

応答加速度スペクトル形状を考慮した 直杭式栈橋の断面設定最適化に関する研究

A STUDY ON THE OPTIMAL DESIGN FOR OPEN-TYPE WHARVES
ON VERTICAL PILES CONSIDERING RESPONSE ACCELERATION SPECTRUM

長尾 毅¹・宮下健一朗²
Takashi NAGAO and Kenichirou MIYASHITA

¹正会員 工博 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

²工修 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 inertia force acting on open-type wharves on vertical piles changes according to the natural period of the wharves. The natural period also changes according to the section modulus of the piles. This means that an iterative calculation is needed in the design of the wharves and an effective method is desirable to reduce the number of iteration.

In this study, we conducted the optimal design of the wharves using the conjugate gradient method. It was shown that the number of iteration can be reduced focusing on the shape of the response acceleration spectrum.

Key Words: Open-type wharves on vertical piles, optimal design, response acceleration spectrum

1. はじめに

港湾基準の改正に伴い、栈橋のレベル1地震動に対する耐震性能照査は、個々の港湾における地震波形に基づいて応答加速度スペクトルを評価し、応答加速度スペクトルをもとに照査用震度の特性値を設定することとなった¹⁾。従来は標準応答加速度スペクトルが設定されており、応答値に対する栈橋の固有周期の影響度合いは比較的小さいものであったが、新基準の体系においては、応答加速度スペクトルの形状と栈橋の固有周期が照査用震度に大きな影響を及ぼすことになる。

栈橋の固有周期は杭の剛性に応じて変化するため、杭の諸元を決定しなければ固有周期は算出されない。一方で、照査用震度は栈橋の固有周期が決まらなければ算出されない。このことは、栈橋の杭諸元の決定過程において、繰り返しの計算が必要になることを意味する。さらに、杭の剛性を高めると固有周期は短くなるが、応答加速度スペクトル形状によっては周期が短いほど照査用震度が大きくなることもあり、杭剛性を高めることが（杭の径や肉厚を大きくすることが）、必ずしも安全側の結果に繋がるとは限らない。この点も、計算の繰り返し回数に影響する。設計実務で繰り返し計算を何回行うかについては明確な規定はない。

本研究では、設計実務における計算負荷低減に寄

与する観点から、応答スペクトル形状を考慮して直杭式栈橋の最適な杭諸元を設定する方法について研究を行った。

2. 提案する設計法

栈橋の固有周期は式(1)で求められる。最適設計の導入にあたり、栈橋の固有周期が杭剛性の関数として表現できると取扱が容易となる。このため本研究では、式(2)～式(5)²⁾を式(1)に代入することにより、栈橋の固有周期を杭の肉厚 t の関数として表現する。スペクトル応答加速度は固有周期に応じて変化するため、応答スペクトルまで固有周期の関数として表現すれば、栈橋に作用する慣性力を肉厚 t の関数として整理できることになる。同様に、杭の断面係数 Z 、断面積 A も式(7)、式(8)に示すように肉厚 t の関数として整理することができる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{g \sum K_{hi}}} \dots\dots (1) \quad K_{hi} = \frac{12EI}{l_i^3} \dots\dots (2)$$

$$l_i = h_i + \frac{1}{\beta_i} \dots\dots\dots (3) \quad \beta_i = \sqrt{\frac{k_{hi} D}{4EI}} \dots\dots (4)$$

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - (D-2t)^4) \cdot (5) \quad Z = \frac{2I}{D} \dots\dots\dots (7)$$

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - (D - 2t)^2) \cdots \cdots (8)$$

ここに、 i : 杭の列番号、 T : 固有周期、 m : 栈橋自重、 K_H : 水平バネ係数、 E : ヤング係数、 I : 断面 2 次モーメント、 h : 杭頭から仮想海底面までの距離、 D : 杭径、 β : 杭の特性値である。

図-1 に杭の断面 2 次モーメント I と断面積 A 、図-2 に杭の断面係数 Z と断面積 A について、杭の肉厚と杭径の変化に対応したコンターを示す。等断面積は重量一定条件を示しており、図より重量一定条件では杭径が大きいほど断面係数、断面 2 次モーメントが大きくなること分かる。断面係数が大きくなることは、耐力が増加することに寄与する。また、断面 2 次モーメントが大きくなることは固有周期が短くなることを意味するが、もし仮に応答スペクトル形状が固有周期に対して負の傾きを持っているならば、これは慣性力が大きくなることに繋がる。すなわち、この場合、杭径が大きいほど耐力が大きくなるが、同時に作用する慣性力も大きくなる。

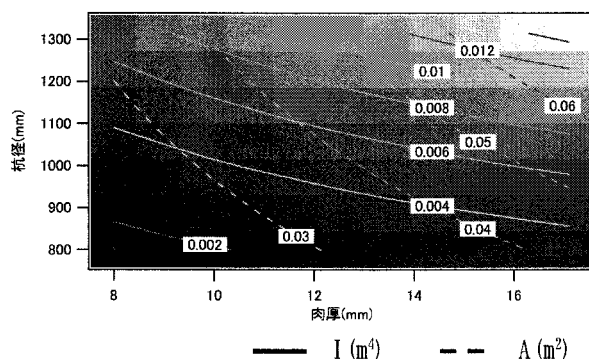


図-1 断面 2 次モーメント I と断面積 A

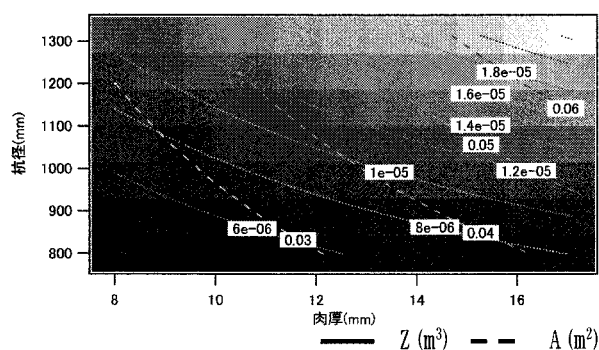


図-2 断面係数 Z と断面積 A

本研究では、応答加速度スペクトル S_a 、杭の断面係数 Z 、杭重量 W 等、性能照査に関係する全てのパラメータを杭の肉厚 t の関数として表現可能であることに着目し、肉厚 t の関数として整理した栈橋の応力照査式を重量一定条件で最小化させることにより肉厚を求める設計法を提案する(式(9)参照)。この提案法により、肉厚の増加による耐力及び作用する慣性力の変化を反映した上で、応力照査式を最小にする最適肉厚を求めることができ、設計実務における繰返し照査回数を低減することができる。なお、

応力照査式は軸力による応力増加分も考慮し、軸力 N 、断面積 A についても肉厚 t の関数として整理し取り入れる。提案する設計法は栈橋の設計を最適化問題として捉えた設計法と言える。

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_b}{\sigma_{by}} + \frac{\sigma_c}{\sigma_{cy}} \right)_i = F(t) \Rightarrow \text{minimize} \cdots \cdots (9a)$$

$$\text{subject to} : W(t) = \text{const} \cdots \cdots (9b)$$

ここで、 σ_b : 杭の曲げ応力度、 σ_c : 杭の圧縮応力度、 σ_{by} : 降伏曲げ応力度、 σ_{cy} : 降伏圧縮応力度である。曲げ応力度は式(10)～式(14)より、圧縮応力度は式(15)～式(20)より、重量は式(21)により与える。

$$\sigma_{bi} = \frac{M_i}{Z} \cdots \cdots (10)$$

$$M_i = \frac{1}{2} H_i l_i \cdots \cdots (\text{杭頭}) (11a)$$

$$M_i = -\frac{H_i}{2\beta_{ki}} \sqrt{1 + (\beta_{ki} h_i)^2} \exp(-\beta_{ki} l_{mi}) \quad (\text{地中}) (11b)$$

$$l_{mi} = \frac{1}{\beta_{ki}} \tan^{-1} \frac{1}{\beta_{ki} h_i} \cdots (12) \quad H_i = \frac{K_{Hi}}{\sum K_{Hi}} \frac{m S_a}{g} \cdots (13)$$

$$S_a = C_1 T + C_2 \cdots \cdots (14) \quad \sigma_{ci} = \frac{N_i}{A_i} \cdots \cdots (15)$$

$$N_i = \frac{K_{vi}}{\sum K_{vi}} + N_{Hi} \cdots \cdots (16) \quad K_{vi} = \frac{E A_i}{l_i} \cdots \cdots (17)$$

$$N_{Hi} = \frac{M_{i-1,i} + M_{i,i-1} - M_{i,i+1} - M_{i+1,i}}{L} \cdots \cdots (18)$$

$$M_{i,i-1} = a M_i \cdots \cdots (19) \quad M_{i,i+1} = b M_i \cdots \cdots (20)$$

$$W = \sum_i \rho A_i \cdots \cdots (21)$$

ここで、 M : 曲げモーメント、 H : 杭頭に働く水平力、 C_1, C_2 : 応答加速度スペクトルを近似するための定数、 N : 軸力、 K_v : 鉛直バネ係数、 ρ : 単位体積重量、 N_{Hi} : 杭頭に働く水平力による軸力、 $M_{i,j}$: i 番目の杭頭における j 番目の杭側の水平力によるモーメントであり、式(19)、式(20)の定数 a, b は栈橋が 2 スパンの場合は $a=0.6, b=0.6$ 、3 スパンの場合は 2 番目の杭頭で $a=0.5, b=0.7$ 、3 番目の杭頭では $a=0.7, b=0.5$ で与えられる³⁾。提案法では、応答加速度スペクトルを固有周期の一次の近似式として与えており、近似する固有周期の範囲を初めに仮定する必要がある。また、水平バネを求めるための β も初めに仮定する必要がある。よって提案法では、まず肉厚を仮定して応答加速度スペクトルの近似式、 β を設定し、最適化問題を解いて求めた肉厚と仮定した肉厚が等しくなるまで収束計算を行うことにより、最適肉厚を求める

こととする。最適肉厚算出までのフローを図-3に示す。本研究において最適化問題は共役勾配法⁴⁾により解くこととする。

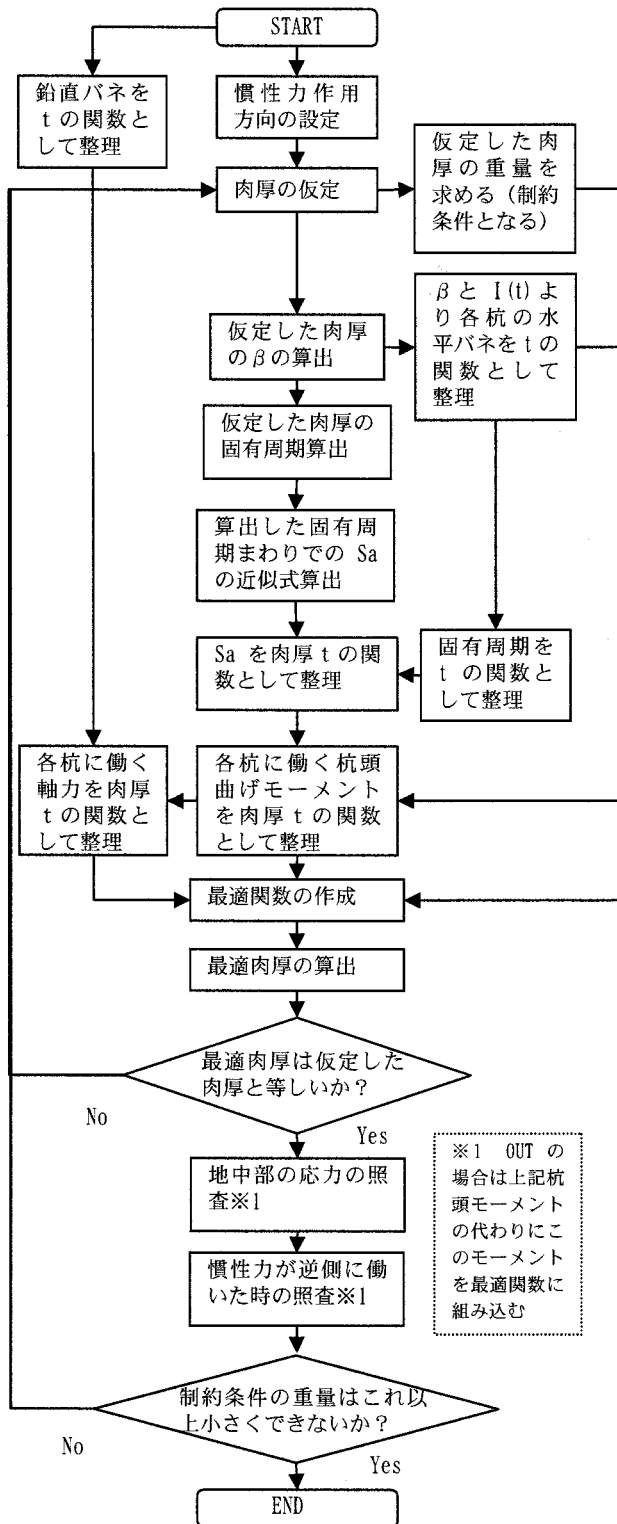


図-3 最適肉厚算出フロー

3. 提案法の評価

提案法により設計した断面と照査用震度 0.22 で設計した断面の比較を行う。照査用震度 0.22 で設計した断面は、設計を行うに当たり仮定した固有周期と照査用震度により設計した杭諸元による固有周期が照査用震度 0.22 の時点で一致している断面であり、応答加速度スペクトルの形状によっては、更なる繰り返し照査によってより最適な断面が求められる可能性を含んだ断面である。以後、この断面を基本断面と呼ぶことにする。

(1) 比較検討ケース

水深-10mで杭本数 3, 水深-10m, -13m, -16mで杭本数4の4つのケースについて比較検討を行う。検討ケースの諸元を表-1に、各ケースの検討モデルを図-4に、各ケースの地盤条件を表-2に示す。地盤条件は栈橋の採用実績の多い軟弱地盤を想定し、固有周期が 1.2s 程度になるように設定している。仮想海底面は各杭と地盤高さとの水深の平均値に設定している。

表-1 検討ケース

		Case1	Case2	Case3	Case4
地盤高さ	杭A	-10	-10	-13.2	-15.75
	杭B	-7.5	-7.5	-10.45	-12.75
	杭C	-5	-5	-7.7	-9.75
	杭D	杭無	-3	-4.95	-7.5
水深		-10m	-10m	-13m	-16m
杭本数		3	4	4	4
上部工幅		14m	19m	20.5m	23m
基本断面の固有周期 (s)		0.994	0.83	0.98	1.15

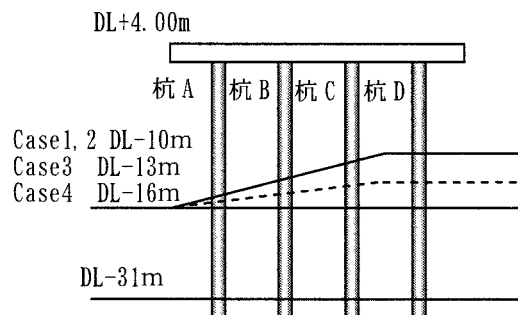


図-4 検討モデル

表-2 地盤条件

地盤	土層区分	ρ (t/m^3)	N	kh (kN/m^3)	G_{ma} (kN/m^2)	σ_{ma} (kN/m^2)	ν	ϕ (deg)	h_{max}	m_g
水深-10m	埋土	1.8	-	-	20800	70	0.33	37	0.24	0.5
	原地盤	2	7	10500	45000	199	0.33	37	0.24	0.5
水深-13m	埋土	1.8	-	-	20800	81	0.33	37	0.24	0.5
	原地盤	2	7	10500	45000	210	0.33	37	0.24	0.5
水深-16m	埋土	1.8	-	-	20800	92	0.33	37	0.24	0.5
	原地盤	2	7	10500	45000	221	0.33	37	0.24	0.5
共通物性	捨石マウンド	2	5	7500	-	-	-	-	-	-

(2) 応答加速度スペクトル

提案法に用いる応答加速度スペクトルは、スペクトル形状が異なる9つの地震動として、港湾等における代表的観測波形、鉄道構造物における設計波および模擬地震動から抽出した波形を用いて設定した。各地震動の卓越周期を表-3に示す。地震動は仮想海底面から $1/\beta$ の深さの位置での応答値を利用し、基本断面の固有周期における照査用震度が0.22になるように振幅調整している。仮想海底面から $1/\beta$ の深さの位置での地震動を求めるための1次元地震応答解析には解析コードFLIP617⁵⁾を利用している。解析に用いた地盤条件は表-2に示すとおりであり、各種パラメータはFLIPにおいて標準的に用いられている設定方法に従って設定している⁶⁾。使用した地震波のうちCase3における応答加速度スペクトルと応答最大値に対応する周期を図-5に示す。他のCaseは紙面の都合上割愛する。

表-3 使用地震動の卓越周期

No.	地震波名	卓越周期(s)
No.1	宮崎波	0.22
No.2	美都波	2.70
No.3	JR波	0.75
No.4	Dip波	1.47
No.5	八戸波	2.56
No.6	神戸波	0.35
No.7	大船渡波	0.43
No.8	Strike波	0.60
No.9	Subduction波	1.49

(3) 比較検討結果

提案法による断面と基本断面の杭の肉厚、鋼材重量の比を表-4に示す。杭径は基本断面に合わせている。各Caseの幾つかの地震動ケースで鋼材重量比が1.00より小さくなっており、提案法による鋼材重量が基本断面より小さくなっていることが分かる。図-6にCase3における応答加速度スペクトルの近似式(図中の直線)を示す。Case3において、提案法による断面の鋼材重量が基本断面より小さくなった地震動No1, No3, No5, No6は応答加速度スペクトルが固有周期近傍で周期に対して負の傾きを持っていることで共通している。提案法は応答スペクトル形状を考慮して、降伏に対する安全性を確保しながらも、できるだけ肉厚の薄い断面を算出していることが分かる。また栈橋において、最も陸側の杭は突出長が短いために水平方向のパネ値が大きく、最も大きな水平力が作用するが、提案法では、最陸側の肉厚がそれより海側の肉厚より薄くなる結果がCase2のNo4とNo8, Case4のNo6で得られた。これは、それらのケースでは肉厚を厚くして耐力を上げるよりも肉厚を薄くして作用を下げる方が応力比が小さくなるためと考えられる。

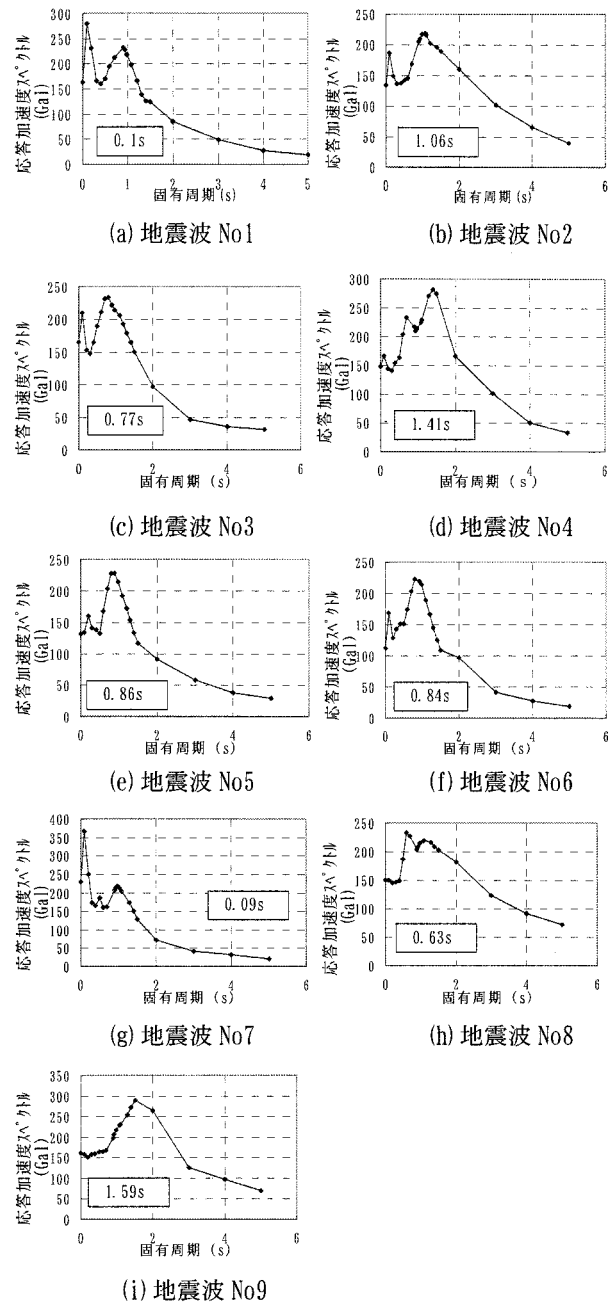


図-5 応答加速度スペクトル (Case3)

表-4 提案法による断面と基本断面の比較 (その1)

地震波	基本断面	提案法								
		No1	No2	No3	No4	No5	No6	No7	No8	No9
杭Aの肉厚(mm)	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
杭Bの肉厚(mm)	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
杭Cの肉厚(mm)	10	9	10	9	10	9	9	10	10	10
固有周期(s)	0.994	1.015	0.994	1.015	0.994	1.015	1.015	0.994	0.994	0.994
鋼材重量比	1	0.96	1.00	0.96	1.00	0.96	0.96	1.00	1.00	1.00

地震波	基本断面	提案法								
		No1	No2	No3	No4	No5	No6	No7	No8	No9
杭Aの肉厚(mm)	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
杭Bの肉厚(mm)	9	9	9	9	9	9	9	9	10	9
杭Cの肉厚(mm)	9	9.3	9	9	9	9	9	9	9	9
杭Dの肉厚(mm)	10	9.7	10	10	9.1	10	10	10	9	10
固有周期(s)	0.827	0.829	0.827	0.827	0.837	0.827	0.827	0.827	0.838	0.827
鋼材重量比	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

表- 4 提案法による断面と基本断面の比較 (その2)

(c) Case3 ($\phi 1000$)

地震波	基本断面	提案法								
		No1	No2	No3	No4	No5	No6	No7	No8	No9
杭Aの肉厚 (mm)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
杭Bの肉厚 (mm)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
杭Cの肉厚 (mm)	10	11	10	10	10	10	10	10	10	10
杭Dの肉厚 (mm)	13	11	13	12	13	12	11	13	13	13
固有周期 (s)	0.984	1.004	0.984	0.999	0.984	0.999	1.015	0.984	0.984	0.984
鋼材重量比	1	0.98	1.00	0.98	1.00	0.98	0.95	1.00	1.00	1.00

(d) Case4 ($\phi 1100$)

地震波	基本断面	提案法								
		No1	No2	No3	No4	No5	No6	No7	No8	No9
杭Aの肉厚 (mm)	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
杭Bの肉厚 (mm)	11	11	11	11	11	11	13	11	11	11
杭Cの肉厚 (mm)	11	11	11	11	11	12	12	11	11	11
杭Dの肉厚 (mm)	15	15	15	15	15	14	11	15	15	15
固有周期 (s)	1.154	1.154	1.154	1.154	1.154	1.158	1.2	1.154	1.154	1.154
鋼材重量比	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00	1.00	1.00

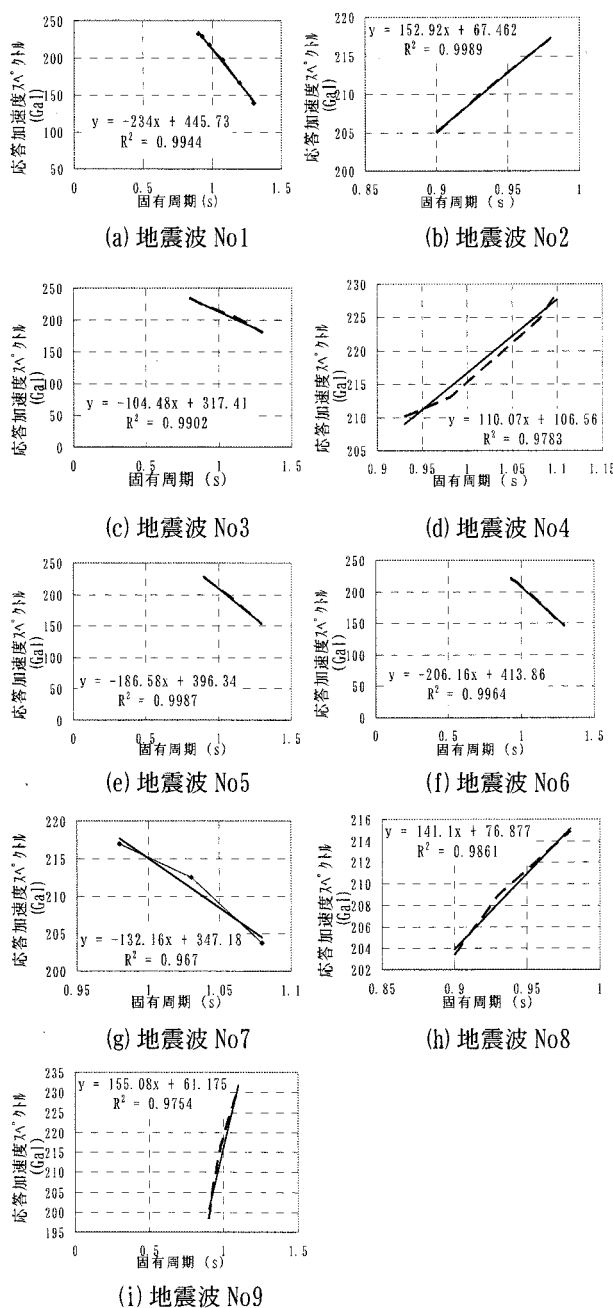


図- 6 応答加速度スペクトルの近似式 (Case3)

4. レベル2地震動に対する耐震性も考慮して設計を行う場合についての考察

ここまでは、レベル1地震動に対する性能に関する最適化の検討であった。耐震強化施設としての栈橋の場合、レベル2地震動に対しても性能が求められることになる。レベル1地震動に対する最適化を行った断面と、最適化を行わない断面について、より大きな作用に対する性能を比較検討する。但し、レベル2地震動に対しては杭の降伏を許容する設計体系となっていることから、プッシュオーバー解析によりレベル1地震動相当以上の作用を栈橋に与え、杭に地中部で全塑性モーメントが発生する時点（終局限界状態）までの余裕度という観点での性能の比較を行う。検討は、表- 4 の提案法による杭諸元条件（以後、肉厚杭別条件）と提案法に全ての杭の肉厚を等しくする等肉厚の制約条件を加えて設計を行った場合の杭諸元条件（以後、等肉厚条件）の2種類の条件で行った。

等肉厚条件の肉厚と、等肉厚条件と肉厚杭別条件の終局限界状態に対応する作用、重量、固有周期の比を表- 5 に示す。ここに、 T :固有周期、 W :重量、 R :終局限界状態に対応する作用であり、添字 c は等肉厚条件の値、 e は肉厚杭別条件の値を示す。両ケースとも提案法により応答スペクトル形状を考慮し、レベル1地震動に対して降伏に対する余裕度は最小に設計されており、降伏に対する安全度は同程度である。

Case3 の地震波 No4, No7, No9 を除く全てのケースで等肉厚条件は肉厚杭別条件以上の終局限界状態に対する性能を示すことがわかる。肉厚杭別条件において最陸側の杭の肉厚がそれより海側の杭の肉厚より薄い Case2 の地震波 No4, No8 における等肉厚条件の終局限界状態に対する性能は肉厚杭別条件に比べて特に大きい。また、全てのケースで等肉厚条件の固有周期は肉厚杭別条件の値以下になっており、もし仮に応答加速度スペクトルが固有周期に対して正の傾きならば、作用慣性力も小さくなるため、等肉厚条件は肉厚杭別条件に比べて非常に耐震性能が高くなることが分かる。

等肉厚諸元の終局限界状態に対する性能が高い理由は、等肉厚条件の場合、降伏に近い応力が生じている杭以外は肉厚杭別条件に比べて応力に余裕を持っており、栈橋の変形が進むとこれらの杭に力が分担されていくためである。等肉厚条件のように建設コストを増加させ、杭の剛性を高めることが終局限界状態に対する性能の向上に結び付くことは当然の結果といえるが、レベル2地震動に対する性能を考慮する必要がある場合は、レベル1地震動に対して過度に最適化を追及することは得策でない可能性が示されたといえる。

但し、今回の検討では、レベル2地震動に対する性能もブッシュオーバー解析の結果をもとに評価しているが、設計実務においては非線形地震応答解析結果を考慮した杭の応答を評価することが標準的であり、検討手法の違いがあることに注意する必要がある。非線形地震応答解析結果を考慮した性能の比較については今後の課題とする。

表-5 等肉厚諸元の肉厚と等肉厚諸元と肉厚杭別諸元結果の比較

(a) Case1 ($\phi 900$)									
	No1	No2	No3	No4	No5	No6	No7	No8	No9
肉厚 (mm)	9	10	9	10	9	9	10	10	10
Tc/Te	1.00	0.98	1.00	0.98	1.00	1.00	0.98	0.98	0.98
Wc/We	1.00	1.07	1.00	1.07	1.00	1.00	1.07	1.07	1.07
Rc/Re	1.00	1.06	1.00	1.06	1.00	1.00	1.06	1.06	1.06

(b) Case2 ($\phi 900$)									
	No1	No2	No3	No4	No5	No6	No7	No8	No9
肉厚 (mm)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Tc/Te	0.98	0.98	0.98	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
Wc/We	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Rc/Re	1.09	1.09	1.09	1.14	1.09	1.09	1.09	1.14	1.09

(c) Case3 ($\phi 1000$)									
	No1	No2	No3	No4	No5	No6	No7	No8	No9
肉厚 (mm)	11	12	11	11	11	11	11	12	11
Tc/Te	0.99	0.98	1.00	1.01	1.00	0.98	1.01	0.98	1.01
Wc/We	1.05	1.12	1.05	1.02	1.05	1.07	1.02	1.12	1.02
Rc/Re	1.05	1.05	1.01	0.97	1.01	1.06	0.97	1.05	0.97

(d) Case4 ($\phi 1100$)									
	No1	No2	No3	No4	No5	No6	No7	No8	No9
肉厚 (mm)	13	13	13	13	13	12	13	13	13
Tc/Te	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99
Wc/We	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.02	1.08	1.08	1.08
Rc/Re	1.00	1.00	1.00	1.00	1.04	1.08	1.00	1.00	1.00

5. まとめ

栈橋は杭の肉厚や径を大きくすると杭の耐力が上がりと同時に、応答加速度スペクトル形状によって杭に作用する慣性力も変化するため、最適な杭諸元を決定するには繰り返しの計算が必要となってくる。本研究では、設計実務における計算負荷低減の観点から、応答加速度スペクトルや断面係数を応力照査式として肉厚の関数として整理し、重量一定の条件の下でこれを最小化させることにより最適な肉厚を算出する設計法を提案した。本研究による主要な結論は以下のとおりである。

- ①提案法は適切に機能し、栈橋の固有周期近傍で応答加速度スペクトルが固有周期に対して負の傾きとなっている幾つかのケースで、耐力が大きい厚い肉厚ではなく、薄い肉厚とすることにより作用する慣性力が小さくなる条件を最適肉厚として算出した。提案法により栈橋設計における繰り返し計算回数を低減できるケースがあると考えられる。
- ②提案法による最適肉厚の中には、最陸側杭の肉厚と比較して、それより海側の杭の肉厚が厚くなる結果も幾つか見られた。
- ③提案法により決定した杭諸元と提案法に全ての杭の肉厚を等しくする制約条件を加えた場合の杭諸元の終局限界状態に対する性能を比較した結果、等肉厚条件の方が終局限界状態に対する性能が高いケースが多かった。レベル2地震動に対する性能を考慮する必要がある場合は、レベル1地震動に対して過度に最適化を追及することは得策でない可能性がある。但し、今後は非線形地震応答解析を行うことにより、詳細な検討が必要である。

謝辞：本研究で用いた地震波の一つは防災科学技術研究所の基盤強震観測網 (KiK-net) の地震波によるものであり、ここに感謝の意を表します。

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) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、(社)日本港湾協会、1999
- 3) 片山猛雄，堀井修身：さん橋係船岸に働く水平力による上部工曲げモーメント計算図表，港湾技研資料 No.75，1969
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 森田年一，井合 進，H. Liu，一井康二，佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法，港湾技研資料 No.869，1997.