

数値波動水槽を用いた衝撃波圧に関する大規模計算

Large-Scale Simulations on Impulsive Wave Pressures by using CADMAS-SURF/3D

有川太郎¹・山野貴司²

Taro ARIKAWA, Takashi YAMANO

This report describes large-scale simulations on impulsive wave pressures using CADMAS-SURF/3D (Super Roller Flume for Computer Aided Design of Maritime Structure in 3D), which is a three-dimensional numerical wave tank under development. This code is also adapted to the parallel computing system and multi grid size system. Prediction of impulsive wave pressure using empirical formula is one of difficult problems. So, the tool for the practical use is needed to solve this problem. In this report, the validity of this model for predictions of impulsive wave pressures is verified. Large scale simulations are conducted by using the field data and the occurrence of impulsive wave pressures is discussed. At the last, the calculation cost is reported for the practical use.

1. はじめに

衝撃波圧が発生する条件は、高橋ら(1983)により提案されているが、衝撃波圧の発生ならびにその大きさを予測することは、防波堤の構造が複雑な場合や平面的に断面が違う場合などには、理論的・実務的に困難である。また、様々な構造について、水理模型実験を行うには、多くの費用的や時間的が必要となるうえ、さらに時空間的な計測が困難な場合もある。

一方で、数値水槽の研究開発も徐々に進み、経験則に基づかない砕波を含めた波浪変形計算手法が確立しつつあり、さらに計算機の発達により大規模な計算が可能となりつつある。そこで、著者らは、計算効率の良い実務適用に耐える数値水槽の開発を目指して、VOF法を用いた3次元数値波動水槽の開発を行ってきた(たとえば、2007)。本研究では、3次元数値波動水槽の計算効率について報告するとともに、実務にとって重要な衝撃波圧計算の適用性についての検討を行う。そのうえで、現地防波堤を対象とした大規模な波浪変形計算を行い、衝撃波圧の発生について議論した。

2. 計算効率について

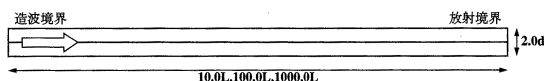
(1) 矩形水路ならびに平面水路における検討

今回検討に用いたシステムは、Pentium4の3.2GHz、Ramメモリ2GBのLinuxマシンを1GbitのEther Netで接続したシステムである。

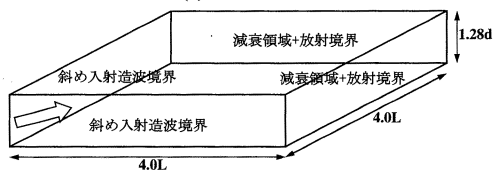
計算効率の検討を行うための計算ケースの一覧を表-1に示す。計算領域は断面計算問題と平面計算問題の2つを行った(図-1)。

表-1 計算ケース

名称	ステップ	格子数				計算領域
		x	y	z	合計	
C1	100	1,000	1	100	100,000	a
C2	10	10,000	1	100	1,000,000	a
C3	2	100,000	1	100	10,000,000	a
P1	100	100	100	16	160,000	b
P2	10	200	200	32	1,280,000	b
P3	2	400	400	64	10,240,000	b



(a) 断面計算領域



(b) 平面計算領域

図-1 計算領域

(2) 計算効率の検討結果

効率検討の結果を表-2に示した。表中のP数とはプロセッサ数、また(計算時間-通信時間=C)とし、計算速度において、計算時間全体で1プロセッサと比較したものをD、Cで比較したものをEとした。並列効率は、DとEをプロセッサ数で割ったものである。これが100であれば効率的な計算をしていることを示す。

計算時間全体としては、C2のケースを除いて8CPUで並列効率が50%程度になることがわかる(図-2(a))。一方で、通信時間を除いた計算時間は、ほぼプロセッサ数に線形比例することがわかる(図-2(b))。

よってCPUの数を増やし、計算領域を小さくすることで、1CPUでの計算負荷が下がり計算時間は速くなるが、通信に時間をとられた結果として、CPU数が増えた分だ

けの効率が得られていないことがわかる。

ここでP3のケースを基に、計算時間はCPU数に応じて線形に減少し、一方で通信時間はCPU数に応じて増加すると仮定すると図-3のようになる。16CPUにした場合、通信時間が計算時間を越え、全体計算時間が8CPUよりも悪くなり、32CPUにすると1CPUとほぼ変わらないという結果になる。これは、通信時間に時間をとられ、並列効率(D/n)が減少するためである。従って本システムでは、1000万格子程度の計算領域の場合、8CPU以上用いても効率が悪いと予想される。

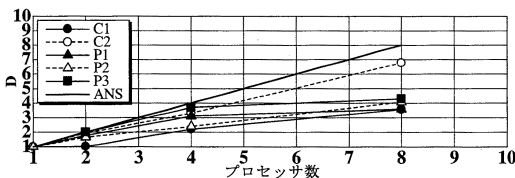
このことから、本計算プログラムを用いて数千万格子の大規模計算を行う場合には、通信時間がネックとなることから、通信時間を短縮するため、メモリ空間を共有しているSMPシステムのほうが適していることがわかる。

表-2 計算効率の結果(平面問題(ケースP))

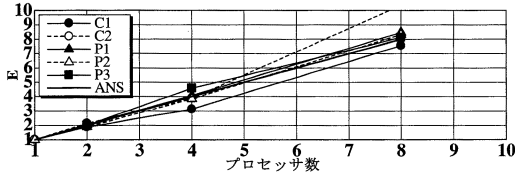
名称	P数	計算時間(h)			計算速度		並列効率	
		全体時間(A)	通信時間(B)	A-B(C)	A1/An(D)	C1/Cn(E)	D/n*100	E/n*100
1	1	145.51	0.04	145.57	1.00	1.00	100.00	100.00
	2	82.77	11.19	71.58	1.76	2.03	87.90	101.61
	4	46.84	11.14	35.70	3.11	4.07	77.66	101.87
	8	40.54	23.36	17.18	3.59	8.47	44.87	105.84
2	1	129.17	0.00	129.17	1.00	1.00	100.00	100.00
	2	78.17	9.38	68.79	1.65	1.88	82.62	93.89
	4	53.81	20.19	33.62	2.40	3.84	60.01	96.05
	8	31.77	16.25	15.52	4.07	8.32	50.82	104.04
3	1	-	-	-	-	-	-	-
	2	188.37	5.94	182.43	2.00	2.00	100.00	100.00
	4	101.72	21.99	79.73	3.70	4.58	92.59	114.40
	8	87.59	42.66	44.93	4.30	8.12	53.76	101.51

注1) 白抜き数字は理論性能がだものと仮定

注2) 一部はメモリ不足で計算できなかったことを示す。



(a) 計算速度比(D)の比較



(b) 通信を除く計算時間比(E)の比較

図-2 計算効率とプロセッサ数の関係

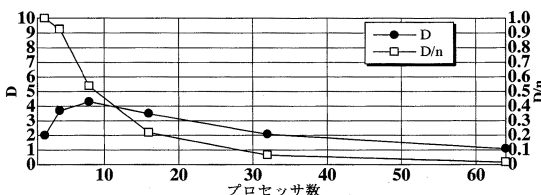


図-3 並列計算速度の予測(ケースP3)

3. スパイクノイズ処理の適用性

(1) スパイクノイズの発生原因と対策

スパイクノイズとは、構造物に作用する波圧を計算する際に発生する数値ノイズのことを言う。極端に大きい数値ノイズが局所的に発生するため、特に衝撃波圧のようなピークの鋭い波形が発生する場合、数値ノイズと衝撃波圧の区別が困難となる。

特に本計算システムで採用しているVOF法を用いた単相モデルにおいては、数値ノイズが顕著に発生することがわかっている(有川ら, 2001)。

VOF法では、計算領域の各セルを、液相セル、気相セルならびに表面セルに区分する。液体を対象とした単相計算においては、液相セルのみ計算をし、そこでの連続式、運動方程式を満たすように計算する。表面セルは、表面の圧力として大気圧を設定し、流速については、外挿補間するか、勾配ゼロにする。気体セルは、計算されないセルとなる。よって、表面セルならびに気体セルについては、基礎方程式を満足しない。そのため、図-4のように気体が流体の中に取り込まれる状態になると、中の表面セル・気体セルについては計算されないため、その気体の中に流体が流れ込み、表面セル・気体セルが流体セルに変化した場合、圧力ならびに連続式を満たしていない流体セルが突然現れるため、スパイクノイズが現れることとなる。

そこで有川ら(2001)では、相の変化が生じたときに、ボアソン方程式を繰り返し回す処理を行う方法を提案し、2次元問題においてその妥当性を確認した。

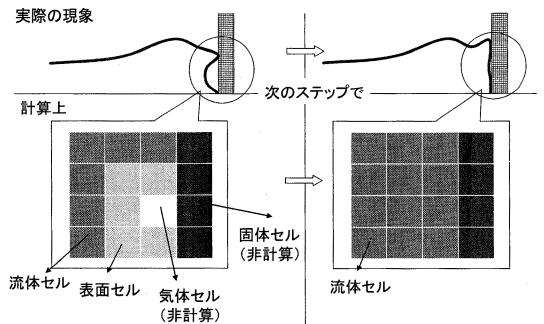


図-4 スパイクノイズの発生原因

(2) 3次元計算での適用性

2次元計算でのスパイクノイズ処理が3次元計算でも適用できるかどうかを確認するために、2次元水路に幅を持たせた3次元計算を行った。

妥当性を確認するため、高橋ら(1983)が行った実験を用いて比較した。この実験は、長さ160m、幅1m、深さ1.5mの長水路で行われており、この水路に海底模型

を砂および厚さ5cmのセメントモルタルで形成し、その上に波圧測定用の直立壁を設置している。海底の斜面勾配は3/100と1/10の2種を対象としている。図-5は海底勾配3/100の場合である。斜面から水平床に変わる位置(水平床前端)より直立壁までの距離を水平距離 B_1 で表し、 B_1 を0~700cmの間で変化させている。図-6は波圧測定用の直立壁の図である。

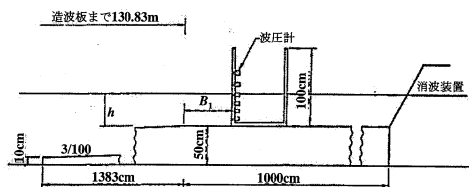


図-5 実験模型(3/100勾配)

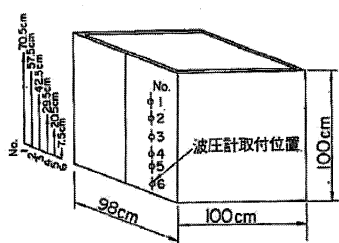


図-6 波圧測定用直立壁

(3) 計算条件

実験条件の中から、直立堤前の斜面勾配1/10のケースを用いた(図-7)。造波位置から直立堤までの長さは計算時間の関係から水理模型実験よりも短くしている。護岸前面では、x方向の格子サイズを2cmとした。計算格子間隔などは、有川ら(2001)と同条件とした。また、y方向の格子は、2cmとして、格子数は5個とした。

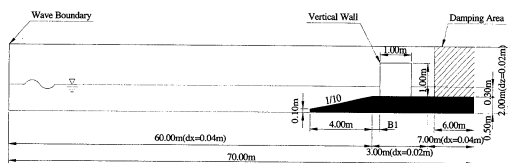


図-7 計算領域(x-z断面)

(4) 2次元版との比較

$T=3s$, $h=30cm$, $H=35.1cm$, $B_1=25cm$ および $50cm$ の結果を2次元版と3次元版とで、図-6におけるNo.4の位置にある波圧の時系列を比較したものが、図-8である。実線が3次元版であり、点線が2次元版である。これを見ると、ほぼ同程度の衝撃波圧と作用時間であることがわかる。また、さらに、若干3次元版のほうが、細かいノイズが少ない場合が多い。 $B_1=25cm$ の19.5s付近に現れているように、細かいノイズは下向きにでているものであり、こ

れは、気泡の圧力設定ができていないことが要因と考えられるが、3次元計算のほうが、気体セルから流体セルに変更されるような現象が少ない可能性がある。これは、2次元のときのように、気体セルが周りの流体セルから押しつぶされるような条件が、3次元の計算では生じにくいと考えられる。

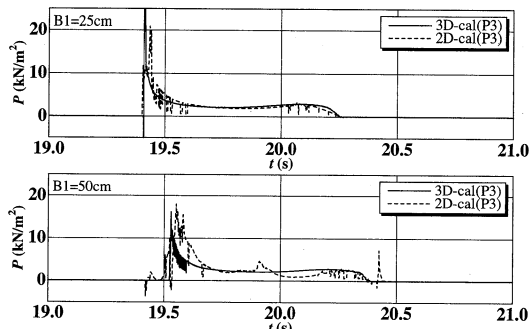


図-8 波圧の時系列の比較 ($C_f=25cm$ (上), $50cm$ (下))

(5) 波圧の比較

波圧強度について、実験と比較したものが図-9である。図の値は1波ごとの波圧強度を表している。波圧強度の計算結果が実験より定性的には低めにでているものの、ほぼ実験値と整合していることがわかる。

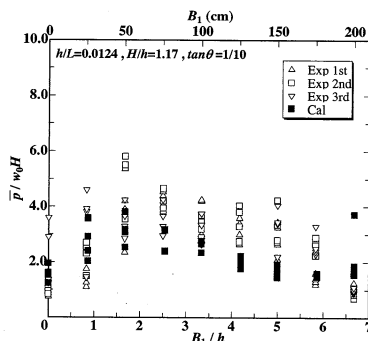


図-9 波圧強度の比較

4. 現地計算への適用

3章において、本モデルの数値ノイズ処理は、実務適用可能なレベルにあることを確認した。そこで、実際に現地港湾防波堤に適用し、大規模な計算においても、数値粘性などによる影響がなく、衝撃波圧が発生するかどうかを検討する。また、大規模計算や実務計算においては、計算効率は重要な課題であるため、計算時間に関して若干の考察を加える。

(1) 計算条件

K港において、低気圧により高波の来襲により防波堤ケーソンの一部が破壊され、その破壊状況から衝撃碎波圧が発生したことが予想されるため、その防波堤の平面構造を用いて計算する。

図-10に計算領域を示す。造波方向(x)に370m, 防波堤に沿う方向(y)に450m, 鉛直方向(z)に50mの数値水槽とした。格子間隔については, x方向については図に示す通りであり, 防波堤近傍で0.5mとし, 他の場所については1mとした。y方向は1m, z方向は0.25mの等間隔とした。格子数は, x方向に440個, y方向に450個, z方向に200個とし, 総格子数は, 39,600,000個である。斜線部には, エネルギー吸収帯を設け, 境界部からの反射を抑えている。防波堤は, 全部で13函設置しており, 1函はy方向に25mである。No.8のケーソンを除いたケーソンの断面の構造を図-11に示す。No.8のケーソンは, 図-12に示す通り半没水上部斜面堤となっている。また, No.8ケーソンにおいては岸側に3.5m後退している。波浪条件は, 現地で被災時に来襲したと推定される波で数波計算した。水深25.9m, 周期12.4s, 波高13.9m, 入射角度は図-10に示されるとおり, 直入射を0度とし, 時計回りで8.3度とした。

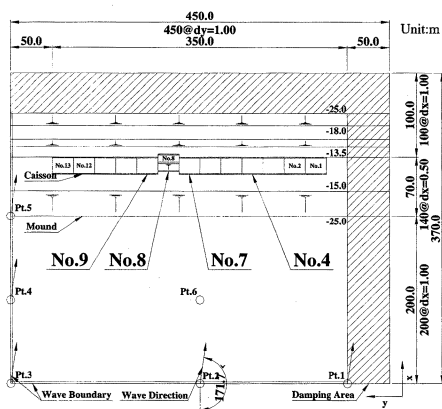


図-10 計算領域(x-y平面)

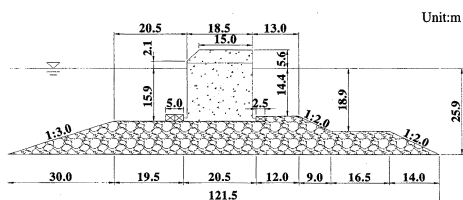


図-11 ケーソン断面(No.8以外のケーソン)

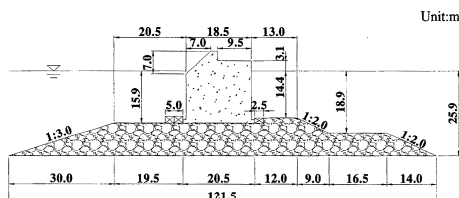


図-12 ケーソン断面(No.8)

(2) 各函に作用する水位および波圧の時系列

図-13に防波堤前面の水位の時系列を示す。各ケーソンにおいて砕波後の波が作用していることがわかる。図-14は, 各ケーソンの中心部静水面の点における波圧の時系列波形である。No.1, No.2, No.8の防波堤以外では, 衝撃砕波圧が発生していることが確認できる。

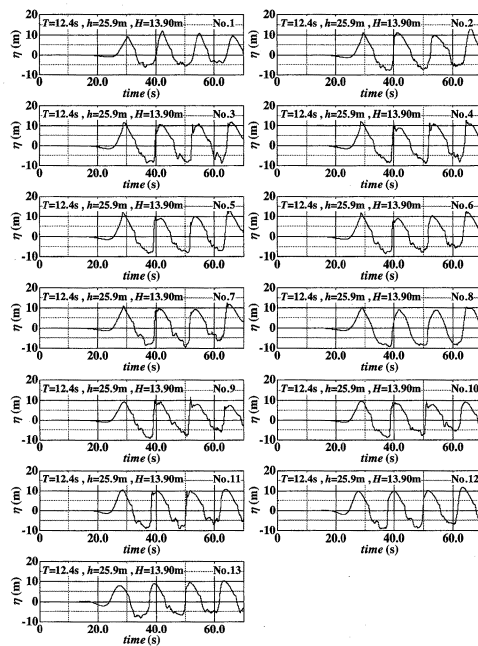


図-13 防波堤前面の水位の時系列

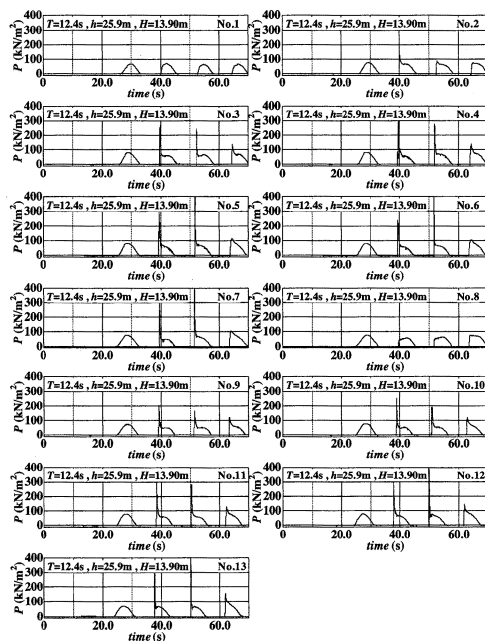


図-14 防波堤に作用する波圧

(3) ケーソンのずれに関する考察

No.8は、被災前から滑動していたため、仮にNo.8ケーソンが所定の位置にあった場合における波圧の比較を図-15に示す。No.8がずれることにより、特にNo.7に作用する衝撃波圧が1.5倍程度になった。実際にはNo.9のみが破壊したが、これらの結果から、ケーソンの平面的な配置・形状の違いにより衝撃波圧が大きく変化し、波向き等によっては、十分にNo.9だけ破壊するという可能性が考えられるということである。

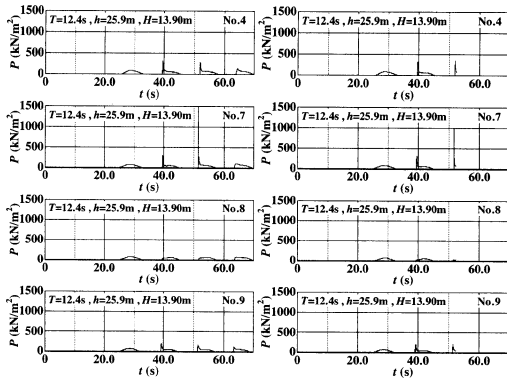


図-15 波圧比較(3.5m ずれ(左), ずれなし(右))

(4) 防波堤に作用する波の様子

図-16に全13箇のケーソンに作用する砕波の空間波形を示し、半没水ケーソン (No.8) 近傍の砕波の様子を図-17に示す。斜め方向から波がケーソンに作用し、そこで大きなスプラッシュが生じていることがわかる。

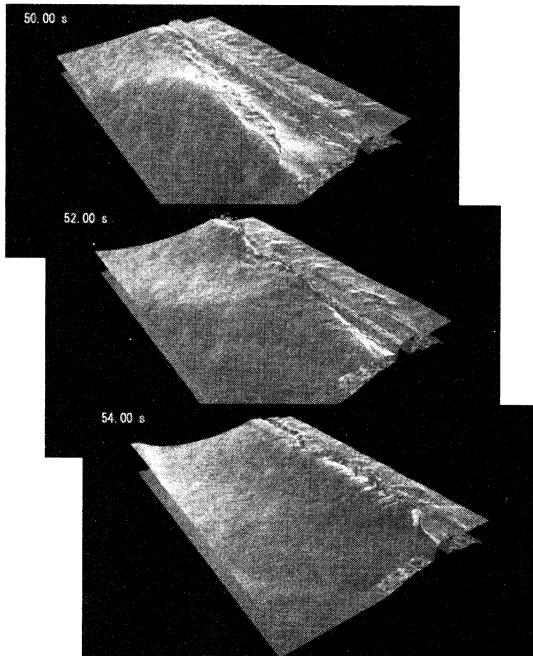


図-16 砕波変形計算結果 (t=50~54s)

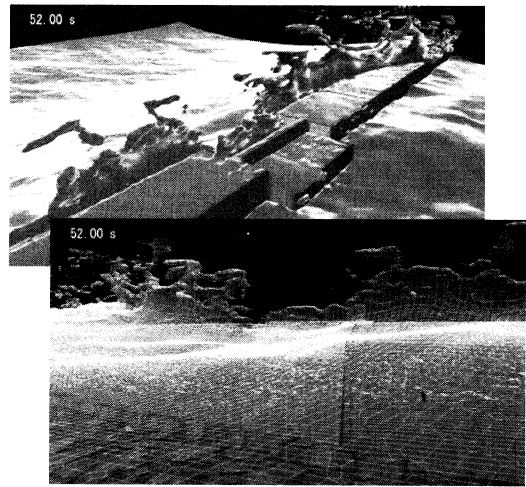


図-17 砕波変形計算結果(No.8ケーソン背面(上), 前面(下))

(5) 計算効率について

2章の考察から、ALTIX450 (SGI製) のSMPマシーンを用いた。プロセッサは、デュアルコアItanium²プロセッサ1.6GHz, 72core並列させたものである。そのシステムで36コア用い、図-10で示す約4,000万格子での計算時間等を表-3に示す。総計算時間は22.5日、総ステップ数は16,846であった。よって、約115s/stepであった。所持している汎用機システムでは計算できない計算格子数であったため、単純に比較することはできないが、通信時間は非常に小さく抑えられていることがわり、本システムでは、CPU数の増加とともに計算速度を小さくすることが予想され、今後のシステム構築の参考となる。

表-3 大規模計算の計算時間

P 数	サブ 数 (S)	ステップ 数		計算時間(s)		
		計算ステップ (ST)	総ステップ 数 (=ST×S)	全体時間 (A)	通信時間 (B)	A-B(C)
36	2	8423	16846	1944884.95	45219.72	1899665.23

5. まとめ

衝撃波圧を計算する際に問題となる数値ノイズ処理の3次元への適用を図り、妥当性を確認した。また大規模計算の実施を行い、衝撃波圧による被災状況を定性的に説明するとともに、計算効率について考察した。

参 考 文 献

- 有川太郎・磯部雅彦・高橋重雄(2001): VOF法を用いた衝撃砕波圧の計算と適用性, 海講論文集, 第48巻, pp.831-835.
有川太郎・山野貴司・秋山実(2007): 数値波動水槽における砕波変形計算の高精度化, 海講論文集, 第54巻, pp.71-75.
高橋重雄・谷本勝利・鈴村諭司(1983): 直立壁に作用する衝撃波圧の発生機構に関する一考察, 港研報告, 22巻, 4号