那覇港静穏度対策で用いる波浪変形計算法の現地観測による検証

VARIDATION OF WAVE TRANSFORMATION MODEL EMPLOYED IN NAHA-HARBOR PLANNING BY FIELD OBSERVATION

津田修一[1]・知念正吉[2]・内間和秀[2]・平石哲也[3]・平山克也[3]・春尾和人[4]
Shuichi TUDA, Masayoshi CHINEN, Kazuhide UCHIMA,
Kazuto HARUO, Katsuya HIRAYAMA, and Tetsuya HIRAISHI

[1]非会員　沖縄総合事務局　那覇港湾・空港整備事務所（〒900-0001 沖縄県那覇市港町2-6-11）
[2]非会員　前　沖縄総合事務局　那覇港湾・空港整備事務所（〒900-0001 沖縄県那覇市港町2-6-11）
[3]正会員　博(工)　(独)港湾空港技術研究所　海洋・水工部（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）
[4]非会員　(独) 港湾空港技術研究所　海洋・水工部（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）

The Naha-harbor in Okinawa-Prefecture is located in a coastal region with coral reef where the wave transformation due to wave refraction, diffraction, shoaling and breaking are induced. The present harbor planning has been carried out employing only the wave diffraction calculation with a uniform water depth. Therefore the wave heights designed in some quay walls may differ from the practical wave situation. In the paper, a new wave simulation in the harbor area is carried out employing the new Boussinesq form named NOWT-PARI to evaluate the effect of an offshore permeable type breakwater with good accuracy. The simulated results are validated by the field observation carried out after the implementation of the breakwater in 2007.

Key Words : *NOWT-PARI, wave transformation model, field observation, permeable breakwater, coral reef*

1．はじめに

那覇港港湾計画に基づき算定された従来の回折計算などによる評価結果によると，那覇港浦添ふ頭地区岸壁(-7.5m)の前面泊地は，十分な静穏度が確保されているはずであった．しかしながら，当該施設の利用にあたっては荷役障害が度々発生し，期待された港湾機能が十分発揮されていない状況である．この原因の一つには，浅瀬やリーフなどの複雑な海底地形上に建設された那覇港では，港内で生じる複雑な波浪変形が当時の波浪変形計算において十分考慮されていなかったことが推測される．

そこで，平成 17 年度には砕波・遡上計算が可能なブシネスクモデル（NOWT-PARI，Ver.5.2）[1]を用いて，平成 17 年度に取得した現地波浪観測データに対する再現計算を行うとともに，対象岸壁に対する静穏度解析を行った[2]．さらに静穏度対策工についても検討を行い，効果や事業実現性の観点から，浦添ふ頭地区の内防波堤北前面の浅瀬上に消波ブロックによる仮設透過堤を設置することを提案した．この検討結果に基づき，平成 18 年度には，浦添ふ頭地区岸壁(-7.5m)の静穏度対策工として消波ブロックによる仮設透過堤の施工を行い，さらに透過堤の効果を検証するために，平成 17 年度と同様な現地波浪観測を実施した．本研究では，このように透過堤の施工前後で観測したデータを用いて透過堤の効果を検証するとともに，砕波・遡上モデルに加え，透水層モデルが組み込まれたブシネスクモデルを用いて，浅瀬上に設置された透過堤による波浪低減効果，および浦添ふ頭地区の各地点で観測された有義波高の再現を試みた．

2．現地波浪観測

(1) 那覇港浦添ふ頭地区

静穏度解析の対象となる岸壁(-7.5m)が位置する浦添ふ頭地区は，浦添第一防波堤 1,350m と新港第一防波堤 3,220m からなる港口部（倭口），および浦添ふ頭地区を囲む内防波堤北 340m と浦添第一防波堤からなる港口部（浦添口）を有し，沖波はこれらの港口部から浸入すると考えられる(図-1)．

また，内防波堤北前面には水深 2m 程度の浅瀬が

あり，特に浦添口から浸入する周期の長い波はこの浅瀬で屈折し浦添ふ頭地区へ浸入しやすくなる．そこで平成 18 年度には，この浅瀬上に消波ブロックによる仮設透過堤が施工された．

浦添ふ頭地区施設配置図を**図-1** に示す．なお，図中の St.1～St.5 には，平成 17 年度および平成 18 年度に浦添ふ頭地区で実施した現地波浪観測地点を示す．

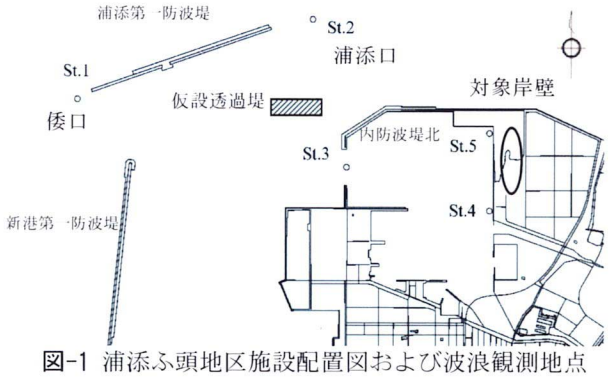

図-1 浦添ふ頭地区施設配置図および波浪観測地点

(2) 現地波浪観測の概要

現地波浪観測は，岸壁の荷役障害が著しい冬季の**表-1** に示す各期間において，各地点の水位と水平 2 成分流速データをサンプリング間隔 0.5 秒で連続観測した．

観測地点のうち，St.1 は浦添第一防波堤倭口付近，St.2 は浦添第一防波堤浦添口付近，St.3 は浦添ふ頭地区港口部，St.4，St.5 はそれぞれ浦添ふ頭地区岸壁前面の南側と北側である．ただし，平成 17 年度の波浪観測では，対策工検討段階であったため St.2 の観測は行っていない．そこで，平成 17 年度に観測されたであろう St.2 の波高は，後述するように各地点の波高相関をもとに推定した．

このようにして観測された各期間(年度)，各地点の有義波高の変化を**図-2** に示す．平成 17 年度の St.1 の波浪観測記録をみると，1 月 6 日～8 日，2 月 2 日，4 日に 3.0m を越える時化が観測されている．同様に平成 18 年度 St.1 の波浪観測記録をみると，1 月中に有義波高が 2m を越える時化が連続して 5 回観測されており，特に 2 月 1 日から 2 日にかけては，有義波高が最大 4m 程度となる高波浪が観測されている．

表-1 波浪観測期間

平成17年度	平成17年12月28日～平成18年2月6日 (ただし，平成18年1月13日～平成18年1月20日は欠測)
平成18年度	平成19年1月11日～平成19年2月23日

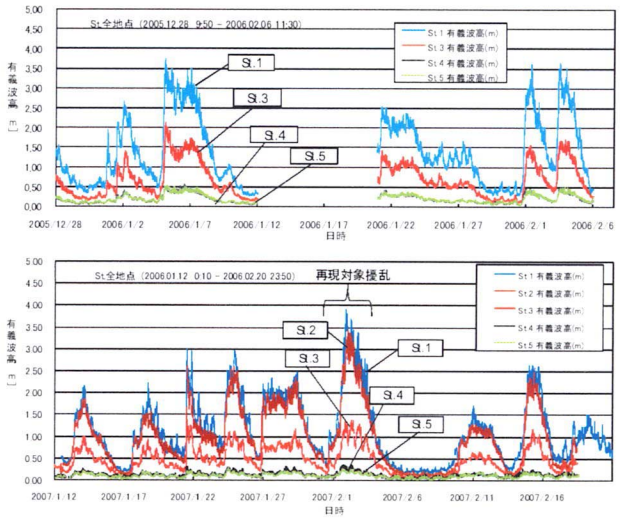

図-2 有義波高

(3) 透過堤による波浪低減効果の確認

内防波堤北前面の浅瀬に設置された透過堤による波浪低減効果を確認するために，透過堤が設置される前後の年度に取得された現地波浪観測データのうち，主に浦添口からの浸入波を捉えたと考えられる St.2 および St.3 で観測された有義波高の相関関係をそれぞれ調べ，それらの違いを確認した．

ここで，透過堤設置前の平成 17 年度に観測されたであろう St.2 と St.3 の有義波高の相関関係は，まず，平成 18 年度の St.1 と St.2 の相関関係(相関係数；St.2 / St.1 = 0.872)が平成 17 年度も同様であったと仮定し，これと，さらに平成 17 年度の St1 と St3 の相関関係(相関係数；St.3 / St.1 = 0.486)を用いて推定した(**図-3**)．この結果，相関係数は St.3 / St.2 = 0.486 / 0.872 = 0.557 であった．一方，透過堤設置後の平成 18 年度に観測された St2 と St3 の相関係数は，St.3 / St.2=0.457 であった(**図-4**)．これらの比をとると，0.457/0.557＝0.82 であり，したがって，透過堤の効果は 2 割程度であることを確認した．ところで，平成 19 年度に別途実施された荷役業者へのヒアリングでは，透過堤設置以前に比べ港内が静穏になり，荷役稼働率が向上したという調査結果が得られていたことから，これらの考察は概ね妥当であると考えられる．

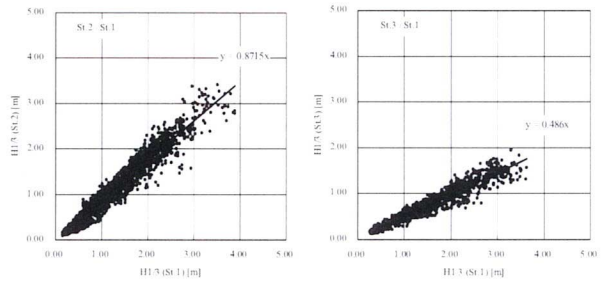

図-3 H18 年度 St.1 と St.2 および H17 年度 St.1 と St.3 の相関関係

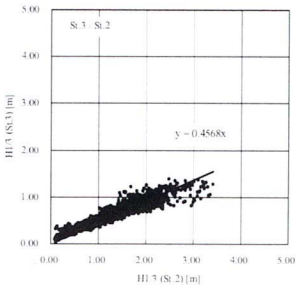

図-4 H18 年度 St.2 と St.3 の相関関係

3．モデルの検証

(1) モデルの概要

本研究では，水深2m程度の浅瀬上に設置された透過堤による波浪低減効果を定量的に把握することを目的としている．したがって，海底面の露出をも許容する砕波・遡上モデルに加え，透水層による任意反射境界処理法を備えた最新ブシネスクモデル（NOWT-PARI，Ver5.2）を用い，さらに，これを透過堤による波の透過・反射計算に応用する手法を開発した．

すなわち，消波ブロックが施工された防波堤や護岸では，水深や入射波の諸元に応じて振幅が異なる反射波（反射率：K_r）が形成される．消波構造の物理量に基づいて客観的にモデル化した任意反射境界処理法を用いた計算では，模型実験で得た反射率を自動的かつ適切に再現することが検証されている[3]．そして，各種の消波構造物が設置された実際の港湾を対象とした波浪変形計算では，屈折，回折変形とともに，港湾構造物による波の部分反射を正しく算定して，実験結果をよく再現できることが確認されている[4]．

ここで，消波ブロックを積み重ねて成形した透過堤は，入射波に対して沖側だけでなく岸側にも，ある法面勾配で設置された消波工とみなすことができる．そこで，消波工の法面高さの変化を透水層内空隙率の水平方向の変化に置き換えるという，従来と全く同様な手法により，透過堤による反射および波浪低減機構を物理的に表現することを試みた．

(2) 事象の抽出

2 章で述べた現地波浪観測のうち，透過堤設置後の平成 18 年度に得られた浦添ふ頭地区各地点の有義波高および有義波周期に対し，NOWT-PARI（Ver.5.2）による再現計算を実施し，当該モデルの計算精度を検証した．

対象とした波浪は，冬季風浪により那覇港の港内外が最も擾乱した2007年2月1日午後15時頃より2月2日4時頃までの期間で，ピークを含む3時刻とした（図-2参照）．これら3時刻に得られた各観測地点の有義波高と有義波周期を表-2に示す．なおこの観測期間中の那覇港NOWPHASデータは欠測のため得られていない．

これらの解析に用いた各時刻より100分間の時系列波形は，ローパスフィルター処理を施し周期5s以下を除去したものであることに注意されたい．これは，再現計算に用いたブシネスクモデルでは，計算容量や計算時間の制約などにより，極端に細かな計算格子を設定することができず，また少なくとも現時点では，高々周期4s程度の港内発生波の発生，伝搬を考慮することは困難であるため，再現対象である観測値から予めこれらの影響を除外しておくためである．

なお参考までに，選定した3時刻において各地点で観測された周波数スペクトルを図-5に示す．

表-2 再現対象の波浪諸元，

No	年月日	時刻	波向	St.1		St.2		St.3		St.4		St.5	
				H1/3[m]	T1/3[s]	H1/3[m]	T1/3[s]	H1/3[m]	T1/3[s]	H1/3[m]	T1/3[s]	H1/3[m]	T1/3[s]
1	2007.2.1	15:50	NNW	2.37	7.2	2.24	7.1	0.88	7.1	0.26	7.3	0.2	7.4
				2.71	6.8	2.62	6.9	1.05	6.1	0.31	5.6	0.23	5.4
2	2007.2.1	21:30	NW	3.41	8.5	2.69	8.5	1.07	8.5	0.24	8.0	0.16	8.8
				3.90	8.2	2.84	7.9	1.35	8.2	0.31	4.9	0.19	6.7
3	2007.2.2	3:50	NW	2.79	9.0	2.81	9.3	0.92	8.9	0.21	7.6	0.13	9.9
				2.97	8.5	3.37	9.5	1.06	7.5	0.24	7.0	0.17	5.9

※網掛けは全周波数成分を用いて算定される波浪諸元を表す。

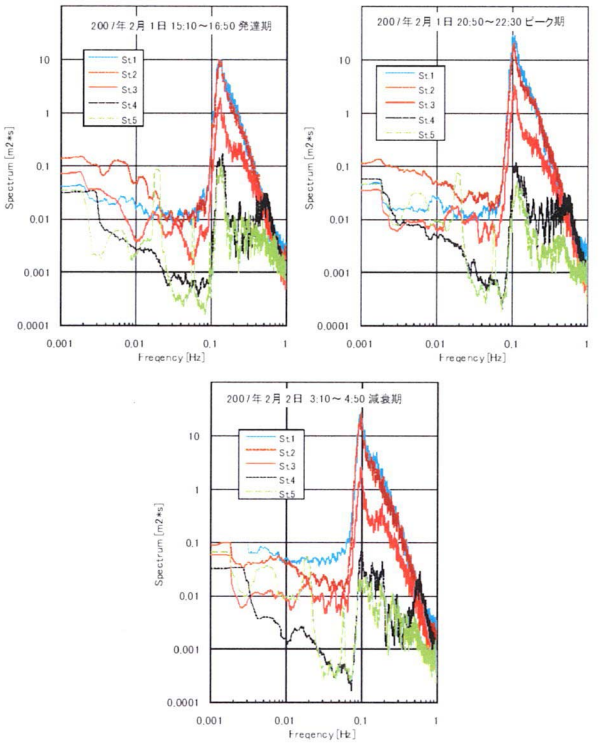

図-5 周波数スペクトル

(3) 計算条件の設定

再現計算に用いた入射波条件および計算領域をそれぞれ表-3，図-6に示す．

再現対象とした観測事象に対する沖波および波浪変形計算の入射波条件には，エネルギー平衡方程式法を用いた波浪変形計算により，まず沖波を逆推定し，次にそれを用いた順解析によりブシネスクモデルの入射波条件を設定した．ここで，沖波を逆推定

する際の基準とする観測地点はSt.2とした．これは，再現対象とした波浪事象の波向NW，NNWは，検討の結果，St.1がある倭口よりもSt.2がある浦添口から入射してくる比率が高かったためである．なお，複雑な海底地形に入射する多方向不規則波の波浪変形をブシネスクモデルで計算する場合には，計算格子軸に対して斜めに進行する波に対する差分誤差による波高の減衰が懸念される．そこで，実際にブシネスクモデルに与えた入射波諸元は，エネルギー平衡方程式で得られた波高よりも1～3割程度増幅させている．

一方，入射境界上の水深は50m（一定）とし，ここから1/20勾配斜面により計算領域内の海底地形にすりつけた．

透過堤を表現する透水層モデルの各パラメータは**表-4**に示すように設定した．すなわち，現地の仮設透過堤に使用した消波ブロックは，将来移設可能な積み方をしているため，一般的な積み方ではない．また，透過率は，現地で計測をしていないので不明なため，再現計算では抵抗係数α_0，β_0を変化させて港内波浪変形計算を実施し，その違いを考察することとした．

再現計算で設定したその他の計算条件は**表-5**に示すとおりである．とくに差分時間間隔はΔt=0.05s，計算格子はΔx=5mとした．

表-3 入射波条件

No.	年月日	時刻	沖波			入射波		
			波向	HI/3[m]	TI/3[s]	波向	HI/3[m]	TI/3[s]
1	2007.2.1	15:50	NW	2.32	7.1	NW	2.97	7.2
2	2007.2.1	21:30	NW	2.86	8.5	NW	3.45	8.6
3	2007.2.2	3:50	NW	2.99	9.3	NW	3.36	9.4

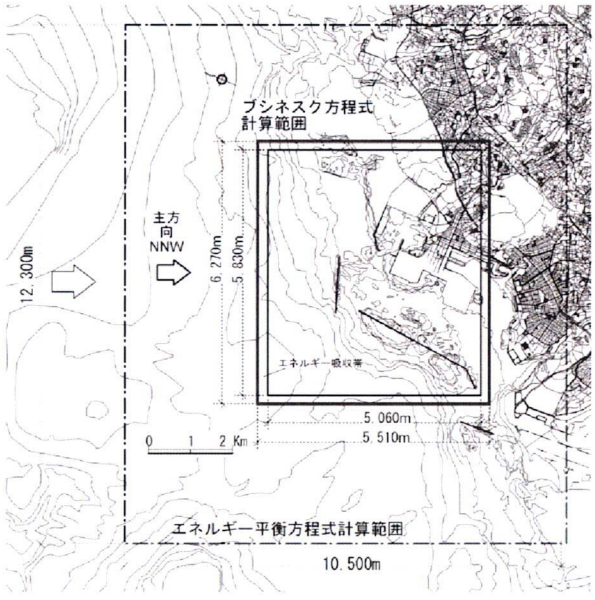

図-6 計算領域

表-4 検討ケース

項目	設定値		
検討内容	層流・乱流抵抗係数を変化させた		
堤体幅	天端幅32m、底面幅52m		
層流抵抗係数：α_0	300	1200	3000
乱流抵抗係数：β_0	1.2	1.7	2.8
備考	—	整積	—

表-5 計算条件

主方向	NNW
格子間隔	5.0 [m]
格子数	1103×1247
時間間隔	0.05 [s]
Smax	25
成分波数	512
砕波計算	有り
砕波指標	0.5
底面摩擦係数	0.02
最低水深	遡上計算が可能
沖側水深	50.0 [m]
有効造波時間	1025 [s]

(4) 計算結果

例として2007年2月1日の21:30に観測された波浪に対する港内外の有義波高分布の計算結果を**図-7**に示す．

St.1～St.5で得られた現地観測結果（5s以下の成分波を除く）と計算結果のうち，有義波高の比較を**図-8**に示す．ここで有義波高は，観測値，計算値ともに，各地点で得られた水面波形に対してゼロアップクロス法により算出したものである．また，特に計算値に対しては，空間的なバラつきの影響を排除するために，現地波浪観測点を中心とした25m四方の範囲（計算格子で5×5格子）で得られた有義波高の平均値として定義した．

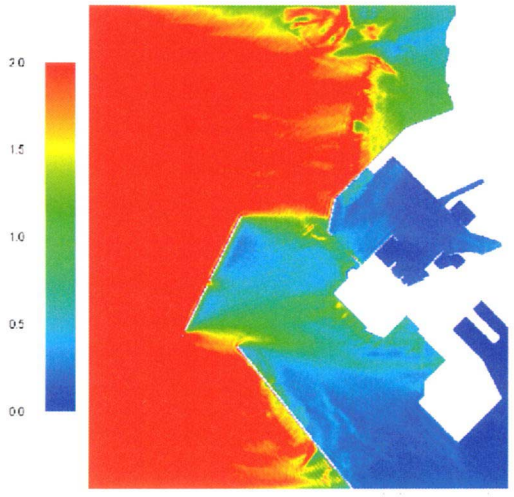

図-7 波高分布図

図より，すべてのケースで再現計算の精度は概ね良好であるものの，浦添ふ頭地区入口の St.3 およびそれら岸壁前面の St.4，St.5 では，いずれのケースでも計算結果が観測結果より小さめの値を示した．ここで，透過堤設置以前の平成 17 年度における現地波浪の再現計算結果ではより良好な再現精度が得られていたことを踏まえると，これらの原因としては，透過堤による波浪低減効果をやや過大に見積もったことが疑われた．なお，透過堤を設置した再現計算結果の中では α_0=300，β_0=1.2 としたケースにおいて最も観測値に近い波高値が計算された．

4．再現計算の精度向上に向けた考察

透過堤を表現した透水層モデルの抵抗係数 α_0，β_0 を変化させた検討では，透過堤による波浪低減効果が効き過ぎて，現地観測値に比べ，計算値は小さい値となった．そのため，次のように条件を変更して，再度，再現計算を実施した．

①抵抗係数は α_0=300，β_0=0.3 とする．

②底面幅を天端幅と同じ 32m とする（直立透過堤をイメージ）．

③空隙率は，0.575（用いた消波ブロックにおけるカタログ値）および 0.634（現地で設置した空隙率）の 2 ケースとする．

3 章で行った再現計算と同様に，再現事象として選定した 3 時刻に St.1～St.5 で得られた現地観測結果と計算結果のうち，有義波高を比較したものを図-9 に示す．透過堤の底面幅を 52m とした再現計算の結果を示した図-8 と比べると，St.3 の波高値が観測値に近づいていることが分かる．なお，空隙率による違いはほとんど見られないが，現地条件に合わせた 0.643 のケースのほうが，若干であるが，よ

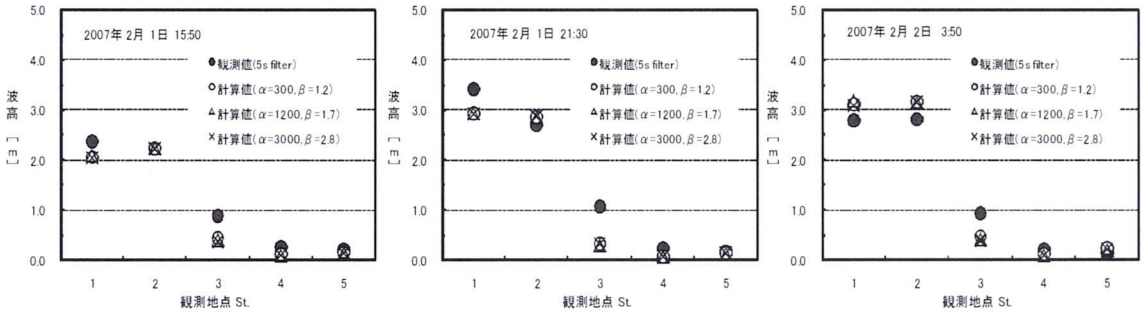

図-8　計算結果と観測値の比較（透過堤の底面幅を52mとした場合）

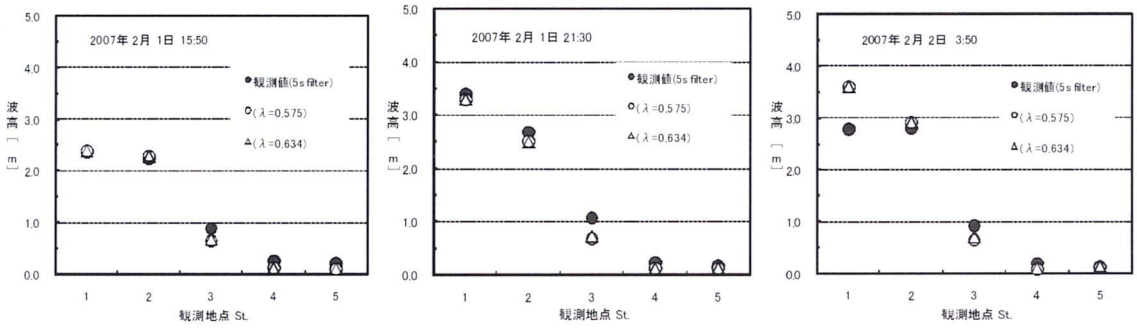

図-9　計算結果と観測値の比較（透過堤の底面幅を32mとした場合）

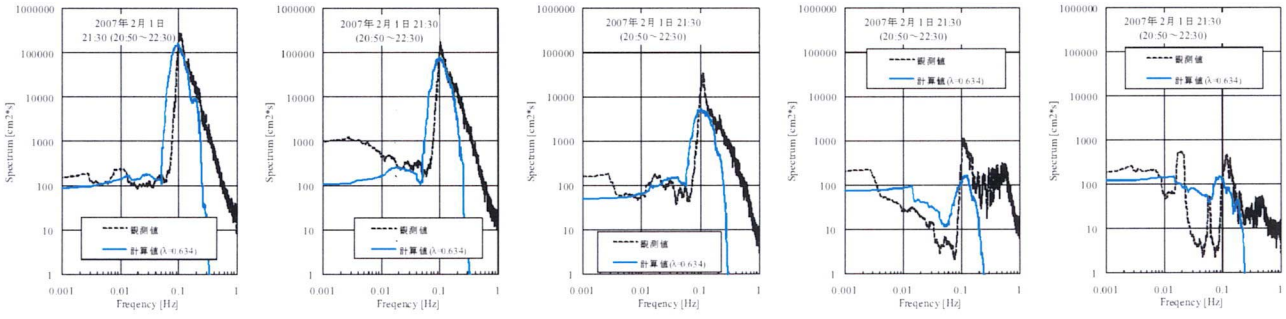

図-10　周波数スペクトルの比較

より観測値に近い値が算定されている．

また，St.1～St.5 における現地観測およびブシネスクモデルによる再現計算で得られた周波数スペクトルの比較を**図-10** に示す．計算では 5s 以下の周期は計算対象外としたので 0.2Hz 未満の波エネルギーを比較すると，浦添ふ頭地区における計算結果は現地観測結果よりもやや小さめに算定されているものの，各観測地点とも，計算値の周波数スペクトルの形状は観測値を非常によく表していることがわかる．

5．おわりに

本研究では，観測データをもとに透過堤による波浪減衰効果を検証するとともに，砕波・遡上モデルに加え，透水層による任意反射境界処理法が組み込まれたブシネスクモデル（NOWT-PARI，Ver.5.2）を用いて，浅瀬上に設置された透過堤による波浪減衰効果，および複雑な海底地形を有する港湾の各地点で観測された有義波高を再現することを試みた．

透過堤設置前後の現地波浪観測データを解析することにより，消波ブロックを用いて浅瀬上に設置した透過堤は，波高を 2 割程度減衰させる効果があることを確認した．また，透過堤を表現した透水層モデルの層流抵抗係数 α_0=300，乱流抵抗係数 β_0＝0.3，空隙率を現地で実際に施工された 0.634 とし，さらに直立透過堤をイメージし，天端幅と底面幅をともに 32m として実施した再現計算では，透過堤による波浪減衰効果を比較的よく再現するとともに，対象岸壁前面を含む港内各地点の有義波高および周波数スペクトルをほぼ再現できていることを確認した．

一方で，今回使用した透水層モデルは，消波工の法面勾配に応じて水平的に徐々に空隙率を変化させているが，各計算格子における鉛直方向の空隙率の変化は考慮されていない．そのため，潮位や波による水位変化に応じた透過堤による波浪抵抗の変化が考慮されず，観測値と計算結果にやや差が生じたものと推測される．したがって，那覇港静穏度対策において重要な透過堤による波浪減衰効果をさらに詳細に解析するためには，水位の変化に応じて透水層内の平均空隙率が変化する機能を持つモデル [5] による検証が必要であると考えられる．

謝辞：本研究をとりまとめるにあたり，(株)日本港湾コンサルタントの山賀博氏，田中和広氏には，観測データの整理および代表波の波浪変形計算にかかる演算作業をご担当いただきました．ここにこの場をお借りして，心から謝意を表します．

参考文献

1) 平山克也・平石哲也（2005）：平面2次元ブシネスクモデルによる砕波・遡上計算法の開発と現地適用，海岸工学論文集，第52巻，pp.11-15.
2) 平山克也（2007）：ブシネスクモデル（NOWT-PARI）を用いた高精度港内静穏度解析手法の提案，港空研資料，No.1159，90p.
3) 平山克也（2001）：ブシネスクモデルにおける透水層内の波浪減衰を考慮した任意反射境界処理法の開発，海岸工学論文集，第48巻，pp.26-30.
4) 平山克也・上原　功（2002）：消波構造物に作用する波浪の消波機構を考慮した港内波浪変形計算，海岸工学論文集，第49巻，pp.671-675.
5) 平山克也（2006）：透水層を用いた任意反射境界処理法の高精度化と遡上計算への適用：海洋開発論文集，Vol.22，pp.241-246.