

構造物に作用する地震荷重への氷盤の影響

ICE EFFECT ON FOUNDATION LOAD OF OFFSHORE STRUCTURE DURING EARTHQUAKES

山内 豊¹・亀崎一彦²

Yutaka YAMAUCHI, Kazuhiko KAMESAKI

¹ 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番地)
² 正会員 工博 同上

This paper describes effects of surrounding ice sheets on foundation design of gravity-based structures while an earthquake occurs. To simulate a situation that an offshore structure placed in moving or non-moving ice sheets encounters an earthquake, we performed vibration tests in the ice tank. We gave a sinusoidal vibration to a model foundation to represent an earthquake. The test showed that the load combination of moving ice and earthquake depends on the indentation velocity and an interaction between structure and non-moving ice may mitigate the seismic load.

Keywords : offshore structure, earthquake, ice, vibration test, foundation load, ice load

1. はじめに

地震を想定する必要がある氷海域に設置される海洋構造物の設計においては、とりわけ氷荷重と地震力が重要な荷重となる。局部荷重としては氷盤との接触部に作用する氷荷重が、また全体荷重は地震力が支配的となろうが、サハリン沿岸のような海域では、氷荷重と地震力が同時に作用する可能性も考えられる。局部荷重や全体荷重及び構造応答には、地震時の氷盤と構造物の相互作用が影響する。三浦等^{1,2)}は定着氷盤中の構造物の地震応答特性、滑動安定性に及ぼす氷の影響を理論モデルによって調査している。一方、移動氷中で氷荷重と地震力が同時に作用する場合の複合荷重の特性は十分には解明されておらず、API³⁾や CSA⁴⁾においても、設計荷重としてこれらの複合荷重の考え方を明確にしていない。本研究では地震時の氷荷重の特性や、構造基部荷重、構造応答への氷盤の影響を解明し、氷荷重と地震力が重畳する場合の設計荷重について評価を行なうことを目的とする。著者等はその第一段階として、氷海水槽において構造物模型の氷中加振実験を実施した。構造物が移動氷または定着氷の中で地震に遭遇する状況を再現し、氷荷重と地震力が重畳する場合の構造物及び地盤への影響について調査した。本論文ではその解析結果について報告し、地震と氷を考慮する必要がある海域に設置される構造物の設計荷重について一考察を行った。

なお、本研究は通産省からの委託事業として日本海洋開発産業協会が平成5年度から12年度にかけて実施した「海洋構造物に作用する氷荷重に関する研究」の一環として実施したものである。

2. 氷中加振試験

(1) 試験方法

鉛直壁型重力式構造物を想定し、縮尺 1/50 の 800mm 幅四角柱鋼製模型を氷海水槽(長さ 20m, 幅 6m, 水深 1.8m)で振動させる試験を実施した。図-1 は模型の概観図で、表-1 は模型の要目を想定実機と比較して示したものである。局部氷荷重を計測するために、模型の前面と氷板との接触部は、幅 88mm, 高さ 120mm の 9 枚の荷重計測パネルで分割した。また模型の後面は、中央の 88mm 幅パネルとその両側

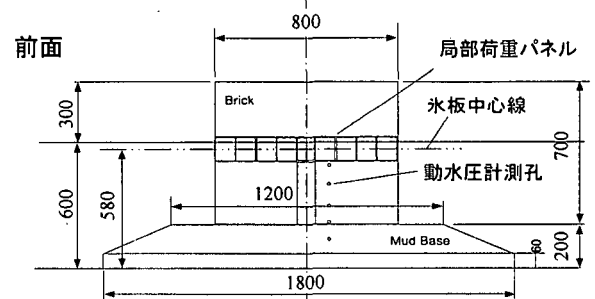


図-1 供試模型

表-1 模型寸法

	想定実機	供試模型
縮尺	1/1	1/50
水線幅	40 m	80 cm
高さ	45 m	90 cm
没水部深さ	30 m	60 cm
全重量	200,600 ton	1.172 ton
排水量	97,580 ton	0.75 ton
重心高さ	12.7 m	29.2 cm

に2枚ずつの177mm幅パネルによって5分割した。

図-2に試験装置を示す。構造物模型は、構造物底部の水平剪断力を計測する全体荷重検力計と、地盤挙動を模擬するためのバネを介して振動台に取り付けられている。振動台は氷海水槽の水中台車上にあり、水中台車は曳引車に剛に連結されている。模型の水深は600mm(実機30m相当)とし、加振時動水圧への海底地盤の影響を考慮して仮床を水中台車に取り付けた。振動台は水平1方向に振動し、振幅と周波数を変えることができる。

氷況としては移動氷盤と定着氷盤を想定した。移動氷に対応する実験では、模型を振動させながら、水中台車を曳引車で牽引して氷板中に貫入させた。定着氷盤に対応する実験では、氷海水槽のほぼ中央に水中台車を固定し、模型の周囲に氷板を密着させた後、模型を振動させた。これら一連の試験において、局部氷荷重 f_i 、構造基部剪断力 F_{gx} を前述の検力装置で、また模型の変位 d_{sr} と加速度 a_x をそれぞれレーザー変位計と加速度計で計測した。図-3に計測の座標系を示す。

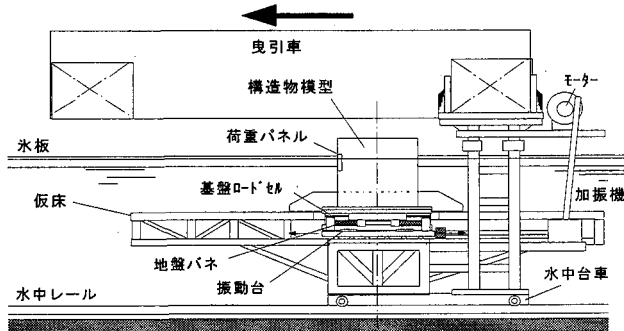


図-2 試験装置

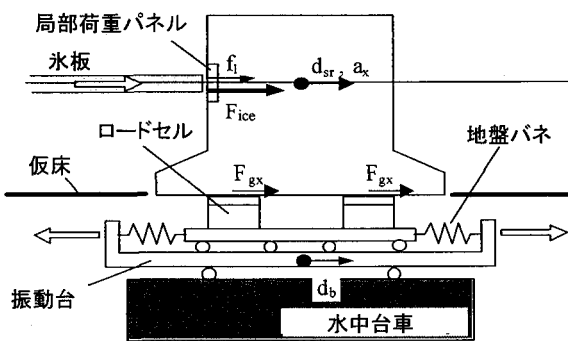


図-3 座標系

(2) 試験条件

実験に用いた模型氷板の氷厚は40mm(2m相当)、一軸圧縮強度は80kPa(4MPa相当)及び120kPa(6MPa相当)とした。なお圧縮強度は歪速度が $10^{-3}s^{-1}$ の時の強度とした。サハリン島北東海域の平均氷厚は1~1.3m、平均圧縮強度は1.5MPa程度と言われており、試験条件はこの海域に対しては厳しい設定となっている。模型底部と振動台との連結は剛連結と前述のバネ連結の2種類とし、それぞれRIGID-model, MS-modelと呼ぶことにする。MS-modelの地盤バネのバネ定数 K_s はN値20の砂地盤を想定して

4.32kN/mm(10.8MN/mm相当)とした。減衰比は約0.06であった。

サハリン海域の地震として遠山等⁵⁾は、100年再現期間に対して0.2g、1000年再現期間に対して0.5gのハザード曲線を提案している。しかしながら、複合荷重の特性を調べる上では、氷荷重と地震力の大きさに大差をつけない方が、氷板の影響をより理解しやすいと考え、試験では加速度振幅 a_v が約0.1gとなるように加振した。0.1gの振動は前記ハザード曲線では50年の再現期間に相当する。加速度波形はsin波とし、周波数 f_v は1~7Hz(0.1~1Hz相当)の範囲で変化させた。表-2に規則地震波の特性を示す。

移動氷盤に対応する加振貫入試験では、貫入速度 V をサハリン海域の平均的な氷盤移動速度(0.3~0.5m/s)を参考にして30mm/sと100mm/s(0.21m/s, 0.71m/s相当)の2種類とし、地盤特性、氷の強度、地震波を変えて合計48ケースの試験を行った。また、定着氷盤に対応する加振実験では地盤特性、地震波を変化させて合計12ケースの試験を行った。表-3にそれぞれの試験条件を示した。

表-2 規則地震波

	周波数 f_v (Hz)	加速度振幅 a_v (g)	変位振幅 d_v (mm)
RW1	1.0	0.06	15.0
RW2	1.5	0.10	11.0
RW3	2.0	0.10	6.0
RW4	2.5	0.10	4.0
RW5	5.0	0.10	1.0
RW6	7.0	0.20	1.0

表-3 試験条件

模型	Test No.	貫入速度 V (mm/s)	氷厚 h (mm)	圧縮強度 σ_c (kPa)	加振 周波数 f_v (Hz)	加振 加速度 a_v (g)
氷板貫入をともなう振動試験 (加振貫入試験)						
MS-model $K_s =$ 4.32kN/mm	7-12	30	40	111	1-7	0.06-0.22
	18, 20, 24-27	100	41	117-120	1-7	0.06-0.22
	32-37	30	41	78	1-7	0.06-0.22
	46, 47, 51-54	100	40-41	77-79	1-7	0.06-0.21
RIGID-model	1-6	30	39	122	1-7	0.06-0.23
	12-14, 19-21	100	40-41	110-114	1-7	0.06-0.23
	24-29	30	43	90	1-7	0.06-0.23
	37, 38, 52-55	100	39-41	84-87	1-7	0.06-0.23
	台車固定の振動試験 (固定水中加振試験)					
MS-model $K_s =$ 4.32kN/mm	f4-f9	0	42	123-126	1-7	0.06-0.20
RIGID-model	f13-f18	0	42	125-128	1-7	0.06-0.20

(3) 加振貫入試験の結果

模型の定常的な貫入と振動の双方によって氷板は模型の近傍でフレーキングを伴う圧壊によって破壊した。図-4はMS-modelの全体氷荷重 F_{ice} (局部氷荷重 f_i の総和)、構造基部剪断力 F_{gx} 、構造変位 d_{sr} の代表的な時系列を振動台の変位 d_b とともに示したもので、貫入速度による明らかな差が認められる。以下に主に氷板強度が120kPaのケースの解析結果について述べる。

a) 構造応答

図-5に構造物の振動変位 d_{sr} の周波数特性を振動

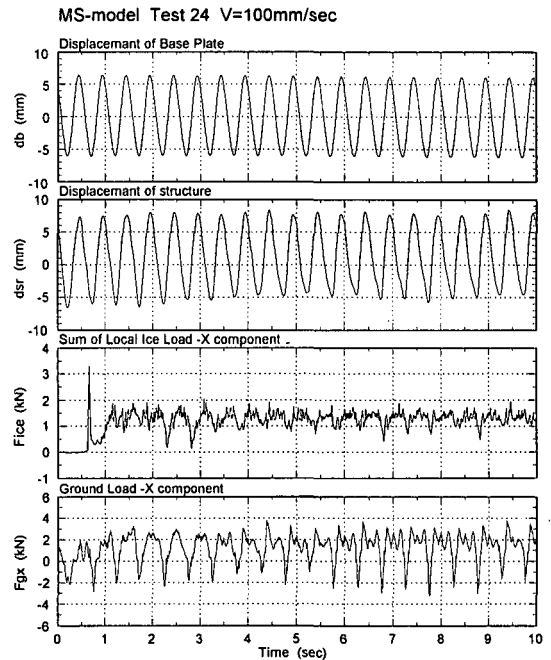
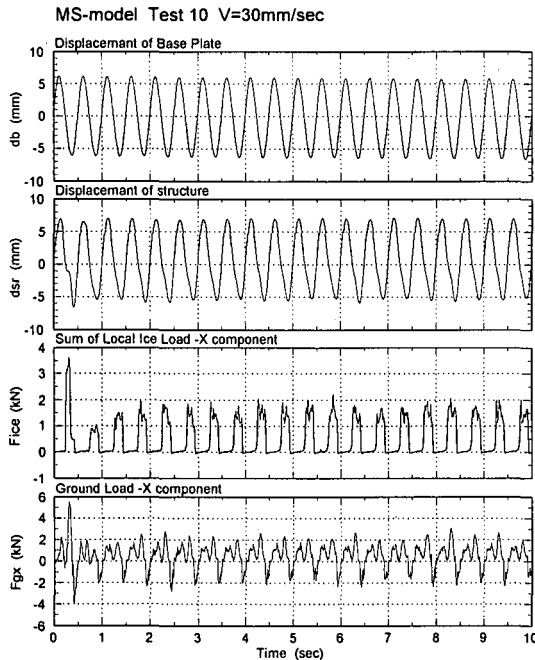


図-4 加振貫入試験の変位・荷重の時系列 (MS-model, $h=40\text{mm}$, $\sigma_c=120\text{kPa}$)

台の加振変位 d_b に対して示した。模型そのものは十分に剛であり、この応答特性は地盤バネによるものである。今回の模型では加振周波数が 5Hz の時に同調する傾向が見られた。この同調周波数には重要な意味はないが、移動氷盤中ではこの同調時の構造応答が平水中に比べ緩和されているのがわかる。

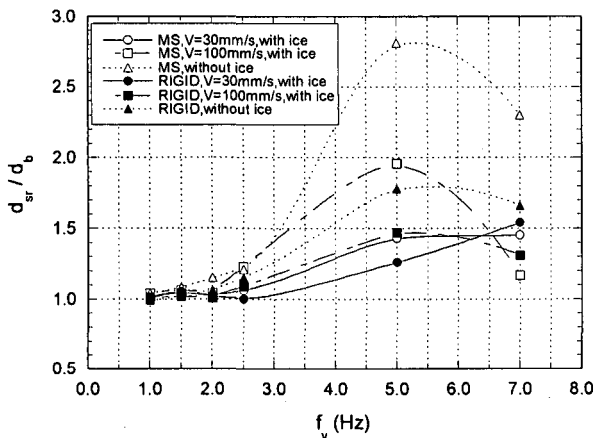


図-5 加振貫入試験時の構造応答 ($\sigma_c=120\text{kPa}$)

b) 氷荷重と地震力

全体氷荷重の時系列の波形は主に貫入速度によって図-6に示すような3種類のパターンに分類できた。図-4に示した例は図-6のCase-AとCase-Cに相当する。氷板との接触と離脱が交互に繰り返されるCase-Aの波形は貫入速度が 30mm/s の場合に多く見られた。Case-Cは不規則な変動を繰り返す波形で模型は常に氷板と接触している状態にある。このケースは貫入速度が速い 100mm/s のケースで見られた。Case-BはCase-AからCase-Cへの遷移的な状態で、断続的な波形ではあるが荷重が0になることはない。

地震力はここでは構造物の挙動に伴う慣性力と定

義する。平水中加振試験の結果から推定した付加質量 m と、氷中加振時の模型の平均加速度振幅 a_{xm} から、氷中加振時の地震力 F_e は(1)式によって解析的に求めた。

$$F_e = (M+m) \times a_{xm}, M \text{ は模型質量} \quad (1)$$

図-7に氷荷重 F_{ice} と地震力 F_e の比を示した。今回の試験条件では、氷荷重と地震力の比は $\sigma_c=120\text{kPa}$, $a_v=0.1g$ の領域で約 0.7 であった。これらの比は貫入速度の影響をほとんど受けない。なお、この領域での F_e は約 3kN である。

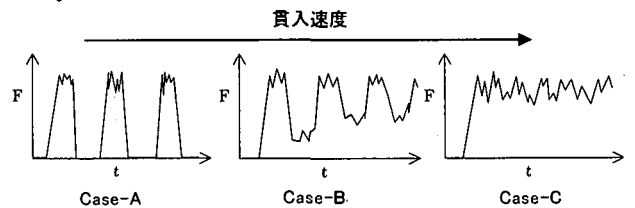


図-6 氷荷重の時系列パターン

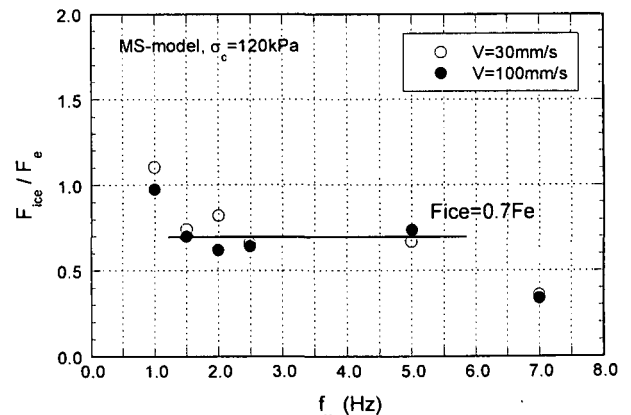


図-7 氷荷重と地震力の比 (MS-model, $\sigma_c=120\text{kPa}$)

c) 構造基部剪断力

構造基部には振動にともなう地震力と氷板接触部からの氷荷重が重畳して作用する。図-4の F_{gx} の時系列を見ると、貫入速度によって波形だけでなく大きさも異なる。図-8に $\sigma_c=120\text{kPa}$ の場合の、氷中加振時の基部剪断力と平水中加振時の基部剪断力の比 F_{gx}/F_{gx0} を加振周波数に対して示した。 F_{gx0} は平水中加振時の地震力に相当する。貫入速度が 30mm/s の場合、基部剪断力の大きさは平水中加振時の荷重と概ね同じ値を示し、氷板の影響はほとんど現われない。一方、貫入速度が 100mm/s の場合には、振動周波数が 5Hz 以下の時に基部剪断力に明らかな氷板の影響が見られ、 F_{gx0} の $10\sim 80\%$ 増の値を示した。図-7で氷荷重と地震力の絶対値の割合は貫入速度の影響をほとんど受けていないことから、 F_{gx}/F_{gx0} の貫入速度による差は変動する荷重の位相によるものと考えられる。貫入速度にともなう位相の影響については後述する。

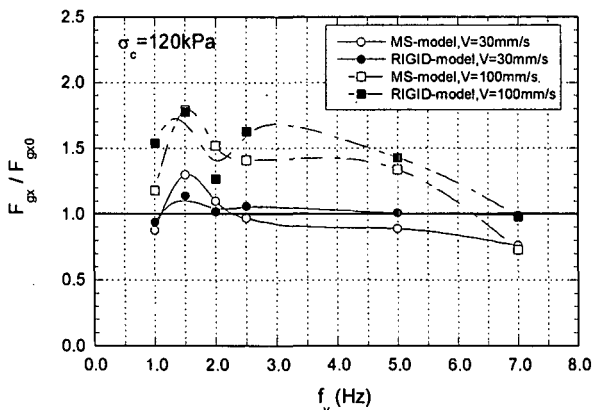


図-8 氷板貫入時と平水中の加振時構造基部剪断力の比 ($\sigma_c=120\text{kPa}$)

d) 局部氷荷重

図-9はMS-modelで貫入速度が 30mm/s の場合の有効氷圧力 P_{ice} と局部氷圧力 P_i をそれぞれ氷の一軸圧縮強度 σ_c で無次元化し、加振周波数との関係を示したものである。局部氷圧力はそれぞれの荷重計測パネルで計測された局部荷重 f_i をパネル内の氷との接触面積で除したものであり、有効氷圧力は全体氷荷重 F_{ice} を氷厚 h 及び構造幅 B で除した見掛けの氷圧力である。同じ図には、加振せずに氷板に貫入した場合の氷圧力も示した。

局部氷圧力は加振周波数によっても異なり、 σ_c の $0.6\sim 1.3$ の範囲に分布した。有効氷圧力は局部氷圧力の $60\sim 70\%$ の値を示しており、これは構造物の全幅に亘って同時に氷板が破壊していないことによる。振動周波数が 2Hz よりも小さい領域では局部荷重は加振しない時の氷荷重よりも大きくなる傾向が見られた。一方、振動周波数が 2Hz よりも大きい領域では局部荷重は加振しない時の荷重とほぼ同じと見なせた。また貫入速度が 100mm/s の場合にも同じような特性が得られ、氷荷重への貫入速度の影響は小さいと考えられた。

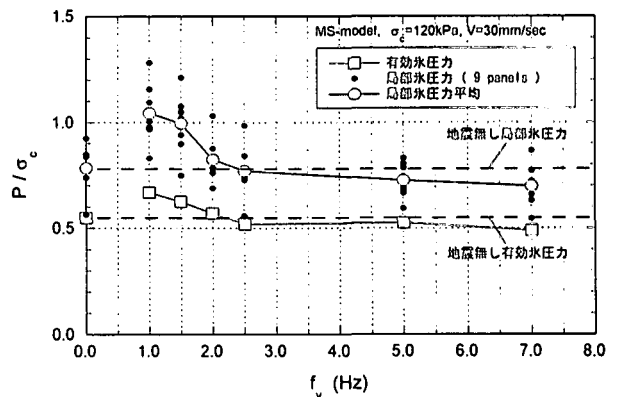


図-9 局部氷圧力への地震の影響 (MS-model, $\sigma_c=120\text{kPa}$)

(4) 固定氷中の加振試験

固定氷中の試験では模型の振動による氷板への周期的な載荷で、氷板は模型の近傍で破壊した。しかしながら氷板の弾性と地盤バネにより氷板は一度に破壊せず、模型の前後振動にともなう徐々に破壊し、最終的に模型と氷板の隙間が振動変位にほぼ一致すると氷板破壊が終了する。その後は振動にともなう模型と氷板の隙間から水が噴き出す現象が観察された。

a) 氷板による地震力の緩和

図-10に典型的な氷荷重 F_{ice} と構造基部剪断力 F_{gx} の時系列を示した。初期の氷板破壊の間は、氷板から受ける反力と慣性力の方向が相反するため、基部剪断力は緩和される傾向にある。氷板の破壊とともに剪断力は徐々に大きくなり、氷板の破壊が終わると基部剪断力は定常的な波形を示す。図-11に模型が振動を始めてから基部剪断力が定常状態になるまでの振動の波数($T_i \cdot f_v$, T_i ; 定常状態に至るまでの時間)と振動周波数の関係を示す。加振周波数が 2Hz よりも小さい場合には基部剪断力の緩和は顕著に現れず、最初の数波で氷板破壊が終わる。今回の実験は加振加速度をほぼ一定にしているため周波数の小さいケースでは加振振幅が大きく、従って一波当たりの氷板の歪が大きく模型の全幅に亘って局部的な破壊が促進したと考えられる。一方周波数が 2Hz よりも大きいケースでは定常状態に至るまでに 10 波以上の振動を要している。この場合には氷板の歪が小さく、また氷板強度の不均一性も手伝って局部的

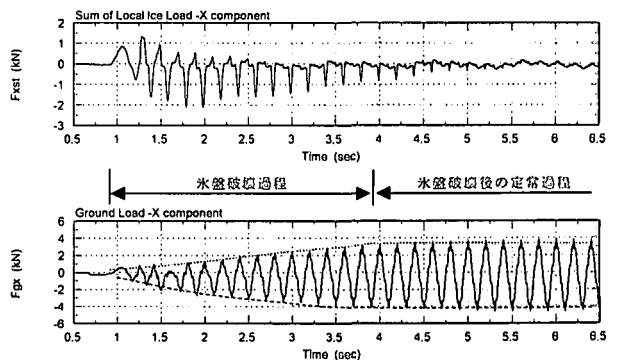


図-10 氷荷重と基部剪断力の時系列 (MS-model, Test f2)

な破壊が場所を変えながら発生することにより、全幅に亘る破壊に時間を要すると考えられる。実際に観測される地震波では、大きな振動が今回の試験のように定常的に継続することはなく、地震発生後10秒程度で減衰することが多い。そのことを考慮すれば定常氷はその反力と破壊に要するエネルギー吸収で地震力を緩和すると考えられる。

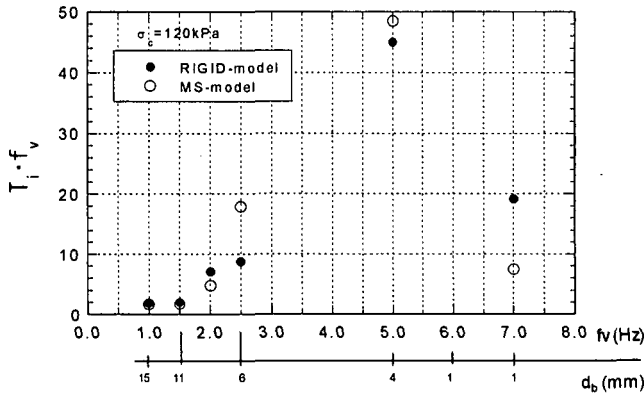


図-11 定常振動に至るまでの振動波数 ($\sigma_c=120\text{kPa}$)

b) 氷板破壊後の基盤荷重と構造応答

図-12 に氷板が破壊した後の定常的な構造基部剪断力と平水中加振時の剪断力の比 F_{gx}/F_{gx0} を示す。氷板破壊後の基部剪断力は平水中加振時の100~150%の値を示した。氷板の破壊長は数mm~20mmと比較的狭く、動水圧の上昇によるものと考えられる。

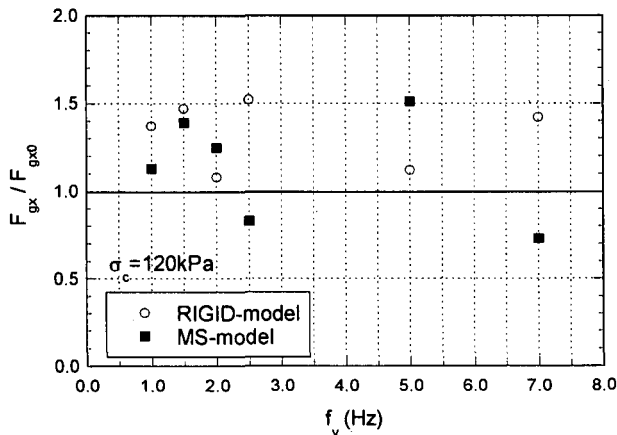


図-12 固定氷中と平水中の基部剪断力の比 ($\sigma_c=120\text{kPa}$)

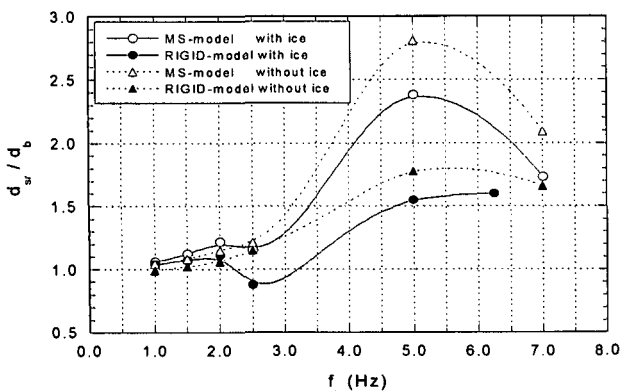


図-13 固定氷中加振試験時の構造応答 (定常過程)

図-13 は定常的な状態における構造応答 d_{sr}/d_b を示す。貫入時と同じく、氷板の存在で構造応答が減衰しているが、図-5 の貫入時の結果に比べ減衰の割合は小さい。貫入時には常に氷板が構造物に押し寄せるのに対し、固定氷中の試験では図-10 に示したように定常状態における氷板の反力が著しく小さくなるためと推察される。

3. 複合荷重への貫入速度の影響

移動氷盤の中で構造物に地震が作用する場合に、構造物は極めて危険な荷重条件に曝される。特に滑動や地盤挙動にともなう構造物の倒壊を考える時、構造基部に作用する氷荷重と地震力の重畳は重要な問題である。しかしながら、今回の一連の試験によって重畳の度合いには氷盤の移動速度が大きく影響すると考えられた。以下に氷荷重と地震力の位相に及ぼす移動速度の影響について考察した。

図-14 は地震力に対する氷荷重の位相遅れ時間 τ の加振周期 T_v に対する割合を示したものである。氷板の移動速度 (構造物の貫入速度) が 30mm/s の遅い場合には両荷重の間には周期の30~60%の位相差があり、特に構造物が氷板の方向に運動する時には逆位相に近くなって慣性力の影響が緩和される。構造基部剪断力は、単純に氷荷重と地震力の絶対値の和にならず、大きい方の荷重が支配的となる。図-7 に示したように、今回の試験では地震力が氷荷重よりも大きいので、基部剪断力は地震力に概ね等しくなる。一方氷盤の移動速度が 100mm/s の速い場合には慣性力の位相と氷荷重の位相にほとんど差が見られず、慣性力に氷荷重の50~80%が付加され、構造基部剪断力が平水中に比べて増加することになる。図

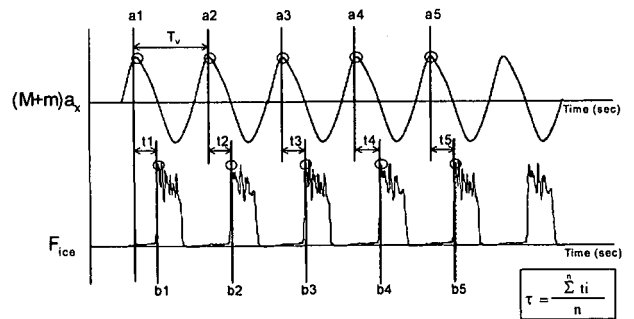


図-14 加振貫入試験の地震力 (慣性力) に対する氷荷重の位相遅れ

-15 は以上の移動速度の影響を示したものである。今回の試験では構造物の平均的な加振速度は約 60mm/s であり、氷板の移動速度が構造物の加振速度よりも速くなると、氷板は構造物の振動にかかわらず構造物と接触し氷荷重が常に作用すると考えられる。

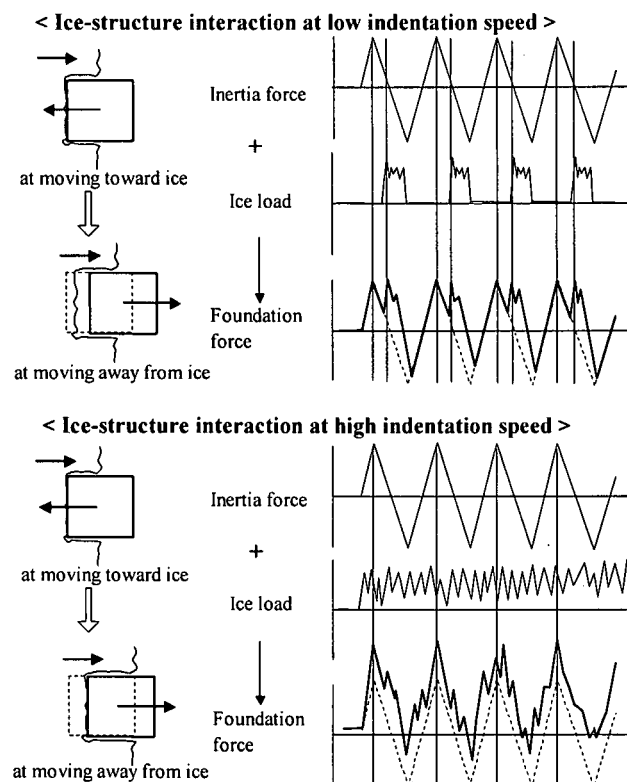


図-15 氷荷重と地震力の複合荷重への貫入速度の影響

4. 設計荷重に関する考察

氷荷重と地震力が同時に作用することは希であると考えられるが、設計条件としては海氷、地震それぞれの出現確率を検討した上で、設計にとって適切な同時発生のお互いの組み合わせを考える必要がある。一方で移動氷と地震が同時に発生する場合に、それらの相互作用による局部荷重や構造基部に作用する全体荷重の特性の調査が進めば、より合理的な設計荷重を設定することができる。

今回の一連の試験によって、地震時の構造基部剪断力は、単純に氷荷重と慣性力の和では表されず、氷盤の移動速度や振動周波数の影響を受け、特に氷盤速度の影響が大きいことが明らかになった。構造物が設置される氷海域における地震と移動氷盤の同時発生条件の下で、今回調査したような地震力と氷荷重の非線形的な複合荷重の特性を考慮すれば、構造基部に作用する全体荷重をより適切に評価することができると思われる。さらに、サハリン海域のように比較的穏やかな氷況を考えるとき、設計条件として再現期間が 200 年や 1000 年の地震と同時発

現する可能性のある氷盤の厚さは 1m に満たないかもしれない。そのような条件では、もともと氷荷重は地震力に比べてはるかに小さく、氷盤の影響は極めて小さいと考えられる。

構造物局部の設計に重要となる局部氷荷重に関しては、今回の試験結果では構造物の振動の影響は小さく、これまでの移動氷盤に対する局部荷重と同じ評価法を用いることができると考えられた。

定着水中の構造物については振動によって氷盤との接触部から移動氷盤と同じ程度の氷荷重を受けることになり、局部構造の設計への考慮が必要である。一方、この場合の構造基部に対しては氷盤は地震時の慣性力を緩和する方向に作用すると考えられた。

5. まとめ

海氷の作用を受ける構造物に、地震が同時に発生する場合の構造物の挙動や全体荷重の特性を実験的に調査した。一連の試験によって地震・海氷同時作用時の構造基部に作用する全体荷重には氷盤の移動速度が大きく影響することが明らかになり、また慣性力に加えて氷荷重の影響が顕著に現れる遷移速度は地震動の速度にほぼ等しくなると推察された。著者らは、今回の試験で得られた知見を基に、地震と海氷の同時作用時の荷重及び構造応答を推定することのできる理論モデルを開発している。規則地震波の試験結果を基にモデルの検証を行い、観測地震波等によって実機ベースのシミュレーションを実施している。海氷と地震の同時発生条件も考慮に入れた上で、局部荷重や構造基部に作用する全体荷重の考え方について、さらに調査を進める予定である。

参考文献

- 1) 三浦房紀, 野沢逸男, 榊 信昭, 平野勝志: 氷海構造物の地震時挙動と滑動安定性に及ぼす氷の影響, 土木学会論文集, 第 409 号/VI-11, pp.65-73, 1989.
- 2) 三浦房紀, 玉 均: 水との相互作用を考慮に入れた氷海構造物の地震応答特性に及ぼす氷の影響, 土木学会論文集, 第 483 号/I-26, pp.117-125, 1994.
- 3) American Petroleum Institute (API): Recommended practice for planning, designing, and constructing structures and pipelines for Arctic conditions, *API recommended practice 2N second edition*, 1995.
- 4) Canadian Standards Association (CSA): General requirements, design criteria, the environment, and loads, *CAN/CSA-S471-92*, 1992.
- 5) Toyama, Y., Kato, K., Kamesaki, K., Yamauchi, Y. and Kurokawa, A.: Ice and earthquake loads on a structure in offshore Sakhalin, *Proc POAC'01*, Ottawa, Vol 2, pp.597-606, 2001.