

バージ用 PC スラブの集中面外荷重に対する強度

松岡 一 祥*
直井 保**

1. はじめに

火力発電、パルプ製造、コンクリート練合せなどのプラントをバージに搭載、曳航して、稼働する場所に設置する例が幾つか見られる。そのようなプラントバージは、設置されたまま長期間の使用が期待されるため、高い耐久性が求められる。そこで、鋼に比べて耐久性のあるコンクリートの使用が考えられる。

一般的なコンクリート製バージは、波浪中縦曲げモーメントでコンクリート船底スラブが全断面引張となったとき、ひび割れが贯通しないように長手方向にプレストレスする(図-1 参照)。そこで、このようなバージは長手方向に PC、横方向に RC の構造様式となる。

コンクリート製バージの例は幾つかあり、海底面に着底させて使用しているもの¹⁾もある。このような場合、船底スラブが地盤との局所接地圧で壊れないことを確かめておく必要がある。また、船舶その他との衝突時の検討も必要である。著者らは、PC バージ船底スラブの強度についての検討を行ってきたが^{2),3)}、ここでは PC バージの着底時の強度などの集中的な面外荷重が加わった場合についての検討結果を示す。

2. 背景

ここでは、着底時、事故時の荷重およびコンクリート版の強度などについて概説する。

2.1 荷重

海洋構造物を着底させて使用する場合、海底地盤に不陸(凹凸)があると、構造物の鉛直荷重が地盤の凸部のみで支持される恐れが生じる。地盤の凸部が岩のような

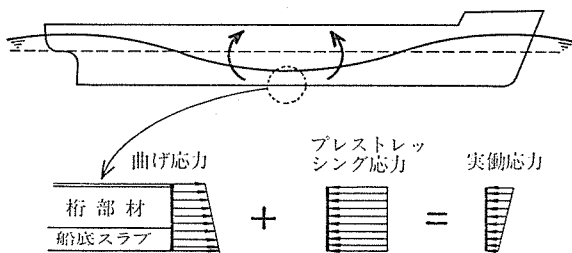


図-1 船体縦曲げ(サギング)による船底部応力

* 運輸省船舶技術研究所

** 運輸省船舶技術研究所(昭和63年10月20日死去)

堅いものであれば、現象は掘座型座礁と同じであり、荷重は構造物の重量と浮力、トリム(浮体の傾斜)などから求められる。しかし、凸部が砂あるいは粘土の場合には、荷重の上限は地盤の崩壊強度となる。

接触面が円形となる地盤凸部の崩壊強度 F_d は、ルール⁴⁾などによれば、

$$F_d = 6.17 \cdot C_u \cdot A \quad (\text{粘土}) \dots \dots \dots (1)$$

$$F_d = 0.5 \cdot r \cdot b \cdot N_r \cdot S_r \cdot A \quad (\text{砂}) \dots \dots \dots (2)$$

となる。ここに、

C_u : 土の非排水せん断強度

A : 接触面積

r : 土の単位体積重量

b : 接触領域の幅

N_r : 支持力係数、内部摩擦角から定まる

S_r : 形状係数 (0.6)

さらに、弾性解と組み合わせて、局所接地による地盤の反力 F は、

$$F = \frac{\delta A}{\frac{\pi(1-\nu^2)}{4E} b + \frac{\delta A}{F_d}} \dots \dots \dots (3)$$

となる。ここに、

δ : 凸部の高さ、あるいは貫入量

ν : 土のポアソン比

E : 土のヤング率

着底以外にも、氷海用構造物の耐氷壁に加わる荷重なども接触面積により氷の強度が異なり、荷重は変化してゆく。また、衝突における船側に加わる荷重では、被衝突船と衝突船との相対変位、接触領域によって荷重は変化する。

2.2 コンクリート版の曲げ強度

一軸単純曲げの場合、軸力平衡と断面平面保持の仮定から、断面の応力状態、ひび割れ深さ、モーメントなどが計算される。しかし、RC あるいは PC スラブの2軸曲げの計算方法は確立しているとは言いがたい。土木学会の指針⁵⁾では、スラブの曲げに対する検討は、梁に準じて行ってよいとしている。これは、まず曲げモーメントの分布を求め、各点で単位幅当たりの梁として検討することをさしている。

コンクリート版に面外集中荷重が加わる場合、一般的

◇論文報告◇

には次節に述べる押抜きせん断による破壊が生じるが、曲げによる崩壊が支配的となることがある。周辺固定の場合、Moe⁹⁾ の実験式では曲げによる耐力 P は、

$$P=8 m_u/(1-r/L) \dots\dots\dots(4)$$

で表される。ここに、

- m_u : 単位幅当たりの最終モーメント
- r : 矩形荷重領域の1辺の長さ
- L : スラブの1辺の長さ

2.3 コンクリート版の押抜きせん断強度

RC および PC スラブに 2.1 節で述べた荷重が加わると、コンクリートのせん断破壊が生じることがある。コンクリートスラブの押抜きせん断強度については、244 の実験結果に基づく設計式⁹⁾がある。

$$V_{cpd}=f_{vd} \cdot u_p \cdot d/r_b \dots\dots\dots(5)$$

ここに、

- V_{cpd} : 押抜きせん断耐力 (kg)
- $f_{vd}=\beta_r(1+\beta_{ds}+\beta_p)f_{vod}$
- $\beta_r=\alpha(0.85+0.4 d/r)$
- $\alpha=2.0$ (指針で採用), 2.2 (実験結果から)
- d : 有効厚 (cm)
- r : 荷重領域周長の 1/4(cm)
- $\beta_{ds}=1.0-0.015 d \geq 0.60$
- $\beta_p=(100 p_w)^{1/2}-1 \leq 0.73$
- p_w : 引張側鉄筋の鉄筋比, ただし深さは d
- $f_{vod}=f_{vk}/r_c$
- $f_{vk}=0.94 f_{ck}^{1/3}$
- f_{ck} : コンクリートの圧縮強度 (kg/cm²)
- $r_c=1.3$: 材料係数
- $u_p=4 r+\pi d$
- $r_b=1.15$: 部材係数

この式は荷重領域周辺部から 45° のコーン状の破壊を想定している。

3. 実験の概要

3.1 実験方法

道路床版などを想定して、コンクリートスラブに矩形あるいは円柱形のブロックを置いて載荷する実験は多く見られる。しかし、ここではバージ着底時の海底面の凸部、衝突時の衝突船の船首、あるいは氷塊の接触、貫入を想定しているため、鋼製円錐の貫入実験を行った。実験の要領は、有田ら⁷⁾の摺座型座礁を想定した貫入実験と同じであり、貫入量-貫入抵抗関係を求めるものである。図-2 に実験の概略を示した。

3.2 試験片

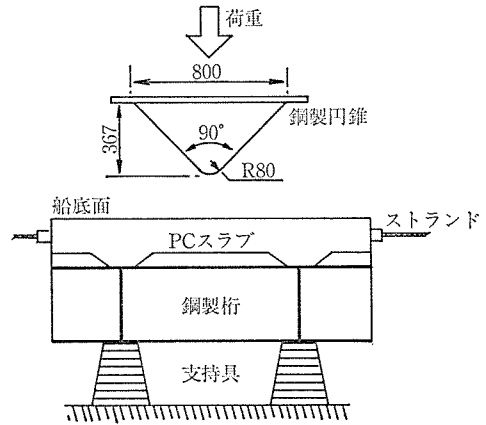


図-2 実験方法 (単位: mm)

図-3 に試験片の概形および寸法を示した。この試験片は、長手方向に PC、横方向は RC 構造で内部構造部材として 鋼桁をもつハイブリッド PC バージの船底あるいは船側の 1/5 程度を想定したモデルである。試験片は 3 体製造した。緊張用鋼材 (ストランド) の間隔、横方向鉄筋の間隔などを変えている。表-1 に材料強度、鉄筋間隔などを示している。なお、長手方向鉄筋と横方向鉄筋とは溶接により結合している。

貫入実験の前に、ストランドを通し、緊張、定着してコンクリートに圧縮力を導入している。有効緊張力はストランド 1 本当たり 5.86 トンであった。緊張後グラウトは行わず、アンボンドタイプとしている。

3.3 実験結果

図-4~6 に貫入量-貫入抵抗関係を示した。図を見ると、3 つの試験片ともに貫入抵抗の微小変動が大きい。しかし、おおまかに見ると、各試験片ともに 10 数トン

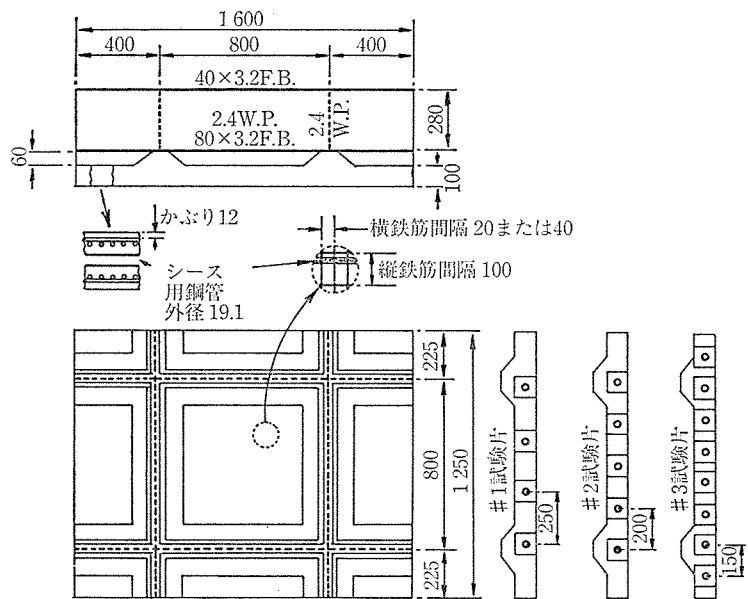


図-3 試験片の形状と寸法 (単位: mm)

表-1 材料強度および配置

試験片番号		#1	#2	#3
材料強度 (kg/mm ²)				
コンクリート	圧縮	4.90	4.85	4.92
	引張	0.445	0.387	0.371
鉄筋	降伏応力	39.1	31.8	
	引張強度	61.8	47.3	
シース用鋼	降伏応力	34.1		
	引張強度	36.6		
ストランド容量		10 t	10.25 t	
寸法 (mm)				
鉄筋の直径		5.99	5.98	
シース用鋼管断面		$D_o=19.0$	$D_i=16.0$	
ストランド断面		3.1φ×7		
縦鉄筋心離		100		
横鉄筋心離		20	40	
ストランド心離		250	200	150

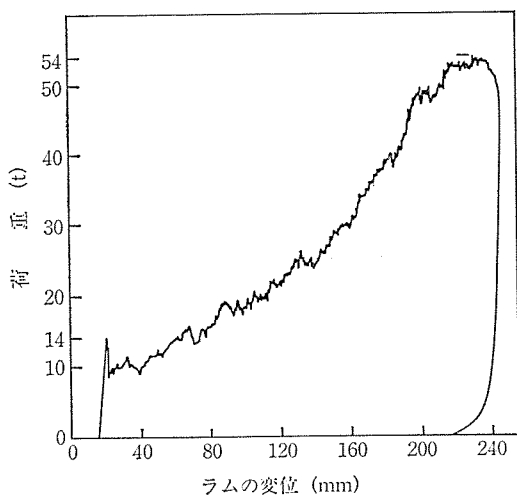


図-4 貫入量-貫入抵抗関係 (#1 試験片)

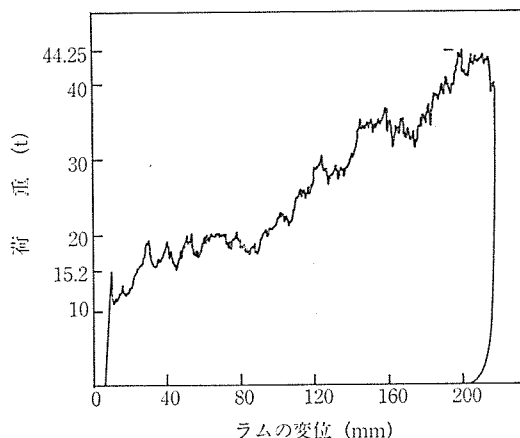


図-5 貫入量-貫入抵抗関係 (#2 試験片)

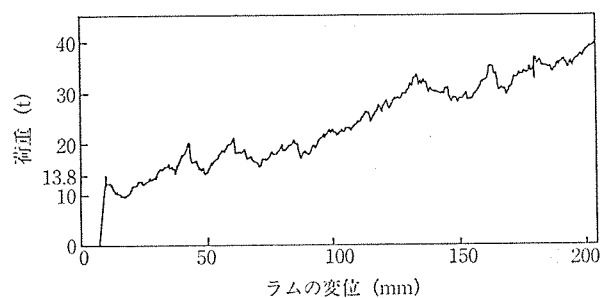


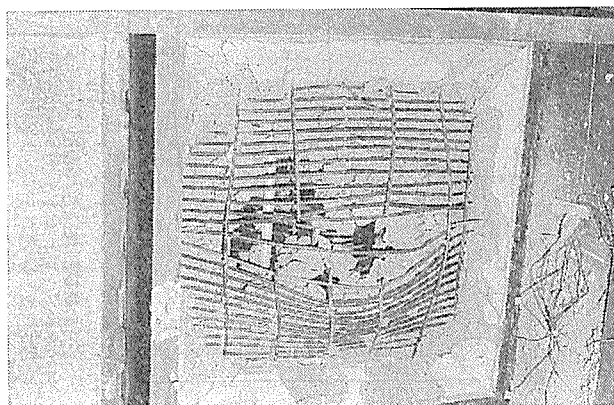
図-6 貫入量-貫入抵抗関係 (#3 試験片)

で初期破壊が生じるまでは一見弾性変形しているように見える。初期破壊発生後いったん抵抗が低下し、その後貫入量の増加に伴って貫入抵抗も増加していく。このとき、載荷面側のコンクリート表面は平面のまま、円錐型治具がプスプスとめり込んでいく。初期破壊発生荷重は、#1 試験片で 14.0 トン、#2 が 15.2 トン、#3 が 13.8 トンであった。

ひび割れは、載荷面裏側に載荷点を中心にして、長手方向および横方向に十字状に発生した。ひび割れ発生後 RC では、ひび割れが相当な深さまで急速に進展する。そのため、長手方向すなわち RC 方向に垂直なひび割



(a) 載荷面側



(b) 裏側

写真-1 試験片の最終状態 (#1 試験片)

れの方が、長さ、幅ともに大きかった。

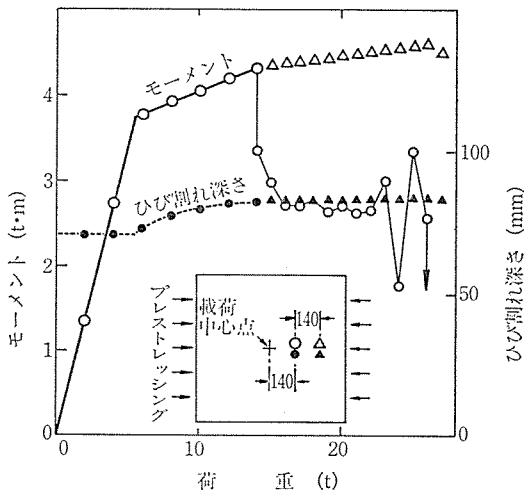
試験片の最終状態を写真—1に示す。円錐型治具がめり込んだ領域では、コンクリートが脱落し、鉄筋などの鋼材は治具に沿って変形している。

4. 実験結果の検討とモデル化

4.1 曲げひび割れの検討

軸力平衡、断面平面保持の仮定から、ひび割れ断面をまたぐ圧縮側表面のひずみを用いて、ひび割れ深さとモーメントが計算できる。図—7はこの方法で#1試験片の長手方向のひび割れについて、ひび割れ深さとモーメントとの変化を求めて荷重との関係を示したものである。測定点は荷重中心から140および280mmの位置である。図を見ると、荷重が6トン以上では、引張側鉄筋は降伏しひび割れも進展し始めている。図—4では14トンまでは荷重-変位関係は線形に見えるが、この段階ですでに鉄筋は塑性降伏し、曲げひび割れは進展し始めていたことになる。図—7では14トンを過ぎると、荷重中心点から140mmの位置のひずみから求めたモーメントは乱れる。これは、14トンで生じた破壊が、荷重中心から140mmの位置の断面にもなんらかの影響を与えているものと考えられる。

初期破壊が曲げにより生じたとすると、(4)式により初期破壊発生荷重が説明されるはずである。表—2に検討結果を示した。表中の m_u^r はRC方向の最終モーメント、 m_u^p はPC方向の最終モーメントである。初期破壊発生時にはたわみがほとんど生じていないことを考慮して、これらのモーメントの計算では、引張鉄筋とシー用鋼管は降伏応力、ストランドは(アンボンドなので)有効緊張力の引張を分担するものとしている。コンクリートの応力ブロックには圧縮強度をそのまま用いた。軸力なしの条件で、2方向のモーメントを合成した。



図—7 モーメントとひび割れ深さの変化(#1試験片)

表—2 曲げ破壊の検討結果

試験片番号		#1	#2	#3
モーメント (t·m/m)	RC 方向, m_u^r	4.373	1.846	1.847
	PC 方向, m_u^p	2.652	2.878	3.483
	$m_u=1/(1/m_u^r+1/m_u^p)$	1.651	1.125	1.207
荷 重 (t)	$P_u=8m_u$	13.21	9.00	9.66
	初期破壊発生	14.0	15.2	13.8

(4)式の r は接触領域が小さいものとして無視した。計算結果と実験結果を比較すると、#1試験片では比較的良好な一致を示すものの、他の試験片では一致するとは言いがたい。

著者らは既報³⁾で、初期破壊を曲げひび割れの発生と解釈していた。しかし、その解釈は#1試験については誤りと言えないが、#2、#3試験片による追加実験により否定されることとなった。

前述の、破壊発生以前にすでに曲げひび割れが進展し始めていたことと考え合わせると、最初の破壊、荷重低下は曲げによるものとは考えがたい。

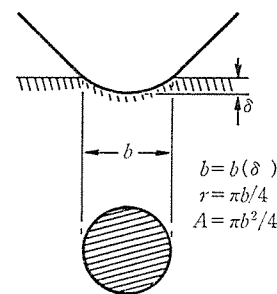
4.2 押抜きせん断破壊の検討

押抜きせん断強度を示す(5)式は、このままでは円錐の貫入抵抗の評価には使えない。そこで、図—8に示したように、貫入量 δ と荷重領域周長の1/4との関係づけを行って(5)式による評価を行った。(5)式には、3箇所に係数が与えられ、安全側の値となるように配慮されている。ここでは、 $\alpha=2.2$, $r_c=r_b=1.0$ としてこれらの係数を除いた。(5)式を整理して、荷重領域周長の1/4, $r(\delta)$ と押抜きせん断耐力 $V_{cpd}(\delta)$ との関係を示すと、

$$V_{cpd}(\delta) = a(b+r(\delta))(c+1/r(\delta)) \dots\dots\dots (6)$$

となる。(6)式は r について極小値を持つ双曲線であり、 r が貫入量 δ の単調増加関数であることから、 V_{cpd} は δ に関して極小値を持つ。

(5)式の有効厚 d は引張側鉄筋の長手方向と横方向との接合面と荷重面との距離、引張側鉄筋の鉄筋比 p_w は鉄筋量の少ない長手方向鉄筋の鉄筋比とした。表—1に示したように、3つの試験片のコンクリートの強度はほぼ等しく、長手方向鉄筋の間隔、有効厚も等しい。そこ



図—8 δ と r との関係

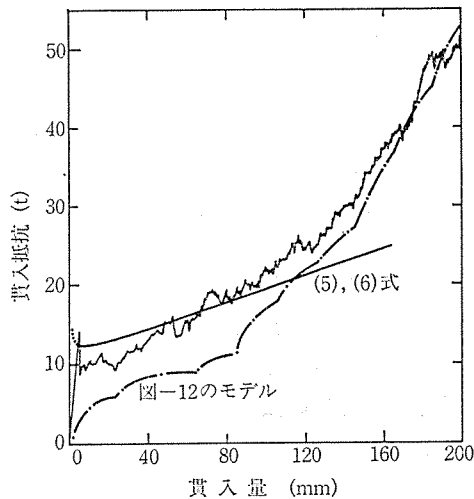


図-9 結果の比較 (#1 試験片)

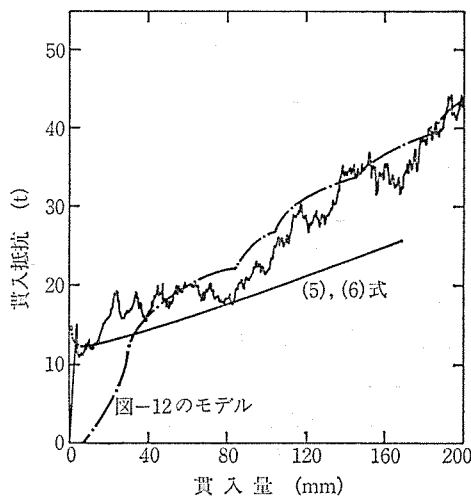


図-10 結果の比較 (#2 試験片)

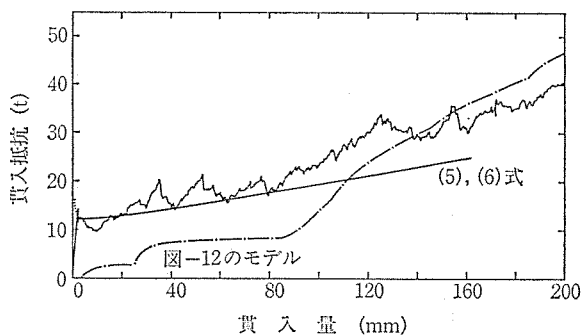


図-11 結果の比較 (#3 試験片)

で、(5)、(6)式による貫入量-押抜きせん断強度関係はほぼ同一のものとなる。図-9~11に(5)、(6)式による貫入量-押抜きせん断強度関係を実験結果に併せて示した。なお、押抜きせん断強度の極小値は12.14トンと3.3節で述べた初期破壊発生荷重の86%程度であり、曲げではなく、押抜きせん断により初期破壊発生荷

重を検討する方が現象によく合っているようである。

図-9~11を見ると、初期破壊の後に、(5)、(6)式による貫入量-貫入抵抗関係が実験結果とよく一致する区間がある。この区間では、接触領域の拡大に伴って順次押抜きせん断破壊が進行していったものと考えられる。

4.3 コンクリート破碎後の貫入抵抗

写真-1に見られるように、コンクリートの破碎後は、鉄筋などの鋼材は治具に沿って変形する。著者ら³⁾はこのコンクリート破碎後の貫入抵抗を鉄筋などの鋼材で貫入治具を支えるものとして計算するモデルを提示している(図-12参照)。ここでも、このモデルに従って貫入抵抗を計算する。ストランドなど緊張用鋼材が治具に接した場合は、その張力も有効とする。鋼材は版に垂直な平面内で治具に沿って変形するものとして計算を行った。鉄筋は、長手方向と横方向が溶接され、金網状になっているためこの仮定に近い変形をすると思われる。一方、ストランドはなんら固定されていないため、この仮定は厳密には成立しない。しかし、治具と鋼材との摩擦抵抗などが不明であるため、この仮定に従った。鉄筋の張力は降伏応力を上限とし、試験片がアンボンドタイプであるため、有効緊張力をストランドの張力とした。なお、ストランドの回りのシース管の張力も考慮した。計算結果を図-9~11に実験結果、押抜きせん断強度の計算結果と併せて示した。

4.4 貫入量-貫入抵抗関係

図-9~11を見ると、(5)、(6)式による押抜きせん断強度と4.3節に示した方法で鋼材の張力から求めた貫入抵抗との大きい方を採用すると、実験結果は比較的よく説明される。

#1試験片(図-9)は、貫入量70mm以下で貫入抵抗の実験結果が若干小さい。#2試験片(図-10)は、

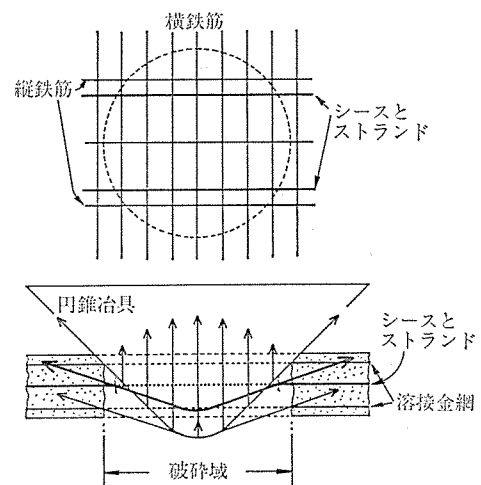


図-12 コンクリートの破碎領域が大きい場合の貫入抵抗計算モデル

◇論文報告◇

載荷点直下にストランドがあるため、鋼材張力の効きがはやい。貫入量-貫入抵抗関係は全般的によく合っているが、貫入量 70 mm 以上で計算結果は実験結果のピーク値をたどっているように見える。これは、ストランドを支えるコンクリートが、図-12 で仮定した以上に破碎されているためと考えられる。そのため、ストランドの支持スパンが長くなり、張力の鉛直方向成分が小さくなっているのであろう。#3 試験片(図-11)では、貫入量 10 mm 付近と 140 mm 以上で貫入抵抗の実験結果が小さいのが気になる。この試験片では、ストランドは載荷中心から 75 mm 離れているが、貫入量 140 mm 以上では計算上はストランドの張力の鉛直方向成分は回りのシーす管と合わせると 9.5 トン以上となる。しかし、緊張用鋼材は治具の表面で滑り、実際には鉛直方向成分は計算値より小さかったものと考えられる。

以上のように、幾つかの問題はあるものの、4.2, 4.3 節に示したモデルによる計算結果は、おおむね認められるものである。

5. 強度の検討

5.1 着底時強度

プラントバージを着底させる際、ひび割れ、永久変形などの損傷は好ましくない。そこで、根ならしなど海底地盤の整地が行われ、岩などの堅い凸部は直接船底部に当たらないように配慮されるであろう。この場合に想定される凸部は、砂あるいは粘土の小山であろう。

着底時強度がどの程度要求されるか明らかにするために、(1)~(3) 式で局所接地荷重を求め、(5), (6) 式の押抜きせん断強度と比較した。実験で用いた厚さ 100 mm のコンクリート板を解析対象とした。粘土は非排水せん断強度 4.8 t/m^2 、ヤング率 10^3 t/m^2 、ポアソン比 0.5 とした。砂は支持力係数 48 (内部摩擦角 35°)、ヤング率 $1.5 \times 10^3 \text{ t/m}^2$ 、単位体積重量 1 t/m^3 、ポアソン比 0.5 とした。凸部の形状は、半径 200~600 mm の球形の先端を持つ円錐とした。計算結果を接触領域の幅(直径)

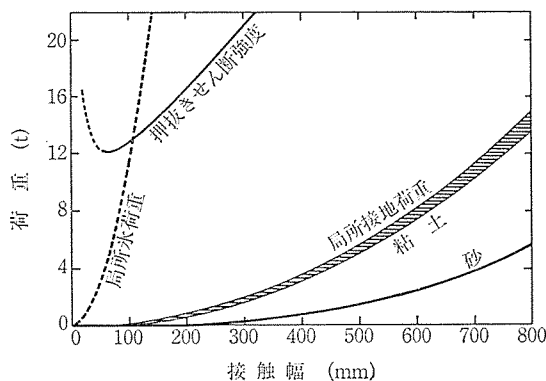


図-13 地盤および氷との接触幅と荷重の関係

で整理して 図-13 に示した。図には押抜きせん断強度の計算結果も示されている。

図を見ると、砂に比べ粘土の方が局所接地荷重大きい。また、粘土の方が凸部の形状の影響が大きい。しかし、ここで検討したコンクリートスラブの押抜きせん断強度に比べると、局所接地荷重ははるかに小さい。

実際の PC バージの船底スラブの厚さは、ここで取り扱ったものの 4~5 倍程度になると考えられる。しかし、着底時の強度だけを考えると、厚さ 100 mm、桁間隔 800 mm とした場合でも十分な強度がある。

5.2 耐氷壁としての強度

氷海用構造物の耐氷壁へのコンクリートの使用は、二重鋼板壁の間にコンクリートを打設する形式が多く研究されている。ここでは、コンクリートだけでどの程度の強度があるか検討してみた。氷荷重としては、Solmski ら⁹⁾の接触面積-氷圧関係を用いた。計算結果を 図-13 に示した。図を見ると、接触幅 100 mm 以上では押抜きせん断破壊が生じてしまう。氷圧は土圧に比べるとはるかに大きい。ここで想定した厚さ 100 mm のコンクリートスラブでは 100 mm 以下の桁間隔が必要であり、実用的とは言いがたい。しかし、(5), (6) 式と適切な接触面積-氷圧関係を用いると、耐氷壁としての強度の検討は可能である。

5.3 衝突時の吸収エネルギー

着底時および耐氷壁としての強度の検討では、押抜きせん断破壊が生じないことが条件であった。しかし、衝突時には、被衝突船の船側と衝突船の船首との破壊で吸収されるエネルギーによって耐衝突性能が評価される。そこで、貫入量-貫入抵抗曲線を積分して得られる貫入量-

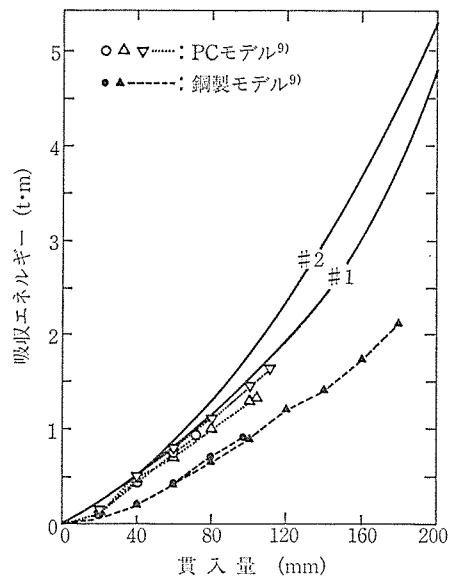


図-14 衝突時の貫入量と吸収エネルギーの関係

吸収エネルギー曲線が重要な判断基準となる。

＃1 および 2 試験片の貫入量-吸収エネルギー曲線を図-14 に示した。図-9, 10 にも見られるように、貫入量-貫入抵抗の実験結果は微小変動が大きく、これを直接積分することは相当困難である。そこで、ここでは押抜きせん断強度が極小値を取る貫入量までは、抵抗がこの極小値と一致するとして計算結果から吸収エネルギーを求めている。

図には、菅原ら⁹⁾の実験結果が併せて示されている。菅原らの実験は、3000 DWT 級の船舶の 1/5 船首部模型を PC および鋼製バージの模型に衝突させ、吸収エネルギーを測定したものである。PC 模型では船首部模型が壊れ、鋼製模型では船側部模型が壊れた。そこで、ここに示した＃1 および 2 試験片の吸収エネルギーと PC 模型のそれとを比べることはできない。しかし、縮尺 1/5 程度の模型実験で見ると、PC バージの耐衝突性は鋼製バージに比べて劣るものではないことがわかる。

6. 結 論

PC バージの着底時など、局所的な面外荷重が加わる場合のコンクリートスラブの強度を調べるために円錐の貫入実験を行い、貫入抵抗の計算方法について検討した。さらに、それらの結果を考慮して、PC バージ用コンクリートスラブの着底時強度、耐氷壁としての強度および衝突時の強度について検討した。得られた主要な結果は以下のとおりである。

- 1) 貫入実験における最初の破壊形式は、押抜きせん断破壊であった。コンクリートの破砕領域が小さい段階では、貫入量に対応する載荷領域の周長から貫

入抵抗が求められる。

- 2) コンクリートの破砕領域が大きくなると、貫入抵抗は鉄筋などの鋼材の張力で貫入治具を支えると仮定して求められる。
- 3) 着底時あるいは耐氷壁としての強度は、押抜きせん断破壊が生じるか否かで評価される。ここで検討したコンクリートスラブは、着底時の強度は十分であるが、耐氷壁としては強度が不足していた。
- 4) 耐衝突強度に関しては、ここで検討したコンクリートスラブの吸収エネルギーは十分大きく、鋼製バージの船側部に劣るものではなかった。

参 考 文 献

- 1) 金井, ほか: 本州四国連絡橋工専用 PC バージの設計と建造, コンクリート工学, Vol. 21, No. 8 (1983)
- 2) 松岡, 直井: コンクリートバージ底板の曲げ強度, 第 47 回船舶技術研究所研究発表会講演集 (1986)
- 3) 松岡, 直井: PC バージ底板の強度について, 本誌, Vol. 29, No. 5 (1987)
- 4) DnV: Rules for the design construction and inspection of offshore structures, Appendix F, Foundations (1977)
- 5) 土木学会: コンクリート構造物の限界状態設計法指針(案) (1983)
- 6) J. Moe: Shearing strength of reinforced concrete slabs and footings under concentrated loads, Bulletin D 47, PCA (1961)
- 7) 有田, 青木: 座礁事故時の船体圧壊強度(第 1 報)——擱座型座礁についての検討——, 日本造船学会論文集, 第 158 号 (1985)
- 8) S. Slomski & J. V. Vivrat: Selection of design ice pressure [and] application to impact load prediction, POAC '83 (1983)
- 9) 菅原, 吉村, 太田: コンクリート製海洋構造物の技術開発, セメントコンクリート, No. 437 (1983)

[1988 年 12 月 8 日受付]

転勤 (または転居) ご通知のお願い

勤務場所 (会誌発送, その他通信宛先) の変更のご通知をお願いいたします。

会誌発送その他の場合、連絡先が変更になっていて、お知らせがないため郵便物の差し支えをうけることがたびたびあります。不着の場合お互いに迷惑になるばかりでなく、当協会としても二重の手数と郵送料とを要することになりますので、変更の場合はハガキに新旧の宛先を記入のうえ、ただちにご一報くださるようお願いいたします (ご送金の際、振替用紙裏面の通信欄に記入されても差し支えありません)。

ご転勤前後勤務先に送ったものがそのまま転送されないでご入手できない場合、当方として責任を負いかねますのでご了承ください。