

レベル1地震動に対する二重矢板式岸壁の耐震性能照査用震度の設定方法

田川 辰也¹・長尾 毅²

¹国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室（〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1）

²国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室長（〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1）

港湾基準が 2007 年に改正され、岸壁の耐震性能照査において、レベル1地震動に対しても、変形量を制御対象とした照査用震度の算出方法が位置づけられた¹⁾。ただし、この方法は重力式、控え直杭式および控え組杭式岸壁に対するもので、その他の構造形式については未検討となっている。そこで本研究では、二重矢板式岸壁を対象に、レベル1地震動に対する照査用震度の算出方法について検討した。提案する方法は、地震動の周波数特性や継続時間等の影響に加えて、二重矢板式岸壁の変形特性を考慮して、係船岸の許容変形量に応じた照査用震度を算出するものである。

キーワード 二重矢板式岸壁、レベル1地震動、耐震設計、照査用震度

1. はじめに

2007 年改正された港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾（以下港湾基準と呼ぶ）では、岸壁のレベル1地震動に対する照査用震度は、地震動の周波数特性・継続時間等の影響を考慮して設定することが標準的な方法となった²⁾。この方法は、矢板式係船岸については、控え直杭式および控え組杭式矢板式係船岸については提示されているが、二重矢板式係船岸についての提示はなく、参考扱いの考え方として、便宜的に控え直杭式矢板式係船岸についての方法を準用してもよいとしている。

控え直杭式矢板式係船岸の変形に関する既往の研究³⁾によると、レベル1地震動に対する矢板式の変形には矢板控え間距離が支配的であり、この距離が長いほど変形量が減少することが明らかとなっている。本研究で対象とする二重矢板式係船岸は、背後地の土地利用の観点などから通常の控え直杭式矢板式係船岸で必要となる矢板控え間距離がとれない場合などに採用されることが多い形式であり、控え直杭式矢板式係船岸よりも矢板控え間距離が短い形式とみなすことができる。従って、二重矢板式係船岸については、その変形特性に着目した照査用震度の算出方法を構築する必要があるといえる。

このような背景のもと、本研究では、二重矢板式係船岸の照査用震度の設定方法について検討した。検討においては、既往の研究事例²⁾との整合性を考慮し、地震動の周波数特性や継続時間の影響を反映し、変形量許容値を引数とする照査用震度の算出式を構築した。また、港湾構造物の設計においてはレベル1地震動に対して液状

化を許容しないことを基本としていることから、既往の研究²⁾と同様に、本研究においても液状化に対する安全性は確保されているという前提で議論を進める。

2. 検討条件

表-1 に示す条件で、標準的な方法により二重矢板式係船岸の断面を設定した。図-1 に断面図、表-2 に地盤条件（せん断波速度 V_s の深度分布）、表-3 に断面諸元を示す。ここで、水深については、二重矢板式係船岸が用いられる計画水深は-10m 未満が多い⁴⁾ことから、本研究では水深-7.5m と-11.0m を対象とした。設計震度についても、二重矢板式係船岸が設計震度 0.15 以下の場合に用いられることが多い⁴⁾ことを考慮して設定した。また、水深が深い条件および設計震度が大きい条件では、壁体の滑動の照査において二重矢板式係船岸の矢板間隔が広くなり、他の構造形式と比較して不利となり採用されないことが多いことも考慮して設定した。地盤条件は、既往の照査用震度設定手法の検討²⁾における地盤条件に準じて設定した。検討モデルの地盤の固有周期は緩い地盤で 1.0 秒程度、締まった地盤で 0.5 秒程度、その中間の地盤で 0.7 秒程度としている。

矢板壁の鋼材については、水深-7.5m の場合 SY295、水深-11.0m の場合、設計震度 0.10 のケースでは SYW390、設計震度 0.15、0.20 のケースでは SKY490 とし、二列の矢板は同じ規格とした。タイ材については、タイロッド HT690 とした。

地震応答解析は、既往の研究²⁾と同様にFLIP³⁾を用いた。解析方法や地盤物性の与え方も既往の研究²⁾における矢板式係船岸と同様としている。ただし、地盤と矢板

壁の接触条件のうち、動的解析時の地盤と矢板壁背面の接触条件はジョイント要素とした。これは既往の研究²⁾と同様に鉛直ローラーとした場合、残留変形量が控え直杭式矢板式係船岸と比較して極端に大きくなったため、鉛直方向の接点のズレを許容しないジョイント要素を用いることにより、控え直杭式矢板式係船岸の残留変形量との整合を図った。このことの妥当性の確認は今後の課題である。

表-1 検討条件

水深 震度	-7.5m	-11.0m
0.10	○	○
0.15	○	○
0.20		○

表-2 地盤条件 (V_s 分布, 単位: m/s)

	case1	case2	case3
埋土上層	120	180	210
埋土下層	120	180	250
原地盤上層	150	190	280
原地盤下層	150	250	450

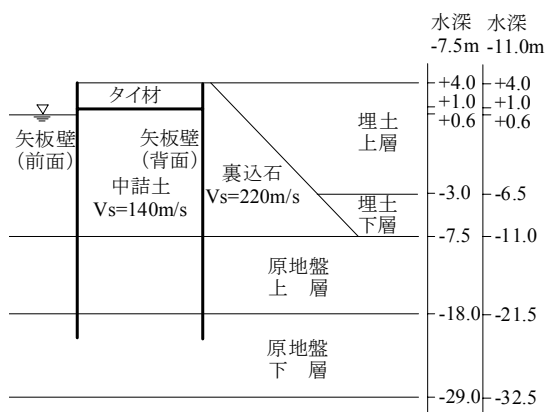


図-1 断面図

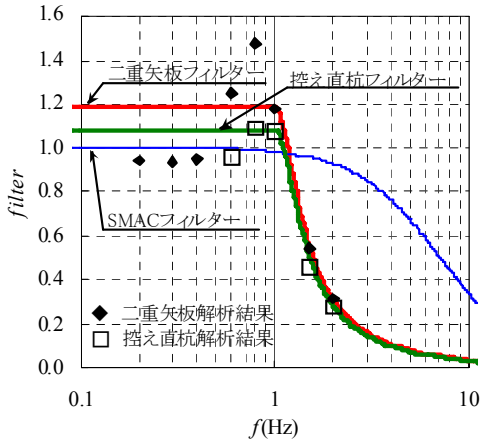
3. 照査用震度の検討

(1) 周波数特性の考慮

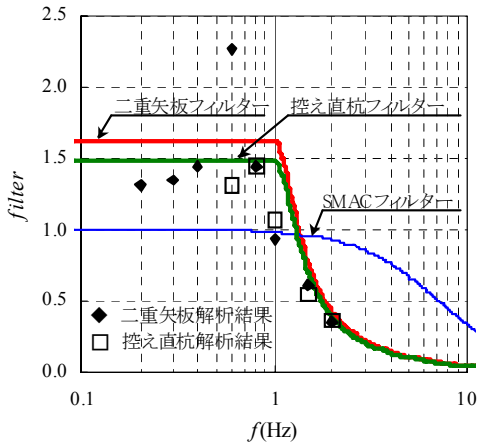
まず周波数特性と岸壁変形量の相関を検討するため、既往の研究と同様に正弦波を用いた検討を行った。用いた周波数は、0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0Hzの8種類とした。設計震度 0.10 の条件について、残留変形量が 20cm となる条件における周波数ごとの地表面加速度最大値を探索した。その結果、周波数に対する地表面加速度最大値の傾向として、重力式係船岸や控え工を有する矢板式係船岸²⁾、根入れセル式係船岸⁹⁾等と同様な結果が得られた。即ち、1Hz 程度以上の周波数になると壁体に変形を起こさせるためには非常に大きな入力地震動が必要になり、かつ、0.4Hz 以下の領域では基本的にほぼ同程度の入力地震動により等量の変形が発生する。さらに、水深が浅いほど同じ入力に対して変形が生じにくく、同じ設計震度で設計した断面であっても、壁高が高いほど変形しやすい。以上の検討により、既往の研究と同様に、1Hz 以下の領域でフラット、1Hz 以上で急激に減衰する値を持つフィルターを用いることにより地震動の周波数特性を考慮することとする。図-2 にフィルターの例を示す。

表-3 断面諸元

水深	地表面 標高	壁高	地盤	設計 震度	矢板				タイ材			
					断面二次 モーメント (m^4/m)	材質	矢板長 (m)	矢板天端 標高(m)	根入れ下端 標高(m)	矢板間隔 (m)	鋼種	断面積 (m^2/m)
-7.5m	4.0m	11.5m	case1	0.10	2.295E-03	SY295	18.0	2.0	-16.0	6.5	HT690	1.383E-03
				0.15	2.678E-03	SY295	18.5	2.0	-16.5	7.5	HT690	1.414E-03
			case2	0.10	2.295E-03	SY295	18.0	2.0	-16.0	6.5	HT690	1.383E-03
				0.15	2.678E-03	SY295	18.5	2.0	-16.5	7.5	HT690	1.414E-03
			case3	0.10	2.295E-03	SY295	17.0	2.0	-15.0	6.5	HT690	1.178E-03
				0.15	2.295E-03	SY295	17.0	2.0	-15.0	7.5	HT690	1.178E-03
-11.0m	4.0m	15.0m	case1	0.10	3.247E-03	SY390	22.5	2.0	-20.5	8.5	HT690	1.659E-03
				0.15	6.108E-03	SKY490	27.0	2.0	-25.0	10.5	HT690	2.004E-03
				0.20	7.349E-03	SKY490	27.5	2.0	-25.5	16.5	HT690	2.566E-03
			case2	0.10	3.247E-03	SY390	22.5	2.0	-20.5	8.5	HT690	1.659E-03
				0.15	6.108E-03	SKY490	27.0	2.0	-25.0	10.5	HT690	2.004E-03
				0.20	7.349E-03	SKY490	27.5	2.0	-25.5	16.5	HT690	2.566E-03
			case3	0.10	3.247E-03	SY390	21.5	2.0	-19.5	8.5	HT690	1.659E-03
				0.15	5.481E-03	SKY490	25.0	2.0	-23.0	10.5	HT690	2.004E-03
				0.20	5.481E-03	SKY490	25.0	2.0	-23.0	16.5	HT690	2.156E-03



(a) 水深-7.5m 地盤 case1 (軟弱地盤)



(b) 水深-11.0m 地盤 case1 (軟弱地盤)

図-2 フィルターの例

図-2 の鉛直軸はフィルターの値を示しており、設計震度 0.10 の条件における結果であることを考慮して、フィルターの値を乗じてフーリエ逆変換した場合に加速度最大値が 100Gal となるような設定としている。例えば(a)の条件では 1Hz 以下の成分は約 1.2 倍され、2Hz の成分は約 0.3 倍されることにより、周波数に関係なく加速度の最大値が同じであれば同程度の変形が生じると判断できることになる。

フィルターの詳細の検討方針は以下の通りである。既往の研究²⁾と同じ形式のフィルター関数を用いることとし(式(1)~式(3))、 $c_1 \sim c_5$ を以下のように定める。まず 1Hz 以下の応答値の代表値として、ピーク値と 0.4Hz 以下のフラットな部分の値の平均値に対して、検討結果をもとに壁高 H 、背後地盤の固有周期 T_b 、海底面下の地盤の固有周期 T_u の 3 つのパラメータを用いて線形重回帰分析を行い 1Hz 以下の値に対する回帰式を求めた。なお、地盤の固有周期に乘じる定数 c_3 、 c_4 については、本研究で対象とした以外の地盤条件でも不整合が生じないように既往の研究による設定と同様としている。さらに 1Hz 以上については、結果にフィッティングする関数形を用いて、フィルターを作成した。

図-2 における□のプロットが正弦波による地震応答計算結果に対応する値であり、フィルターの目標値となる。図に示す通り、解析結果とフィルターの一致度は概ね良好とみなせる。また参考として、既往の研究において設定された控え直杭式矢板式係船岸のフィルターの定数を式(1)~式(3)に、フィルター形状を図中に示す。二重矢板式係船岸の b 値のほうが控え直杭式矢板式係船岸の b 値より 10%程度高い結果となった。この倍率は壁高および地盤ケースによる大きな差はなく、周波数特性が岸壁変形量に与える影響は、両者同じ傾向にあると考えられる。これは、二重矢板式係船岸は、同じ条件で設計した控え直杭式矢板式係船岸より変形しやすいことを示している。したがって、フィルター処理後の加速度最大値を用いて算出した照査用震度も、二重矢板式係船岸のほうが控え直杭式矢板式係船岸より大きくなることになる。

$$a(f) = \begin{cases} b & (f \leq 1.0\text{Hz}) \\ \frac{b}{1 - \{g(f)\}^2 + c_1 g(f) i} & (f > 1.0\text{Hz}) \end{cases} \quad (1)$$

$$g(f) = 0.34(f - 1.0) \quad (2)$$

$$b = c_2 \frac{H}{H_R} - c_3 \frac{T_b}{T_{bR}} + c_4 \frac{T_u}{T_{uR}} - c_5 \quad (3)$$

ここに、 f : 周波数(Hz)、 i : 虚数単位、 H : 壁高(m)、 H_R : 基準壁高(=15.00m)、 T_b : 背後地盤の初期固有周期(s)、 T_{bR} : 背後地盤の基準初期固有周期(=0.80s)、 T_u : 海底面下地盤の初期固有周期(s)、 T_{uR} : 海底面下地盤の基準初期固有周期(=0.40s)、 $c_1 \sim c_5$: 定数で以下のとおり。 $c_1 = 11.0$ (二重矢板式)、 11.0 (控え直杭式)、 $c_2 = 2.40$ (二重矢板式)、 2.25 (控え直杭式)、 $c_3 = 0.88$ 、 $c_4 = 0.96$ 、 $c_5 = 0.97$ (二重矢板式); 0.96 (控え直杭式)

(2) 継続時間の影響の評価

次に、地震動の継続時間の影響について、既往の研究と同様に検討を行った。検討条件は周波数特性の検討と同様に、設計震度 0.10 とした。検討対象波形は既往の研究²⁾で用いた 9 波形とした(表-4)。

この 9 波形を用いて、入力振幅を調整することにより、岸壁の残留変形量が 20cm となる条件を探索した。設計震度 0.10、水深-11.0m の条件における自由地盤部の地表面加速度について上述のフィルター処理後の加速度最大値 a_f を図-3 に示す。図中の□がフィルター処理を行った結果である。加速度最大値にはばらつきがある。これは、例えば継続時間が短い地震動の場合、短時間で 20cm の変位を引き起こすためには大きな加速度 a_f が必要となるためである。この継続時間の影響を補正するための低減率 p の算定式を、既往の研究と同様の手法によって求めた。

図-4 および式(4)に S/α_f と低減率 p の関係を示す。

表-4 検討対象波形

No.	名称	継続時間 (s)	卓越周波数 (Hz)
1	八戸波	19.0	0.39
2	神戸波	20.0	2.88
3	大船渡波	19.0	2.34
4	宮崎波	80.0	4.55
5	美都波	161.0	0.37
6	JR2波	40.0	1.34
7	Dip波	29.1	0.68
8	Strike波	29.1	1.66
9	Subduction波	40.3	0.60

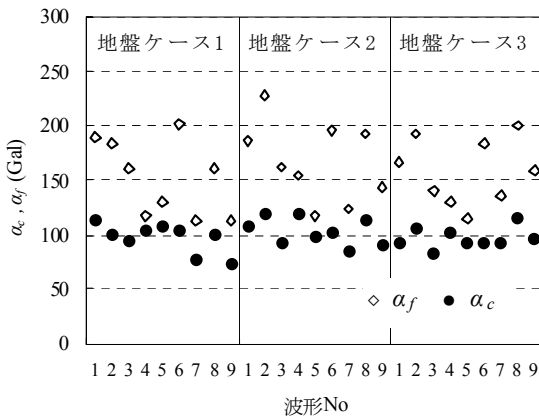


図-3 加速度最大値の比較

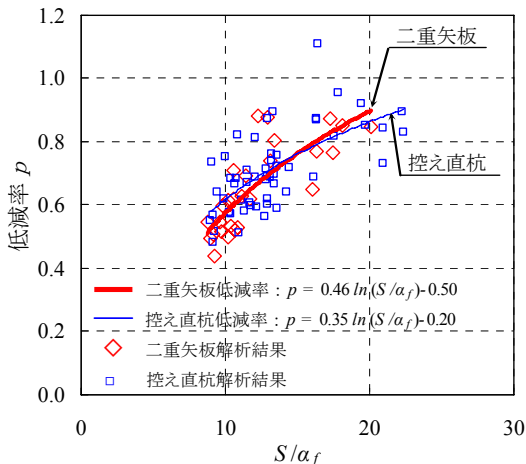


図-4 低減率

ここで、 S はフィルター処理後の加速度の二乗和平方根であり、 S を加速度最大値 α_f で基準化した S/α_f は地震動の継続時間の長さを表すパラメータとなっている。また、低減率 p とはフィルター処理して得られた α_f を検討に用いた設計震度 0.10 相当の 100Gal に対応させるために設定した値 (=100/ α_f) である。式(4)によって求めた低減率 p によって α_f を補正した結果を図-3 に●で示した。継続時間の違いによる波形間のばらつきを補正した結果は概ね良好と考えられる。式(4)により得られる低減率 p を用いて、周波数特性と継続時間の影響を考慮した補正

加速度最大値 α_c は式(5)により得られる。低減率の上限は既往の研究と同様に 1.0 とする。

参考として、既往の研究において設定された控え直杭式矢板式係船岸の定数を式(4)に、低減率を図-4 に示す。式の定数は異なるものの、算定される低減率の値は同程度とみなすことができる。すなわち、周波数特性については控え直杭式矢板式係船岸と二重矢板式係船岸は傾向が異なるものの、継続時間の影響については傾向は類似していると見なせることになる。

$$p = c_6 \ln(S/\alpha_f) - c_7 \quad (4)$$

ここに、 S : フィルター処理後の加速度自乗和平方根 (Gal) , α_f : フィルター処理後加速度最大値 (Gal) , $c_6 \sim c_7$: 定数で、以下のとおり。 $c_6=0.46$ (二重矢板式) , 0.35 (控え直杭式) , $c_7=0.50$ (二重矢板式) , 0.20 (控え直杭式)

$$\alpha_c = p \cdot \alpha_f \quad (5)$$

ここに、 α_c : 補正加速度最大値(Gal)

(3) 照査用震度算出方法

周波数特性、継続時間の影響の考慮を踏まえて、照査用震度の算出方法の検討を行う。任意の変形量許容値に対して照査用震度が適切に算定できるように、表-4 に示した 9 波形を用いて、残留変形量が 5,10,15,20cm となるように入力振幅調整を行い、得られた条件における自由地盤部の地表面加速度時刻歴をもとに補正加速度最大値 α_c を算出した。

震度算出式は、設計震度に対して、岸壁変形量と補正加速度最大値を重力加速度で除した値 α_c/g を説明変量とした回帰分析により求めた。用いたデータ数は 540 である。加速度最大値に対して 1 次の回帰式が得られるように既往の研究²⁾と同様の回帰分析を行った結果、式(6)が得られた。また参考として、既往の研究において設定された控え直杭式矢板式係船岸の定数を式(6)に示す。

$$k_h = c_8 \left(\frac{D_a}{D_r} \right)^{c_9} \cdot \frac{\alpha_c}{g} + c_{10} \quad (6)$$

ここに、 k_h : 照査用震度, D_a : 変形量許容値(cm), D_r : 基準変形量許容値(=10cm), α_c : 補正加速度最大値(Gal), g : 重力加速度(=980Gal), $c_8 \sim c_{10}$: 定数で以下のとおり。 $c_8=1.58$ (二重矢板式), 1.91 (控え直杭式), $c_9 = -0.66$ (二重矢板式), -0.69 (控え直杭式), $c_{10}=0.03$ (二重矢板式), 0.03 (控え直杭式)

(4) 照査用震度算出方法の妥当性の検討

これまで検討してきた照査用震度算出方法の妥当性の検討を行う。上述のように、二重矢板式係船岸は控え直杭式矢板式係船岸と比較して、矢板間隔が狭くなることが多いのが特徴であり、最も変形に影響を与えるパラメ

一たは矢板控え間距離である³⁾ことから変形が大きいといえる。従って、同じ条件では二重矢板式係船岸の照査用震度は控え直杭式矢板式係船岸の照査用震度よりも大きく設定されるべきであるといえる。

これまでの検討ケースの中から、広範囲での算出震度の傾向を見るため、水深、地盤条件、設計震度、入力波形の組み合わせを変えた15ケースを選定し、これまで検討した二重矢板式係船岸の定数により算出した照査用震度と、同じ条件での控え直杭式矢板式係船岸の照査用震度を比較した結果を図-5に示す。二重矢板式係船岸の照査用震度の方が小さく算出されており、妥当な結果が得られているとはいえない。

本研究の照査用震度は、回帰解析の結果をもとに構築されている。二重矢板式係船岸と控え直杭式矢板式係船岸の照査用震度の不整合については、回帰に用いた条件の違い等の要因が考えられる。即ち、後者は設計震度0.15~0.25の範囲を、前者は設計震度0.10~0.20の範囲を対象としている。これは、既に述べたように、それぞれの形式が採用されることの多い範囲に基づいて設定している。この回帰分析の対象震度の違い等が、図-5に示す比較結果に大きく影響していると考えられる。

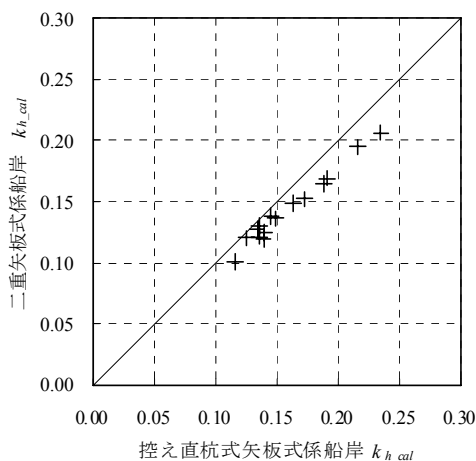


図-5 照査用震度の比較 (見直し前)

いずれにせよ、最終的に照査用震度を用いた安定性の照査は震度法によることになるため、実際の変形メカニズムに即した照査が行われているとは必ずしもいえない。震度法の枠組みによった照査においては精度の面で限界があることは避けられない。よって、既往の研究による控え直杭式矢板式係船岸との整合性などの観点から、二重矢板式係船岸の照査用震度の算出方法について再検討した。

周波数特性の影響を考慮したフィルター、継続時間の影響を考慮した低減率、最終的な変形量を考慮した照査用震度の3段階のうち、周波数特性の影響については、図-2に示したように二重矢板式係船岸と控え直杭式矢板式係船岸の変形しやすさの差は反映されている。また、

継続時間の影響についてはほぼ同程度であった。以上により、最終的な照査用震度の評価式(6)における定数の不整合が二重矢板式係船岸と控え直杭式矢板式係船岸の照査用震度の不整合の原因であるといえる。従って、式(6)の定数を二重矢板式係船岸と控え直杭式矢板式係船岸で統一しておけば、両者の不整合は解消される可能性が高い。さらに、継続時間の影響についても、結果として得られる低減率に大きな差はないことから、設計実務における混乱の低減という観点からは、式(4)の定数についても統一することが考えられる。

以上のことから、二重矢板式係船岸の照査用震度算出方法について、周波数特性以外の項目については、控え直杭式矢板式係船岸の照査用震度算出方法と同じとする方法について検討した。すなわち、式(1)~式(6)における定数 $c_1 \sim c_{10}$ を以下のとおりとするものである。

$$c_1=11.0, c_2=2.40, c_3=0.88, c_4=0.96, c_5=0.97, \\ c_6=0.35, c_7=0.20, c_8=1.91, c_9=0.69, c_{10}=0.03$$

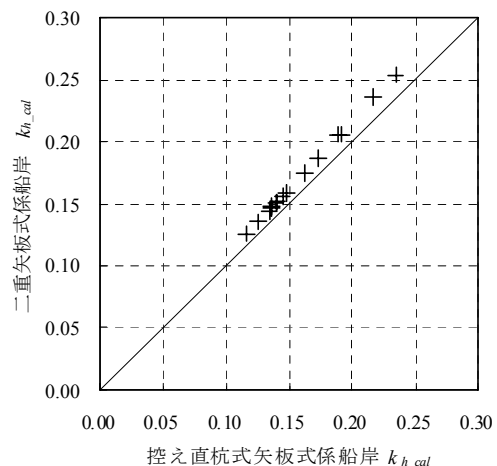


図-6 照査用震度の比較 (見直し後)

図-5に示した条件の二重矢板式係船岸の照査用震度を、上記の方法で算出し直した結果を図-6に示す。二重矢板式係船岸の照査用震度のほうが大きく算出され、両者の不整合は解消されていることが分かる。次に、このようにして設定される照査用震度が、二重矢板式係船岸単独で検討した場合に妥当なものなのかどうかを検討する。検討においては、既往の研究と同様に、従来港湾構造物において用いられてきた野田らによる震度算出方法⁷⁾との比較も参考として併せて行う。

まず、変形量ごとに設計震度 k_{d1} に対する補正加速度最大値 α_c と野田らの方法で用いられてきたSMAC加速度最大値 α_s の分布を、矢板式係船岸における標準的な変形量許容値である15cm変形時の条件について図-7に示す。ここで、SMAC加速度は、図-2に示したSMACフィルターを用いた加速度である。補正加速度最大値 α_c はばらつきが小さく、設計震度の増加に対応して増加し

ている。これに対して SMAC 加速度最大値 a_s はばらつきが大きく、平均値で見ると設計震度の増加に対応して増加しているものの上限値は設計震度 0.15 より 0.20 のほうが小さくなっているなど設計震度との相関が低い。したがって、本研究による補正加速度最大値 a_c のほうが精度が良く、設計震度との対応が良いといえる。

次に、本研究による照査用震度と野田らの式による震度とを 15cm 変形の条件で比較したものを図-8 に示す。鉛直軸の $k_{h,cal}$ が各方法による照査用震度である。野田らの式による震度は設計震度の上昇に伴う大きな変化は示さないが、本研究による震度は設計震度の増加に伴う対応は良い。本研究による震度は、周波数特性以外の項目を控え直杭式矢板式係船岸の算出方法と同じにしているため、ばらつきはあるものの、野田らの方法による震度よりも誤差は少ない。誤差の程度も控え直杭式矢板式係船岸と同程度であると判断できる。以上により、本研究における二重矢板式係船岸の照査用震度は、既往の研究と同程度の精度で、かつ既往の研究で対象とした構造形式における結果との整合性も保たれていると判断できると考えられる。

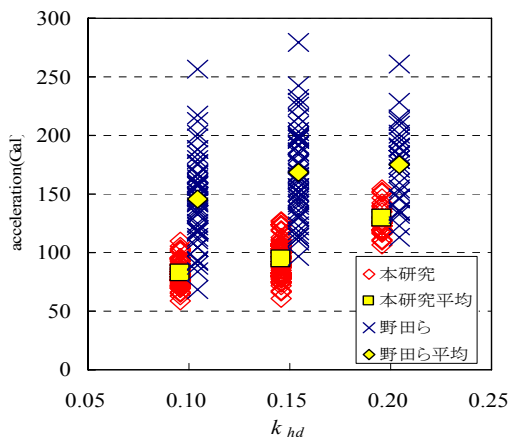


図-7 加速度最大値の比較

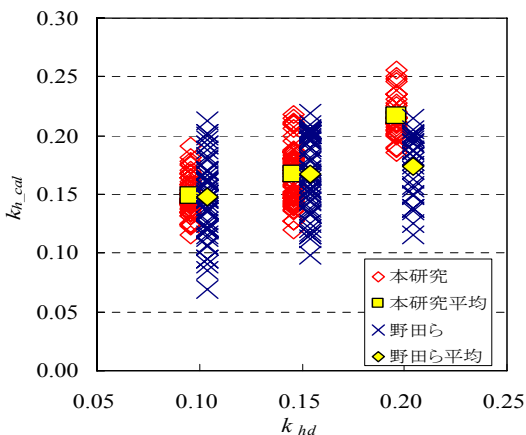


図-8 照査用震度の比較

4. おわりに

本研究では、二重矢板式係船岸のレベル 1 地震動に対する照査用震度について検討した。二重矢板式岸壁は、同一の条件で設計した控え直杭式矢板式岸壁と比較すると矢板間隔が狭くなるため、残留変形量は大きくなる傾向にある。この点が反映されるような手法の提案を行った。提案する方法は、控え直杭式矢板式岸壁の照査用震度算出方法との整合性等の観点から、周波数特性以外の項目については控え直杭式矢板式岸壁の照査用震度算出方法と同じとするものである。

なお、本研究の目的は照査用震度の算定方法の検討であり、例えば控え直杭式矢板と二重矢板での同一設計震度における変形量の違いなどを検討する際には、文献3)の方法が参考になると考えられる。

謝辞：本研究で用いた強震記録のうち、基盤強震観測網の記録については <http://www.kik.bosai.go.jp> よりダウンロードした波形を用いました。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修, (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007
- 2) 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, 国総研資料 No.310, 2006
- 3) 宮下健一郎, 長尾 毅: 控え直杭式矢板式岸壁の変形量に寄与するパラメータに関する研究, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp.841-846, 2007
- 4) 岩崎直晃, 長尾毅: 矢板式係船岸の構造諸元などに関する統計的分析, 港湾技研資料 No.780, 1994
- 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) 住谷圭一, 長尾 毅: レベル 1 地震動に対する根入れセル式岸壁の耐震性能照査用震度の基礎的考察, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp.817-822, 2007
- 7) 野田節男, 上部達生, 千葉忠樹: 重力式岸壁の震度と地盤加速度, 港湾技術研究所報告, Vol.4, No.4, pp.67-111, 1975