

極限波浪中における長大箱型浮体構造の崩壊強度評価の一方法*1

正会員 桂 信二 *2, 正会員 岡田 博雄 *2
 正会員 正岡 孝治 *2; 正会員 坪郷 尚 *2

A Method for Estimating Collapse Strength and Reliability of Very Long Box-type Floating Platforms under Extreme Wave Loads

By Shinji KATSURA (Member), Hiroo OKADA (Member)
 Koji MASAOKA (Member) and Takashi TSUBOGO (Member)

This paper deals with a method for estimating collapsing behavior and reliability of very long box-type floating platforms (VLFP) under extreme wave loads. First, a simplified estimation method is presented for collapsing behavior of VLFP by using hexahedral element models. The dominant limit state modes are obtained from a previously developed system combined with finite element method and plastic node method using hexahedral element models. Next, a simplified estimation method is shortly introduced for the dynamic response of the structure in irregular waves. Finally, the features of the collapsing behavior and reliability level are investigated by a numerical example applied to a 5,000m-class VLFP under trial design. Effects of combined bending moment, shearing force and lateral pressure on dominant collapse modes and reliability levels are also investigated.

Keywords : *Collapsing Behavior Analysis, Dominant Failure Mode, Hydro-Elasticity, Short-Term Prediction, VLFP*

1. 緒言

長さが数千メートルにおよぶ海上空港や海上エネルギー基地等を想定した長大海上プラットフォーム(VLFP)の構造安全性評価法に関する基礎的研究¹⁾⁻⁵⁾の一環として、曲げ単独作用下の崩壊挙動の検討³⁾に引き続いて、本論文では曲げ・剪断の複合荷重下における大型浮体構造の崩壊挙動と信頼性評価法の開発に関する検討を行う。

まず、浮体構造ユニットである防撓薄板構造を6面体要素を用いて、モデル化し、構造の崩壊強度に対する信頼性評価モデルを構築する。また、短期不規則海面における浮体構造に作用する波浪荷重の最大値を推定するとともに、試設計した5,000m級の長大浮体構造に適用し、浮体構造ユニットの主要崩壊モード等の特徴を考察する。

2. 破損条件式(限界状態基準式)の生成とそれに基づく信頼性評価法の概要

2.1 6面体要素モデルを用いた崩壊挙動解析に基づく場合の破損条件式の生成の概要

VLFPの冗長性をも考慮した信頼性評価システムの開発に関する基礎的研究の一環として、立体薄板・骨組複合構造を等価な強度をもつ6面体要素よりなる構造にモデル化することにより、主構造の座屈・圧壊、あるいは塑性崩壊強度解析とそれに基づく信頼性評価を行うための簡易手法の開発・改良を行った³⁾。

解析にあたり、従来開発されている有限要素法と塑性節点法を組み合わせた解析法を基本として、これに改良を加えている。すなわち、立体骨組構造あるいは3角形膜要素が持つ幾つかの欠点を克服するために、8節点6面体要素を用いて構造のモデル化を行っている。

まず初めに要素の座屈・圧壊および塑性化には線形化破損条件式を与えている。長大浮体構造を解析する場合、パネルが非常に薄くなるため、その座屈による破損についても考慮したトレスカの降伏条件を採用すると、安全余裕 Z_i は式(1)のように節点力 X_i の線形関

*1 平成13年11月16日秋季造船3学会連合大会において講演, 原稿受付 平成13年11月30日

*2 大阪府立大学大学院工学研究科

数で表される³⁾.

$$Z_t = R_t - C_t^T \cdot X_t \leq 0 \quad (1)$$

ここに、 $R_t = \sigma_Y$, or σ_c , σ_Y : 降伏応力, σ_c : 座屈・圧壊応力, C_t^T : 主応力 σ_a , σ_b の大きさや符号により決定する. また, σ_a , σ_b は3つの主応力のうち, 絶対値の大きい2つを採用する.

次に最終崩壊モードと構造破損基準の生成について述べる. まず構造の破損は塑性崩壊により, 節点に大きな変位を生じたときで定義するものとし, 次の手順で構造破損基準を生成する. まず, $p-1$ 個の要素 t_1, t_2, \dots, t_{p-1} が破損した p 段階目での応力解析について述べる. このときの構造全体剛性方程式を解き要素 t_p の節点変位ベクトルを求める.

これを破損条件式に代入すると, 破損せずに残った要素 t_p の安全余裕 $Z_{t_p}^{(p)}$ が得られ, これを要素強度に関する項と, 外荷重ベクトルに関する項に分解することで式(2)のように表すことができる.

$$Z_{t_p}^{(p)} = R_{t_p} + \sum_{k=1}^{p-1} a_{tk}^{(p)} \cdot R_{tk} - \sum_{j=1}^{3m} b_{tpj}^{(p)} \cdot L_j \quad (2)$$

ここに, $a_{tk}^{(p)}$: 残留強度影響係数, $b_{tpj}^{(p)}$: 荷重影響係数, L_j : 外荷重ベクトルの成分, m : 節点総数.

また, 最終崩壊の判定は構造全体剛性マトリックスの行列式の値を用いて, 次式により行う.

$$|K^{(p)}|/|K^{(0)}| \leq \varepsilon \quad (3)$$

ここに, $K^{(p)}$ は p 個の要素が破損した段階での構造全体剛性マトリックスであり, $K^{(0)}$ は非破損時のものである. また, ε は判定定数であり本論文ではこの値を 10^{-5} としている.

最後に最終崩壊要素 t_{pq} の安全余裕から主要構造破損経路の選定ができる. 構造破損に至る完全破損経路に対応する最終崩壊モードの生起確率 P_{fq} は, 最後の破損要素の安全余裕 $Z_{t_{pq}}^{(pq)}$ を用いて次式(4)のように評価する.

$$P_{fq} = \text{Prob}[Z_{t_{pq}}^{(pq)} \leq 0] \quad (4)$$

なお, 確率的に主要な崩壊モードの生成と選定には, 著者らによって開発されている分岐限界法を適用している. 以上により, 薄板構造の崩壊挙動解析とそれに基づく信頼性評価の簡易化と効率化を図った.

2.2 浮体内部の撓み波動伝搬を考慮した梁モデルによる極限波浪中弾性応答特性の簡易推定の概略

まず, Fig.1に示すような海面に浮かぶ長さ L , 幅 B , 曲げ剛性が EI の箱型浮体の規則波中の挙動を考える.

その際に, 構造を弾性基盤上の梁にモデル化し, 浮体撓み変形と浮体上を伝搬するたわみ波動の特性を考慮して波浪応答特性を文献^{3),4)}等にしたがって求めた. 次に, 短期不規則海面における浮体パネルに作用する波浪曲げ荷重の推定を文献^{3),5)}に従って行った. その概略を以下に示す.

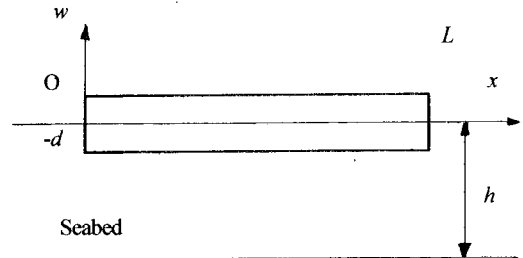


Fig. 1 Very long floating platform on the sea.

文献^{3),5)}等にした解析から, 曲げモーメントの応答関数 $H_{MM}(\omega)$ が解析的に得られる. また, 不規則海面の波スペクトル $S_{\zeta\zeta}(\omega)$ が与えられると, 曲げモーメントの応答値のスペクトルが次のように得られる.

$$S_{MM}(\omega) = \{H_{MM}(\omega)\}^2 \cdot S_{\zeta\zeta}(\omega) \quad (5)$$

次に, 応答のピーク値 x_p の確率密度関数は, 不規則海面のスペクトルおよびそれに対する応答スペクトルが狭帯域であるとして, 次のようにRayleigh分布を仮定する.

$$f_p(x_p/R) = (x_p/R^2) \exp\{-x_p^2/(2R^2)\} \quad (6)$$

ここに, R は応答の標準偏差であり, 下式のように $S_{MM}(\omega)$ を積分して求められる.

$$R^2 = \int_0^\infty S_{MM}(\omega) d\omega \quad (7)$$

さらに, n 個の応答のピーク値の中の最大値 X_{Max} の確率分布関数は次のように表すことができる.

$$F_{\text{Max}}(X_{\text{Max}}) = \{F(x_p)\}^n \quad (8)$$

ここに,

$$F(x_p) = \int_0^{x_p} f_p(x_p) dx_p \quad (9)$$

なお、 n としては、たとえば

$$n = 7200/T \quad (10)$$

(T : 短期 (2時間) 海面の平均波周期)
を考慮することとする。

3. 試設計構造体に対する数値計算例

3.1 解析モデル

本研究の対象モデルとしてはTable 1に示されるような5,000m級海上プラットフォームへの適用を図るためFig.2のように逆コの字型のユニット取り出し、この防撓薄板構造を等価な強度を持つ6面体要素より成るFig.3に示すような構造にモデル化した。

境界拘束条件は、本浮体構造物の連続性を考慮して左壁面はY軸方向に固定し、X、Z方向に移動可能とするローラー支持とした。また、奥面は、X、Z方向に固定とし、Y方向にローラー支持とした。

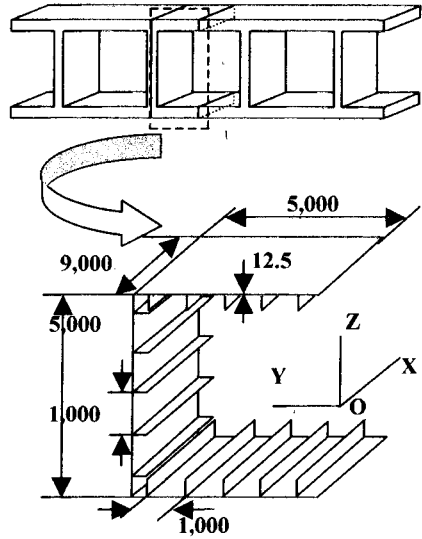


Fig. 2 Unit structure of a VLFP under trial design.

Table 1 Numerical data for a 5,000m-class VLFP.

Principal dimensions $L \times B \times D \times d$		
	5,000m x 1,000m x 5m x 2m	
Spring constant of buoyancy k_c	$0.98 \times 10^7 \text{ N/m}^2$	
Bending rigidity EI	$0.420 \times 10^{14} \text{ Nm}^2$	
Section modulus Z	$0.100 \times 10^3 \text{ m}^3$	
Linear density ρA	$0.100 \times 10^7 \text{ kg/m}$	
ω_0	3.13 rad/s	
k_p	$0.220 \times 10^{-1} \text{ 1/m}$	

Panel thickness t	12.5	mm
Young's modulus E	210	GPa
Yield stress	mean value	280 MPa
	COV.	0.07

3.2 波浪曲げモーメントおよびせん断力の最大値の長さ方向分布の推定

第2.2節の方法により得られた最大波浪曲げモーメント M_{wmax} を与える等価規則波中の曲げモーメント、剪断力の最大値の長さ方向分布を次のように仮定する。

$$M(x) = M_{wmax} \sin(2\pi x/\lambda) \quad (11)$$

$$F(x) = M_{wmax}(2\pi/\lambda) \cos(2\pi x/\lambda) \quad (12)$$

ただし、 λ : 浮体撓み波の波長

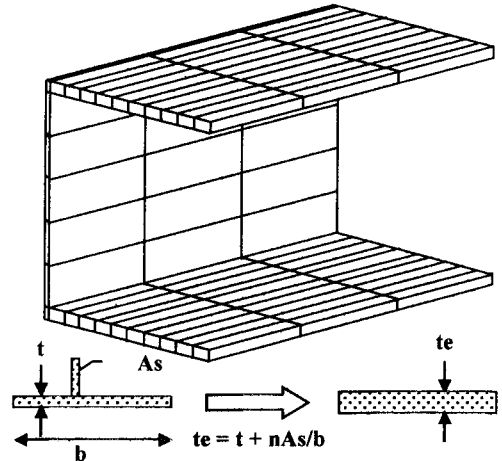


Fig. 3 Hexahedral element model of unit structure.

以上のように仮定すると、最大曲げモーメントを受ける $x = \lambda/4$ の断面では、 $M = M_{wmax}$ のような純曲げを受ける。また、 $x = 0$ の断面では、 $F = M_{wmax}(2\pi/\lambda)$ のような純剪断を受ける。さらに、 $x = \lambda/8$ の断面では、下式のような複合荷重を受けることになる。

$$M = M_{wmax} \sin(\pi/4) \quad (13)$$

$$F = M_{wmax} \cos(\pi/4) \quad (14)$$

また、底部外板については、水圧を受けるため、これを考慮した強度評価も行っている（付録参照）。

3.3 数値計算結果に対する考察

本報告では、短期不規則海面の波スペクトル $S_{\zeta\zeta}(\omega)$ としては、ISSC スペクトルを便宜的に採用した。また、不規則海面の平均波周期 T_W は、簡単のために有義波高を用いて近似的に $T_W = 4.51(H_S)^{0.56}$ と仮定した。

Fig.4 は、曲げ応力の最大値と短期海面における有義波高 H_S の関係を示したものである。本試設計 VLFP に対する計算結果では有義波高が 4m 程度において最大値の期待値は 240MPa 程度、また標準偏差は 20MPa 強であることがわかる。

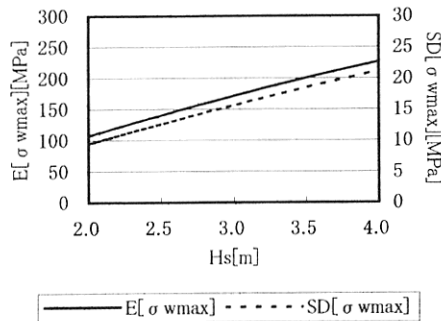


Fig. 4 Relation between expected values and standard deviations of extreme responses and significant wave height.

以上の推定結果をもとに、純曲げが作用する断面、剪断力のみが作用する断面および複合荷重が作用する断面毎に、荷重を算定した。これを本解析モデルに対して節点に集中した荷重に換算して作用させ、主要崩壊モード生成とそれに基づく信頼性評価を行った。

Fig. 5 および Fig. 6 は、有義波高 $H_S = 3m$ の不規則海面における複合荷重が作用する断面に対する解析結果の一部を示したものである。まず、Fig. 5(a) は、上から、純曲げ、純剪断および複合荷重が作用する断面の主要崩壊モードとその生起確率、中央安全率を示したものである。Fig. 5(b) は、開口のある断面を想定した場合について、同様の結果を示したものである。

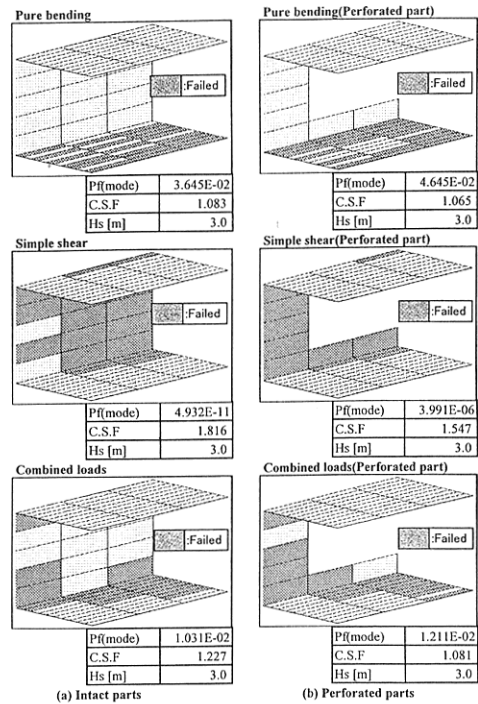


Fig. 5 Dominant failure modes for the case of plate thickness $t = 12.5mm$.

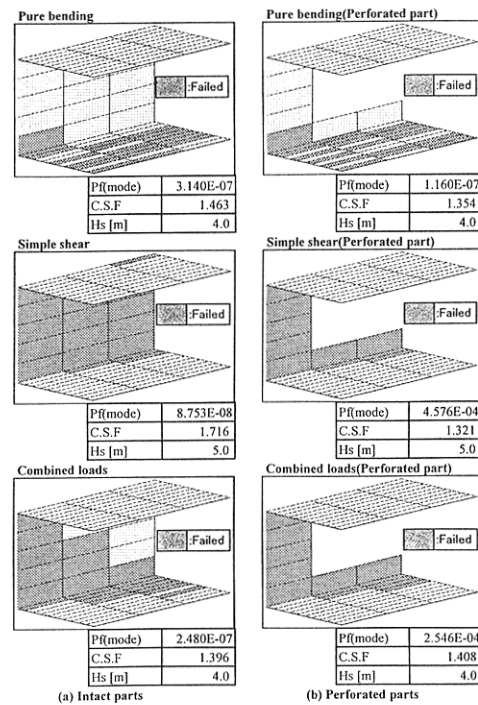
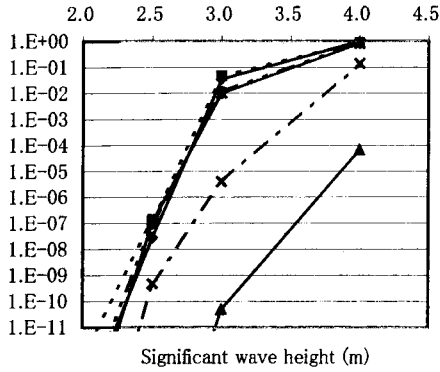
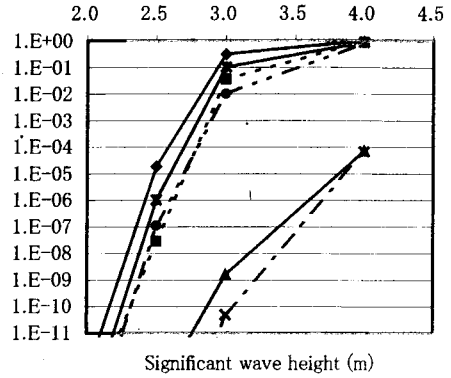


Fig. 6 Dominant failure modes for the case of plate thickness $t = 15mm$.



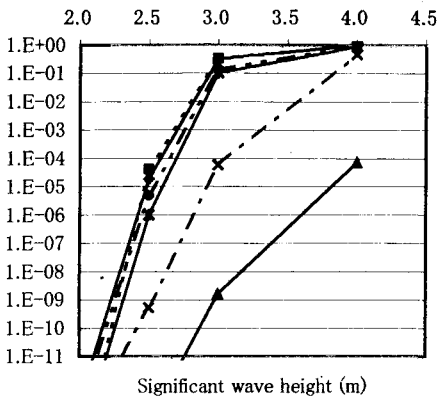
- ◆— Pure bending
- - ■ - - Pure bending (perforated part)
- ▲— Simple shear
- - ✕ - - Simple shear (perforated part)
- Combined loads
- - ● - - Combined loads (perforated part)

Fig. 7 Reliability analysis results for a VLFP under trial design ($t = 12.5\text{mm}$).



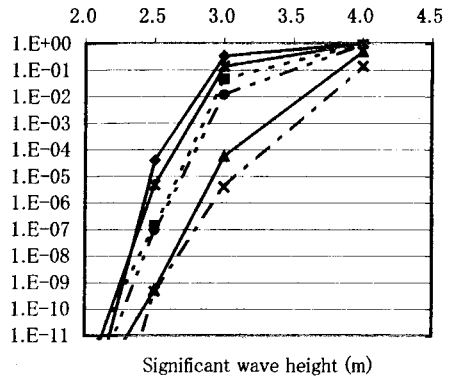
- ◆— Pure bending (+water pressure)
- - ■ - - Pure bending
- ▲— Simple Shear (+water pressure)
- - ✕ - - Simple Shear
- Combined loads (+water pressure)
- - ● - - Combined loads

Fig. 9 Effect of water pressure on reliability analysis results ($t = 12.5\text{mm}$).



- ◆— Pure Bending
- - ■ - - Pure bending (Perforated part)
- ▲— Simple Shear
- - ✕ - - Simple shear (Perforated part)
- Combined loads
- - ● - - Combined loads (Perforated part)

Fig. 8 Reliability analysis results for a VLFP ($t = 12.5\text{mm}$) considering water pressure.



- ◆— Pure bending (+water pressure)
- - ■ - - Pure bending
- ▲— Simple shear (+water pressure)
- - ✕ - - Simple shear
- Combined loads (+water pressure)
- - ● - - Combined loads

Fig. 10 Effect of water pressure on reliability analysis results ($t = 12.5\text{mm}$) (Perforated part).

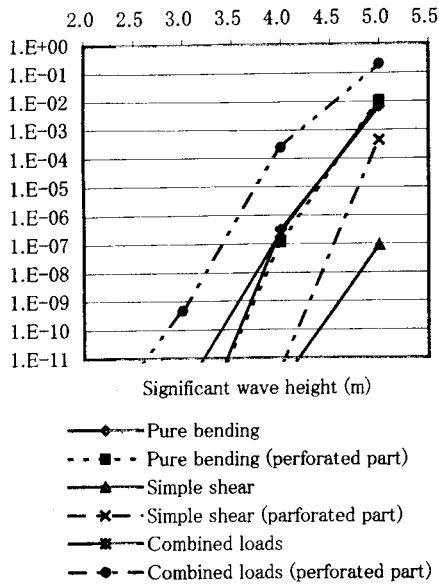


Fig. 11 Reliability analysis results for a VLFP under trial design ($t = 15.0\text{mm}$).

これらの図に見られるように、純曲げを受ける断面では主として上下の水平パネルの座屈・圧壊あるいは塑性化により断面が崩壊するモードが卓越していることがわかる。

一方、単純剪断を受ける断面では、主として鉛直パネルの剪断による破損により断面が崩壊するモードが卓越していることがわかる。

複合荷重が作用する断面では、上下の水平パネルの座屈・圧壊あるいは塑性化によるものと、鉛直パネルの剪断による破損によるものが複合して断面が崩壊していることが見られる。

なお、板厚を15mmに増やした場合の主要構造破損モードをFig. 6(a), Fig. 6(b)に示した。これらを、Fig. 5(a), Fig. 5(b)に示した結果と比較すると、板厚を3mm程度増加させても崩壊モードはほとんど類似であることがわかる。

最後に、Fig. 7~11は、主要破損モードの生起確率と有義波高の関係を示したものである。

同図よりわかるように、本試設計VLFPのように比較的深さが浅い構造においては、単純剪断を受ける断面以外の主要構造破損モードの生起確率レベルにさほど大きな差がないことがわかる。

この他に、水圧を考慮した主要構造破損モードとその生起確率などを求めた。結果の一部を、Fig. 8~9に示す。これらの結果を見ると、本浮体構造のように浅喫水構造でも、主要崩壊確率に及ばず静水圧の影響がFig. 9, 10に見られる程度に現れることがわかる。

次に板厚の影響について言えば、Fig. 7とFig. 11

の比較より、板厚の増加により、破損確率はかなり低下することがわかる。また、有開口、複合荷重作用断面の主要構造破損モードの生起確率が相対的に大きくなることがわかる。

4. 結言

以上、本論文では長大海上プラットフォーム(VLFP)の構造安全性評価法に関する基礎的研究の一環として、曲げ・剪断の複合荷重下の防撓板構造の崩壊挙動と信頼性評価法の開発を行うとともに、これを5,000m級VLFPに適用し、数値計算を行った。

得られた成果を要約すると以下の通りである。

1. 浮体構造ユニットを6面体要素を用いてモデル化し、極限波浪荷重下における崩壊強度に対する信頼性評価モデルを構築する方法を示した。
2. 極限波浪中における純曲げモーメント作用断面、単純剪断荷重作用断面および曲げ・剪断の複合荷重作用断面での主要崩壊モードとその生起確率を計算した。
3. また、これらの結果に及ばず構造寸法や開口の有無、水圧の影響についても考察した。

最後に、本研究の一部は平成12年度大阪府大学院奨励特別研究費の補助を受けて行われたものであることを付記し、関係各位にお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) Ship Research Institute(Ed): Proc. International Workshop on Very Large Floating Structures (VLFS'96), Hayama, 1996.
- 2) Ertekin, R.C. and Kim, J-K.(Ed): Proc. 3rd International Workshop on Very Large Floating Structures(VLFS'99) Honolulu, 1999.
- 3) Masaoka, K., Tsubogo, T., Okada, H., Murotsu, Y. and Talavera, A.L.: A Simplified Method for Collapsing Behavior and Reliability Analysis of Very Large Floating Structures, Proc. OMAE2000(New Orleans, USA), The Ocean Engineering Symposium 2000, OOAED Ref. No OE-15, Paper No. OMAE2000-8016, 2000, pp.25-35.
- 4) 坪郷尚, 八木剛志, 岡田博雄: 箱型浮体を伝わる鉛直撓み波動の分散性に関する実験的研究, 関西造船協会誌, 230, 1998, pp.223-230.
- 5) Tsubogo, T. and Okada, H.: An Estimation Method of Dynamic Behavior of Huge Mat-type Floating Structures Using Simple Beam Modeling, Proc. 17th Int. Conf. on OMAE98-4349 (CD-ROM), Lisbon, Portugal, 1998.

A 横圧力を考慮した平板の圧壊強度係数 ϕ_q

圧縮力と同時に横圧力が作用する長方形板 ($a \times b \times t$) の圧壊強度係数 $\phi_q (= \sigma_u / \sigma_Y)$ の略算式 (長辺支持とした場合) として, 下式を採用する.

$$4\lambda_p^2(1 - \phi_q^2)/(4 - 3\phi_q^2) = qb^4/(Et^4) \quad (\text{a})$$

ここに,

$\lambda_p = (b/t)(\sigma_Y/E)^{1/2}$, σ_Y : 降伏応力

E : 縦弾性係数, q : 横圧力