

氷海域における設計的地震荷重の割り増しに対する構造物規模等の影響

EFFECT OF STRUCTURE SIZE ON THE MAGNIFICATION FACTOR TO DESIGN EARTHQUAKE LOAD IN ICE-COVERED WATERS

加藤一行¹
Kazuyuki KATO

¹正会員 工博 近畿大学教授 生物理工学部人間工学科 (〒649-6433 和歌山県紀の川市西三谷 930)

It is recommended to take some effect of ice loading on the design earthquake load when designing an arctic structure. The author and co-workers have proposed the design earthquake load estimation system which based on the Monte Carlo simulation. The final output from the system is the relationship between the magnified design earthquake load and the return period. Magnification factors are supposed to alter by changing many design parameters. This study focused to calculate the magnification factor for the different size of structure. The results reveals that the large magnification factor associates for smaller structure and shorter return period.

Key words: Arctic structure, design earthquake load, return period, Monte Carlo simulation

1. 研究目的

サハリン沿岸域は氷海域であり, 石油, 天然ガスの宝庫であると言われている. このような海域において, 石油や, 天然ガスの開発に用いられる, サハリン 2 プロジェクトで使われている MOLIKPAQ のような, 原油・ガス掘削プラットフォームなどの海洋構造物 (特に, 氷海構造物と称す) の設計に際しては, 氷による荷重 (氷荷重) により, 構造物が所定の位置から滑らないように設計しなくてはならない. 一方, サハリン沿岸海域は地震地帯でもあり, 相対的に地震の発生確率が高い. また地震荷重も構造物を水平に滑らせるように作用するから, 例えば, CSA¹⁾ のような既存の設計ガイドラインでは, そのような海域においては地震荷重と氷荷重の重畳について検討しなければならないと述べられている. しかし, その方法については言及されていない.

設計地震荷重は一般的には, 100 年以上の再現期間に対応した値であり, 設計氷荷重も同様に, 100 年程度の再現期間に対応する値である. したがって, 設計地震荷重と設計氷荷重を単純に足し合わせることは設計荷重の過大評価を招くことは明らかである.

地震荷重と氷荷重が重畳して作用する場合, 地震単独 (氷無し) による応答と, 氷単独 (地震無し) による応答を重ね合わせて評価して良いかどうかが問題となる. 線形システムの場合, 線形重ね合わせが成立する. ただし, 最大応答に注目すると, 地震持続時間中の地震単独最大応答が, 氷

単独による変動的な応答の最大値と重なるとは限らない. また, 非線形的相互作用の影響もあり, 線形重ね合わせが成り立たない可能性もある.

この問題に対しては全く検討がなされていない状況にあったが, 1990 年代に行われた JOIA (日本海洋開発産業協会, エンジニアリング振興協会に発展的に解消) プロジェクト「海洋構造物に及ぼす氷荷重に関する研究 (平成 5 年度～平成 12 年度)」において, はじめて検討が加えられた.

氷海水槽における模型試験や数値計算が行われたが, 非常に多くの因子が関係するので, すべての関係する因子に対しての検討は完了しなかった. プロジェクトの後半期にこの問題に対する検討の必要性が提起されたこともあるが, 氷海水槽実験は, 費用や手間が非常にかかる実験であり, 実験で関連する諸因子がすべてカバーされたとはいえない. また数値計算も氷板破壊を表現することが非常に難しく, 氷板破壊のアルゴリズムに不十分な面があったと認識されている. したがって, 関連する諸因子のうち検討を断念したものも多々あった. 例えばロッキング振動に対しての検討は全く行われていない. 構造物の安定 (滑りを起こさない) を検討するものとして氷荷重があり, 地震時の基部せん断力も同じ安定性を検討するとき用いるものである. これらの重ね合わせをもっぱら論じるにが自然であると認識されていた. 一方, 上下振動に関連するロッキング振動と氷荷重との関わりが当時 (現在も) 明確になっていなかったため, ロッキング振動に対する検討がなされなかったと認識されている.

非常に多くの因子が関係し、それらの組み合わせによっては、全く逆の現象が起こることもあり、まとめることが困難であるが、それを承知の上で定性的にまとめると次のようになる (Toyama et al.²⁾)。氷板の構造物に対する進行 (衝突) 速度が速いときには、合計の荷重 (模型構造物の基部で測定した水平荷重) は、地震荷重 (三角関数波によって振動させたときの模型構造物の基部で測定した水平荷重) と氷荷重 (氷板が模型構造物に一定速度で衝突し、クラッシング破壊を起こしているときの模型構造物の基部で測定した水平荷重) の和にほぼ等しい。すなわち、氷板の進行速度が速いときは地震荷重と氷荷重が重畳する、という検討結果を得られた。

氷板が静止しているときには、地震荷重が軽減される、という氷海水槽試験の結果もあったが、安全側を考えて、Toyama et al.²⁾、Kato et al.³⁾は、氷が存在するときに地震が起こると、必ず両者の荷重は重畳するという仮定に基づいて、モンテカルロシミュレーションにより設計的な合計荷重を、地震荷重に対する倍率として推定する手法を提案した。

加藤と古川⁴⁾は、入力値に一般性を持たせるようにプログラムを改良し、そのプログラムを設計地震荷重推定システムと呼んでいる。その設計地震荷重推定システムのフローチャートを図-1に示す。このシステムでは、設計地震荷重 (地震荷重) は通常地震荷重に、氷海域であることに由来する地震荷重倍率を乗ずることによって得られる。地震荷重倍率は、再現期間によって変わる。その地震荷重倍率と再現期間の関係が設計地震荷重推定システムの最終的なアウトプットである。

2. 基本手順と仮定

(1) 基本手順

設計地震荷重推定システムの基本手順を簡単に述べると以下のごとくである。フローチャートは図-1に示すごとくである。

(a) 個々の地震発生日の算定

実際の地震では、プレートでのエネルギーの蓄積と解放が繰り返される。すなわち、プレートテクトニクス的な運動により地震の発生間隔は支配されている。しかし、そのような運動は十分に解明されておらず、地震発生間隔の数式化は不可能なのが現状である。従って、本システムでは、図-1のフローチャートに示すように、時間軸上での地震発生過程はポアソン過程を構成するものと仮定した。

個々の地震発生日は、個々の地震の発生間隔を順次足し合わせて算定する。

(b) 個々の地震での地震荷重の算定

地震荷重は地震加速度の関数として表されると考え、後述する地震ハザード曲線に基づいた乱数

を発生させて、地震加速度のデータ列を作成し、個々の地震発生時の地震荷重を後述する算定式より求める。

(c) 個々の地震発生時の氷板の圧縮強度の発生

氷荷重は氷厚と氷の一軸圧縮強度によって算出すると仮定する。個々の地震発生時の氷板の圧縮強度のデータ列を発生させる。

(d) 氷厚変化の時系列の発生

後述する氷厚変化モデルと氷季モデルを用いて、必要な年数分の氷厚変化の時系列を発生させる。

(e) 合計荷重の算定

氷海構造物に作用する合計荷重は、個々の地震荷重とその地震が発生したときの氷荷重の合計と仮定する。個々の地震発生時の氷荷重は後述する算定式より算定するが、氷厚は個々の地震発生日の氷厚を、氷厚変化の時系列から抽出する。

(f) 地震荷重倍率の算定

所定の再現期間に対応する地震荷重倍率、すなわち合計荷重と地震荷重の比を算定する。

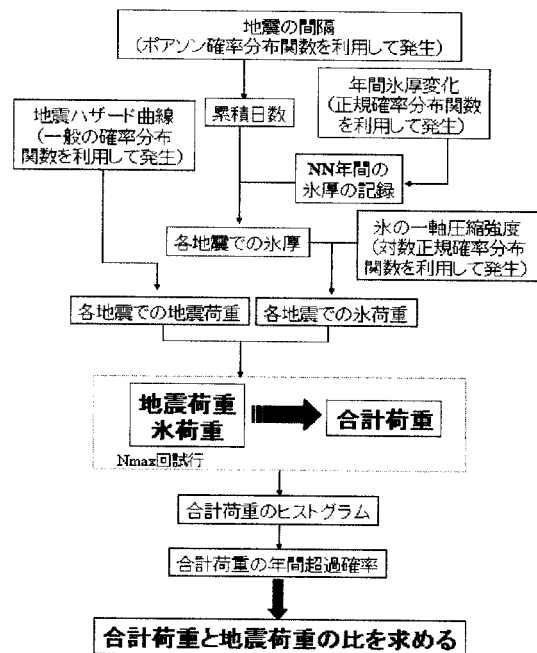


図-1 設計地震荷重推定システムのフローチャート

(2) 基本仮定

地震が結氷期に起こると想定した場合、氷厚のいかによらず構造物に及ぼす荷重は、地震荷重 (構造物基部せん断力) と氷荷重の単純和と考える、という基本仮定を設ける。

地震荷重 F_{earth} は、ある地震における地震最大加速度 a の関数として算出できると仮定する。なぜなら、地震荷重は地震発生時の地震加速度に依存すると考えられるからである。ここでは次に示す式を仮定する。

$$F_{earth} = f(a) \quad (1)$$

氷荷重 F_{ice} は、水線面上に、水平荷重として作用する。氷荷重は、氷板の破壊様式により種々の算定式が提案されているが、この研究では、クラッシングという氷板が圧縮荷重を受けて、相互作用面付近で破壊する様式を想定して、算定式の中で最も単純な Korzavin 型の式によって下記のように与えられると仮定する。

$$F_{ice} = C_e D h \sigma_c \quad (2)$$

ここで、 C_e は係数、 D は構造物の直径（あるいは有効径）である。 h は氷厚、 σ_c は氷の一軸圧縮強度である。氷荷重は、氷の一軸圧縮強度、氷厚および構造物の有効径に比例する、としている。

基本仮定に従い、合計荷重 F_{total} は下記の式によって与えられる。

$$F_{total} = F_{earth} + F_{ice} \quad (3)$$

ここで述べた基本仮定は、次のことを暗示している。

- ・氷板は結氷期において常に運動している。
- ・すべての構造物と氷との相互作用では、氷板のクラッシング破壊が発生している。
- ・氷板の運動速度は常にある程度速い。

これらの、基本仮定に暗示されたすべての事象は、地震荷重と氷荷重が常に重なり合うということを保証している。基本仮定に暗示されたすべての事象は、常に起こると限らない（定量的には定かではないが、過半の相互作用はそれとは異なる事象であると考えられる。したがって、設計地震荷重推定システムの基本仮定は、安全側を配慮していると言える。もしくは、超安全側と言ってよいかも知れない。

3. 氷厚変化モデル等の設定

この研究では、構造物規模の地震荷重倍率に及ぼす影響に焦点をあてているので、氷厚変化モデルや地震ハザード曲線などはすべて同一としている。それらをまず簡単に紹介する。

(1) 氷厚変化モデル

氷厚変化モデルの定式化の詳細は加藤と古川にやや詳しく述べられているので、ここでは用いたモデルを図示するとどめる（図-2 参照）。

氷厚変化モデルは、氷季の長さを規定する氷季モデルと組み合わせて定量化される。したがって、氷厚変化モデルは、氷厚の時間的な変化と同時に、氷季の長さを規定する。設計地震荷重推定システムでは、氷季の長さは年最大氷厚の関数と考えているので、氷厚変化モデルは年最大氷厚の関数である。図-2 中のそれぞれの曲線は、図に示された年最大氷厚に対応するものである。

年最大氷厚は、確率変数であり、本研究では、年最大氷厚の確率密度関数は、平均と標準偏差をそれぞれ $h_{mean} = 1.3m$ 、 $h_{sd} = 0.13m$ の正規分布とし

た。

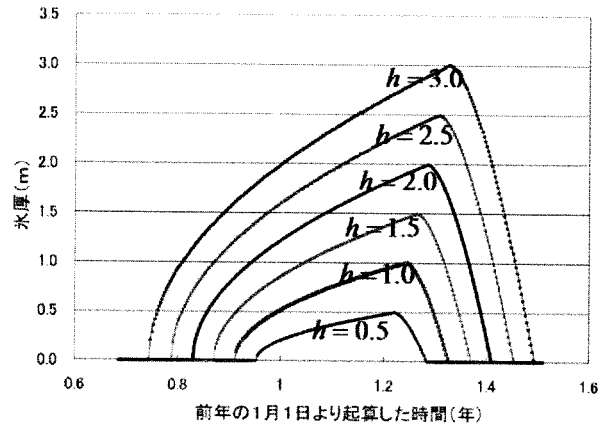


図-2 氷厚変化モデル

(2) 地震ハザード曲線

氷海構造物の設置海域における地震の強さと再現期間の関係を設定するのが地震ハザード曲線である。図-3 に本研究で用いた地震ハザード曲線を示す。地震ハザード曲線における参照加速度を再現期間 100 年の地震最大加速度を $a_{100} = 200(gal)$ 、再現 2000 年の地震最大加速度を $a_{2000} = 600(gal)$ とした。

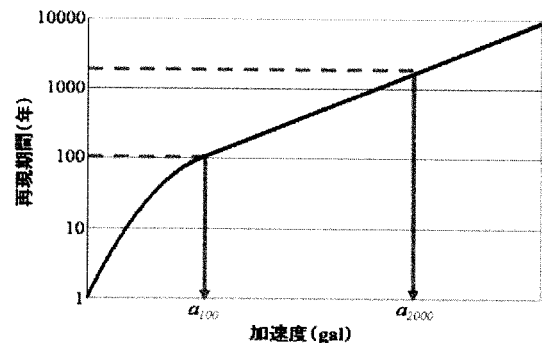


図-3 地震ハザード曲線

(3) その他の設定

氷の一軸圧縮強度の確率密度関数は、平均と標準偏差をそれぞれ $\sigma_{mean} = 2.0MPa$ 、 $\sigma_{std} = 0.2MPa$ の対数正規分布とした。

平均年間地震発生回数は $na = 2$ とした。シミュレーション期間は 100,000 年とした。したがって、地震発生回数の総計は 200,000 回となる。

図-4 に発生させた諸データの最終的な関連を示した例を示す。これはシミュレーション期間 100,000 年の最初の 30 年における氷厚の変化と発生地震の最大加速度を示している。シミュレーションでは、このようなデータが 100,000 年分作られる。もしも、氷厚がゼロではないときに地震が発生したとすれば、その氷厚と強度に見合った氷荷重(2式)と最大加速度に見合った地震荷重(1式)が構造物に作用し、その大きさは両者の足し合わせであるとしている。

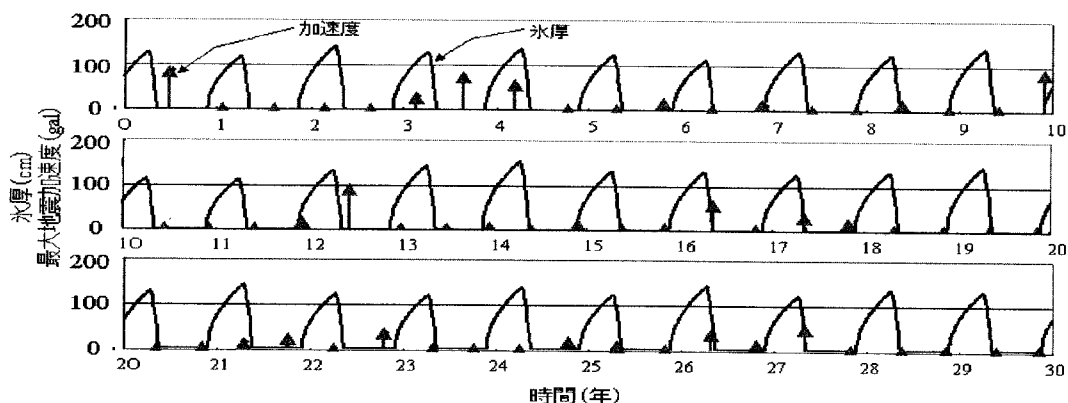


図-4 氷厚変化と地震加速度の時系列 -シミュレーションで発生させた例

4. 構造物モデルと地震応答解析

構造物は、加藤と古川で用いたものを標準モデルとした。その概要図が図-5 に示されている。水線面での構造物直径に因んで、これを 36m モデルと称することとする。

構造物規模の異なった構造物として、水線面直径が 1/2 倍、2 倍のモデルを用いることにした。水線面での構造物直径に因んで、それらをそれぞれ 18m モデル、72m モデルと称することとする。当然ながら、上部構造物の辺長（正方形をしている）も同じ倍率で縮小、拡大されるとしている。図-5 にその概要を模式的に示した構造物を 7 自由度のバネ-マスモデルにてモデル化(図-6 参照)し、地震応答解析に用いた。

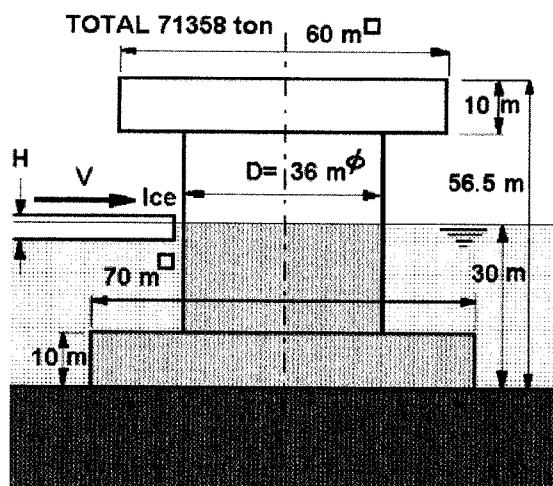


図-5 基本構造物モデルの概要図

表-1 には、これらのモデルの重量分布をまとめた。質点 m_1 から m_4 は水線面下にあるので、付加質量に相当する重量が含まれている。

バネ剛性については基準があまり定かではないので、36m モデルの設定値を基準に、適宜簡単な調整を行った。結果として得られた一次固有振動

数は、36m モデル、18m モデル、72m モデルでそれぞれ 1.03Hz、0.99Hz、0.56Hz であった。

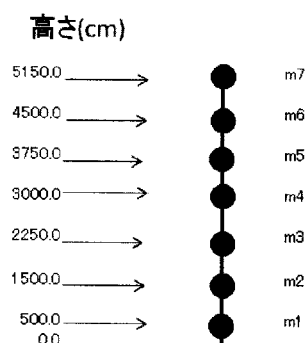


図-6 地震応答解析に用いたバネ-マスモデル

表-1 解析に用いたモデルの重量分布

	36mモデル	18mモデル	72mモデル
	全重量(kN)	全重量(kN)	全重量(kN)
m_7	245000	69085	665714
m_6	15703	3926	62812
m_5	22433	5608	89731
m_4	59821	14955	239283
m_3	97209	24302	388835
m_2	109048	27262	436193
m_1	600250	150063	2401000

地震応答解析には、バネ-マスモデルを Newmark β 法を用いて数値積分を行うという一般的な方法を用いている。用いた地震波は、EL CENTRO-NS 波と Hachinohe-EW 波の 2 種を用いた。EL CENTRO-NS 波は 1.5Hz 付近に卓越周波数があり、

Hachinohe-EW 波は 1.0Hz 付近に卓越周波数がある。時間間隔はいずれの地震波においても 0.01s とした。

すべての地震波に対し、その地震波の最大加速度を順次変更して、地震応答解析を行い、その地震応答解析において算定された基部せん断力の最大値を、その解析における地震力とした。

地震応答解析により算定された最大加速度と地震力の関係は、図-7 (36m モデル)、図-8 (18m モデル)、図-9 (72m モデル) に示されている。

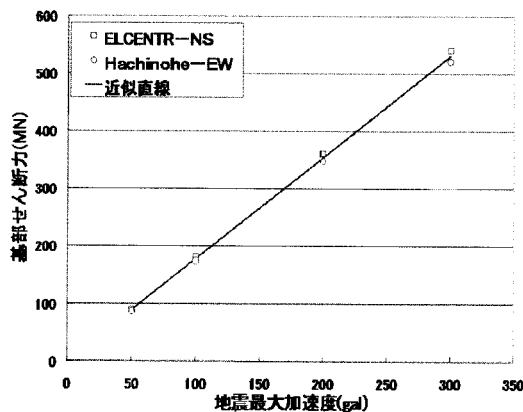


図-7 地震最大加速度と地震力の関係
(36m モデル)

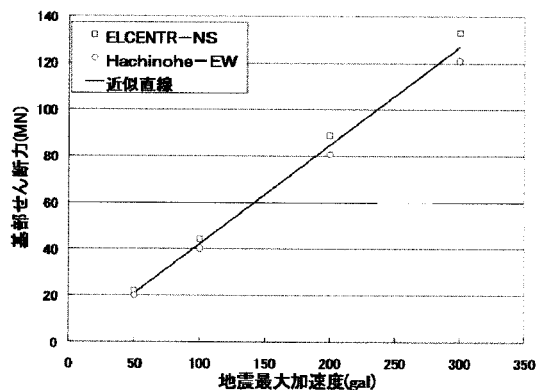


図-8 地震最大加速度と地震力の関係
(18m モデル)

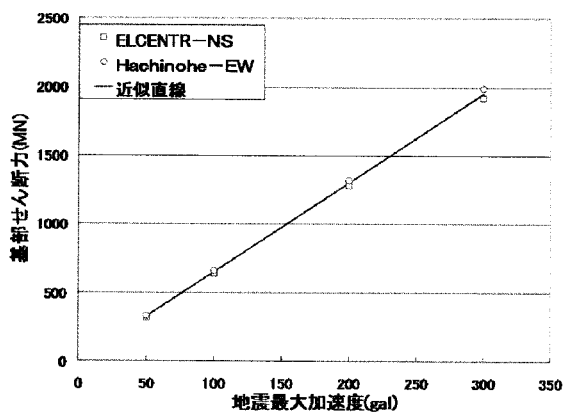


図-9 地震最大加速度と地震力の関係
(72m モデル)

地震波による相違は、18m モデルで少し見受けられるが、36m, 72m モデルではほとんど認められない。強いて言うなら、Hachinohe-EW 波に対応する地震力の方が、ELCENTRO-NS 波に対応する地震力よりもやや小さいという傾向にある。

地震波による相違はないものとして、線形回帰解析を行うと、いずれの構造物モデルに対しても、高い近似度で直線近似ができ、かつ y 切片はゼロに近い、すなわち原点を通る直線で近似できる。

近似直線の、y 切片をゼロとした、方程式は、36m モデルに対して、

$$F_{earth} = f(a) = 1.9929a \quad (\text{MN}) \quad (4)$$

ただし、地震最大加速度 a は、gal を単位とする。18m モデルに対して、

$$F_{earth} = f(a) = 0.4234a \quad (\text{MN}) \quad (5)$$

72m モデルに対して、

$$F_{earth} = f(a) = 6.5154a \quad (\text{MN}) \quad (6)$$

である。

5. 地震荷重倍率

地震最大加速度と地震力の関係が定まったので、図-1 に示されたフローチャートに沿ってプログラミングされた設計地震荷重推定システムを使うことができる。このシミュレーションに用いたパラメータは先に紹介したものである。一方、氷荷重は、第 2 章で述べた Korzavin 型の推定式で、 $C_e = 0.3$ とした式を用いた。すなわち、次式であるとした。 C_e は構造物規模により変更すべきと言う議論もあるが、本研究ではすべてのモデルで同一とした。

$$F_{ice} = 0.3Dh\sigma_c \quad (7)$$

構造物直径とそれに対応する地震荷重と最大加速度の関係式以外は同一としたシミュレーションを行った。

結果は紙数の関係上示せないが、発生させた乱数は、 χ^2 検定により信頼性をチェックしており、いずれの乱数も 95% 以上の信頼性を確認している。また、加藤と古川の論文で、設定した確率密度関数と発生させた乱数の相対頻度の比較が紹介されている。

一連の計算結果を、再現期間対する荷重倍率という形式で示したものを図-10 に示す。この研究で焦点をあてた構造物規模による荷重倍率の相違は明らかである。

荷重倍率は、再現期間が大きいほど小さくなる。また、荷重倍率は、構造物規模が大きいほど小さくなる。すなわち、再現期間が大きいほど、また構造物規模が大きいほど地震荷重に及ぼす氷荷重の影響は小さくなる、というシミュレーション結果が得られた。

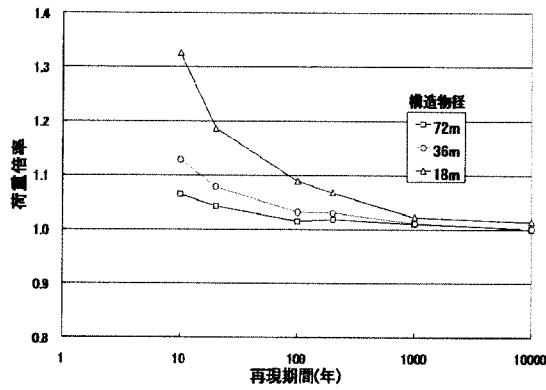


図-10 再現期間と荷重倍率との関係

6. 結語

加藤と古川が行ったパラメトリックスタディーでは、設計地震加速度が小さいほど、構造物の規模が小さいほど、大きな地震荷重倍率を考慮すべきであると結論している。しかし、そのシミュレーションにおいては、構造物規模を考慮するのに、地震応答解析を行わずに、地震力と地震最大加速度の関係式、すなわち(1)式に定性的に変更を加えたに過ぎない。本研究では、質量分布に検討を加え、構造物規模を、質量分布を変更することにより考慮し、ELCENTRO 地震波、Hachinohe 地震波の振動特性が大幅に異なった2種の地震波を用いて、地震応答解析を行い、(1)式を定量的に定め、それを用いてシミュレーションを行い、荷重倍率に対する構造物規模の影響を明らかにした。

定性的な結論は、加藤と古川が行った定性的に変更による影響と同じであり、何ら新規ではないが、本研究ではそれが地震応答解析に裏打ちされたことに意義があると考えられる。本研究では構造物の剛性に関して深く検討を加えておらず、それは今後の課題として残されたと認識している。

ここで、再度、本研究も含めてこれまでに行ったパラメトリックスタディーから得られた荷重倍率の定性的傾向をまとめると、下記ようになる。

- (1) 100年の再現期間に対応する加速度が小さい程、大きな荷重倍率を考慮する必要がある。
- (2) 地震発生頻度の高い海域ほど大きな荷重倍率を考慮すべきである。
- (3) 構造物寸法が小さい程、大きな荷重倍率を考慮する必要がある。
- (4) 考慮する再現期間が短いほど、大きな荷重倍率を考慮する必要がある。

これらの事柄は、相対的に設計地震荷重が小さくなっているためであるとも言える。氷荷重は加速度に依存しないで、氷の特性のみに依存するので、設計地震加速度が小さくなると、相対的に氷

荷重の重みが増す。あるいは構造物の寸法は、氷荷重には一次でしか影響を与えないが、地震荷重には、構造物の質量分布と剛性分布により、1次以上で影響を与えるので、構造物の規模が小さいほど氷荷重の重みが増す、という当然予想される現象である。当然予想される現象が算定できたことは計算コードの信頼性が高いと評価できる(自明のことが計算できるに過ぎないという評価もありえる)。当然予想される現象が定量的に評価できるというのが本システムの価値であると考えられる。

最後に、地震荷重と氷荷重の重なりという問題を再度考えてみたい。前述したように、このシステムを構築するのにあたり用いた基本仮定には、次の事項が暗に仮定されている。

- ・氷板は結氷期において常に運動している。
- ・すべての構造物と氷との相互作用では、氷板のクラッシング破壊が発生する。
- ・氷板の運動速度は常にある程度速い。

これまで言及していなかったが、さらに「地震の主要な振動方向と氷板の移動方向がほぼ一致している」ということも、暗に仮定されている。

地震発生時に、氷板はある比較的速い速度で、地震の主要な振動方向とほぼ同じ方向に運動しており、しかも連続的なクラッシング破壊を起こしている、と言うことを基本仮定は前提としている。そのような事象が発生する確率は、定量的には定かではないが、非常に低いと判断せざるを得ない。したがって、本システムにより算定された地震荷重倍率は、超が付くほど安全側である。

上記の議論を受けて、加藤と古川は、「サハリン沿岸域においても、設計地震荷重は、氷がないときの(つまり通常海域での)設計地震荷重を用いればよい」という結論を述べた。しかしながら、関連するパラメータが非常に多く、未検討のパラメータも多々あるという現状を強く認識するようになった。見込み的には、ほぼ上記の結論でよいと考えているが、今少しパラメトリックスタディーを行ってから、再検討しようと考えている。

参考文献

- 1) Canadian Standard Association: CAN/CSA-S471-04 General Requirements, Design Criteria, the Environment, and Loads, 2004
- 2) Toyama, Y., Kato, K., Kamesaki, K., Yamauchi, Y. and Kurokawa, A.: Ice and Earthquake Load on a Structure in Offshore Sakhalin, Proceedings, POAC'01 pp.597-606, 2001
- 3) Kato, K., Toyama, Y., Yamauchi, Y., Kiyokawa, T., Nakazawa, N. and Kurokawa, A.: Ice and Earthquake Loads on a Structure in the Okhotsk Sea, Int. Jour. Offshore and Polar Engineering, Vol.11, No.4, pp.298-303, 2001
- 4) 加藤一行, 古川祥一: オホーツク海における設計地震荷重の設定法 第21回寒地技術シンポジウム論文・報告集 pp.460-467, 2005