

氷荷重に与える構造物の剛性影響

ICE LOADS AS A FUNCTION OF STRUCTURE STIFFNESS

亀崎一彦¹・山内 豊²

Kazuhiko KAMESAKI and Yutaka YAMAUCHI

¹正会員 工修 NKK エンジニアリング研究所 (〒514-0393 三重県津市雲出鋼管町1丁目)

² 工修 同上

Vertical sided structures may have advantages over inclined structures in terms of construction costs and past experiences. Although, it is well recognized that even a massive structure may vibrate if a load exceeds certain level after the lesson of Molikpaq experienced in 1986. Designers shall know the parameters that cause vibrations while structures indent against various ice features. The vibration may inversely affect design loads and foundation stability. A five-year ice load research program was executed from 1993 to 1997 to clarify the characteristics and develop the computer code capable of simulating vibrations and associated loads. Extensive ice tank tests were performed to observe crushing phenomena and obtain the verification data for the computer code. In this paper, highlights of test results are summarized to feature the non-simultaneous and simultaneous failure modes.

Key Words: Offshore structure, vertical sided structure, ice tank tests, indentation, global load, local load, vibration

1. まえがき

1970年代に建造されたジャケット式構造物の細い脚柱は氷板が押し寄せてくると振動することは広く認識されていた¹⁾。その後、1980年代に Molikpaq, SSDC, CIDS など一辺が 100m近いケーソン式の大型氷海構造物が北極海の油ガス田試掘用として建造された。これらの構造物の壁面は水面に対して鉛直であり、鉛直壁構造物と呼んでいる。これらの大型構造物では質量、剛性から見て設計時には振動が発生する事は予見されていなかった。しかしながら 1986 年、Molikpaq は押し寄せてきた約 4mの多年氷と遭遇した際に大きな振動を引き起こし、中心部のサンドコアが液状化を起こす寸前であったと報告されている²⁾。公表されていないが SSDC, CIDS も Molikpaq ほどの深刻な振動ではないが振動が発生したと言われている³⁾。鉛直壁は円錐状の傾斜壁構造物と比較すると形状が単純なことから建造が容易であり、コスト面から優位性があり、今後も氷海域での使用が期待されるが振動発生に伴う評価が重要な課題として認識されている。著者らは鉛直壁構造物の氷荷重と振動の特性を評価するために一連の氷海水槽試験を実施した。その結果を踏まえ氷と氷海構造物の振動応答をシミュレーションできる数値解析プログラムの作成を行って来た。本論文では一

連の氷海水槽試験から得られた鉛直壁構造物の荷重と振動特性について報告する。

2. 氷海水槽試験

試験は氷海水槽(長さ 20m、幅 6m、深さ 1.8m)にて実施した。尿素を添加した粒状氷を用い試験を行った。

(1) 高剛性モデルによる氷海水槽試験

まずは比較的剛性の高い貫入モデルを用いモデルの幅、貫入速度、氷厚、氷板の強度を変えた一連の試験を実施した。図-1 に氷海水槽試験の側面から見た配置を示す。水中台車の上に鉛直壁モデルを

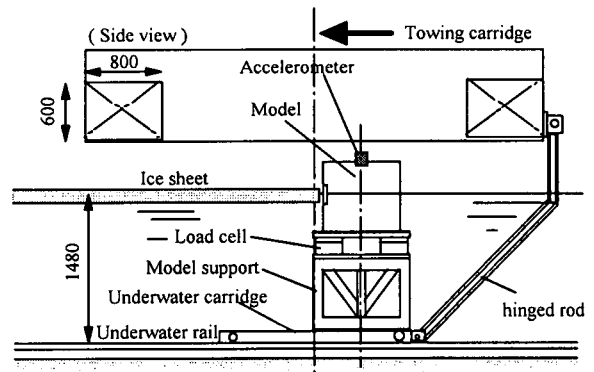


図-1 高剛性貫入モデルの試験配置

固定し氷板に貫入させた。貫入モデルは四角柱とし幅は 100、400、800、1500mm の 4 種類を使用した。貫入モデルを図-2 に試験条件を表-1 に示す。60 ケースの貫入試験を実施した。貫入モデルはロードセルを介して水中台車に結合した。モデルの剛性よりも、本装置の系では水中台車と曳引車を繋ぐ柔いロッドの剛性により貫入モデルの振動数が支配されいた。大よそ固有振動数は 20Hz であった。モデルと

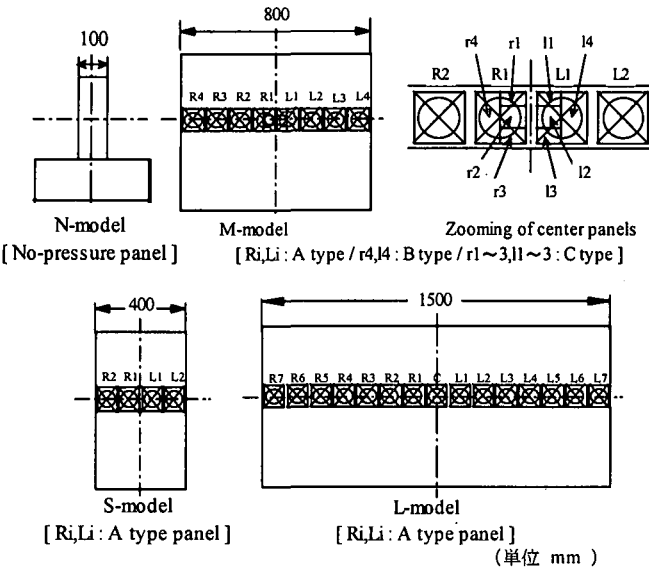


図-2 貫入モデル

氷板が接触する部分には幅 100、高さ 120mm の分割荷重パネルを配置し、局部的に作用する氷圧力を計測した。

表-1 高剛性モデル試験条件

貫入モデル	TestID	氷厚 h(mm)	圧縮強度 (kpa)	貫入速度 (mm)
100mm N-model	1-4	63	103-	6-212
	5-6	99	123	6-208
400mm S-model	1-4	62	105-113	6-210
	5-6	98	94-98	6-207
800mm M-model	1-4	62	56-58	6-169
	5-8	64	129-135	6-168
	9-12	62	100-104	6-168
	13-16	42	96	6-169
	17-20	42	143-151	9-169
	21-24	64	121	6-168
	25-28	100	88-90	6-168
	29-32	102	99-103	6-167
1500mm L-model	33-36	91	120-124	6-167
	1-3	93	107-110	6-105
	4-6	94	104-105	6-325
	7-9	65	121-123	6-316
	10-12	66	105-109	6-316

(2) パネ付きモデルによる剛性変更試験

次に剛性の変化が荷重、振動特性に与える影響を調べるために、幅 800mm の貫入モデル基部に取り付けた皿パネの個数を変えることにより貫入モデルの剛性を 3 段階に変化させた。貫入モデルを図-3

に示す。剛性の小さいほうから LS、MS、HS モデルと呼ぶ。皿パネによる剛性が支配的になるように、図-1 の水中台車と曳引車を繋ぐロッドは剛性の高いロッドに改造した。剛性、貫入速度、氷厚、氷板の圧縮強度を変化させ 74 ケースの試験を実施した。試験条件を表-2 に示す。図-2 のモデルと同様に局部的な氷圧力の特性を測定するために氷板と接触する部分には分割パネルを取り付けた。貫入モデルにはモデルと曳引車間の変位を測定するために差動トランスを取り付けた。計測の座標系を図-4 に示す。試験では剛性を 3 段階に変化させた。パネ剛性、固有振動数、減衰係数も表-2 に併せて示す。

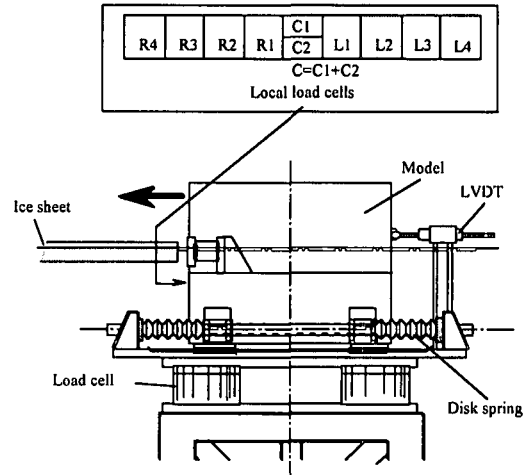


図-3 パネ付きモデルの配置

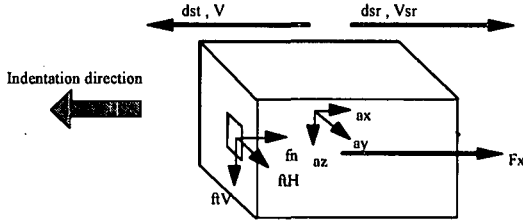


図-4 パネ付きモデルの座標系

表-2 パネ付きモデルの試験条件

モデル名 要目	TestID	氷厚 h(mm)	圧縮強度 (kpa)	貫入速度 (mm)
LS-モデル $f_n=3.91\text{Hz}$ $K_s=0.25\text{KN/m}$ $\eta=5.8\%$	1-5	60	114	6-106
	6-10	99	196	6-107
	11-15	62	259	6-106
	16-20	89	145	6-105
	21-25	88	129	6-105
	26-31	90	226	6-105
MS-モデル $f_n=6.9\text{Hz}$ $K_s=1.23\text{KN/m}$ $\eta=6.0\%$	1-5	60	83	6-107
	6-10	62	286	6-105
	11-15	63	226	9-106
	16-20	89	166	6-105
HS-モデル $f_n=10.9\text{Hz}$ $K_s=2.5\text{KN/m}$ $\eta=7.9\%$	21-27	90	201	6-105
	1-5	62	243	6-107
	6-10	62	300	6-107
	11-16	94	231	6-105

3. 試験結果

氷海構造物の評価には地盤安定性の検討からは構造物全体に作用する全体荷重、振動特性などが、構造物の部材設計の観点からは局部荷重が重要である。ここでは貫入時の氷板の破壊モード、振動特性、全体荷重、局部荷重の特性について述べる。

(1) 高剛性モデル

a) 全体荷重

全ての試験で安定したフレーキングを伴う圧壊モードが観察された。破壊された氷片は氷板の上下に排出され貫入モデルの前面に堆積する。その様子を写真-1 に示す。貫入する氷板のたん部はモデルと平行に整形しているために、モデルが最初に氷板たん部に接触した時、モデルは氷板全面に接触する。従って、図-7 に示すように最初に荷重は大きくなり貫入するに連れてモデルと氷板の接触部は減少し、荷重も低下する。図-5 に貫入した初期ピーク値 P_{g-INT} と継続荷重の平均値を超すピーク値の平均 $P_{g(peak)}$ との関係を示す。一定の関係があり、今回の試験では $P_{g(peak)}$ は P_{g-INT} の 0.43 倍となった。Korzhavin⁴⁾は全体荷重 F_x を式(1) により求めている。貫入係数 I は極限解析法により求めることができる。Ralston⁵⁾が粒状氷に対して求めた貫入係数を適用し、実験結果と比較した。結果を図-6 に示す。接触係数 f_c は実験結果より 0.43 を用いた。Korzhavin が提案した全体荷重の推定式と実験結果は良く一致することが解る。

$$p_{g(peak)} = F_x / (B \cdot h) = I \cdot f_c \cdot \sigma_c \tag{1}$$

ただし、 F_x は 全体荷重、 I は貫入係数、 f_c は接触係数、 B は貫入モデル幅、 h は氷厚、 σ_c は氷板の一軸圧縮強度である。

b) 局部荷重

各パネルの面積別に重ね合わせた時刻歴データを図-7 に示す。各荷重パネルのピークの位相が違う非同時的な破壊を起こしているために図-7 に示すように参照する面積が大きくなるに連れて荷重の変動成分は減少する。無次元化した分散値を参照する荷重パネルの幅に対してプロットしたものを図-8 に示す。Kry⁶⁾は統計的モデルから貫入時の時系列データの分散値は荷重の位相が一致する面積単位である独立破壊領域の幅 B_1 を使い、参照する幅との比である B/B_1 に反比例し分散値が減少することを示している。図-8 は Kry が示したモデルと良く一致している。また独立破壊領域は解析結果から大よそ氷厚に等しくなる。⁷⁾



写真-1 貫入試験 (M-model, 800mm 幅)

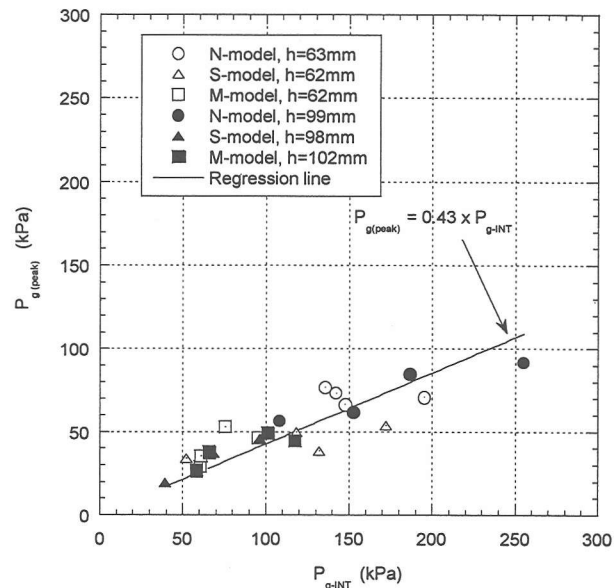


図-5 初期ピーク値と継続荷重の比較

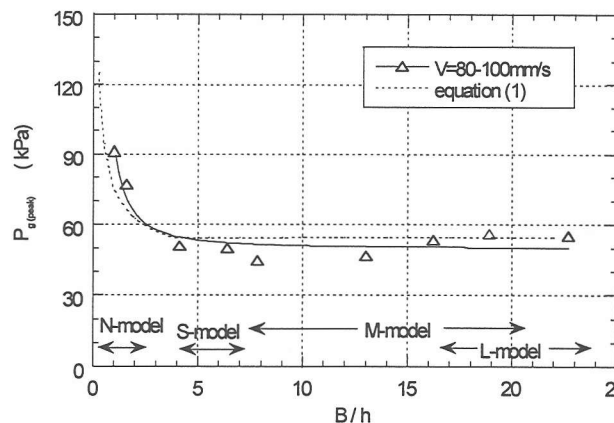


図-6 Korzhavin 式と試験結果の比較

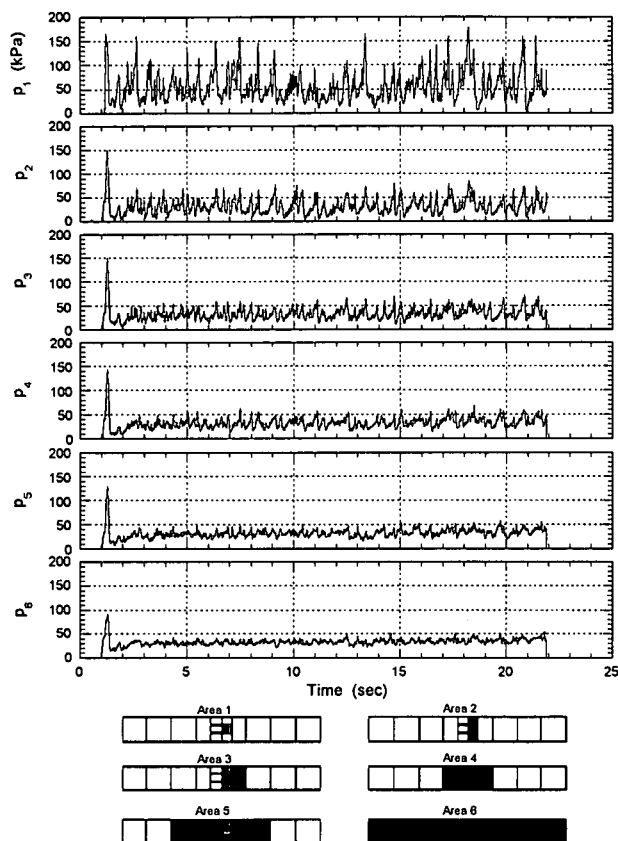


図-7 非同時破壊時の代表的な面積別の時系列データ
($h = 101\text{mm}$, $V = 84\text{mm/sec}$, $\sigma_{cu} = 104\text{Kpa}$)

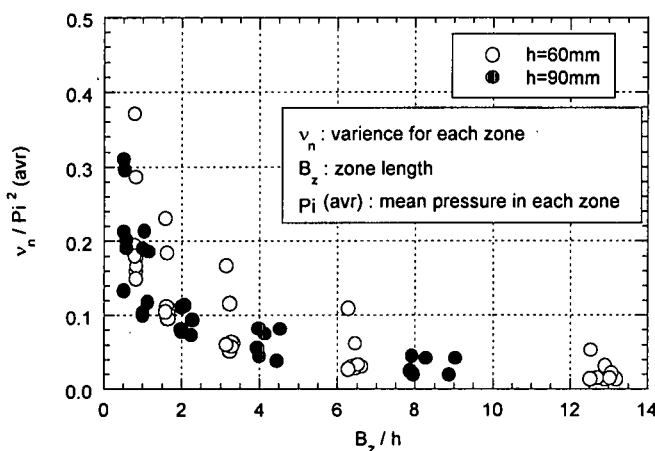


図-8 氷荷重の分散値と幅Bの関係

(2) バネ付き貫入モデル

a) 局部荷重と振動の特性

図-9 に代表的な振動モードと局部荷重の変化を示す。貫入速度が遅いと振動モードは鋸刃状の変位を示す準静的振動を呈し、局部荷重も分割パネル間の荷重ピークの位相が合う同時破壊モードとなる。貫入速度がやや速くなると振動モードも局部荷重も正弦波的に近い波形となる。更に速度が速くなると前述した高剛性モデルの試験と同じ挙動を示し、振

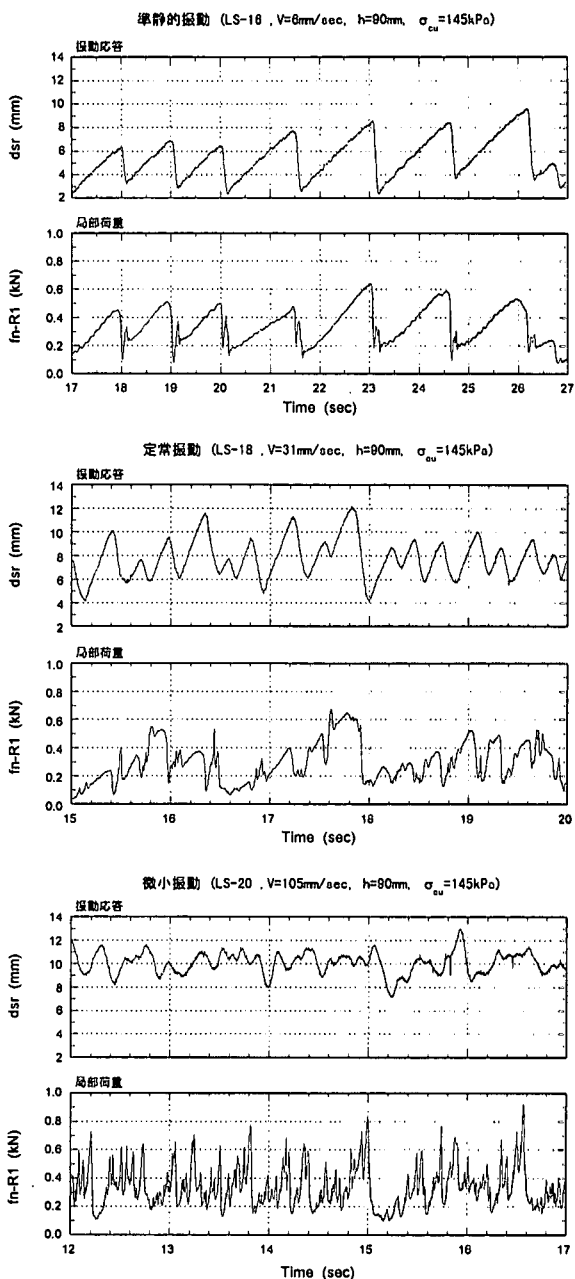


図-9 バネ付きモデルの代表的な時系列データ
(変位と中央部の分割パネル荷重)

動変位は小さく、局部荷重は非同時破壊となる。図-10 に LS モデル Test21($V = 6\text{mm/sec}$)と Test23($v = 31\text{mm/sec}$)の分割パネル間の相関係数を示す。貫入速度が速くなると急激に相関係数が減少する様子が窺える。同時破壊／非同時破壊の発現と貫入速度／剛性の関係を調べる。構造物のコンプライアンスを表す無次元パラメーター C_0 として(2)式を用いる。構造物の静的な水平変位を氷厚で無次元化したものである。 B は模型の幅、 K_s は貫入モデルの剛性である。

$$C_0 = \frac{(\sigma_c \cdot B \cdot h) / K_s}{h} \quad (2)$$

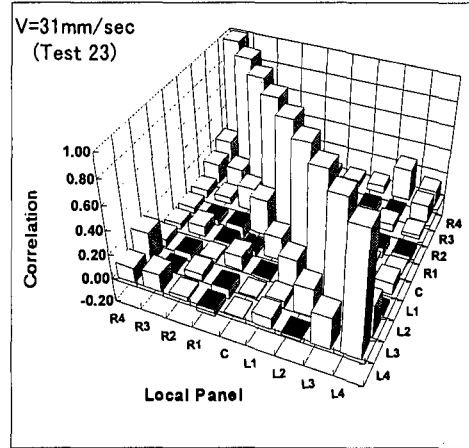
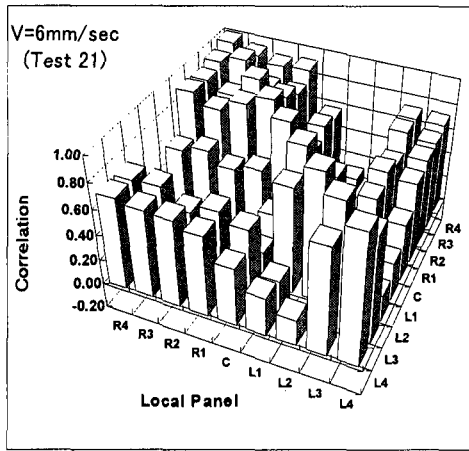


図-10 同時破壊と非同時破壊時の分割パネル間の相関係数（変位と中央部の分割パネル荷重）

試験結果をプロットしたものを図-11 に示す。貫入速度が遅いと同時破壊が支配的であり、貫入速度が速くなると非同時破壊が支配的となることが解る。またその遷移するポイントは C_0 が大きいほど、貫入速度が速い方に移行する。次に貫入中の支配的周波数 f の特徴について述べる。同時破壊と遷移状態の試験結果を対象にして、変位 d_{sr} の卓越周波数をフーリエ解析により求め、貫入速度との関係を調べた。貫入速度の増加に伴い f はモデルの固有振動数 f_n に漸近することが解る。非同時破壊モードでは d_{sr} の波形は振幅が小さく複雑であるため支配的周波数の判別が困難となり図-11 のプロットからは除外した。 f が f_n に近づいても共振することではなく逆に振動波形は小さくなるのが特徴である。

b) 全体荷重の特性

図-13 に剛性と全体荷重 F_{xs} の関係について述べる。 F_{xs} は分割パネルの荷重を合算し直接貫入モデルに作用する全体氷荷重を求めたものである。 F_{xs} をモデルの幅、氷厚、一軸圧縮強度で除し無次元化した荷重 P_c を歪み速度を横軸にしてプロットした。MS モデルと HS モデル間では固有振動数も大きな差異がないため P_c も大きな差はない。しかしながら LS モデルは HS、MS モデルと比べて格段にコン

プライアンスが大きく、全体荷重も約 30~50% 大きくなること解る。

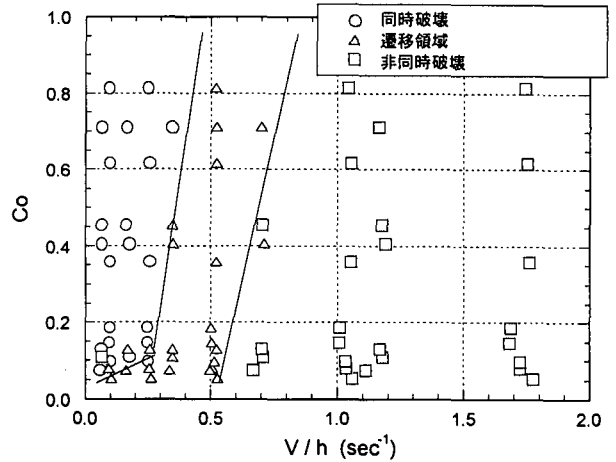


図-11 破壊モードと C_0 の関係

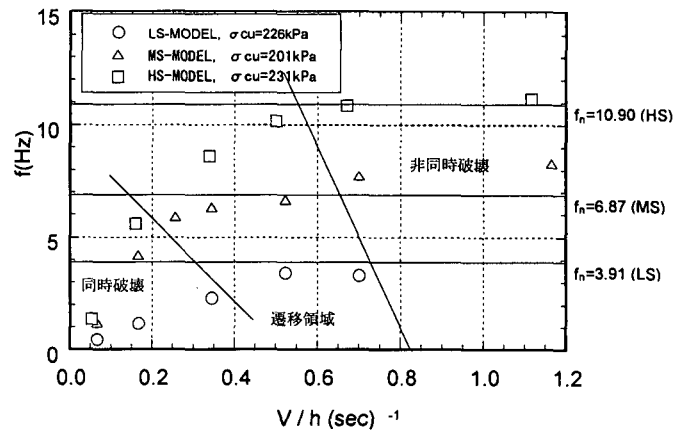


図-12 支配的周波数 f と貫入速度の関係

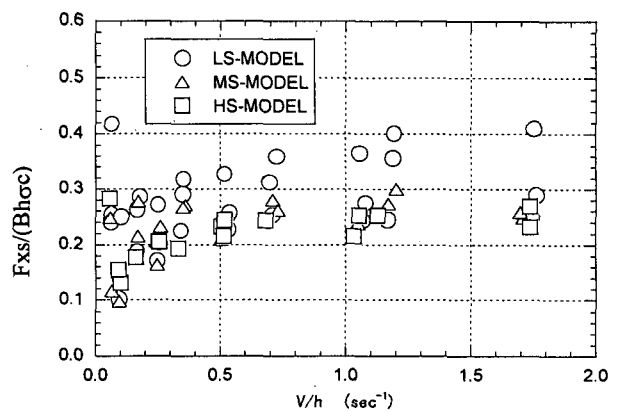


図-13 剛性影響と全体荷重の関係

4. 考察

二つの異なる系統の氷海水槽試験結果について述べてきた。全体荷重、局部荷重、振動特性について考察する。

(1) 全体荷重

剛性が高く、非同時破壊を起こす場合の氷海水槽試験結果では、全体荷重の予測式として Korzhavin 式が良く適合することを示した。(1)式に示した $I \cdot f_c$ (接触係数と貫入係数の積) は本試験では約 0.4 であったが、Sanderson⁸⁾ は実機では約 0.1 のオーダーであることを示し、Korzhavin 式は過大評価となることを指摘している。図-6 に示す有効氷圧力は氷厚に対して模型幅が大きくなると、本実験の範囲では一定値に漸近する結果となった。これは図-8 に示した分散値の傾向と合致している。実機では、図-6 の結果は B/h が大きくなると低下していることになる。氷海水槽試験としては比較的大きな模型幅 1.5m では、ある程度の氷圧力の低下を期待していたが、1.5m 規模の試験では有効氷圧力の低下は期待できない結果となった。氷海水槽の模型氷は均一で欠陥が実海氷と比べ少ないことなどが起因しているものと考えられる。即ち、 B/h ではなく、幅 B の絶対値による評価が必要である。氷海水槽試験結果から直接、実機荷重を外挿すると過大になることを示唆している。接触面積と欠陥の関係などから補正し、実機荷重を推定する必要がある、今後の大きな課題である。一方、剛性影響については、コンプライアンスが大きいほど同時破壊が促進されることからより大きな全体荷重が発生するものと考えられる。

(2) 局部荷重

局部荷重の特性は構造物の剛性、貫入速度により大きく変わる。剛性、貫入速度の小さな領域では同時破壊が発生し、剛性が大きく、貫入速度の大きな領域では非同時破壊が発生する。著者らは同時破壊が発生するパラメーターとして無次元のコンプライアンス値 C_0 を提案した。比較的剛性が大きな構造物でも厚い氷板に対しては、 C_0 は大きくなり、非同時破壊が発生し易いことを意味する。非同時破壊の場合、図-7 に示すように参照する面積が増えると氷圧力は減少するが、同時破壊では参照面積が増えても一定値となり、部材設計圧力を選定する場合には注意が必要である。

(3) 振動特性

剛性、貫入速度が小さい場合は準静的な振動が発生する。貫入速度が速くなるにつれて卓越周波数は構造物の固有振動数に漸近する。剛性が小さいと構造物は氷板に押し付けられ、氷板の進行方向に後退し、氷板が破壊した時点で大きなスプリングバックを伴い急激に前進する。構造物は所謂、間欠的なぎくしゃくした動きを呈する。本論文では言及しなかったが、著者⁹⁾ らは大きなスプリングバックにより同時破壊が発生するメカニズムを提案している。

4. 結言

同時破壊が発生すると全体荷重が大きくなるばかりでなく、全面に高いレベルの局部荷重が同時に作用する。また地盤には振幅の大きな荷重が伝達され、氷盤が構造物を通過しきるまでの長時間に亘り繰り返されることから、液状化あるいはせん断歪みの蓄積による基礎地盤の変形が懸念される。著者らは現在、これら氷海水槽試験で得られた定性的な知見を元に数値解析プログラムを開発し、実海氷を使った中規模野外試験、実機データを用い定量化を得るために校正中である。本プログラムにより同時破壊が発生する条件を予測し、設計に反映する予定である。

謝辞：本研究は通産省から(社)日本海洋開発産業協会が委託され「海洋構造物に及ぼす氷荷重の研究」(委員長 佐伯 浩 教授)の一環として実施されたものである。貴重な助言を得た委員各位に深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) Blenkarn, K.A.: Measurement and analysis of ice forces on Cook Inlet structures, *International Offshore Technology Conference*, Houston, Paper No.OTC1261, pp.365-378, 1970.
- 2) Jefferies, M.G., Wright, W.H.: Dynamic response of "Molikpaq" to ice-structure interaction, *Proceedings, 7th OMAE*, Houston, TX, USA, Vol.4, pp.201-220, 1988.
- 3) Wright, B.: Cost survey for ice capable offshore structure, *Confidential report*, B. Wright & Association limited, 1998.
- 4) Korzhavin, K.N.: Action of Ice on Engineering Structures, *CRREL Draft Translation*, No.260, 1962.
- 5) Ralston, T.D.: An Analysis of Ice Sheet Indentation., *IAHR* 78, Part 1, pp.13-31, 1978.
- 6) Kry, P.R.: A Statistical prediction of effective ice crushing on wide structure, *Proc. of the 5th International IAHR Conference*, Lulea, Sweden, Part 1, pp.33-47., 1978
- 7) Kamesaki, K., Tsukuda H., Yamauchi Y.: Experimental Studies on Non-simultaneous Failure Characteristics of Vertical Sided Indentors, *Proceedings of the seventh ISOPE*, Honolulu, Hawaii, Vol.2, pp.387-393, 1997.
- 8) Sanderson, T.J.O: *Ice Mechanics, Risk to Offshore Structures*, Graham & Trontman, ISBN 086010785X, 1988.
- 9) Kamesaki, K., Tsukuda H., Yamauchi Y.: Experimental studies of ice flaking characteristics of compliant indentors, *Proceedings of the eighth ISOPE*, Montreal, Vol.2, pp381-388, 1998.

(1999.4.19 受付)