

台風0314号による韓国馬山市地下街の浸水に関する数値解析

平石哲也*・安田誠宏**・永瀬恭一***・河合弘泰****

2003年9月に韓国南部を縦断した台風14号によって慶南道馬山市では、高潮による未曾有の災害が発生し、地下施設への浸水により十数名の死者が出た。本研究では、地下施設内での海水の流動を3次元流体解析モデルで解析し、地下室の浸水に要する時間、流入する海水の流速等を明らかにし、被災に至ったメカニズムを解明した。次に、今後の浸水対策として臨港部に高さ1mの防潮壁を建設する方法ならびに被害を受けた地下施設の入り口に高さ50cmの止水壁を設ける手法を提案し、その効果を数値計算で検討した。計算の結果、防潮壁や止水壁により地下施設への浸水開始時刻が遅くなり、地下室内の浸水深も大幅に低下されることが明らかになった。

1. はじめに

2003年9月に韓国南部を通過した台風14号によって、釜山から西に60km離れた慶南道馬山市では最大偏差2.3mの高潮が発生し、人命および市内家屋に甚大な被害が生じた。特に高層アパートや商業ビルの地下街へ多量の海水が流入し、避難が遅れた十数名の方の命が奪われる大惨事となった。河合ら(2004)は被災後の馬山市における浸水高を調査し、地表での最大浸水深が1.6m程度になったことを明らかにした。高山ら(2004)とChoi(2004)は潮位観測データを整理して、前述の最大高潮偏差や潮位の時間的な変化をまとめた。

高潮だけでなく津波による臨海市街地への浸水は、人口・資産が集中した都市部における新しい災害形態を引き起こす(安田ら, 2003)。馬山市における被災形態を解明し、その対策を検討することは、馬山市の都市防災計画に必須であるだけでなく、我が国における臨海部の高潮・津波対策を高度化するために重要である。そこで、著者らは、馬山市建設部の協力を受けて現地調査を行うとともに、地表部の地形データを作成し、高潮浸水計算モデルを開発した(安田ら, 2004a)。計算法は、功刀(1997)によって提案された3次元流体直接解析法を活用し、波動現象を外力とする津波浸水や長周期波解析にも応用できる(安田ら, 2004b, 平石ら, 2004)。

馬山市街地において最も大きな人的被害を受けた海雲プラザ(Haeun Plaza)ビル(以下、Kビルという)は海岸線から約700m離れており、地表部での浸水深は0.4~0.6mであった。それに関わらず地下3階まで浸水し、7名の方が亡くなられた。そこで、本研究では、複層地下街の高潮氾濫計算を試み、Kビル内の浸水状況を解析して対策工法の有用性を検討することを目的と

した。対策としては防潮壁と止水板設置を提案している。

2. 高潮浸水計算の概要

(1) 計算法の概要

台風14号の経路、馬山市の地形特性、高潮浸水痕跡、浸水数値解析モデルの詳細については前報(安田ら, 2004a)を参照されたい。図-1は数値計算に用いた馬山市臨海部の地形(幅550m×奥行き800m)を示す。図の下側の直線部は埠頭になっており、計算の入射境界に相当する。埠頭岸壁の最も低い場所の高さはC.D.L.+2.7mで、被災時の天文潮位はC.D.L.+1.9mである。計算では、図-2に示す最高高潮偏差2.3mを記録した馬山港内の検潮記録を近似して、埠頭護岸の浸水開始時($t=0$ s)から台風通過後までの潮位変化を、図の白丸間を直線で変化する3角形波形として入力した。計算時間は3時間で、最高水位は、9月12日21:49でのC.D.L.+4.32mである。

海上および地表での高潮数値計算法は、功刀(1997)が示したMARS(Multi interface Advection and Reconstruction Solver)法を活用し、臨海部市街地に適用した安田ら(2003)の解析手法である。本手法の特徴は、自由表面の計算格子内で界面の勾配を表現することができ、自由表面の形状を正確に再現できることにある。また、同様の機能を非流体部の形状再現に活用しており、湾曲した地表面上での海水流動や直線格子で再現できない構造物周辺の流体運動を計算できる。地表面での計算では、水平方向に1m間隔で格子を作成し、鉛直方向は20cm間隔で地表面上の高さ2mまで3次元格子をあてはめている。

図-1の着色した部分は、数値計算で求めた $t=2000$ sおよび $t=6000$ s後における地表面での浸水範囲である。図中の記号で示したKビルは、海岸の埠頭から約700m離れており、地表面も埠頭岸壁天端より1m以上高く、C.D.L.+4.00mに位置している。写真-1は、被災2週間後における現地調査時に撮影したKビル周辺の状況

* 正 会 員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部

** 正 会 員 博(工) 京都大学防災研究所海岸災害部門

*** 正 会 員 博(工) (株)フジタ 技術センター

**** 正 会 員 工 修 (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部

で、格子状の幅3m道路の交差点に位置し、地下3階構造になっている。地上階は、道路面から40cmの段差を有し、ファーストフードと電気器具店が占め、地下街は地下1階(B1F)が駐車場、地下2階(B2F)および地下3階(B3F)は飲食店街となっている。駐車場(B1F)は、地表から写真に示す車両通行用斜路により出入りでき、B2FおよびB3Fへは駐車フロア中央の階段によって降りることができる。斜路入り口には、格子状のシャッターだけが設置されており、海水の流入を抑止する機構はない。駐車フロアから階段室へ入るためには、歩行者用扉を開ける必要があるが、高潮被災後は扉が破壊されており、海水浸水時に開いていたのか閉まっていたのかは不明である。

Kビルの地下街への氾濫計算を開始するに当たり、入力条件として用いる地表面での浸水高時間変化をKビル位置の代表点で抽出した。抽出点は図-1に示すK1で、地下駐車場斜路入り口に相当する。図-3はK1における水位変化をC.D.L.を基準として示したもので、K1地表面の高さは、C.D.L.+3.38mである。計算水位は、計算開始後3900sで地表面より高くなっており、高潮によって氾濫した海水が、異常潮位発生後3900sでKビ

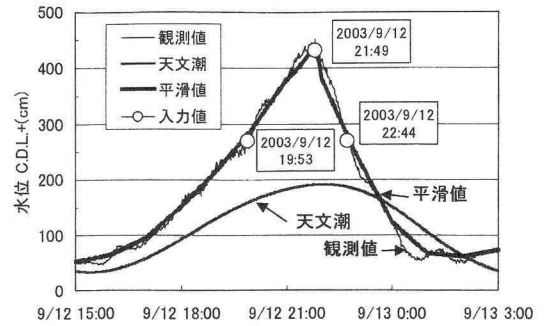


図-2 埠頭入射境界面での水位変動

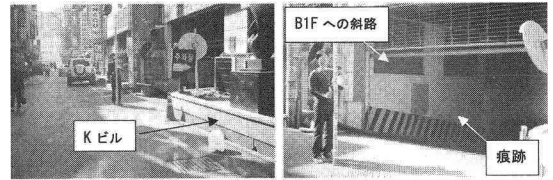
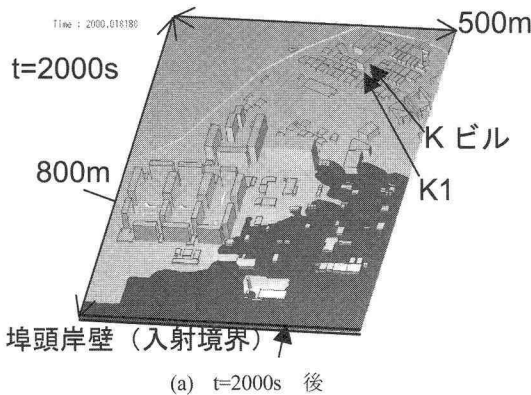


写真-1 海雲プラザ(Kビル)の状況

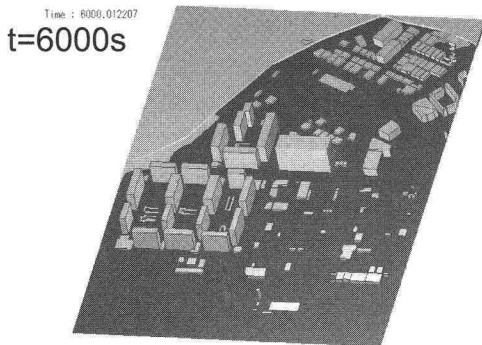
ル周辺に達したことが分かる。高潮による水位上昇に伴ってKビル周辺の浸水深は増加し、 $t = 7300$ s後に最高値となって、水位はC.D.L.+4.30mになっている。地表面からの浸水深に換算すると約0.6~0.7mである。Kビル周辺の浸水痕跡高は、安田ら(2004a)によるとC.D.L.+4.25mと示されており、本浸水計算で求めた浸水深は痕跡とほぼ一致する。また、計算領域中のその他の地点でも浸水深の計算値と実測値はよく一致し、計算手法の妥当性が検証できた。

(2) 海雲プラザでの地下街氾濫計算

海雲プラザ(Kビル)における複層構造ビル内の海水氾濫計算を行うにあたり、計算モデルは地表面での高潮氾濫計算と同様に3次元直接流体解析法を適用し、水平方向の格子幅を0.1m、鉛直方向の格子高さを0.1mとした。計算地形(ビル構造モデル)を作成するに当たり、ビルの建築設計図等を参照する方法もあるが、ここではレーザー測距機、テープ等を用いて直接測量を行った。したがって、流入時の流速変化に影響を与えないと考えられるフロア端部の閉鎖された機械室などはモデル



(a) $t=2000$ s 後



(b) $t=6000$ s 後

図-1 馬山市街地の計算地形と浸水域

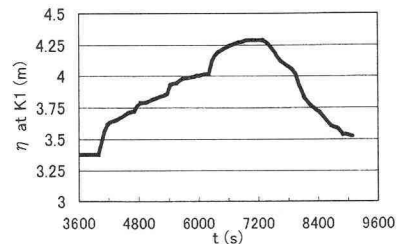


図-3 海雲プラザ(Kビル)周辺の浸水深変化

に含まれておらず、微細な室内形状の変形は無視している。また各フロアの測量データを重ね合わせると上下階をつなぐ階段室の位置が微妙にずれていたため、すべての階で同一平面位置で重なるような修正を加えた。図-4は、測量で得られたビル構造をCADで示したもので、地表階をGFとして表している。各フロアのレベルは以下の通りである；

GF : C.D.L.+4.00 m (地表面より段差で高くなっている)

B1F : C.D.L.+1.00 m, B2F : C.D.L.-3.30 m

B3F : C.D.L.-6.88 m

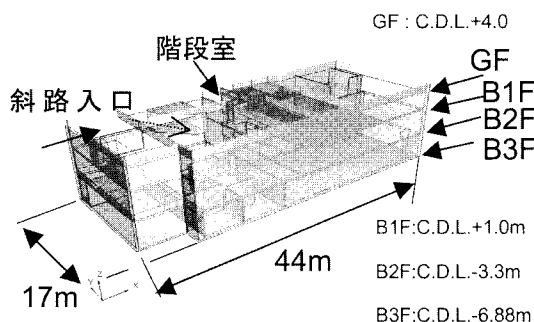


図-4 海雲プラザ (Kビル) の詳細構造モデル

3. 複層地下街の浸水解析

(1) 計算の条件

Kビルの地表階の出入り口はビルの東側に位置し、地表面より0.3 m以上高く、階段室までに正面玄関扉が存在していたので、地下街への浸水は、地表面と同一レベルのK1点での斜路入り口から生じたものと考えられる。そこで、地下街への海水の侵入口としては駐車場入り口斜路のみを考えて、Kビル周辺の地表面を含む詳細解析用の複層地下街計算モデルを作成した。地表面での水位変化は、入力条件として与えるので、図-3に示すK1での水位変化を平滑化して入力した。Kビル入り口では $t=3900$ s頃に浸水が始まるので、詳細計算は $t=3600$ sから開始した。以下、 t' で示した時刻は、詳細計算開始時刻を $t'=0$ として換算した時間である。

KビルのB1Fは海水の侵入が容易で、B2F以下に大量の海水が侵入する以前に海水が貯まっていた可能性が高い。B1FからB2Fへは階段室以外には海水の流入箇所がなく、現地調査では階段室入口に床上1.2 mに泥跡が観察できた。そこで、地下街への海水流入に大きな影響を及ぼす階段室扉について以下の2種類の仮定を行った；

仮定 S-S：階段室扉は当初閉まっていたが、B1Fの

浸水深が1.2 mとなったとき ($t'=1200$ s 頃) に水圧で破壊されて通路が開放された。

仮定 S-O：階段室扉は最初から開放されていた。

計算では仮定 S-S に対しては $t'=1200$ s まで通路は閉境界として水を遮断し、 $t'=1200$ s で閉境界を取り外している。

(2) 計算の結果

図-5は、海雲プラザ内の浸水状況を示したものである。 $t=1200$ s で B1F は、ほぼ満水になってしまうが、B2F および B3F への浸水は見られない。階段通路を計算中に開放すると海水が一挙に流下し、 $t=1800$ s 後には B3F まで、ほぼ満水状態となる。したがって、地下への浸水が発見されたなら素早い避難が必要であることが分かる。

図-6は、仮定 S-S での地下室内の各フロアの時間的な水位変化を示したものである。最も下段に示した曲線が B3F の水位変動で、1200 s 後から水位は上昇し、約 1000 s 後には満水になってしまう。図-7(a)は階段室の流速変化を示したもので、B1F の踊り場では、最高 2.5 m/s の流速が生じ、長時間 2 m/s 以上の流速で海水が流入を続けるので避難は困難である。なお、図-7(b)に比較のために、地下駐車場の扉が最初から開いていた場合 (仮定 S-O) の数値解析結果を示す。この場合は、浸水当初から海水が流入するために、階段室の流速は当初 2.0 m/s 以下となり、扉が水圧で破壊される場合より、やや小さくなるものの、地下室の浸水深はほとんど変化していない。

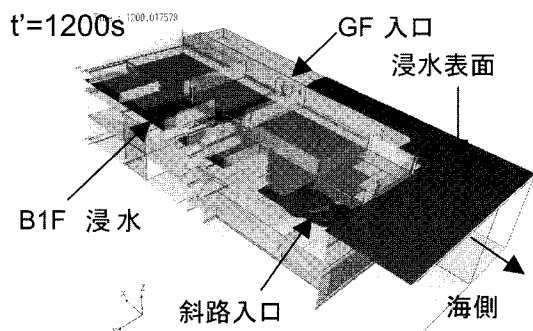
4. 浸水対策施設の効果予測

ここでは、浸水対策施設として以下の2ケースを提案した；

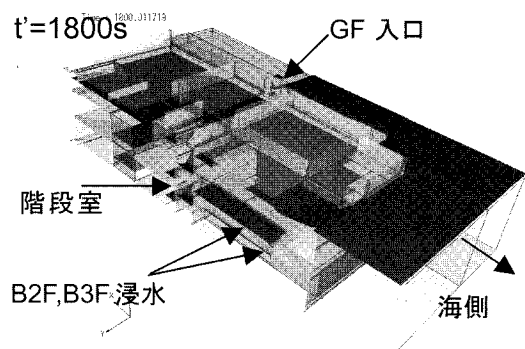
- 1) 海岸の岸壁背後に高さ1.0 mの防潮壁を建設する。
- 2) 海雲プラザ地下駐車場入り口に高さ0.5 mの止水板を設置する。

(1) 防潮壁の効果

最初に、防潮壁の効果を調べた。図-8は、高潮による氾濫計算開始後6000 s および8000 s 後の計算市街地における浸水状況である。計算開始後6000 s 後までは、図の着色域 (埠頭敷地) と白色 (市街地) の間に設定した防潮壁の効果により市街地への浸水は生じていない。前出の図-1では、計算開始後6000 s 後には、すでに埋立地のほとんどが浸水していた。したがって、市街地の浸水開始時刻を遅らせて、避難するための時間的な余裕を作るためには、防潮壁が効果的で、岸壁における越流を観測した後に、ただちに避難警報を発信すると十分な避難時間を確保することができる。夜間や荒天時における岸壁や護岸前面での水位変化を視認することは難しいが、



(a) 浸水開始 1200s 後



(b) 浸水開始 1800s 後

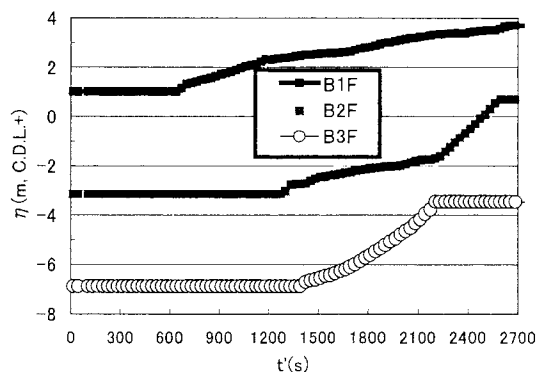
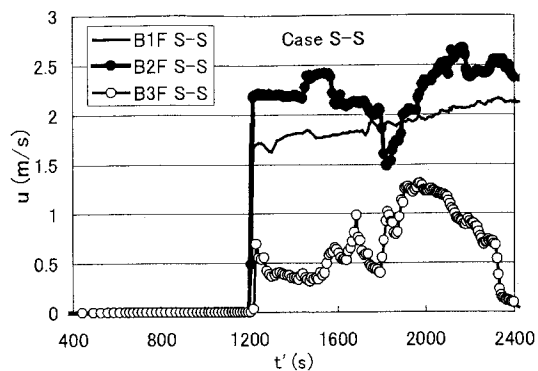
図-5 Kビルにおける地下街氾濫の様子
(色付けした面は浸水部の表面)

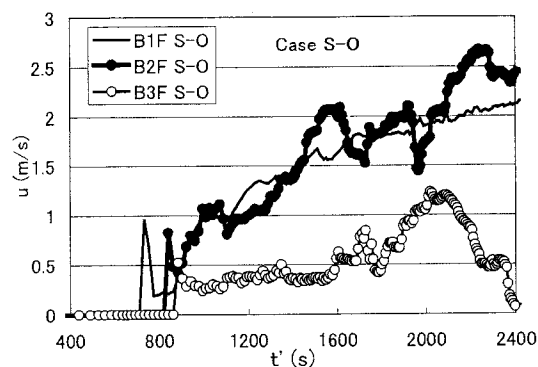
図-6 Kビル地下街における計算水位の変化

越波監視計 (永井ら, 2003) を活用することによって、越流や浸水の状況をモニタリングするも可能である。

防潮壁を海水が越えると、高潮最高潮位が市街地の地表面より高いために、8000s 後には、海雲プラザ付近まで浸水してしまうが、高潮による潮位は、すでに低下しはじめており、市街地の総浸水量は小さくなっているものと思われる。なお、詳細解析の対象となる海雲プラザ駐車場入口における最大浸水深(地表面を CDL+3.375



(a) 仮定 S-S の場合



(b) 仮定 S-O の場合

図-7 地下フロアの階段室内での浸水流速

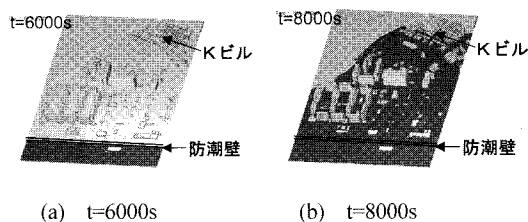
(a) $t=6000s$ (b) $t=8000s$

図-8 防潮壁(高さ1m)設置後の地表浸水状況

m とする)と高潮到達時刻(埠頭岸壁の一部で浸水が始まった時刻を $t'=0$ とする)を比較すると以下のようになる；

1) 防潮壁が無い場合 (現況)

最大浸水深： $\eta_{max}=1.014$ m, 到達時刻： $t'=3858$ s

2) 高さ1mの防潮壁がある場合 (対策工有)

最大浸水深： $\eta_{max}=0.257$ m, 到達時刻： $t'=7490$ s

このように本解析モデルを用いると、対策工による浸水深の減少や浸水開始時刻の遅れなどが予測できる。

(2) 止水壁の効果

次に駐車場の斜路入口に、高さ0.5mの止水壁を設置

した。本計算ケースでは、最大浸水深が約1mになるので、1m以上の止水壁を設けなければ地下街への浸水そのものを止水壁で抑止することはできない。しかし、最大浸水深よりも低い止水壁であっても、地下街の浸水時刻や流速を抑制することが期待できる。

図-5と同様な浸水状況を解析した図面から、詳細計算開始 $t'=8000$ s後までの海雲プラザ内の状況を検討した。止水板が無い場合には、 $t'=600$ sで、すでにB1Fへの浸水が始まっていたが、止水板を設置すると、 $t'=1800$ sまで全く流入は生じず、 $t'=2100$ sになってB1Fの浸水が顕著になってくる。したがって、浸水そのものを抑止できなくても、地下駐車場への流入を遅らせて避難を容易にするためには止水板の効果は大きい。

図-9に地下街の各フロアでの浸水深の変化を示す。止水板が無い場合の図-6に比べると、最大浸水深が小さくなる。すなわち、B1Fの駐車場では、止水板が無い現況では、室内浸水深は3m程度であるが、止水板を設置すると、浸水深は最高で1m程度になり、水没する施設被害は小さくなる。

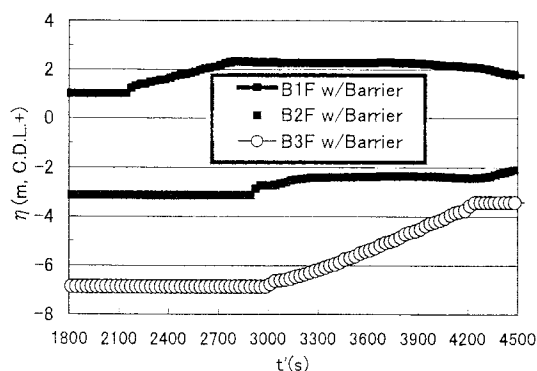


図-9 止水板を設置した場合の地下街の浸水深変化

B2Fにおける最大浸水深は、4mであったものが1.5m程度になっており、止水板の効果が定量的に把握できる。なお、階段室内の最高流速は、止水壁がある場合でも最高で2.5m/s程度に達し、浸水開始後の避難は困難である。

本解析では高潮潮位の最高値をC.D.L.+4.32mとしているので、止水壁を越えて地下駐車場に浸水が生じてしまった。高潮潮位の最高値をやや小さくし、C.D.L.+3.92mで浸水計算を行うと、止水壁を越流する現象は生じず、地下室内への浸水被害は無かった。したがって、浸水対策においては、高潮規模を予想して適切な高さの止水壁を設置する必要がある。

浸水対策工の効果を示すために、市街地氾濫計算開始後に各フロアが満水になる時間と階段での最大流速の比較を表-1に示す。仮定はS-Oで、満水に達しない場合は数値未記入である。対策工により浸水時刻を遅く、浸水深を軽減できるので、適切な避難計画を立てることによって高潮災害を防止できる

表-1 対策工による浸水時間の遅れと流速の減少

ケース	対策無し	1m防潮壁	0.5m止水板
B1F 全床浸水	4048 s	7690 s	4150 s
B1F 満水	6300 s	—	—
B2F 満水	6207 s	—	8974 s
B3F 満水	5840 s	—	7444 s
斜路	1.74 m/s	1.20 m/s	1.16 m/s
地下2F 階段	2.2 m/s	微小	2.05 m/s

5. ま と め

本研究では、MARS法による馬山市地下街の高潮氾濫解析を行った。また、防潮壁と止水板を対策工として場合に、それらがB3Fでの浸水時刻を30分程度遅延させ、B1Fの最大浸水深を約2m軽減できることを示した。

参 考 文 献

- 河合弘泰・富田孝史・平石哲也・安田誠宏(2005)：台風0314号による大韓馬山湾の高潮の現地調査と数値計算，港湾空港技術研究所報告，Vol.44, No.1, pp. 3-20.
- 功刀資彰(1997)：自由界面を含む多相流の直接数値解析法，日本機械学会論文集(B編)，63巻609号，pp. 1576-1584.
- 高山知司・雨森洋司・間瀬 肇・金 泰民・姜 閔求・河合弘泰(2004)：台風0314号による釜山沿岸の高潮・高波災害，海岸工学論文集，第51巻，pp. 1371-1375.
- 永井紀彦・平石哲也・服部昌樹・安田誠宏・高山俊裕(2003)：オンサイト越波計の開発と現地適用性，海岸工学論文集，第50巻，pp. 626-630.
- 平石哲也・永瀬恭一(2004)：長周期波対策護岸の最適構造に関する実験，海岸工学論文集，第51巻，pp. 721-725.
- 安田誠宏・平石哲也(2003)：模型実験による臨海都市部の津波氾濫のリスク評価，港湾空港技術研究所報告，第42巻，第3号，pp. 111-156.
- 安田誠宏・平石哲也・河合弘泰・永瀬恭一(2004a)：韓国馬山市における高潮浸水被害現地調査と地下浸水解析，海岸工学論文集，第51巻，pp. 1366-1370.
- 安田誠宏・平石哲也(2004b)：臨海部の複層都市空間におけるMARS法を用いた高精度な浸水解析，港湾空港技術研究所報告，Vol.43, No.2, pp. 3-34.
- Choi, B.H.(2004)：Coastal Disasters due to typhoon Maemi, 韓国海岸・海洋工学会，Waves and Storm Surges around Korean Peninsula, pp. 1-34.