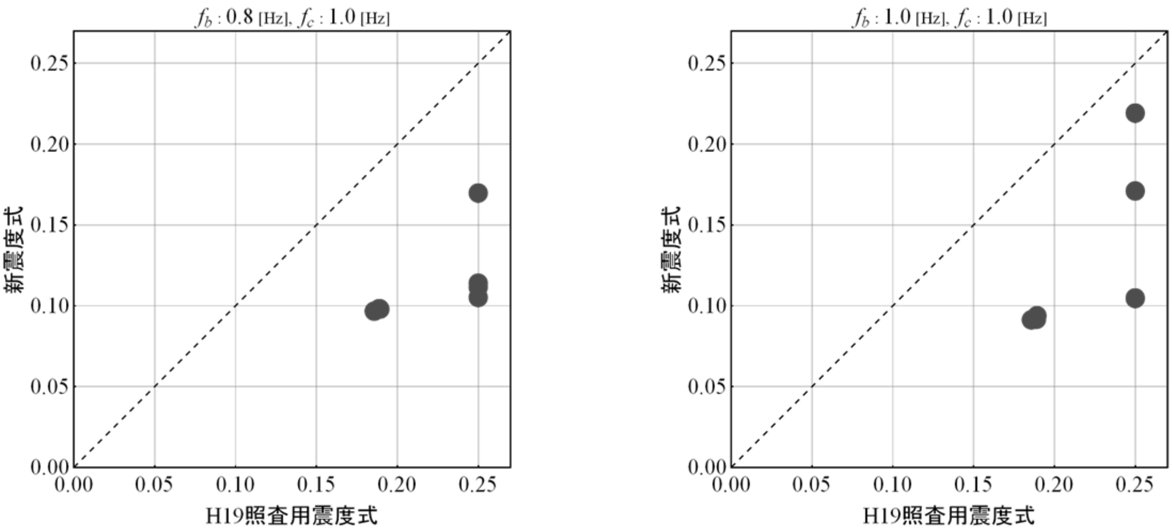
図-5.7 新旧震度比較（D_a : 20 [cm]，f_c : 1.0 [Hz]，SVM による震度の修正なし）



a) 重力式岸壁（41施設）



b) 控え直杭式矢板式岸壁（8施設）



c) 控え組杭式矢板式岸壁（7施設）

図-5.8 新旧震度比較（D_a : 20 [cm]，f_c : 1.0 [Hz]，SVM による震度の修正あり）

表-5.1　被災検証結果，適合度検定，震度の大きさ，定数関数 b の妥当性による各種パラメータの選択

構造形式	k_h 順位	D_a [cm]	f_b [Hz]	SVMによる震度の修正	被災判定率 [%]			b 値の回帰方程式の妥当性
					合致率	危険判定率	安全判定率	
重力式岸壁	1	5	0.8	なし	90.2	2.4	7.3	○
	2		0.8	あり	87.8	0.0	12.2	○
	1	10	0.8	あり	95.1	2.4	2.4	○
	2		1.0	なし	90.2	7.3	2.4	○
	3		1.0	あり	95.1	2.4	2.4	○
	1	15	0.8	あり	85.4	9.8	4.9	○
	2		1.0	あり	82.9	9.8	7.3	○
控え直杭式矢板式岸壁	1	5	0.8	なし	87.5	12.5	0.0	○
	2		0.8	あり	75.0	12.5	12.5	○
	1	10	0.8	あり	75.0	12.5	12.5	○
控え組杭式矢板式岸壁	1	5	1.0	あり	100.0	0.0	0.0	×
	1	10	1.0	あり	100.0	0.0	0.0	×
	2		0.8	あり	85.7	14.3	0.0	○
	1	15	1.0	あり	85.7	14.3	0.0	×
	1	20	1.0	あり	85.7	14.3	0.0	×
	2		1.0	なし	85.7	0.0	14.3	×

※「k_h 順位」の列は，k_h の値を昇順に並べた場合の順位を意味する

6. 結論

本稿では，3種類の構造形式（重力式岸壁，控え直杭式矢板式岸壁，控え組杭式矢板式岸壁）を対象に，震度算定式を深い水深にも適用可能なものとするために水深 –16.0 ～ –20.0 [m]の数値解析結果を組み入れて照査用震度式を定式化し，併せて，被災検証結果に基づくSVMによる震度修正法を提案した．そして，これらの提案に基づく被災検証結果への影響と震度への影響について示し，被災検証結果，適合度検定，算出される震度の大きさの観点から，適切な各種パラメータの組合せについて示した．その結果，構造形式，変形量許容値を問わず，f_b : 0.8 [Hz]の場合において，D_a : 5 [cm]の場合はSVMによる震度の修正なし（ただし，控え組杭式矢板式岸壁を除く），D_a : 10 [cm]の場合はSVMによる震度の修正あり，D_a : 15 [cm]の場合はSVMによる震度の修正なし（ただし，重力式岸壁のみ）の場合が，上記3つの観点から最適となるという結果を得た．ただし，控え直杭式矢板式岸壁の被災検証に使用した対象施設のデータのうち，図-4.3 b–1) に示すように被災検証結果が危険となっている施設番号1, 8については注意が必要である。被災検証法で対象としている震度法は地盤が液状化しないことを前提にしている[1)]ため, 被災検証には地盤が液状化していない施設のデータを用いることが原則であり，地震被害調査の報告書から液状化の発生が明らかな施設は検討対象から省いている[1)]．しかし，1983年の日本海中部地震を経験した施設番号1の秋田港外港地区の泊地護岸 (–13.0 m) については，地震被害調査の報告書[5)]によると, 噴砂は認められないものの，周辺の被災状況から液状化した可能性が高いと推察される．また，2007年能登半島沖地震を経験した施設番号8の七尾港大田地区の –10 m 1号岸壁については，関連する正式な地震被害調査の報告書が刊行されておらず, 本研究では液状化の発生が明らかな施設として取り扱わなかったが，現地調査を行った関係者によれば液状化した可能性が極めて高いとされている．本稿のデータを用いて関連研究を実施される際には, 上記2つのデータの取り扱いについて十分に注意されたい.

本稿に係る研究の今後の展開についてであるが，本稿で示した被災検証結果に基づく照査用震度式の修正方法は，H19照査用震度式による被災検証結果が良好でなかった控え直杭式及び控え組杭式矢板式岸壁に対して，良好な被災検証結果を導き出すように照査用震度式を修正することを目的として発案したものである．しかし，本稿において，控え直杭式及び控え組杭式矢板式岸壁の被災検証に用いた施設数は，それぞれ8施設，7施設数と分離境界線の妥当性を統計的観点から評価するにはやや標本サイズが小さい．矢板式岸壁をはじめ重力式岸壁においても，今後生じうる地震による被災データ，あるいは

地震被害調査の報告書にはあまり記載されることがない無被災のデータを収集して検討対象のデータとして組み入れ，本稿で示したSVMによる震度修正係数への影響を十分に吟味する必要がある．また，被害の有無に関する予測精度が向上するよう照査用震度式を被災検証結果に基づいて改善するためには，今後地震が生じた際に，施設単位ではなく，バース単位の岸壁天端の残留水平変位等の定量的な被災状況に関する情報が不可欠となる．地震被害調査を実施される際にはこの点に留意し，限られた地震被害調査の中で，できる限り多くの詳細な記録の蓄積が望まれる次第である．

謝辞

本稿をとりまとめるにあたり，港湾施設研究室の交流研究員である佐藤 健彦氏，高野 向後氏，勝俣 優氏，田端 優憲氏，及び松本 英雄港湾新技術研究官には，本稿の執筆方針及び検討内容に対して貴重なご意見を頂いた．ここに深く感謝の意を表す．

参考文献

1) 福永 勇介，竹信 正寛，宮田 正史，野津 厚，小濱 英司：重力式および矢板式岸壁を対象とした被災検証による照査用震度式の妥当性の評価，国土技術政策総合研究所資料，No.920，2016．
2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007．
3) 長尾 毅，岩田 直樹，藤村 公宜，森下 倫明，佐藤 秀政，尾崎 竜三：レベル1地震動に対する重力式および矢板式岸壁の耐震性能照査用震度の設定手法，国土技術政策総合研究所資料，No.310，2006．
4) 前田 英作：痛快！サポートベクトルマシン －古くて新しいパターン認識手法－，情報処理，Vol.42，No.7，pp.676–683，2001．
5) 土田 肇，野田 節男，稲富 隆昌，上部 達生，井合 進，大根田 秀明，外山 進一：1983年日本海中部地震港湾被害報告書，港湾技研資料，No.511，1985．

（2017 年 5 月 31 日受付）

付録A　修正版ソフトマージンSVMにおける最適化問題の導出

本付録では，被災判定グラフ上で分離境界線を引くにあたり，本研究において提案した修正版ソフトマージンSVMにおける最適化問題の導出を行う．

本編で説明したとおり，本研究で使用したSVMではオリジナルのソフトマージンSVM[1), 2)]に対し2つの修正を加えている．1つがSVMによって求まる分離境界線が原点を通るようにしているということ，もう1つが損失に対し重みを課すことができるようにしているということである．

オリジナルのソフトマージンSVMでは次式で表される無制約最適化問題を解いて，分離境界線の法線ベクトル $\boldsymbol{w}$ と閾値 b を求める．

$$\underset{\boldsymbol{w}\in\mathbb{R}^2,\, b\in\mathbb{R}}{\text{Minimize}} \quad \frac{1}{2}\|\boldsymbol{w}\|^2 + C\sum_{k\in I}\max\left\{1-y_k\, f\left(\boldsymbol{x}_k\right), 0\right\} \tag{A.1}$$

ここに

$\underset{\text{cond.}}{\text{Minimize}}(\cdot)$: 最適化問題において，条件 cond. の下で目的関数 $(\cdot)$ を最小化することを意味する

$\boldsymbol{w}$: 分離境界線の法線ベクトル（$\in\mathbb{R}^2$）

b : 閾値（$\in\mathbb{R}$）

f : 分離境界線の方程式を陰関数で表した場合の関数

$\boldsymbol{x}_k$: 添字 k で表されるデータの座標（$\in\mathbb{R}^2$）

y_k : 添字 k で表されるデータに付与されたクラスを表す量（$\in\{+1,-1\}$）

C :正則化パラメータ $\left(\in(0,\infty]\right)$

I : データに付された添字の集合．要素は m 以下の自然数

A.1　SVMにおける損失に対し重みを課す条件の付加

まず，式(A.1)に，損失に対し重みを課すことを考える．重みとしては，危険判定率を r，安全判定率を s とすると，$1+r$，$1+s$ を採用し，損失の計上対象となるデータのうち，実被害による判定で被災，実被害による判定で無被災となるデータに対しそれぞれ乗じる．これは，次の理由による．矢板式岸壁の場合のように，被災検証に用いる標本サイズがやや小さく，その中でさらに少ない数の損失計上対象のデータによる損失を考える場合，損失計上対象となるデータのうち，実被害による判定で被災となるデータによる損失，無被災となるデータによる損失のいずれか一方に分離境界線の傾きが大きく影響を受けることを懸念し，その影響を相対的に弱めるためである．本来であれば，最適化問題の解として求まる分離境界線に対し，損失計上対象となるデータのうち，実被害による判定で被災，無被災となる割合それぞれに1を加えたものを重みとして採用すべきであるが，本研究では計算を簡単にするために，$1+r$，$1+s$ を採用した．今，実被害による判定で無被災，被災を意味する○，×のデータには，属するクラスを表す量として，それぞれ+1，−1の値が付与されているので，+1の時に $1+s$ を，−1の時に $1+r$ を取る関数を考えればよく，その関数は次の式で表される．

$$p\left(y_k; r, s\right) := \left[y_k, 1\right]\left[-\frac{r-s}{2}, \frac{r+s}{2}+1\right]^T \tag{A.2}$$

ここに

p : 損失に重みを課す関数

r : 危険判定率（$\in\mathbb{R}$）

s : 安全判定率（$\in\mathbb{R}$）

なお，本研究ではこの損失に課す重みを全ての構造形式に対して適用している．

式(A.2)で表される損失に課す重みを，各損失に乗じて総和を取れば，解くべき無制約最適化問題は次の式のようになる．

$$\underset{\boldsymbol{w}\in\mathbb{R}^2,\, b\in\mathbb{R}}{\text{Minimize}} \quad \frac{1}{2}\|\boldsymbol{w}\|^2 + C\sum_{k\in I}p\left(y_k; r, s\right)\max\left\{1-y_k\, f\left(\boldsymbol{x}_k\right), 0\right\} \tag{A.3}$$

式(A.3)の最適解が満たす条件として1次の最適性条件を求めるために，式(A.3)の目的関数を $\boldsymbol{w}$ によって微分が可能となるように変換し，Lagrange乗数法によるLagrange関数を求める必要がある．

式(A.3)の目的関数が $\boldsymbol{w}$ で微分可能となるようパラメータ ξ_k を導入すると，式(A.3)は不等式制約付き最適化問題

$$\begin{aligned}
&\underset{\boldsymbol{w}\in\mathbb{R}^2,\, b\in\mathbb{R},\, \xi_k\in\mathbb{R}}{\text{Minimize}} && \frac{1}{2}\|\boldsymbol{w}\|^2 + C\sum_{k\in I}p\left(y_k; r, s\right)\xi_k \\
&\text{subject to} && \xi_k \geq 1-y_k\, f\left(\boldsymbol{x}_k\right) \quad \left(k\in I\right) \\
& && \xi_k \geq 0
\end{aligned} \tag{A.4}$$

ここに

ξ_k : 添字 k で表されるスラック変数（$\in\mathbb{R}$）

$\text{subject to}(\cdot)$: 最適化問題において，目的関数に制約 $(\cdot)$ を課すことを意味する

となり，Lagrange乗数法によるLagrange関数を導入すると，解くべき最適化問題は次の式で表される．

$$
\begin{aligned}
&\underset{\boldsymbol{w}\in\mathbb{R}^2, b\in\mathbb{R}, \xi_k\in\mathbb{R}}{\text{Minimize}} && \mathcal{L}(\boldsymbol{w}, b, \xi_k, \lambda_k, \mu_k) \\
& && := \frac{1}{2}\|\boldsymbol{w}\|^2 + C\sum_{k\in I} p(y_k; r, s)\,\xi_k \\
& && \quad + \sum_{k\in I}\lambda_k\left(1 - y_k\, f(\boldsymbol{x}_k) - \xi_k\right) + \sum_{k\in I}\mu_k(-\xi_k) \\
&\text{subject to} && 1 - y_k\, f(\boldsymbol{x}_k) - \xi_k \le 0 \quad (k\in I) \\
& && \lambda_k \ge 0 \\
& && \lambda_k\left(1 - y_k\, f(\boldsymbol{x}_k) - \xi_k\right) = 0 \\
& && -\xi_k \le 0 \\
& && \mu_k \ge 0 \\
& && \mu_k(-\xi_k) = 0
\end{aligned}
\tag{A. 5}
$$

ここに

$\mathcal{L}$　: Lagrange関数

λ_k, μ_k　: Lagrange乗数（$\in\mathbb{R}$）

このパラメータ ξ_k の幾何学的な意味であるが，**図－A. 1**で示すように，このパラメータに対応するデータの点 $\boldsymbol{x}_k$ と，分離境界線に平行なサポートベクターを通る直線との距離に関係しており，その距離はパラメータ ξ_k を用いて，$\|\boldsymbol{w}\|^{-1}\xi_k$ と表される．因みにこのデータの点 $\boldsymbol{x}_k$ と分離境界線との距離は，$\left|\|\boldsymbol{w}\|^{-1}(1-\xi_k)\right|$ となる．

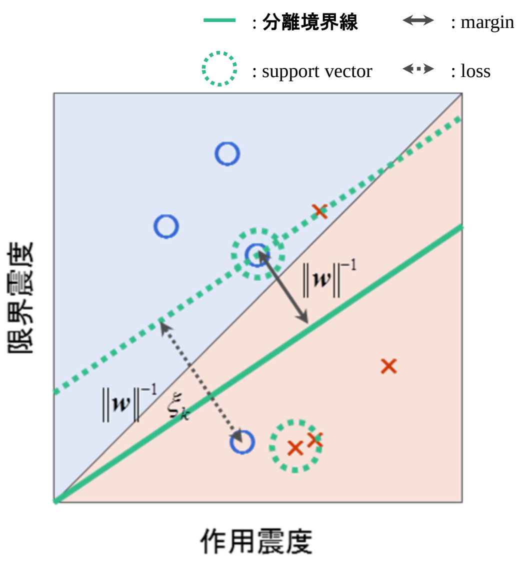


図-A. 1　パラメータ ξ_k の幾何学的意味

A. 2　SVMにより求まる分離境界線が原点を通るという条件の付加

ここでは，もう一つの条件である，SVMにより求まる分離境界線が原点を通るという条件を追加する．これは式(A. 5)の目的関数において，$b=0$ とするだけでよく，この条件を追加した新たなLagrange関数は

$$
\begin{aligned}
\tilde{\mathcal{L}}(\boldsymbol{w}, \xi_k, \lambda_k, \mu_k) &:= \mathcal{L}(\boldsymbol{w}, 0, \xi_k, \lambda_k, \mu_k) \\
&= \frac{1}{2}\|\boldsymbol{w}\|^2 + C\sum_{k\in I} p(y_k; r, s)\,\xi_k \\
&\quad + \sum_{k\in I}\lambda_k\left(1 - y_k\langle\boldsymbol{w}, \boldsymbol{x}_k\rangle - \xi_k\right) + \sum_{k\in I}\mu_k(-\xi_k)
\end{aligned}
\tag{A. 6}
$$

ここに

$\tilde{\mathcal{L}}$　: Lagrange関数

と表される．

ここで，1次の最適性条件を求める際に式(A. 6)のLagrange関数の $\boldsymbol{w}$，ξ_k による偏微分を行うため，偏微分しやすいよう式(A. 6)を行列表記で書き換えると次のように表される．

$$
\begin{aligned}
&\tilde{\mathcal{L}}(\boldsymbol{w}, \boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \\
&:= \frac{1}{2}\|\boldsymbol{w}\|^2 + C\,\boldsymbol{p}(Y; r, s)^T\,\boldsymbol{\xi} \\
&\quad + \boldsymbol{\lambda}^T\left(\boldsymbol{1} - Y X^T\boldsymbol{w} - \boldsymbol{\xi}\right) - \boldsymbol{\mu}^T\boldsymbol{\xi}
\end{aligned}
\tag{A. 7}
$$

ここに

$\boldsymbol{p}$　: 損失に重みを課す関数 p を Y の関数として表した場合のベクトル値関数

$$\left(\boldsymbol{p}(Y; r, s) := [Y\boldsymbol{1}, \boldsymbol{1}]\left[-\frac{r-s}{2}, \frac{r+s}{2}+1\right]^T\right)$$

Y　: 各データ $\boldsymbol{x}_k$ に付与されたクラスを表す量からなる対角行列 $\left(=\mathrm{diag}(y_1, \cdots, y_m)\in M_{m,m}(\mathbb{R})\right)$

$\mathrm{diag}(\cdot)$　: $(\cdot)$ を要素に持つ対角行列

$M_{m,n}(\mathbb{R})$　: (m, n) 型の実行列全体の集合

X　: 被災判定グラフ上の各データの座標 $\boldsymbol{x}_k$ を各列に並べた行列 $\left(=[\boldsymbol{x}_1, \cdots, \boldsymbol{x}_m]\in M_{2,m}(\mathbb{R})\right)$

$\boldsymbol{1}$　: 全ての要素が1のみからなるベクトル（$\in\mathbb{R}^m$）

$\boldsymbol{\lambda}$, $\boldsymbol{\mu}$　: Lagrange乗数からなるベクトル

$$\left(\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1, \cdots, \lambda_m]^T\in\mathbb{R}^m, \boldsymbol{\mu} = [\mu_1, \cdots, \mu_m]^T\in\mathbb{R}^m\right)$$

$[\cdot]^T$　: ベクトルまたは行列 $[\cdot]$ の転置

$\boldsymbol{\xi}$　: スラック変数からなるベクトル

$$\left(=[\xi_1, \cdots, \xi_m]^T\in\mathbb{R}^m\right)$$

なお，ここではLagrange関数を表す記号として式(A. 6)と同じものを用いている．式(A. 7)の $\boldsymbol{w}$，$\boldsymbol{\xi}$ による偏微分はそれぞれ

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\partial \tilde{\mathcal{L}}}{\partial \boldsymbol{w}} \\ \dfrac{\partial \tilde{\mathcal{L}}}{\partial \boldsymbol{\xi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{w} - X\,Y\,\boldsymbol{\lambda} \\ C\,\boldsymbol{p}(Y;r,s) - \boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{\mu} \end{bmatrix} \tag{A. 8}$$

となり，1次の最適性条件

$$\left[\left(\frac{\partial \tilde{\mathcal{L}}}{\partial \boldsymbol{w}} \right)^T, \left(\frac{\partial \tilde{\mathcal{L}}}{\partial \boldsymbol{\xi}} \right)^T \right] = \boldsymbol{0}_{\mathbb{R}^{2+m}}{}^T \tag{A. 9}$$

ここに

$\boldsymbol{0}_{\mathbb{R}^n}$　：n 成分の零ベクトル（$\in \mathbb{R}^n$）

より，次の式を得る．

$$\begin{cases} \boldsymbol{w} = X\,Y\,\boldsymbol{\lambda} \\ \boldsymbol{\mu} = C\,\boldsymbol{p}(Y;r,s) - \boldsymbol{\lambda} \end{cases} \tag{A. 10}$$

最後に，この最適化問題を解きやすくするために，式(A. 5)に $b=0$ の条件を課した最適化問題を主問題とした場合のWolfe双対問題を求める．1次の最適性条件により求められた式(A. 10)を式(A. 7)に代入して方程式の変形を行い，式(A. 4)の制約を付加すれば，Wolfe双対問題は非常にすっきりとした次の式で表される．

$$\begin{aligned} &\underset{\boldsymbol{\lambda}\in\mathbb{R}^m}{\text{Maximize}} && -\frac{1}{2}\left\| X\,Y\,\boldsymbol{\lambda} \right\|^2 + \boldsymbol{\lambda}^T \boldsymbol{1} \\ &\text{subject to} && 0 \le \lambda_k \le C\,p(y_k;r,s) \quad (k \in I) \end{aligned} \tag{A. 11}$$

ここに

$\underset{\text{cond.}}{\text{Maximize}}(\cdot)$ ：最適化問題において，条件 cond. の下で目的関数 $(\cdot)$ を最大化することを意味する

今考えている最適化問題は凸2次計画問題なので，式(A. 5)に $b=0$ の条件を課した主問題と式(A. 11)で表されるWolfe双対問題には双対性が成り立ち[3]，主問題の最適解とWolfe双対問題の最適解が一致する．よって，解くべき最適化問題は式(A. 11)となる．

この後，式(A. 11)で表される最適化問題を数値的に解いていく必要があるが，その解法の導出については**付録B**で解説する．その際，SVMにより求められる分離境界線が原点を通るという条件を追加しない場合のWolfe双対問題が必要となるため，ここで示しておく．

式(A. 6)で $b=0$ の条件を課さなかった場合は式(A. 5)で表される最適化問題を解くことになる．この式の目的関数を行列表記で書き換えると，解くべき最適化問題は次のように表される．

$$\begin{aligned} & && \mathcal{L}(\boldsymbol{w}, b, \boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \\ &\underset{\boldsymbol{w}\in\mathbb{R}^2,\, b\in\mathbb{R},\, \boldsymbol{\xi}\in\mathbb{R}^m}{\text{Minimize}} && := \frac{1}{2}\left\|\boldsymbol{w}\right\|^2 + C\,\boldsymbol{p}(Y;r,s)^T\,\boldsymbol{\xi} \\ & && \quad + \boldsymbol{\lambda}^T \left[\boldsymbol{1} - Y\left(X^T \boldsymbol{w} + b\,\boldsymbol{1} \right) - \boldsymbol{\xi} \right] - \boldsymbol{\mu}^T \boldsymbol{\xi} \\ &\text{subject to} && 1 - y_k\,f(\boldsymbol{x}_k) - \xi_k \le 0 \quad (k \in I) \\ & && \lambda_k \ge 0 \\ & && \lambda_k \left(1 - y_k\,f(\boldsymbol{x}_k) - \xi_k \right) = 0 \\ & && -\xi_k \le 0 \\ & && \mu_k \ge 0 \\ & && \mu_k \left(-\xi_k \right) = 0 \end{aligned} \tag{A. 12}$$

なお，ここではLagrange関数を表す記号として式(A. 5)と同じものを用いている．

この最適化問題のLagrange関数の最適化は $\boldsymbol{w}, \boldsymbol{\xi}$ だけでなく b についても行うので，1次の最適性条件は

$$\left[\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \boldsymbol{w}} \right)^T, \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial b} \right)^T, \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \boldsymbol{\xi}} \right)^T \right] = \boldsymbol{0}_{\mathbb{R}^{3+m}}{}^T \tag{A. 13}$$

となり，式(A. 12)の目的関数の $\boldsymbol{w}$，b，$\boldsymbol{\xi}$ による偏微分を取り式(A. 13)で表される1次の最適性条件を適用すると次の式を得る．

$$\begin{cases} \boldsymbol{w} = X\,Y\,\boldsymbol{\lambda} \\ \boldsymbol{\lambda}^T\,Y\,\boldsymbol{1} = 0 \\ \boldsymbol{\mu} = C\,\boldsymbol{p}(Y;r,s) - \boldsymbol{\lambda} \end{cases} \tag{A. 14}$$

この式を式(A. 12)の目的関数に代入して，式(A. 4)のWolfe双対問題を求めると次の式のようになる．

$$\begin{aligned} &\underset{\boldsymbol{\lambda}\in\mathbb{R}^m}{\text{Maximize}} && -\frac{1}{2}\left\| X\,Y\,\boldsymbol{\lambda} \right\|^2 + \boldsymbol{\lambda}^T \boldsymbol{1} \\ &\text{subject to} && 0 \le \lambda_k \le C\,p(y_k;r,s) \quad (k \in I) \\ & && \boldsymbol{\lambda}^T\,Y\,\boldsymbol{1} = 0 \end{aligned} \tag{A. 15}$$

よって，閾値 b に $b=0$ の条件を課さなかった場合のWolfe双対問題は，$b=0$ の条件を課した場合のWolfe双対問題の制約に $\boldsymbol{\lambda}^T\,Y\,\boldsymbol{1}=0$ の条件を加えただけのものとな

る．

参考文献

1) 前田 英作：痛快！サポートベクトルマシン －古くて新しいパターン認識手法－，情報処理，Vol.42，No.7，pp.676–683，2001．
2) 竹山 一郎，鳥山 昌幸：サポートベクトルマシン，機械学習プロフェッショナルシリーズ，講談社サイエンティフィク，2015．
3) 寒野 善博，土屋 隆：最適化と変分法，東京大学工学教程　基礎系　数学，東京大学工学教程編纂委員会編，pp.140–142，丸善出版，2014．

付録B 修正版ソフトマージンSVMにおける最適化問題を数値的に解くためのSMOアルゴリズムの導出

本研究では，SVMにおける最適化問題を数値的に解く上で，計算効率の高いSMO（Sequential Minimal Optimization）を使用している．**付録A**で示した修正版ソフトマージンSVMにおける最適化問題を解くために，オリジナルのSMOに修正を加えているため，本付録ではそのアルゴリズムの導出を行う．

SMO[1)]は，最適解を求める対象となる全てのLagrange乗数のうち，任意の2つのLagrange乗数のみを選んで変化させ，残りのLagrange乗数は固定したままLagrange関数の最適化を行うという操作を繰り返して，順次Lagrange関数の最適化を行っていく手法である．オリジナルのSMOは，目的関数に閾値 b の項を含みかつ損失に重みが課されていない場合の最適化問題を対象としているため，本研究で使用する修正版ソフトマージンSVMにおける最適化問題を数値的に解くに当たり，アルゴリズムを修正する必要がある．

B.1 SVMにより求まる分離境界線が原点を通るという条件によるSMOの修正

まず，SVMにより求まる分離境界線が原点を通るという条件を付加した場合のLagrange乗数の更新式について考える．オリジナルのSMO同様，Lagrange関数の最適化を行う際に用いる任意の2つのLagrange乗数を λ_i，λ_j（$i \neq j$）とし，これらの添字に相当するデータの点とデータに付与されたクラスを表す値をそれぞれ，$\boldsymbol{x}_i$, $\boldsymbol{x}_j$, y_i, y_j とする．λ_i，λ_j を第1成分，第2成分として並べたベクトルを $\boldsymbol{\lambda}_1$，それら2つの成分を $\boldsymbol{\lambda}$ から除いたベクトルを $\boldsymbol{\lambda}_2$ とすれば，$i < j$ の場合次の式のようになる．

$$\begin{cases} \boldsymbol{\lambda}_1 := \left[\lambda_i, \lambda_j\right]^T \\ \boldsymbol{\lambda}_2 := \left[\lambda_1, \cdots, \lambda_{i-1}, \lambda_{i+1}, \cdots, \lambda_{j-1}, \lambda_{j+1}, \cdots, \lambda_m\right]^T \end{cases} \tag{B.1}$$

同様に，$\boldsymbol{x}_i$, $\boldsymbol{x}_j$ を第1列，第2列として並べた行列を X_1，それら2つの列ベクトルを X から除いた行列を X_2 とし，y_i，y_j のみからなる対角行列を Y_1，それら2つの成分を Y から除いた対角行列を Y_2 とすれば，次の式のようになる．

$$\begin{cases} X_1 := \left[\boldsymbol{x}_i,\, \boldsymbol{x}_j\right] \quad \left(\in M_{2,2}(\mathbb{R})\right) \\ X_2 := \left[\boldsymbol{x}_1, \cdots, \boldsymbol{x}_{i-1}, \boldsymbol{x}_{i+1}, \cdots, \boldsymbol{x}_{j-1}, \boldsymbol{x}_{j+1}, \cdots, \boldsymbol{x}_m\right] \\ \qquad \left(\in M_{2,m-2}(\mathbb{R})\right) \\ Y_1 := \mathrm{diag}\left(y_i,\, y_j\right) \quad \left(\in M_{2,2}(\mathbb{R})\right) \\ Y_2 := \mathrm{diag}\left(y_1, \cdots, y_{i-1}, y_{i+1}, \cdots, y_{j-1}, y_{j+1}, \cdots, y_m\right) \\ \qquad \left(\in M_{m-2,m-2}(\mathbb{R})\right) \end{cases} \tag{B. 2}$$

ここに

$M_{m,n}(\mathbb{R})$ ：(m, n) 型の実行列全体の集合

$\mathrm{diag}(\cdot)$ ：$(\cdot)$ を要素に持つ対角行列

これらを用いて，付録Aの式(A. 12)の閾値の項を残したままのLagrange関数を書き換えれば，次のように表される．

$$\begin{aligned} &\mathcal{L}(\boldsymbol{w}, b, \xi, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \\ &= -\frac{1}{2}\left\| \left[X_1, X_2\right] \begin{bmatrix} Y_1 & O_{M_{2,m-2}(\mathbb{R})} \\ O_{M_{m-2,2}(\mathbb{R})} & Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_1 \\ \boldsymbol{\lambda}_2 \end{bmatrix} \right\|^2 + \boldsymbol{I}_{\mathbb{R}^m}{}^T \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_1 \\ \boldsymbol{\lambda}_2 \end{bmatrix} \\ &= \left\{ -\frac{1}{2}\left(\left\| X_1 Y_1 \boldsymbol{\lambda}_1 \right\|^2 + 2\left\langle X_1 Y_1 \boldsymbol{\lambda}_1,\, X_2 Y_2 \boldsymbol{\lambda}_2 \right\rangle \right) + \boldsymbol{I}_{\mathbb{R}^2}{}^T \boldsymbol{\lambda}_1 \right\} \\ &\quad + \left(-\frac{1}{2}\left\| X_2 Y_2 \boldsymbol{\lambda}_2 \right\|^2 + \boldsymbol{I}_{\mathbb{R}^{m-2}}{}^T \boldsymbol{\lambda}_2 \right) \\ &= \mathcal{L}_1(\boldsymbol{\lambda}_1, \boldsymbol{\lambda}_2) + \mathcal{L}_2(\boldsymbol{\lambda}_2) \end{aligned} \tag{B. 3}$$

$$\begin{cases} \mathcal{L}_1(\boldsymbol{\lambda}_1, \boldsymbol{\lambda}_2) := -\dfrac{1}{2}\left(\left\| X_1 Y_1 \boldsymbol{\lambda}_1 \right\|^2 + 2\left\langle X_1 Y_1 \boldsymbol{\lambda}_1,\, X_2 Y_2 \boldsymbol{\lambda}_2 \right\rangle \right) + \boldsymbol{I}_{\mathbb{R}^2}{}^T \boldsymbol{\lambda}_1 \\ \mathcal{L}_2(\boldsymbol{\lambda}_2) := -\dfrac{1}{2}\left\| X_2 Y_2 \boldsymbol{\lambda}_2 \right\|^2 + \boldsymbol{I}_{\mathbb{R}^{m-2}}{}^T \boldsymbol{\lambda}_2 \end{cases} \tag{B. 4}$$

ここに

$O_{M_{m,n}(\mathbb{R})}$ ：(m, n) 型の零行列

$\boldsymbol{I}_{\mathbb{R}^n}$ ：n 成分の全ての要素が1のみからなるベクトル（$\in \mathbb{R}^n$）

次に，この式を分離境界線の方程式を陰関数で表した場合の関数 f を用いて，$\boldsymbol{\lambda}_1$ のみの関数として表すことを考える．関数 f は資料本編の式(3. 2)内の定義等号（:=）で繋がれた式により表されるので，この式に付録Aの式(A. 14)の第1式，式(B. 1)，(B. 2)を代入すると

$$\left\langle X_2 Y_2 \boldsymbol{\lambda}_2, \boldsymbol{x} \right\rangle = f(\boldsymbol{x}; \boldsymbol{w}, b) - \left(\left\langle X_1 Y_1 \boldsymbol{\lambda}_1, \boldsymbol{x} \right\rangle + b \right) \tag{B. 5}$$

という関係が得られ，この式に $\boldsymbol{x}_i$，$\boldsymbol{x}_j$ を代入して行列で表記し，それを $\boldsymbol{v}$ と定義する．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{v} := \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} &= X_1{}^T X_2 Y_2 \boldsymbol{\lambda}_2 \\ &= \begin{bmatrix} f(\boldsymbol{x}_i; \boldsymbol{w}, b) \\ f(\boldsymbol{x}_j; \boldsymbol{w}, b) \end{bmatrix} - \left(X_1{}^T X_1 Y_1 \boldsymbol{\lambda}_1 + b\, \boldsymbol{I}_{\mathbb{R}^2} \right) \end{aligned} \tag{B. 6}$$

式(B. 6)を式(B. 4)の第1式に代入すれば

$$\mathcal{L}_1(\boldsymbol{\lambda}_1, \boldsymbol{\lambda}_2) = -\frac{1}{2}\left\| X_1 Y_1 \boldsymbol{\lambda}_1 \right\|^2 - \left\langle Y_1 \boldsymbol{\lambda}_1, \boldsymbol{v} \right\rangle + \boldsymbol{I}_{\mathbb{R}^2}{}^T \boldsymbol{\lambda}_1 \tag{B. 7}$$

となるので，付録Aの式(A. 15)で表される最適化問題の目的関数は $\boldsymbol{v}$ を用いて次のように表される．

$$\begin{aligned} &\mathcal{L}(\boldsymbol{w}, b, \xi, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \\ &= \left(-\frac{1}{2}\left\| X_1 Y_1 \boldsymbol{\lambda}_1 \right\|^2 - \left\langle Y_1 \boldsymbol{\lambda}_1, \boldsymbol{v} \right\rangle + \boldsymbol{I}_{\mathbb{R}^2}{}^T \boldsymbol{\lambda}_1 \right) + \mathcal{L}_2(\boldsymbol{\lambda}_2) \end{aligned} \tag{B. 8}$$

オリジナルのSMOでは，このようにして得られた閾値 b を0としない場合のLagrange関数について，付録Aの式(A. 15)の制約の下，Lagrange関数が最大となるよう $\boldsymbol{\lambda}_1$ を変化させながら数値的に解いていくことになる．つまり，付録Aの式(A. 15)の制約のうち2つ目の制約により

$$-\boldsymbol{\lambda}_2{}^T Y_2 \boldsymbol{I}_{\mathbb{R}^{m-2}} = \boldsymbol{\lambda}_1{}^T Y_1 \boldsymbol{I}_{\mathbb{R}^2} \tag{B. 9}$$

が成り立ち，$\boldsymbol{\lambda}_2$ を固定したまま $\boldsymbol{\lambda}_1$ のみを変化させることを考える．両辺を y_i 倍し，それを ζ と置くと

$$\zeta := -y_i \boldsymbol{\lambda}_2{}^T Y_2 \boldsymbol{I}_{\mathbb{R}^{m-2}} = y_i \begin{bmatrix} \lambda_i \\ \lambda_j \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} y_i & 0 \\ 0 & y_j \end{bmatrix} \boldsymbol{I}_{\mathbb{R}^2} = \text{const.} \tag{B. 10}$$

ここに

const. ：定数

より，$y_i^2 = 1$ に注意すれば

$$\lambda_i = \zeta - y_i y_j \lambda_j \tag{B. 11}$$

となり，λ_i は λ_j の関数として表されるため，λ_i，λ_j を同時に自由に変化させることはできない．よって，式(B. 8)

の最大化を考える場合，1次の最適性条件としては次の式を考える必要がある．

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_j} = \left[\frac{\partial \mathcal{L}_1(\boldsymbol{\lambda}_1, \boldsymbol{\lambda}_2)}{\partial \boldsymbol{\lambda}_1} \right]^T \frac{d\boldsymbol{\lambda}_1}{d\lambda_j} = 0 \quad \text{(B. 12)}$$

しかし，ここで分離境界線が原点を通るという $b = 0$ の条件を課した場合，**付録A**の式(A. 15)の制約のうち2つ目の等式制約は成り立たなくなるため，オリジナルのSMOとは異なり，1次の最適性条件としては次の式を考えればよい．

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \boldsymbol{\lambda}_1} \\
&= \frac{\partial \mathcal{L}_1(\boldsymbol{\lambda}_1, \boldsymbol{\lambda}_2)}{\partial \boldsymbol{\lambda}_1} \\
&= -(X_1 Y_1)^T X_1 Y_1 \boldsymbol{\lambda}_1 - Y_1 \boldsymbol{v} + \boldsymbol{I}_{\mathbb{R}^2} \\
&= -(X_1 Y_1)^T X_1 Y_1 \boldsymbol{\lambda}_1 - Y_1 \left(\begin{bmatrix} f^{\text{old}}(\boldsymbol{x}_i) \\ f^{\text{old}}(\boldsymbol{x}_j) \end{bmatrix} - X_1^T X_1 Y_1 \boldsymbol{\lambda}_1^{\text{old}} \right) + \boldsymbol{I}_{\mathbb{R}^2} \\
&= \boldsymbol{0}_{\mathbb{R}^2}
\end{aligned} \quad \text{(B. 13)}$$

ここに

f^{old}　：更新前の f; $f^{\text{old}}(\boldsymbol{x}) = f\left(\boldsymbol{x}; X\,Y\,\boldsymbol{\lambda}^{\text{old}}, 0\right)$

$\boldsymbol{\lambda}^{\text{old}}$　：更新前の $\boldsymbol{\lambda}$ $\left(= \left[\left(\boldsymbol{\lambda}_1^{\text{old}}\right)^T, \left(\boldsymbol{\lambda}_2^{\text{old}}\right)^T \right]^T \right)$

$\boldsymbol{\lambda}_\alpha^{\text{old}}$　：更新前の $\boldsymbol{\lambda}_\alpha$ $\left(\alpha \in \{1, 2\}\right)$

ただし，式(B. 13)において $\boldsymbol{v}$ に式(B. 6)を代入する際に，f，$\boldsymbol{\lambda}_1$ には更新前の f^{old}，$\boldsymbol{\lambda}_1^{\text{old}}$ を代入した．これは，次の理由による．オリジナルのSMO同様，数値的に解く際に $\boldsymbol{\lambda}_2$ を固定したまま $\boldsymbol{\lambda}_1$ のみを変化させることになるが，**付録A**の式(A. 11)の不等式制約を満たしさえすれば，$\boldsymbol{\lambda}_1$ にどのような値を代入してもよく，ここでは $\boldsymbol{\lambda}_1$ を更新する方程式，つまり $\boldsymbol{\lambda}_1$ の $\boldsymbol{\lambda}_1^{\text{old}}$ による関数を導きたかったためである．

さらに，**付録A**の式(A. 15)の制約のうち2つ目の等式制約が成立しないのであれば，この式より導かれる式(B. 11)を満たすように $\boldsymbol{\lambda}_1$ を変化させる必要がなくなり，**付録A**の式(A. 11)の不等式制約を満たす限り，全てのLagrange変数を自由に変化させることができる．よって，例えば λ_i のみを変化させた場合，式(B. 13)において

$$\begin{cases} \boldsymbol{\lambda}_1 = [\lambda_i] \\ X_1 = [\boldsymbol{x}_i] \\ Y_1 = [y_i] \end{cases} \quad \text{(B. 14)}$$

として方程式の変形を行えば，$\boldsymbol{\lambda}_1$ つまり λ_i の更新式は次のように表される．

$$\lambda_i = \lambda_i^{\text{old}} + \frac{1 - y_i\, f^{\text{old}}(\boldsymbol{x}_i)}{\|\boldsymbol{x}_i\|^2} \quad \text{(B. 15)}$$

最適化の手順としては，まず m 個からなる $\boldsymbol{\lambda}$ の成分の1つに着目して他の成分は固定し，その着目した1つの $\boldsymbol{\lambda}$ の成分について式(B. 15)による更新を繰り返して収束値を算出する．次に，別の $\boldsymbol{\lambda}$ の成分に着目し，同様の操作を行いその $\boldsymbol{\lambda}$ の成分の収束値を算出する．全ての $\boldsymbol{\lambda}$ の成分に対して以上の操作を一通り行うと最適化は終了となる，すなわちその $\boldsymbol{\lambda}$ の収束値が最適解となる．上記の操作において，まだ収束値を得ていない $\boldsymbol{\lambda}$ の成分を残した状態で，ある $\boldsymbol{\lambda}$ の成分について収束値を得たとしても，その収束値は一見すると最適解ではないように思われるが，上記の手順を全ての $\boldsymbol{\lambda}$ の成分に対して一通り行うだけで，$\boldsymbol{\lambda}$ の最適解が得られることが証明されている[2)]．

B. 2　SVM における損失に対し重みを課す条件による SMO の修正

次に，損失に対し重みを課す条件を追加した場合のLagrange乗数の更新式について考える．

付録Aの式(A. 11)に示すとおり，損失に対する重みは目的関数には無関係に制約にのみ現れるため，式(B. 13)を数値的に解く際に，**付録A**の式(A. 11)の不等式制約の範囲でLagrange乗数を算出すればよく，Lagrange乗数の更新式に対しさらに条件を追加する必要はない．

B. 3　修正版ソフトマージン SVM における SMO の疑似コード

修正版ソフトマージンSVMにおける最適化問題を数値的に解くためのSMOの疑似コードは次のようになる．

■ SMOの疑似コード
・入力
　tol　：許容誤差（$= 1.0 \times 10^{-5}$）
　C　：正則化パラメータ（$= 1.0 \times 10^{-5}$）
　p　：損失に重みを課す関数
maxPasses: プログラムのパス（プログラムが最初から最

後まで実行される1回分の周期）の最大回数

・出力

$\boldsymbol{\lambda}$: Lagrange乗数（$\in \mathbb{R}^m$ ）

・アルゴリズム

Initialize $\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{0}_{\mathbb{R}^m}$

Initialize *passes* = 0

while (*passes* < *maxPasses*)

  $noOfChanged\lambda = 0$

  for $i = 1, \cdots, m$

    Calculate $err_i = f(\boldsymbol{x}_i) - y_i$

    If $(y_i \times err_i < -tol \,\&\&\, \lambda_i < C\,p(y_i; r, s)) \;||\; (y_i \times err_i > tol \,\&\&\, \lambda_i > 0)$

      Save old λ_i: $\lambda_i^{\mathrm{old}} = \lambda_i$

      Compute *lowLim* and *highLim*:

        $lowLim = 0$

        $highLim = C\,p(y_i; r, s)$

      Compute and clip new value for λ_i:

$$\lambda_i = \lambda_i^{\mathrm{old}} + \frac{y_i \times err_i}{\|\boldsymbol{x}_i\|^2}$$

$$\lambda_i = \begin{cases} highLim & \lambda_i \in (highLim, \infty) \\ \lambda_i & \lambda_i \in [lowLim, highLim] \\ lowLim & \lambda_i \in (-\infty, lowLim) \end{cases}$$

      $noOfChanged\lambda = noOfChanged\lambda + 1$

    end if

  end for

  if ($noOfChanged\lambda == 0$)

    $passes = passes + 1$

  else

    $passes = 0$

  end if

end while

なお，このアルゴリズムの検証［verification］は次の方法により行った. 照査用震度式は資料本編第2章に示した f_b : 0.8 [Hz]，f_c : 1.0 [Hz]のケースから導出した重力式岸壁のものを用いて, 被災検証に使用した重力式岸壁（41施設）を対象に D_a : 10 [cm]のケースの作用震度を算出し，それぞれの施設の限界震度と組み合わせて，$\boldsymbol{x}_k$ とする. それと実被害による被災判定結果を表す y_k を組み合わせて $(\boldsymbol{x}_k, y_k)$ の組を入力値とする．その入力値を用いて，**付録A**の式(A. 3)に $b = 0$ の条件を課した最適化問題に対し，法線ベクトル $\boldsymbol{w}$ の向きと大きさを細かく変化させることにより, 目的関数が最小となる最適解 $\boldsymbol{w}$ を算出した. その $\boldsymbol{w}$ の値を，**付録A**の式(A. 11)の最適化問題に対し本稿で提案したアルゴリズムを適用して求めた $\boldsymbol{\lambda}$ の最適解から，**付録A**の式(A. 10)の第1式を通じて算出した $\boldsymbol{w}$ の値と比較し，両者が一致することを確認した.

参考文献

1) John C. Platt：Fast Training of Support Vector Machines using Sequential Minimal Optimization, Advances in Kernel Methods - Support Vector Learning, MIT Press, 1998.

2) Norikazu Takahashi, Makoto Nagayoshi, Susumu Kawabata and Tetsuo Nishi：Stable patterns realized by a class of one-dimensional two-layer CNNs, IEEE Transactions on Circuits and Systems-I, vol.55, no.11, pp.3607-3620, 2008.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of N I L I M

No. 979 July 2017

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019
E-mail:ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp