

SVM による耐震強化岸壁の断面設定最適化に関する研究

A STUDY ON THE OPTIMAL DESIGN FOR EARTHQUAKE-RESISTING WALL
BY SUPPORT VECTOR MACHINE

宮下健一朗¹

Kenichirou MIYASHITA

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) (〒206-8550 東京多摩市関戸 1-7-5)

The present study is an examination of the method of calculating the best section for earthquake-resisting wall by support vector machine. Some two dimension earthquake response analysis results were used for the examination. The support vector machine is a technique paid attention to as a technique for requesting the restriction curved surface of the classification problem in recent years.

Moreover, it is what was compared with the best section obtained from the limit state function by other techniques, and examined about the utility of support vector machine

Key Words: *Optimal design, support vector machine*

1. はじめに

港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾が改訂され、耐震強化岸壁の設計法が変更された。大きな変更点としては、レベル2地震動による作用の評価において、設計震度が取り除かれたことが挙げられる。このため、最適断面の決定までには様々な断面に対して2次元地震応答解析を行い、所要の耐震性能を満たす断面を抽出し、その中で最も経済的な断面を選定するといった作業が必要と考えられる。しかしながら、設計実務においては、計算負荷の問題からレベル1地震動の作用で決定した断面を基準として、例えば地盤改良の幅や本体幅を変更し、レベル2地震動の作用に対して所要の性能を満足する断面が得られれば、そこで設計を終了するケースが多い。この場合、最も経済的な断面が選択されているとは必ずしも言うことができない。一方、サポートベクターマシン²⁾(SVM)はクラス分け問題の制約曲面を求める手法として近年注目されており、その特徴としては、正確に2値をクラス分けすることができるため正確な制約曲面を求めることができること、学習機能を有しデータを与える度に制約曲面の精度が上がるため、効率的に制約曲面を求めることができることなどが挙げられる。

耐震岸壁の設計において、様々な断面の2次元地震応答解析結果をSVMにより耐震強化岸壁としての性

能を満たす・満たさないでクラス分けした場合、得られる制約曲面は限界状態関数として捉えることができる。そして、この限界状態関数を建設コスト最小化を制約条件として解けば、効率的に最も経済的な断面を求めることができ、設計における作業量を減らすことができると考えられる。

本研究は、幾つかの2次元地震応答解析結果をもとにSVMにより限界状態関数を求め、効率的な最適断面の算出方法について検討を行ったものである。また、他の手法による限界状態関数から得られた最適断面と比較を行い、SVMの有用性についても検討を行った。

2. SVMの概要

SVMとは多数のデータを2値にクラス分けする方法として開発された手法であり、図-1のように与えられたデータをクラスごとに分割する制約曲面を求めることができる。分割時の特徴は、得られた制約曲面からデータまでの距離(マージン)が最大になること、制約曲面から離れた位置にあるデータ、すなわちマージンの大きいデータは制約曲面の算出に影響を及ぼさず、最小のマージンのデータにより制約曲面が求められることにある。この時、この制約曲面の算出に影響を及ぼしている最小のマージンのデータをSV(サポートベクター)と呼ぶ。

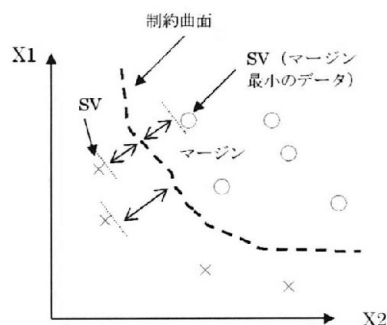


図-1 SVM の概要

具体的な SVM による制約曲面の求め方を以下に示す。まず、SVM による制約曲面が線形の場合、制約曲面は式 (1) で与えられる。次に、式 (1) を平行移動した式 (2) を定義する。式 (1) と式 (2) の間にデータが存在せず、式 (1) により x がクラス分けされるためには、式 (3) を満たすことになる。

$$\omega'x + b = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\omega'x + b = \pm 1 \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$y_i(\omega'x_i + b) - 1 > 0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 ω, b : 制約曲面における定数、 x : 制約曲面における変数、 y : 教師データで、所属しているクラスにより +1 もしくは -1 が与えられる。添え字 i は転置行列を表す。

式 (1) から式 (2) までの法線距離を考えると、その値は式 (4) で求められる。式 (3) を満足し、式 (1) から式 (2) までの距離である式 (4) を最大化させる式 (1) の定数 ω, b を求めるとすると、結局、SVM は式 (5) の最適化問題に帰着する。本研究では、式 (5) の最適化問題の解法にはラグランジュの未定定数法³⁾を利用する。この場合、式 (5) は式 (6) に書き換えられる。

$$\text{式 (1) から式 (2) までの法線距離} \quad \frac{1}{|\omega|} \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$\frac{1}{2}|\omega|^2 \rightarrow \text{minimize} \quad \dots \dots \dots (5) \text{ a}$$

$$y_i(\omega'x_i + b) - 1 \geq 0 \quad \dots \dots \dots (5) \text{ b}$$

$$L_p(\omega, b, \lambda) = \frac{1}{2}|\omega|^2 - \sum \lambda_i(y_i(\omega'x_i + b) - 1) \quad \dots \dots (6)$$

また、制約曲面が非線形の場合、式 (1) の代わりに式 (7) が用いられる。式 (7) に内装されている関数 K はカーネル関数²⁾と呼ばれ、例えば式 (8) のガウシアン型カーネル関数などで表される。本研究ではこのガウシアン型カーネル関数を用いる。

$$\omega'K(x_i, x_j) + b = 0 \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{|x_i - x_j|^2}{2\delta^2}\right) \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 δ : 制約曲面の形状に係る定数で、値によっては与えられたデータをクラス分け出来なくなる。本研究では検討ケースごとに試行錯誤によりデータをクラス分けできる値を求める。

3. SVM による最適断面の算出

(1) 最適断面

本研究における最適断面とは工事費最小の断面を意味し、式 (9) を満たす断面である。図-2 に最適断面のイメージを示す。

耐震強化岸壁の設計においては、断面の照査を 2 次元地震応答解析にて行う必要があるため、式 (9) b の限界状態関数を数式で表すことができない。そのため、最適断面算出には何らかの方法で式 (9) b を近似的に求める必要がある。本研究では SVM により幾つかの 2 次元地震応答解析結果から限界状態関数の近似式を算出し最適断面について検討する。

$$\text{Cost}(x_i) \rightarrow \text{minimize} \quad \dots \dots \dots (9) \text{ a}$$

$$\text{Subject to } g(x_i) = 0 \quad \dots \dots \dots (9) \text{ b}$$

ここで、 $\text{Cost}(x_i)$: 建設コスト関数、 x_i : コスト及び耐震性能に影響を与えるパラメータ、 $g(x_i) = 0$: 限界状態関数

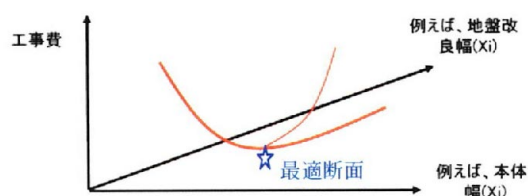


図-2 最適断面のイメージ

(2) 検討条件

本検討では図-3 に示す背後地盤が固化処理された水深-14.5m ケーソン岸壁の最適断面について検討を行う。地盤条件及び部材の物性値を表-1 に示す。2 次元解析には解析コードは FLIP718⁴⁾を用いる。表-1 に示した地盤パラメータは現在 FLIP において標準的に用いられている設定方法⁵⁾に従い、固化処理土については事前混合処理工法技術マニュアル⁶⁾を参考に設定している。埋土は液状化を考慮し、有効上載圧 66kN/m² で N 値 5 かつ $F_c < 5\%$ 程度の砂の標準的な液状化パラメータを与えている。検討に用いる

地震動は八戸波を最大加速度 500Gal になるよう振幅調整したものとする。地震波形の時刻歴加速度、フーリエスペクトルを図-4 に示す。

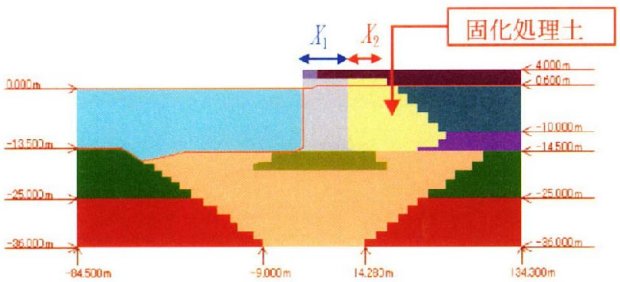


図-3 検討断面

表-1 地盤条件及び部材物性値

土層区分	ρ (t/m^3)	G_{avg} (kN/m^2)	σ_{avg} (kN/m^2)	ν	C (kN/m^2)	ϕ (deg)	h_{avg}	m_g
埋土	1.8	25920	89.8	0.33	0	37	0.24	0.5
原地盤 (粘性土)	1.6	36000	239.8	0.33	0	30	0.2	0.5
基礎礫石	2	180000	98	0.33	0	40	0.24	0.5
置換砂	1.8	74700	98	0.33	0	39	0.24	0.5
固化処理土	1.8	300000	0	0.33	50	30	0.2	0

液状化パラメータ (埋土)					
PHIP	S1	W1	P1	P2	C1
28.000	0.005	1.150	0.500	1.120	1.600

	ρ (t/m^3)	E (kN/m^2)	ν
ケーソン	2.1	22300000	0.17
上部工	2.3	29400000	0.17

本検討において限界状態関数は、式 (10) に示すように許容変形量 R に対する残留変形量 S の差で表すこととする。許容変形量は港湾基準¹⁾に示されている標準的な耐震強化岸壁を考え 100cm とする。

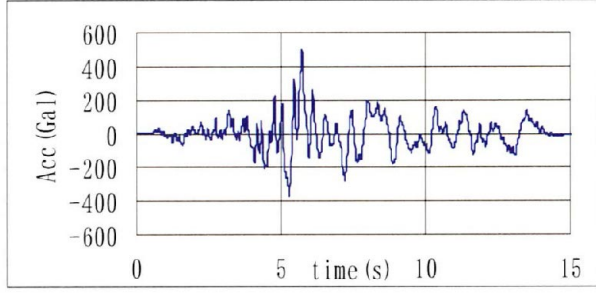
$$g(x_i) = R - S(x_i) \quad \dots \dots \dots (10)$$

最適断面算出時において考慮するパラメータはケーソン幅 x_1 と固化処理土の天端改良幅 x_2 とし、各パラメータは検討に用いるデータの平均値 μ 及び標準偏差 σ で式 (11) により無次元化する。これは SVM では、マージンが最小となる制約曲面を求めることになるが、マージンはパラメータの単位の影響を受けため、単位の影響により SVM の精度が低下するのを防ぐためである。建設コスト関数はケーソン制作工、本体工、掘付工、固化処理工を考慮して、それぞれ港湾土木請負工事積算基準⁷⁾により算出する。表-2 に各パラメータの工事費を示す。表の単位工事費から固化処理土の天端改良幅がゼロの時の改良体積を考慮し、コスト関数を作成すると、式 (12) のよ

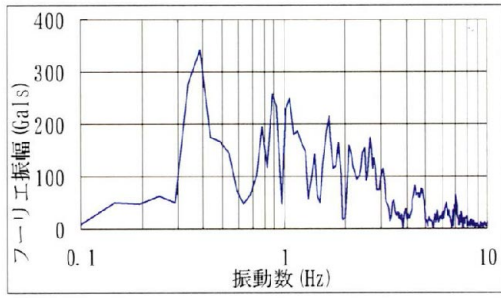
うになる。

$$X_1 = \frac{x_1 - \mu_1}{\sigma_1} \quad \dots \dots \dots (11) a$$

$$X_2 = \frac{x_2 - \mu_2}{\sigma_2} \quad \dots \dots \dots (11) b$$



(a) 時刻歴加速度



(b) フーリエスペクトル

図-4 入力地震動

表-2 単位工事費

ケーソン工事費 (千円/m)	固化処理土工事費 (千円/m ³)
250	10

$$Cost(x_1, x_2) = 250x_1 + 10(16.5x_2 + 158) \quad \dots \dots \dots (12)$$

[千円/m]

(3) 検討結果

初期検討ケースとして表-3 に示すケースで 2 次元地震応答解析を行い、SVM により求めた限界状態関数と 2 次元地震応答解析結果を図-5 に示す。点線が限界状態関数、○でプロットしたデータは許容変形量以内で所要の性能を満足するケース、×でプロットしたデータは所要の性能を満足しないケースである。図には、限界状態関数を平行移動した関数もコンター図として示されており、山もしくは谷に近づくほど限界状態関数から離れた関数となる。この結果、一回目の SVM により得られた限界状態関数は SV までのマージンが長かった。例えば Case4 のデータ

から限界状態関数まででは、本体幅で 3m 程度、改良幅で 4m 程度離れており、限界状態関数の精度はあまり高くないことが分かる。マージンを短くするようにデータを増やし再度 SVM を行った結果を図-6 に示す。太線でプロットしているデータが追加したデータで、細線が既に SVM の検討に用いていたデータである。限界状態関数から SV から限界状態関数までの距離が、例えば Case4 では本体幅と改良幅ともに 1m 程度となっており、限界状態関数の精度は SV の近くでは十分高いことが分かる。この限界状態関数を用いて最適断面算出した結果が図の☆の断面であり、この断面について 2 次元地震応答解析を行った結果、残留変形量 0.99cm となり所用の性能を満たしていた。この時点で所要の性能を満たす断面が得られたが、この最適断面を追加データとして再度 SVM を行い、限界状態関数の精度を上げ、更なる断面の絞り込みを行う。最適断面を算出して、2 次元地震応答解析を行い、再び所要の性能を満足する断面を得るまでこれを繰り返す。その過程を図-7～図-9 に示す。各図で限界状態関数の形状が変化し、データを追加する度に限界状態関数の精度が向上しているのが分かる。この結果、図-9 に示す☆の断面で残留変形量が 1.033m となり、更に経済的な断面を得る事ができた。使用したデータ数は全 12 ケースであった。1 度目の最適断面と最終的な最適断面の比較を表-4 に示す。

表-3 初期検討ケース

Case	単位 (m)	
	本体幅 x_1	改良幅 x_2
1	7.8	6.28
2	7.8	20.69
3	15.4	0
4	15.4	13.88

表-4 SVM による最適断面

	ケーソン幅 x_1 (m)	固化処理土改良幅 x_2 (m)	工事費 (千円/m)
SVMによる最終的な最適断面	9.3	15.9	6210
SVMによる一度目の最適断面	8.4	18.7	6391

表-5 SVM による最適断面と通常的设计手法による断面の比較

	ケーソン幅 x_1 (m)	固化処理土改良幅 x_2 (m)	工事費 (千円/m)
SVMによる最適断面	9.3	15.9	6210
通常的设计手法による断面	15.4	9.1	6747

また、通常的设计手法ではレベル 1 地震動の作用

で決定した断面に対して、所要の性能を満足するまで本体幅や背後の固化処理土の範囲を拡げるという手法が取られることが多いが、この通常設計法による断面と SVM による最適断面の比較を行う。本検討におけるレベル 1 地震動の作用（設計震度 0.20）に対する断面の本体幅は 15.4m であり、この本体幅で背後の固化処理土の範囲を拡げて、所要の性能を満たす断面は、図-9 の四角に囲まれた○のケースにあたる。この断面と SVM による最適断面の比較結果を表-5 に示す。SVM による最適断面は通常的设计手法による断面に比べて経済的な断面を算出していることが分かる。なお、検討に用いたカーネル関数の定数 δ は、全ての検討ケースにおいて、 $\delta = 2$ とすることによりデータを正確にクラス分けする制約曲面を求めることができたため、これを利用した。

4. 重回帰分析による限界状態関数を用いた場合の最適断面との比較

2 次元地震応答解析結果の残留変形量を重回帰分析により、ケーソン幅 x_1 と固化処理土の天端改良幅 x_2 の回帰式として整理し、限界状態関数を作成する。作成した重回帰分析による限界状態関数の最適断面と SVM による最適断面の比較を行う。SVM での最適断面の検討同様、限界状態関数によって最適断面を算出し、2 次元地震応答解析を行い、再び所要の性能を満足する断面を得るまでこれを繰り返す。初期検討ケースは図-7 での SVM に使用したケースとする。最適断面算出までの過程を図-10～図-12 に示す。各図において、限界状態関数の算出のために追加したデータは太線、既に得られていたデータは細線でプロットしている。限界状態関数は点線で示している。各図において、限界状態関数はあまり変化せず、追加データの影響は小さかった。初期検討におけるデータ数で、ある程度の精度を持った限界状態関数が得られていたと考えられる。しかしながら得られた限界状態関数は○と×を正確には分けておらず、SVM に比べて限界状態関数の精度が低いことが分かる。SVM 同様全 12 ケースで残留変形量が 1.05m となる断面が得られ、この断面を最適断面とした。最適断面は図-12 の☆の位置の断面である。重回帰分析による最適断面と SVM による最適断面の比較を表-6 に示す。重回帰分析による最適断面は SVM による最適断面に比べて不経済となった。これは、重回帰分析による限界状態関数の精度が SVM に比べて低いことによると考えられる。重回帰分析の最適断面は、表-4 に示す 1 度目の SVM 最適断面より不経済であった。しかしながら、表-5 に示す通常的设计手法による断面に比べると経済的な結果を得ることができており、また、SVM に比べて少ないデータ数である程度の精

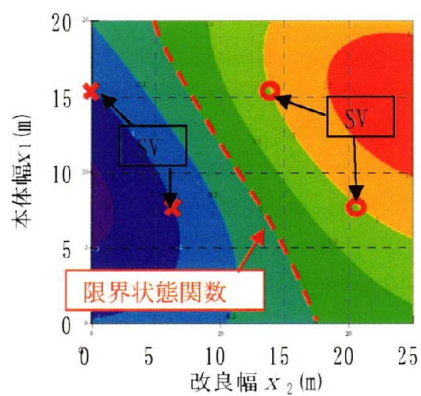


図-5 SVM 結果その 1

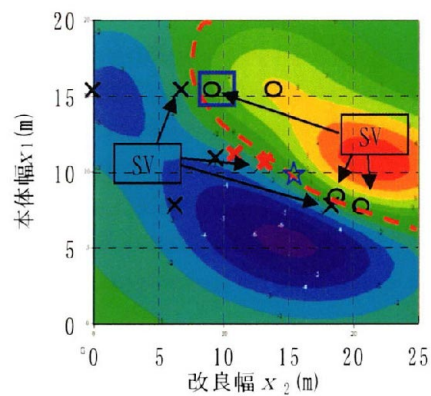


図-9 SVM 結果その 5

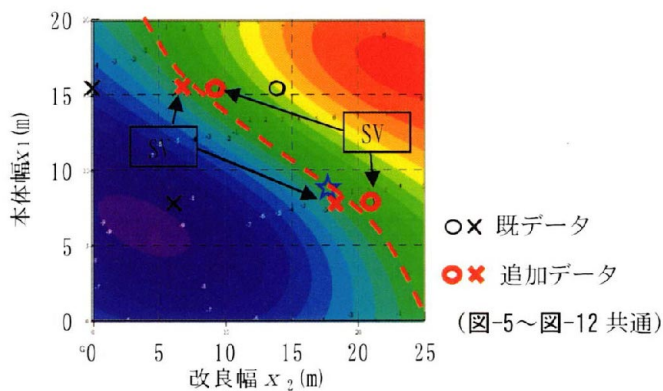


図-6 SVM 結果その 2

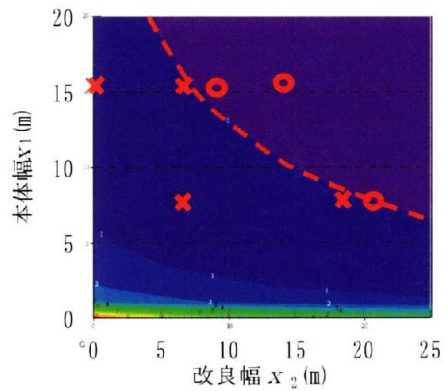


図-10 重回帰分析その 1

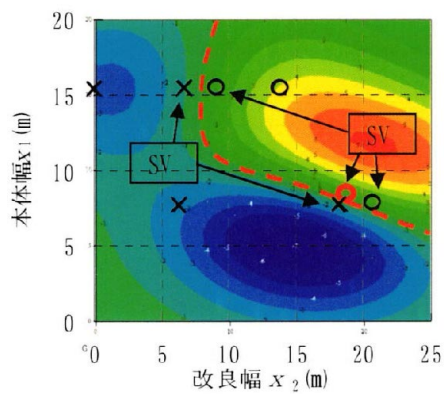


図-7 SVM 結果その 3

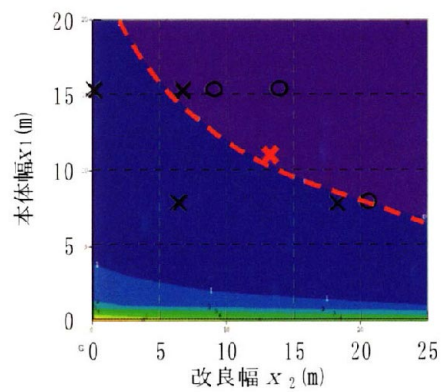


図-11 重回帰分析その 2

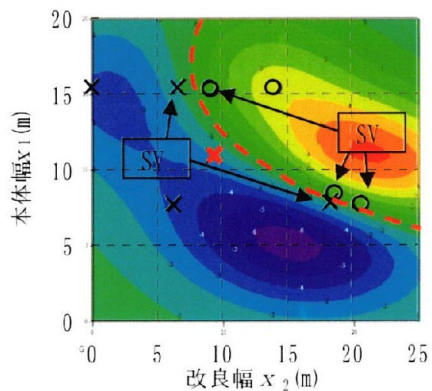


図-8 SVM 結果その 4

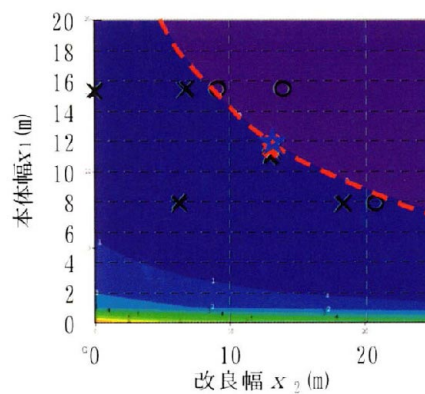


図-12 重回帰分析その 3

度を持った限界状態関数が得られており、設計実務における計算負荷を考慮すると、重回帰分析による最適断面算出法もある程度有効な手法であると考えられる。

表-6 SVMと重回帰分析による最適断面の比較

	ケーソン幅 x1 (m)	固化処理土改良幅 x2 (m)	工事費 (千円/m)
SVMによる最適断面	9.3	15.9	6210
重回帰分析による最適断面	11.8	13.5	6487

5. まとめ

本研究は、幾つかの2次元地震応答解析結果をもとにSVMにより限界状態関数を求め、効率的な最適断面を算出方法について検討を行ったものである。主な結論は以下のとおり。

- ①SVMにより限界状態関数を求め、幾つかの2次元地震応答解析結果から効率的に最適断面を得ることができた。
- ②得られた最適断面は通常の設計手法による断面より経済的でありSVMの有用性が確認された。
- ③限界状態関数を決定する他の手法である重回帰分析による最適断面とSVMによる最適断面の比較を行った結果、重回帰分析による最適断面に比べて経済的な断面を得る事ができた。これは、SVMによる限界状態関数は重回帰分析に比べて精度が高いからだと考えられる。
- ④しかしながら、重回帰分析による限界状態関数も通常の設計手法による断面に比べると経済的であることや、少ないデータ数である程度の精度の限界状態関数を得ることから、設計実務における計算負荷を考慮すると、重回帰分析による最適断面算出法もある程度有効な手法であると考えられる

謝辞：本論文は、港湾信頼性設計法研究会（事務局：国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室）での研究成果を取りまとめたものです。ご協力頂いた方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，(社)日本港湾協会，2007
- 2) Cristianini N.and Shawe-Taylor J.:An Introduction to Support Vector Machines and other kernel-based learning methods,Cambridge University Press, 2000. 邦訳 大北剛：サポートベクターマシン入門，共立出版，2005
- 3) 戸川隼人：「共役勾配法」シリーズ新しい応用の数学17，新曜社，1977
- 4) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of The Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990
- 5) 森田年一，井合 進，H. Liu，一井康二，佐藤幸博：液化化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法，港湾技研資料 No.869，1997.
- 6) (財)沿岸技術研究センター：事前混合処理工法技術マニュアル，2008
- 7) 国土交通省港湾局監修：港湾土木請負工事積算基準，(社)日本港湾協会，2008