

港湾構造物の耐波設計におけるデジタルシフトに対する検討 Digital Shift in Design of Maritime Structures Against Waves

都市人間環境学専攻 長谷川巖
Iwao Hasegawa

Key words : Numerical simulation, Physical model experiment, Digital shift, Sigmoid curve, Energy consumption

1. 序論

地球温暖化により海面上昇を生じることや、気候変動により波浪条件が厳しくなるなど、港湾と海岸の構造物は地球温暖化の影響を強く受ける。したがって、今後に建設する構造物の設計だけでなく、既存施設が受ける地球温暖化による影響の評価においても、耐波設計に関する模型実験や数値シミュレーションが果たす役割が大きい。防波堤などの港湾施設の断面諸元の設定のために、波浪に関する水理模型実験が従来より実施されている。近年は数値計算技術と計算機性能の向上により、波動現象を数値シミュレーションで取り扱えるようになってきている。しかし、耐波設計の実務において数値シミュレーションの適用はあまり進んでいない。

様々な分野のデジタル化が進む中で、港湾構造物の耐波設計においても数値シミュレーションが社会に貢献する役割は大きい。模型の製作や造波機の駆動に多くの資源やエネルギーを利用する模型実験に、計算機に使用する電力だけで実施できる数値シミュレーションが代替することができれば、環境負荷の軽減に貢献することができる。数値シミュレーションによる検討は、実験施設を持たない技術者や組織によっても実施が可能である。模型実験の実施には複数人による作業が必要であるが、数値シミュレーションは一人の技術者によって実施が可能であるため、少子高齢化による人口減少社会における人手不足の解消にも寄与する。そこで、耐波設計の分野において、模型実験から数値シミュレーションへの移行について検討を行った。

2. デジタルシフトの現状把握

耐波設計分野におけるデジタルシフトの現状を定量的に把握するために、日本の国の機関からの調査設計業務の業務件数とその内訳を調査した。調査対象の期間は2009年から2019年である。調査対象の業務件数は年平均で648であり、そのうち設計業務が79、数値シミュレーションが17、模型実験が15である。図-1に検討項目ごとの業務件数の変化を示す。波浪変形は模型実験より数値シミュレーションの業務件数が多く、デジタル化が進んでいる。越波は業務件数が少ない中で数値シミュレーションが模型実験より少ない。波圧波力は数値シミュレーションの業務件数が1件だけである。ブロック安定は数値シミュレーションの業務が皆無である。このように耐波設計に関する模型実験から数値シミュレーションへのデジタル化率は対象項目により異なる。

検討項目によって模型実験から数値シミュレーションへのデジタルシフトの進み具合に違いを生じている要因として、数値計算手法が開発されてからの経過年数の違いが考えられる。図-2は耐波設計に関する数値シミュレーションの変遷である。エネルギー平衡方程式と非線形波浪変形計算は研究開発の開始から10年程度で耐波設計に適用されている。VOFと粒子法(SPH, MPS)は研究

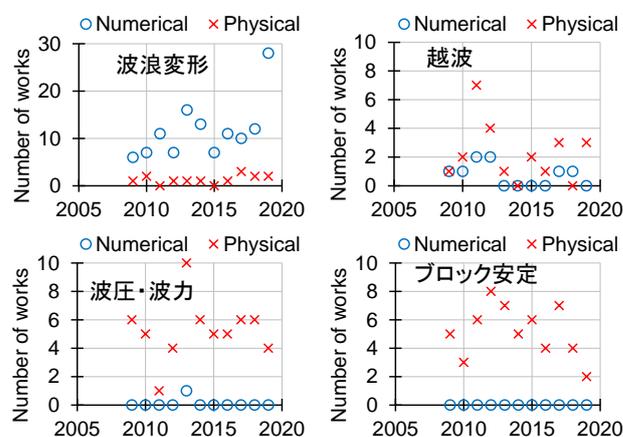


図-1 数値シミュレーションと模型実験の業務件数

開発開始が遅いわけではないが、耐波設計への適用には時間がかかっている。したがって、デジタルシフトに進み具合に違いを生じる要因は、数値計算手法の開発開始からの経過年数の不足ではない。

波浪変形以外の項目については模型実験から数値シミュレーションへのデジタルシフトが進んでいない。そこで港湾構造物の耐波設計に用いる模型実験から数値シミュレーションへの移行に関する考えについてヒアリングを実施した。ヒアリングの相手は、波浪変形の研究者、耐波設計の研究者、海浜変形の研究者、港湾行政の現職者とOB、民間企業の設計技術者と数値計算技術者である。ヒアリングにより、数値シミュレーションの現状として、①実験結果や現地データと一致するようにパラメータ調整が必要である、②越波の現象で打ち上がりやしぶきを再現することが難しい、③波圧の現象では空気を巻き込む現象の再現が難しい、④消波ブロックの安定を数値シミュレーションで取り扱うことは難しい、⑤3次元的な現象を取り扱うことはまだ難しい、と評価された。数値シミュレーションの信頼性の不足と計算時間の長さに対する指摘が多かったため、これら2点を改善できればデジタルシフトが進むと考えられる。

3. 数値シミュレーションの精度と計算時間

波浪変形、反射波、越波、伝達波、波圧についての数値シミュレーションを実施し、模型実験との比較により計算精度を評価するとともに、計算時間を確認した。計算機は耐波設計の実務に適用可能なものとして、デスクトップコンピューターを適用した。検討例として1:5勾配斜面における2次元波浪変形を図-3に示す。波浪条件は $H_{1/3}$ が14.4 cmで $T_{1/3}$ が1.49 sの不規則波である。数値シミュレーション手法は砕波係数¹⁾、VOF²⁾、非線形³⁾の3種類である。VOFと非線形は砕波点で波高が大きくなる模型実験の現象を再現できているが、砕波係数はできていない。計算精度はVOFと非線形は0.9を超えるが砕波係数は0.9を下回る。図-4に伝達波計算のセル数による計算精度と計算時間の変化を示す。計算領域の大きさは同じなので、セル数が多いほど計算セルが小さい。伝達波計算では、計算精度を向上させるために計算セルを細かくする必要がある。その結果としてセル数が多くなり、精度を高めるために多くの計算時間を必要とする。計算時間が長くなる要因として、セル数の多さ、計算対象時間の長さ、波浪条件の厳しさが挙げられる。それらの条件を考慮して計算負荷を表す指標として式(1)を提案する。計算時間間隔はクーラン条件を満たすように設定するので、波浪条件の厳しさは計算時間間隔で考慮される。図-5に計算負荷指標による計算時間と計算精度を示す。計算負荷指標によって計算時間を少ないバラツキ

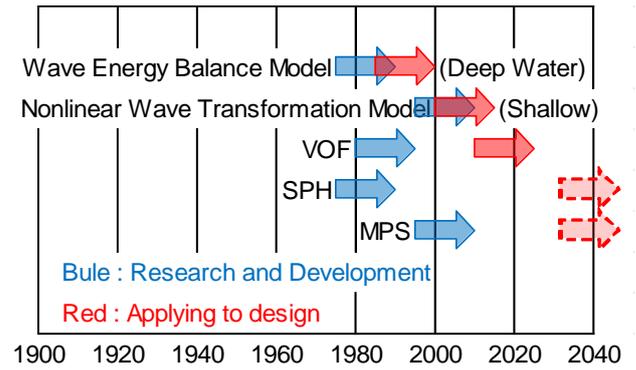
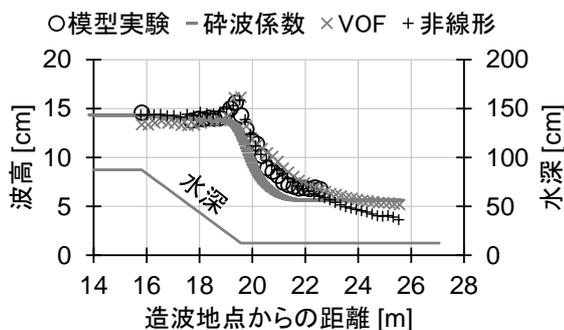
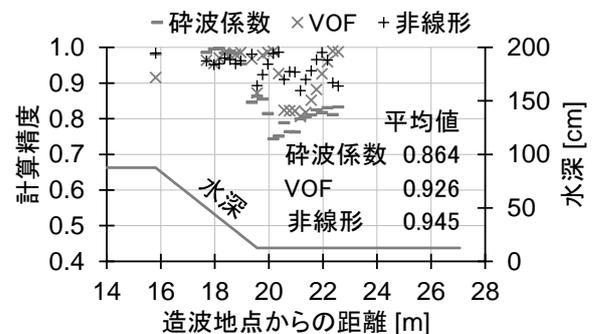


図-2 数値シミュレーションの変遷



(1) 有義波高の空間分布



(2) 有義波高の計算精度

図-3 2次元波浪変形の数値シミュレーションと模型実験の波高の比較および計算精度

で評価できている。計算精度については対象項目により結果に違いはあるが、対象項目ごとに、精度を高めるためには大きな計算負荷が必要である傾向を示した。

$$L_{Fr} = \frac{S_d}{S_c} \cdot \frac{T \cdot N_w}{\Delta t} \tag{1}$$

S_d : 計算領域の大きさ [m^2]or[m^3], S_c : セルの大きさ [m^2]or[m^3], $\frac{S_d}{S_c}$ = セル数,

T : 周期 [s], N_w : 波数, Δt : 計算時間間隔 [s], $T \cdot N_w$: 計算対象時間 [s], $\frac{T \cdot N_w}{\Delta t}$ = ステップ数

4. 数値シミュレーションと模型実験の消費エネルギー

造波機の駆動などに多くの電力を使用する模型実験と、計算機だけで実行できる数値シミュレーションの消費電力量を比較した。図-6に数値シミュレーションと模型実験の消費電力量を示す。模型実験の造波機は一般的な規模の造波水路で7.5kW、数値シミュレーションの計算機はデスクトップコンピュータの200Wとした。×印は1ケースの造波に必要な電力量である。計算時間の長さのために、予想に反して模型実験より数値シミュレーションの消費電力量が多くなった。数値シミュレーションの準備段階において消費電力量が必要な作業は通過波検定計算程度であるが、模型実験は、模型床製作、模型製作・設置、実験波の検定や、実験終了時の模型と模型床の撤去などでも電力を使用する。断面条件3種類×波浪条件3種類=9ケースで準備作業も含めて消費電力量を算定し、ケース数で割って1ケースあたりの消費電力量を求めたものが図-6の○印である。準備作業も含めると、模型実験から数値シミュレーションに移行することで消費電力量を削減できることがわかる。

5. 耐波設計における現状と将来予測

計算機性能の向上により計算時間が短縮される。図-7は年代の異なる計算機で同じ計算を実施した結果である。計算機の年代が進むと計算時間が短くなっている。

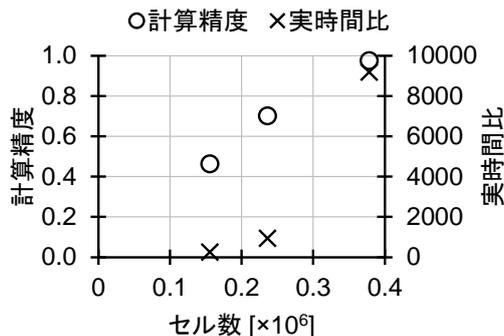


図-4 セル数と計算精度および計算時間

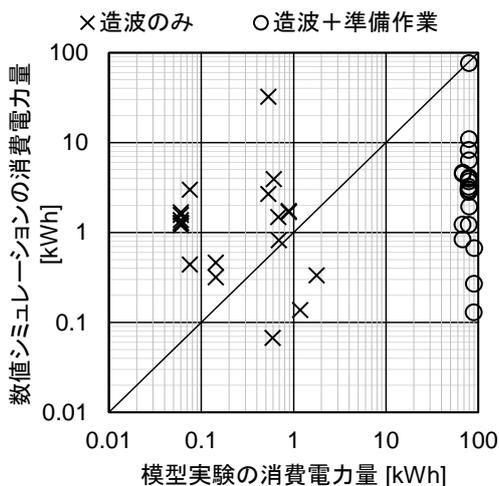


図-6 消費電力量

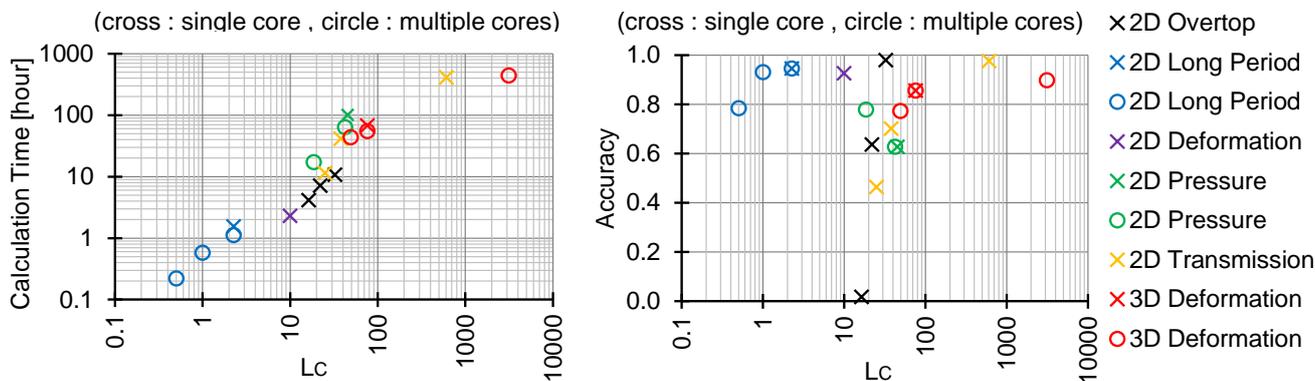


図-5 計算負荷指標と計算時間および計算精度

前述した国の機関からの調査設計業務の発注実績に基づき、デジタル化率の変化と将来予測を行った。デジタル化率は数値シミュレーションと模型実験の件数に占める数値シミュレーションの割合と定義した。Sigmoid 関数を一般化した式(2)に示す Logistic 関数によりデジタル化率の変化を再現して、将来予測を行った。

$$f(x) = \frac{L}{1 + \exp^{-\alpha(x-x_0)}} \quad (2)$$

L : $f(x)$ の最大値を決めるパラメータ

x_0 : S字カーブの変曲点の位置を決めるパラメータ

α : 最小値から最大値に至る増加の緩急を決めるパラメータ

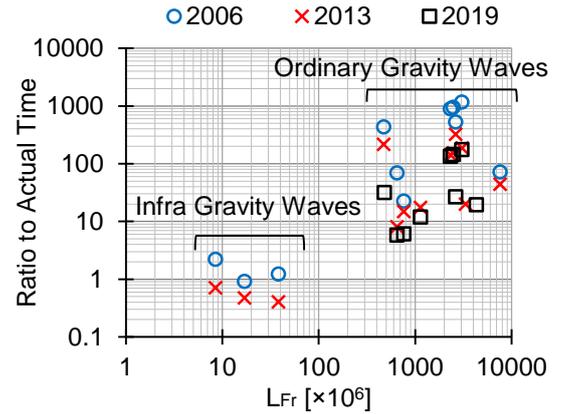
図-8 に波浪変形のデジタル化率の変化を示す。デジタル化が進んでも模型実験がある程度は残ることを考慮して、最大値を0.9に設定した。反射波や越波などの項目についても同様な解析を行い、それらの結果により図-9に示すようにデジタル化率の増加を予測した。

6. 結論

- (1) デジタルシフトを推進するために二つの視点が考えられる。一つは信頼性であり、計算精度を高めることで信頼性を高められる。二つ目は計算コスト（計算時間）である。計算精度を高めるには計算負荷が大きくなり、長い計算時間が必要である。
- (2) 計算負荷を表す指標を提案した。
- (3) 国の機関からの発注実績に基づき、デジタルシフトの将来予測を行った。
- (4) デジタルシフト達成の目標期間を示した。
- (5) デジタルシフトによる消費エネルギーの軽減を示した。
- (6) 数値シミュレーションへの移行に時間がかかる項目もある。したがって、今後も模型実験での検討や、数値シミュレーションと模型実験の併用が必要である。

参考文献

- 1) 合田良実：段階的碎波係数を用いた不規則波浪変形計算モデルの改良，海洋開発論文集，第19巻，pp.141-146，土木学会，2003.
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター：数値波動水路の研究開発，沿岸開発技術ライブラリー，No.12，296p., 2001.
- 3) 平山克也，岩瀬浩之，加島寛章：造波境界上の水深と方向スペクトルの空間変化を考慮した多方向不規則波の造波とその特性，港湾空港技術研究所報告，第51巻，第1号，pp.3-2，2012.



2006 : Pentium4, 2013 : Core i7 3rd, 2019 : Core i7 8th

図-7 計算機の年代による計算時間の比較

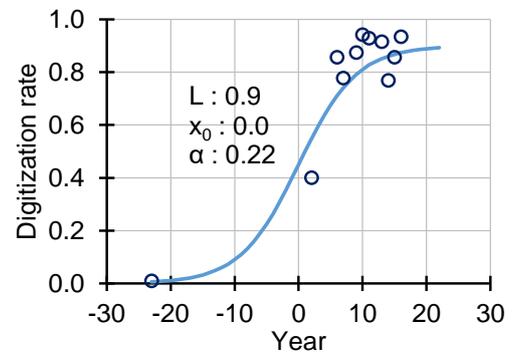


図-8 波浪変形のデジタル化率の変化

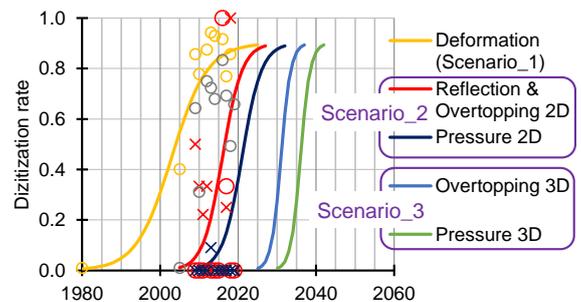


図-9 デジタル化率増加の予測