

浮棧橋係留杭の耐震照査手法の提案

山本 修司*

* (一財) 沿岸技術研究センター 上席客員研究員

最近、チェーンやロープに替わって杭で係留する浮棧橋が主流となっている。しかし、この係留杭の地震時における照査方法については不明な点が多い。本稿では、係留杭に作用する地震時慣性力の算定法を提案するとともに、試設計を行い照査用震度に与える減衰係数等の影響について検討した結果を報告する。

キーワード：浮棧橋係留杭, 照査用震度, 付加質量, 減衰係数, 造波減衰

1. はじめに

浮棧橋は水面上に浮いているので、それ自身に地震慣性力は作用しない。また、チェーンやロープでカテナリー係留されている場合には、海底のアンカーから伝達される地震力は無視できる程小さい。しかし、浮棧橋が杭で係留されている場合には、浮棧橋と係留杭の接点において、係留ロープを介して地震力が浮棧橋に伝達されるので、係留杭と浮棧橋の間の相互作用を考慮して、係留杭に作用する地震慣性力を評価する必要がある。本稿では、浮棧橋係留杭に作用する地震慣性力の算定法を提案するとともに、試設計を行い照査用震度に与える減衰係数等の影響について検討した結果を報告する。

2. 検討方法と前提条件

2.1 対象施設

照査用震度の算定にあたっては、図-1に示す「法線平行方向」と「法線直角方向」の2方向に対して検討を行う。

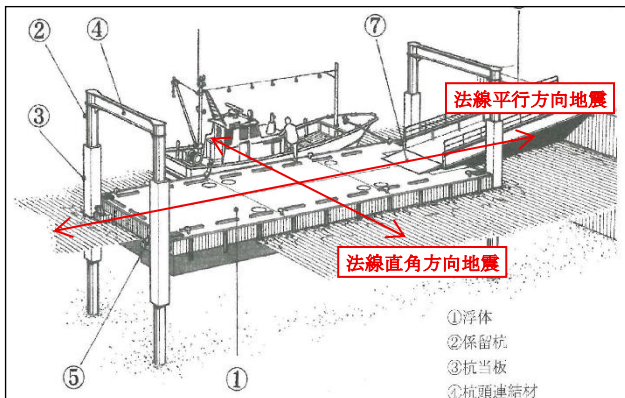


図-1 検討対象と照査用震度の算定方向

2.2 検討方法

2.2.1 検討方法照査用震度の算定

浮棧橋と係留杭で構成される構造系は直杭式棧橋のそれに類似しているので、直杭式棧橋の照査用震度の算定法を準用するものとする。すなわち、

- (1) 工学的基盤の地震動の設定
- (2) 一次元地震応答解析
- (3) 海底面下 $1/\beta$ での加速度時刻歴の算定
- (4) 浮棧橋係留系の固有周期の算定
- (5) 加速度応答スペクトルの算定
- (6) 照査用震度の特性値の算定

ここで、固有周期 T_s の算定は、直杭式棧橋と同様に一質点系によるものとする。

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gK}} \quad \dots (1)$$

自重 W については、浮棧橋の自重 W_p 、水の付加重量 W_a 及び1組の係留杭(平面ラーメン)の自重 W_k の和とすると、地震動が法線直角方向の場合には、慣性力の半分を1組の係留杭(平面ラーメン)で受け持つとし、地震動が法線平行方向の場合には、地震力の半分を1本の係留杭で受け持つこととなる。

法線直角方向： $W=1/2 (W_p + W_a) + W_k$

法線平行方向： $W=1/2 (W_p + W_a) + 1/2 W_k$

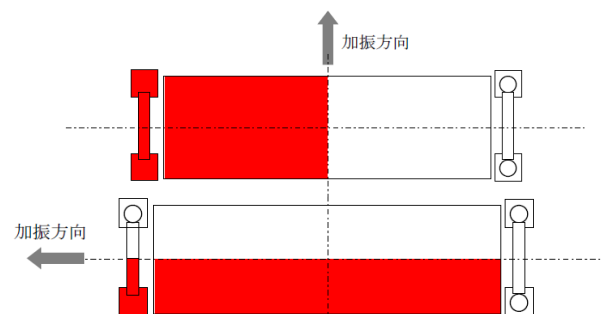


図-2 加振方向と重量

2.2.2 付加重量の算定

浮栈橋の付加重量は船舶の接岸エネルギーを算定する際に用いる付加質量係数 C_m を準用することとする。

$$C_m = 1 + \frac{\pi}{2C_b} \frac{d}{B} \quad \dots (2)$$

$$C_b = \frac{\nabla}{L_{pp} B d} \quad \dots (3)$$

ここに、

$$C_m = 1 + (\pi / 2C_b) \cdot (d/B)$$

$$C_b = \nabla / (L_{pp} B d)$$

∇ : 浮体の排水体積 (上載荷重満載時)

C_b : ブロック係数 (長方形浮体の場合 1.0)

L_{pp} : 浮体の長さ L

B : 浮体の幅 (地震動の作用方向により, B と L を入れ替える.)

d : 上載荷重満載時の喫水

2.2.3 減衰定数

浮栈橋と係留杭で構成される構造系の減衰定数 h については、構造系が似ている直杭式栈橋の照査用震度の算定に用いられている $h=0.2$ を準用する^{1), 2)}。

3. 試設計

(1) 減衰定数

試設計に用いた浮栈橋の諸元は以下の通りである。

長さ $L=18.00\text{m}$

幅 $B=6.00\text{m}$

高さ $D=1.90\text{m}$

無載荷時の乾舷: $f_1=1.00\text{m}$

無載荷時の喫水: $d_1=0.90\text{m}$

浮栈橋の自重:

$$W_f = L \times B \times d_1 \times \gamma_w = 18.0 \times 6.0 \times 0.9 \times 10.1 = 981.72\text{kN}$$

満載時の上載荷重:

$$18.0\text{m} \times 6.0\text{m} \times 3.0\text{kN/m}^2 = 324\text{kN}$$

(地震時の上載荷重は永続状態の半分 1.5kN/m^2 とすることが一般的であるが、ここでは、上載荷重の影響を最大に評価するために、永続状態の上載荷重を用いている。)

浮き栈橋の自重:

$$W_f = W_{pf} + 324\text{kN} = 1,305.72\text{kN}$$

上載荷重満載時の喫水:

$$d_2 = W_f / (L \times B \times \gamma_w) = 1.197\text{m}$$

上載荷重満載時の乾舷: $f_2 = D - d_2 = 0.703\text{m}$

係留杭のバネ定数 K は骨組解析の結果より以下の通りとした。

法線直角方向: $K=2,888\text{kN/m}$

法線平行方向: $K=733.9\text{kN/m}$

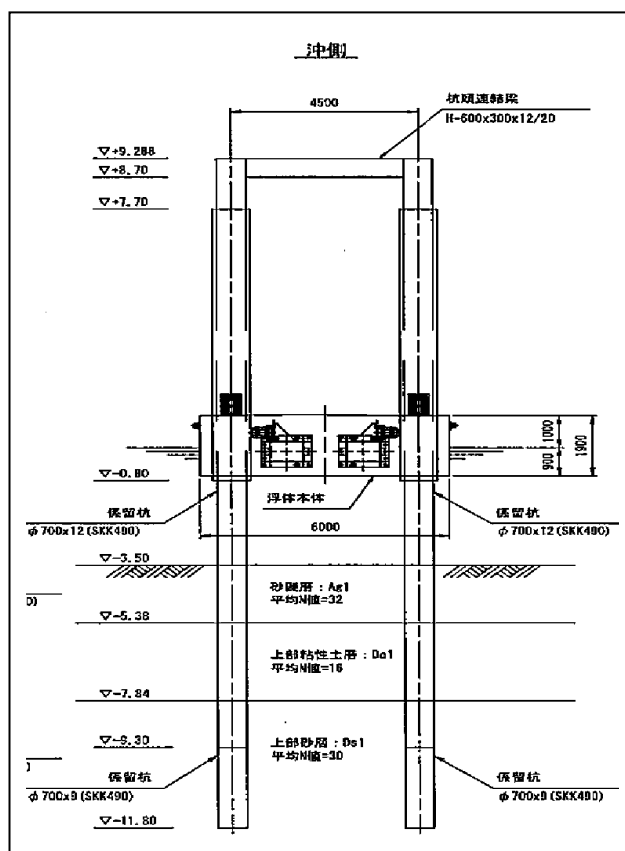


図-3 係留杭の諸元と地盤条件

(2) 付加重量を含む浮栈橋の重量

表-1 付加重量を含む浮栈橋の重量

	垂線間長 Lpp(m)	型幅 B(m)	上載荷重	喫水 d1, d2 (m)	浮体自重 W(kN)	仮想質量係数 $C_m = 1 + \pi / 2C_b \cdot d/B$	付加質量を含む 栈橋重量 W × C _m (kN)
法線直角方向	18	6	満載	1.197	1305.72	1.313	1714.41
			なし	0.9	981.72	1.236	1213.41
法線平行方向	6	18	満載	1.197	1305.72	1.104	1441.51
			なし	0.9	981.72	1.079	1059.28

(3) 固有周期

表-2 固有周期算定のための重量

	上載荷重	付加質量を含む 栈橋重量 W×C _m (kN)	杭1本換算 (kN/本)	杭等の自重 (kN/本)	杭内の水重量 (kN)	杭の付加重量 (kN)	固有周期算定重量 (kN)
法線直角方向	満載	1714.41	857.205	260.694	38.434	88.900	1245.233
	なし	1213.41	606.705	260.694	非考慮		1117.899
					38.434	88.900	994.733
					非考慮		867.399
	浮体非考慮		0.000	260.694	38.434	88.900	388.028
					非考慮		260.694
法線平行方向	満載	1441.51	720.755	130.347	19.217	44.450	914.769
	なし	1059.28	529.640	130.347	非考慮		851.102
					19.217	44.450	723.654
					非考慮		659.987
	浮体非考慮		0.000	130.347	19.217	44.450	194.014
					非考慮		130.347

表-3 固有周期

	上載荷重	杭内の水重量	固有周期算定重量	バネ定数	固有周期
		(kN)	(kN)	kN/m	$2\pi(W/gk)^{0.5}$
法線直角方向	満載	考慮	1245.233	2888	1.32
		非考慮	1117.899	2888	1.25
	なし	考慮	994.733	2888	1.18
		非考慮	867.399	2888	1.10
	浮体非考慮	考慮	388.028	2888	0.74
		非考慮	260.694	2888	0.60
法線平行方向	満載	考慮	914.769	733.9	2.24
		非考慮	851.102	733.9	2.16
	なし	考慮	723.654	733.9	1.99
		非考慮	659.987	733.9	1.90
	浮体非考慮	考慮	194.014	733.9	1.03
		非考慮	130.347	733.9	0.85

(4) 工学的基盤の入力地震動

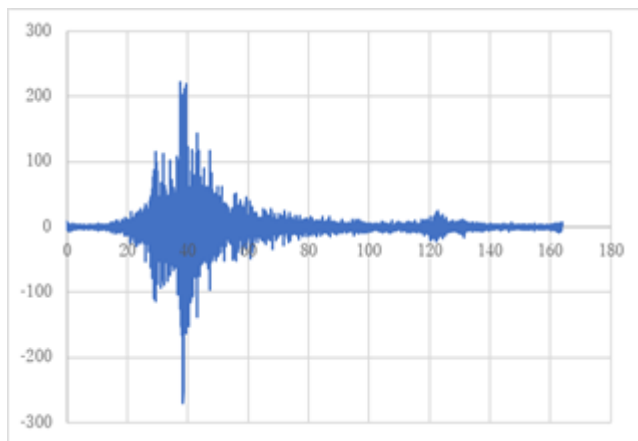
 $\alpha_{\max}=263\text{Gal}$ 、PSI 値：16.2

図-4 入力地震動

(5) 加速度応答スペクトル

減衰を $h=0.1\sim0.5$ としたときの加速度応答スペクトルの算定結果を図-5に示す。周期が1.0sよりも短い時には減衰の小さいほうが、長い時には減衰の大きい方がそれぞれ応答加速度が大きくなる傾向にある。

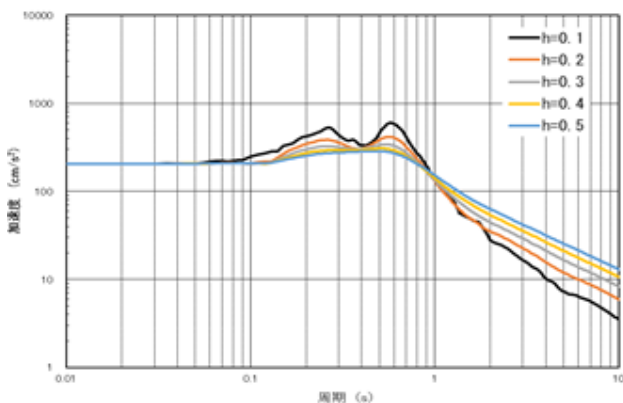


図-5 加速度応答スペクトル

(6) 照査用震度の特性値と地震時慣性力

減衰定数を $h=0.2$ として、浮栈橋重量（付加重量を含む）、上載荷重及び杭内水の有無の各ケースについて照査用震度と地震時慣性力を算定した結果は下表のとおりである。

表-4 照査用震度の特性値と地震時慣性力

	上載荷重	杭内の水重量	固有周期算定重量	固有周期	応答加速度	照査用震度	地震時慣性力
		(kN)	(kN)	(s)	(Gal)		(kN)
法線直角方向	満載	考慮	1245.233	1.32	102.5	0.10	124.523
		非考慮	1117.899	1.25	110.5	0.11	122.969
	なし	考慮	994.733	1.18	119.8	0.12	119.368
		非考慮	867.399	1.1	132.5	0.14	121.436
	浮体非考慮	考慮	388.028	0.74	341.9	0.35	135.810
		非考慮	260.694	0.60	585.1	0.60	156.416
法線平行方向	満載	考慮	914.769	2.24	57.1	0.06	54.886
		非考慮	851.102	2.16	57.1	0.06	51.066
	なし	考慮	723.654	1.99	63.2	0.06	43.419
		非考慮	659.987	1.90	66.3	0.07	46.199
	浮体非考慮	考慮	194.014	1.03	145.6	0.15	29.102
		非考慮	130.347	0.85	233.1	0.24	31.802

注) 固有周期の算定にあたっては、地盤ばね定数を2倍にしたケースが実態と合うという指摘もあるが今回は1倍で検討した。地盤ばねを2倍にすると固有周期が短くなり照査用震度が大きくなることが想定される。

4. 考察

- ①浮栈橋重量を考慮すると固有周期が長くなり応答加速度は小さい。逆に、浮栈橋重量を考慮しないと応答加速度は大きい。地震時慣性力は浮栈橋の質量（付加質量を含む）×応答加速度なので、それぞれの場合において、相応の地震時慣性力が作用する。そのため、設計においては、この両方の状態を考慮する必要がある。
- ②上記の表で浮体非考慮の場合は、係留杭が浮栈橋に接触していない状態（係留杭単独の地震応答）に相当する。この計算例では杭に分布する自重が全て浮栈橋との接点に集中している状態の算定結果であることに留意する必要がある。
- ③減衰定数については直杭式栈橋の設計で用いている $h=0.2$ を準用しているが、直杭式栈橋の減衰定数については、3～6%程度という指摘³⁾がある。また、浮栈橋が動揺することによる造波減衰も考慮する必要があるので模型実験や数値解析⁴⁾により減衰定数の値を解明する必要がある。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，p.1209，平成30年6月。
- 2) 横田弘他：鋼管杭式栈橋の地震応答解析結果に基づく設計水平震度の考察，港湾技術研究所報告第37巻第2号，1998年6月。

- 3) 小濱英司, 大久保陽介, 楠健吾: 異なる解析手法による直杭式栈橋のレベル1地震時の応答特性の比較, 港湾空港技術研究所資料 1260, 2012 年 12 月.
- 4) 塩崎禎郎, 田中祐人, 規矩大義: 浮力利用構造物の耐震解析手法に関する基礎的検討, 土木学会地震工学論文集, 2007年8月.