

港湾における防波堤の津波対策効果に関する考察

小田勝也*・早川哲也**・直井秀市***

東海、東南海・南海地震等巨大地震発生の切迫性が指摘されている。これらの地震により発生する津波から、港湾内の人命を守り、地震津波直後から被害者支援、緊急復興のために使用される港湾機能を防護する対策が求められている。港湾を防護する方策の大きな柱が防波堤の津波防護効果である。本論文は、港湾における津波対策の体系化を試み、その結果に基づいて防波堤に求められる津波対策効果を整理するとともに、簡単な形状のモデル港湾及び実際の港湾を想定したケーススタディにより検証した。これにより、防波堤の有する効果が示され、防堤の目的として津波対策を位置付けることの重要性が明らかになった。

1. はじめに

東海、東南海・南海地震、日本海溝・千島海溝周辺地震等巨大地震発生切迫性が指摘されている。これらの地震により発生する津波により各地で甚大な被害が予測され、津波対策が進められているところである。昨年12月に発生したスマトラ島沖地震により発生し、インド洋沿岸に襲った津波は、未曾有の大被害をもたらした。津波対策推進の重要性が大きくクローズアップされた。

我が国の港湾においては、地震により発生する津波から港湾内の就業者や来訪者等の人命を守り、地震津波発生直後の避難、緊急物資輸送等の緊急支援、さらに復旧・復興のために使用される港湾機能を防護する対策が求められている。港湾を防護する方策として防波堤による津波の低減が想定される。しかし、防波堤の機能は常時の波浪に対して港内静穏度を確保することであり、ごく一部の津波防波堤を除き、津波に対する防護効果を直接の目的とはしていない。

このため、本論文では、港湾における津波被災の波及過程を体系化し、これに基づいて港湾において防波堤に期待すべき津波対策効果を整理する。さらに、モデル港湾によるシミュレーションの実施により、港湾の形状による防波堤の津波低減効果を分析するとともに、実際の港湾を想定したケーススタディにより詳細な効果を把握した。

2. 港湾における津波被害波及過程の分析

(1) 概要

港湾においては、物流等の機能で水際線を利用することから、港湾内の相当部分が海岸保全の防護ラインの外側に位置し、物流機能や人流機能、親水性の高い空間、

賑わい空間等は津波から防護されていない場合が多い。

港湾における津波被害は、来襲した津波により港湾施設等が被災する直接被害と港湾の機能停止・低下から波及する間接被害が考えられる。しかし、これまでに港湾が津波により被災した事例はあるものの、体系的に整理されていないのが現状である。また、地震被害と津波被害は複合的に発生するが、港湾の特性に対応した津波対策を検討するためには津波のみによる被害波及過程を整理することが重要である。このため、津波被害事例の分析に基づいて港湾における津波被害波及過程を整理した。

(2) 津波被害波及過程

早川(2005)及び熊谷ら(2005)は、港湾における津波被害波及過程及び対策を体系化して提示した。図-1に津波被害波及のイメージを、表-1に直接被害の形態を示す。直接被害は、人命被害、浸水被害及び流出被害(貨物・船舶・車両等の陸域・海域への流出、石油類その他危険物の流出)に分類した。

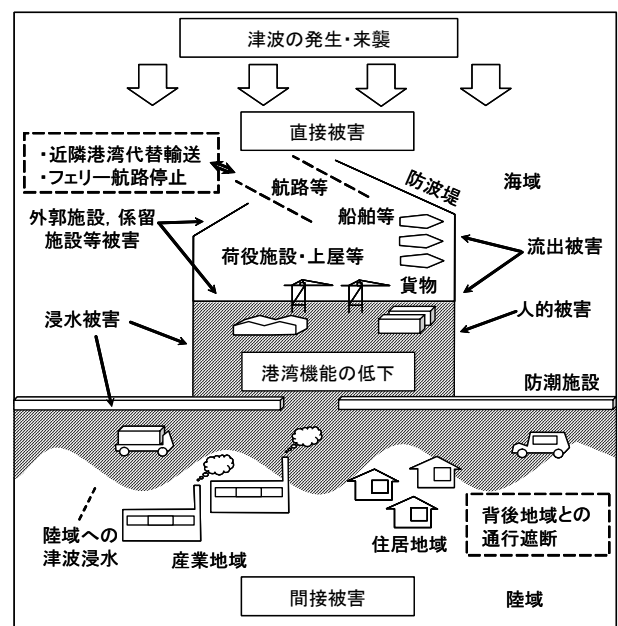


図-1 港湾における津波被害波及過程のイメージ

* 正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所
** 正会員 工博 国土交通省港湾局海岸・防災課
*** 正会員 (財) 沿岸技術研究センター

これらの直接被害による港湾機能の低下，さらにそれが物流・人流・産業・生活レクリエーション・港湾環境の悪化等の間接被害，関連主体の経済的被害，地域経済への影響，復旧・復興への影響等へと波及する。

表-1 港湾における津波の直接被害

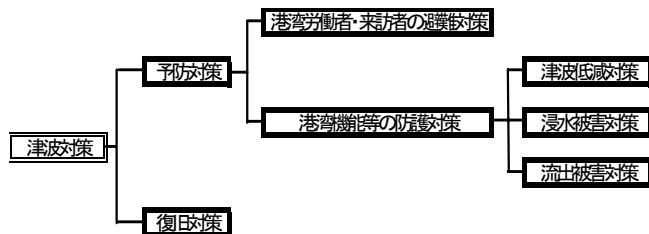
直接被害の区分	主要な被害
人命被害	港湾労働者や港湾来訪者などの人命の損失
浸水被害	港湾地域における被害 ケミカル施設の浸水・損壊 倉庫・上屋の浸水による貨物被害 浸水による荷役機械等の被害 船舶の火災 地震による外郭施設機能低下による浸水被害 等
	背後地域における被害 津波の浸水による産業活動の停止 排水ポンプ場の被災による浸水の長期化 等
流出被害	港湾地域における被害 車両・原木・コンテナ・船舶・瓦礫等の港内への流出 船舶の岸壁への打ち上げ転覆 プレジャーボートの流出 等
	背後地域における被害 漁船などの流出物による家屋等の損壊 石油の流出による火災被害 等

(2) 港湾における津波対策の体系

これらの被災に対応する対策として，防護する対象から，①港湾労働者・来訪者の避難対策，②港湾機能・資産の防護対策，③応急，復旧対策が考えられる。

一方，それぞれの直接被害を軽減する対策が考えられ，図-2に示すように整理される。これより，防波堤が津波対策に関して果たすと考えられる機能は，港口における一次的な津波低減，水際線における二次的な津波低減，陸域における浸水・流出対策であると考えられる。

図-2 港湾における津波対策の体系



防波堤は港内に流入する津波そのもののエネルギーを低減することから，港湾で発生する全ての被害形態に対して一定の効果が期待できる。しかしながら，防波堤の整備には大規模な投資が必要であることから，防波堤により浸水を完全に防護することは現実的ではない。従って，防波堤の整備による，①港内に流入する津波波高・流速の低減，②津波到達時間の遅延を十分に把握し，護岸の整備，ソフト対策といった対策とあわせ，総合的に被害の軽減を図ることが重要となる。

3. 防波堤の津波防護効果

(1) 防波堤の津波防護効果

防波堤が津波低減に対して発揮する効果として，物理的には港内への津波流入量の抑制，津波の共振防止，防

波堤開口部前後の運動量損失が考えられる。防波堤の津波低減効果に関して，谷本ら(1983)は，1983年日本海中部沖地震津波の遡上高の現地調査結果から，港外の海岸での遡上高に比べ，港内での遡上高が小さい傾向が認められるとし，この理由として，防波堤による締め切り効果，埋立地等の効果を挙げている。また，防波堤の締め切り効果について，日本海中部地震津波の周期が比較的短く，通常規模の港の防波堤であっても締め切り効果があったことを指摘している。しかし，港湾形状，津波周期との関係は明確にされていない。

同様の津波低減効果がスマトラ島沖地震によるインド洋大津波が来襲したスリランカ南西部の隣接する地域において観測されている。約10km離れた防波堤のないカハワと防波堤のあるヒッカドゥアにおいて，カハワでは内陸側へ数100m浸水し，鉄道に避難した多くの人命が失われた。一方，ヒッカドゥアでは，港湾背後の建物は大きな被害を蒙っていないことが確認されている。周辺海域の海図から判断する限りでは，両地域の沖合海底地形はほぼ同じと考えられることから，防波堤により囲まれた地域の津波が減殺されたと推察できる。しかし，定性的な整理に留まっており，今後，シミュレーション等による詳細な現象の解明が待たれる。

(2) モデル港湾による防波堤の効果

a) 計算条件

港湾の地形形状による防波堤の津波防護効果をより定量的に把握するため，並びに後述するケースステディの予備的検討として3種類のモデル港湾を考え，防波堤の開口幅と入射する津波周期の関係について検討した。対象とするモデル港湾の地形形状は，図-3に示すV字形港湾，U字形港湾及び矩形型港湾の3種類とした。モデル地形条件は次のとおり設定した。①計算メッシュサイズは50mとする，②津波による港内水位増幅は，対象とする港内の水域面積に大きく依存すると考えられることから，各港湾にモデルにおける水域面積は同一とする，③水深勾配は湾奥で0mとなるように一定勾配とする，④防波堤の開口部幅は，それぞれ400m，800m，1600mの3ケースとする。⑤入射する津波波形は，入射波高2.0m，周期20分，40分，60分とする。

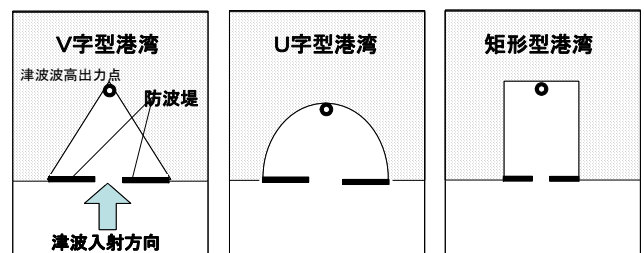


図-3 各港湾モデル形状と防波堤位置

b) シミュレーション結果

防波堤がない場合における、各モデル港湾の最大津波高の増幅率を図-4に示す。増幅率は、港口における津波入射波高2.0mを基準とし、湾奥における最大津波高(図-3に示す津波波高出力地点における津波波高)との比率を算出したものである。モデル港湾別では、V字形が最も大きく3.0程度、U字形で2.0程度、矩形形で1.5程度に増幅されている。周期については、港湾の形状によりその傾向が一律ではない。この差を生じた原因は、それぞれのモデル港湾のもつ固有周期との関係もあると考えられる。

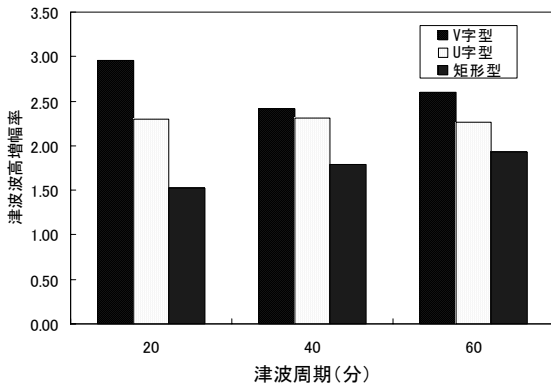


図-4 モデル港湾湾奥部における津波増幅率

各モデル港湾における津波低減効果を把握するために、次式により最大津波波高の低減率を算定した。対象とした地点は、図-3に示す津波波高出力地点である。

$$\text{津波波高低減率} = 1 - (\text{津波波高}) / (\text{防波堤なしの津波波高})$$

表-2 各モデル港湾における湾奥の津波波高減衰率

港湾タイプ	開口幅(m)	周期 20 分	周期 40 分	周期 60 分
V字型	1,600	0.22	0.04	0.13
	800	0.38	0.26	0.26
	400	0.54	0.55	0.39
U字型	1,600	0.21	0.07	0.16
	800	0.42	0.31	0.32
	400	0.59	0.61	0.44
矩形型	1,600	0.05	0.12	0.03
	800	0.22	0.33	0.16
	400	0.43	0.59	0.26

津波周期、防波堤開口幅毎の津波波高低減率を表-2に、周期40分の場合の開口幅と津波波高低減率の関係を図-5に示す。周期が比較的短い20分の津波の場合では、V字形港湾とU字形港湾はほぼ同じ低減効果を示し、矩形型港湾は、他の2つの形状に比べ、低減効果がやや低い。周期40分の場合ではV字形港湾、U字形港湾及び矩形型港湾でほぼ同じ低減率となっている。周期60分では

矩形型港湾の低減率がやや低い。この結果、開口幅、港湾形状等により低減率は異なるが、防波堤が一定の津波低減効果を有することが示された。

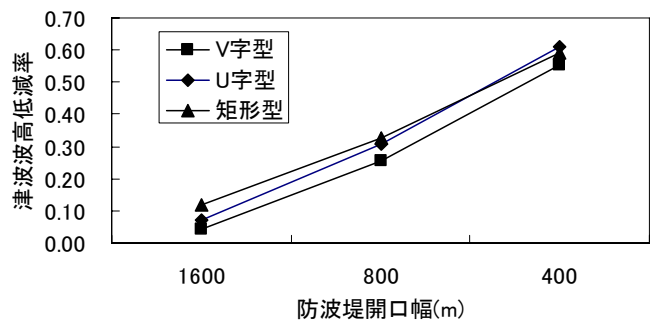


図-5 防波堤開口幅と津波波高低減率の関係(周期40分)

(3) ケーススタディ

a) ケーススタディ対象港湾の選定

ケーススタディ対象港湾の選定は次に示す二段階で行った。一次選定は全国1016港湾を対象として過去の津波被害の有無、既往地震津波・想定地震津波による各港湾の予想最大津波高、予測最大津波高と施設天端高による施設越流水深、背後地の防護人口・防護面積、津波防護施設の計画・整備状況等に基づいて15港湾を選定した。

二次選定は、選定された15港湾を対象として津波シミュレーションによる防波堤の津波低減効果、その他港湾及び背後地域の状況などを総合的に考慮して行い、詳細な浸水シミュレーションによる防波堤の津波防護効果を検討する港湾を抽出した。

表-3 各港湾の代表地点における最大津波波高の低減率

港湾	代表地点の最大津波波高(m)		津波波高低減率
	防波堤無	防波堤有	
A	2.0	1.7	0.15
B	2.7	1.1	0.59
C	6.0	1.6	0.73
D	9.5	8.6	0.09
E	2.7	1.2	0.56
F	2.2	1.3	0.43
G	3.3	1.9	0.42
H	4.7	3.0	0.35
I	4.5	4.5	0.00
J	4.7	3.0	0.36
K	7.8	5.6	0.28
L	1.3	1.3	0.00
M	1.8	1.8	0.00
N	4.7	4.7	0.00
O	4.2	3.2	0.24

一次選定された 15 港湾における津波シミュレーションは、港内への津波流入の抑制を主眼に比較することを目的として実施したもので、防波堤が津波に対して健全であること(地震による直接的な被害や津波による倒壊、越流がないこと)として、各港湾の計画地形と防波堤のないケースを実施した。計算に用いた地震津波は、各港湾における既往最大の津波である。なお、シミュレーションの支配方程式は積分型の非線形長波理論式で最小格子間隔は 50m、陸域への浸水は考慮していない。また、防波堤からの越流が生じないように防波堤には十分な天端高を与えた。潮位は朔望平均満潮位とした。表-3 に二次選定で実施した 15 港湾における津波シミュレーション結果を示す。これは、津波高、港湾の利用状況等から設定した代表地点における最大津波波高及び最大津波波高の低減率を示したものである。防波堤による津波低減効果は、最大で 73%、以下 50%台が 2 港、25%以上が合計で 8 港となり、大半の港湾で効果が確認された。一方、明確な低減効果が確認されていない港湾もある。これは、代表地点を港湾の土地利用状況等を勘案して設定したことや計画されている防波堤の延長が短いことから十分遮蔽されていない場合があること、津波の周期や地形・防波堤配置等の要因によるものと考えられる。これらの結果、既往津波による被害状況等に基づいて浸水シミュレーションによる詳細な検討を行う港湾は、津波波高低減率が最も大きかった C 港を対象とすることとした。

b) 浸水シミュレーション手法及び検討ケース

浸水シミュレーションの条件を表-4 に示す。対象とした津波は、対象港湾を襲った既往最大の津波とした。ケーススタディは、現在の防波堤配置(ケース 1)と全ての防波堤を取り除いた地形(ケース 2)で浸水シミュレーションを実施し、この両ケースを比較することにより行った。

表-4 浸水シミュレーションの条件

項目	条件
対象地震	既往最大地震を想定地震とした。
海岸保全施設等の考慮	考慮する(天端高データで考慮)
基礎方程式	非線形長波理論式
津波越流の評価	本間の式
海底摩擦(粗度)	海域: マニング粗度係数 $n=0.025\text{sm}^{-1/3}$ 陸域: 土地利用粗度データを考慮
計算格子間隔	最小格子間隔 $12.5\text{m} \times 12.5\text{m}$
潮位条件	H.W.L.(T.P+1.00m)
計算時間	地震発生後 180 分

c) ケーススタディ結果と考察

ケーススタディでは、港湾機能、港湾内資産等の被害低減、避難の円滑化を想定して、最大浸水深、陸域・海

域における最大流速及び津波到達時間に着目して両ケースを比較した。

ケース 1、ケース 2 の最大浸水深をそれぞれ図-6、図-7 に、両ケースの最大浸水深の差を図-8 に示す。浸水深は最大で 2~3m 低減し、一部を除くと 2m を越える最大浸水が発生していない。これより、防波堤の存在により港湾機能や家屋等への被災が相当程度低減されていることが想定できる。全体の浸水面積は約 5km^2 減少し、港湾にかぎらず、背後地域への影響も低減されていると考えられる。

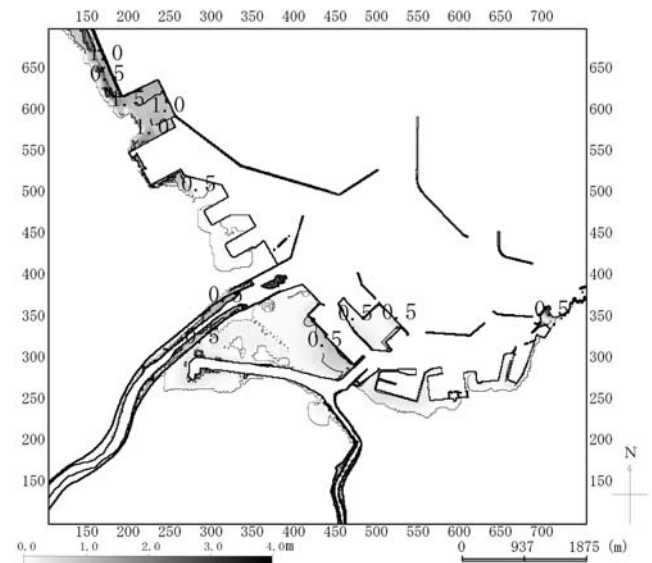


図-6 現況防波堤配置における最大浸水深(ケース 1)

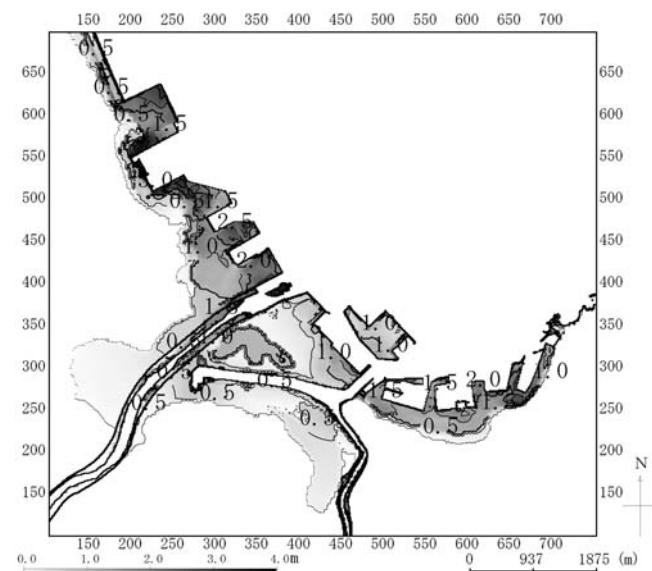


図-7 防波堤がない場合の最大浸水深(ケース 2)

両ケースの最大水深の差を図-9 に示す。最大流速が最大で約 4m/sec 減衰し、浸水域全体で流速の減少が見られる。一方、防波堤開口部では、急縮効果により流速が増大する。

浸水開始時間（津波のフロントの到達時間）の差を図-10に示す。浸水範囲の大部分で最低5分程度浸水開始時間が遅延し、最大で60分程度津波の浸水開始時間が遅延している。これより、防波堤は、港湾内の就業者、来訪者等の避難を図る上で、また、緊急的な対策を図る上で効果を有していると考えられる。地区により違いはあるものの、防波堤は、津波の浸水深、流速を減少させ、浸水開始時間を遅延させる効果を有意に有するといえる。

今後、新規の防波堤の計画・整備を行う際にその目的として津波対策の効果を取り入れること、また、既存防波堤の延伸、嵩上げ等の改良によって港湾におけるハード面での対策の強化を図ることが望まれる。

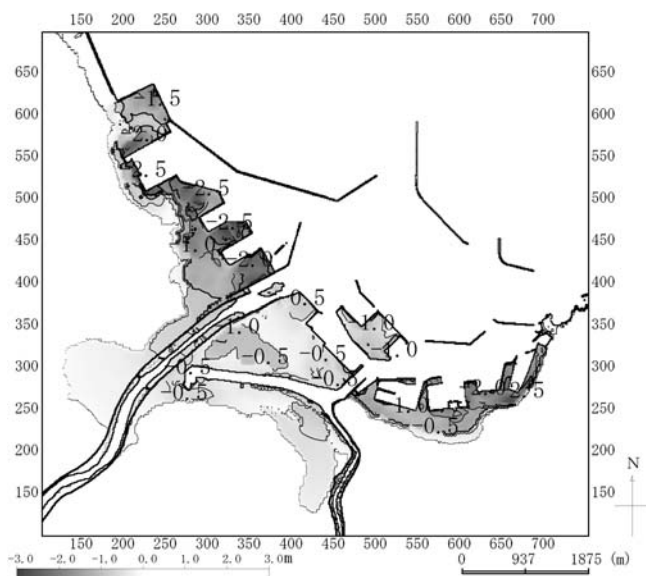


図-8 最大浸水深の低減効果

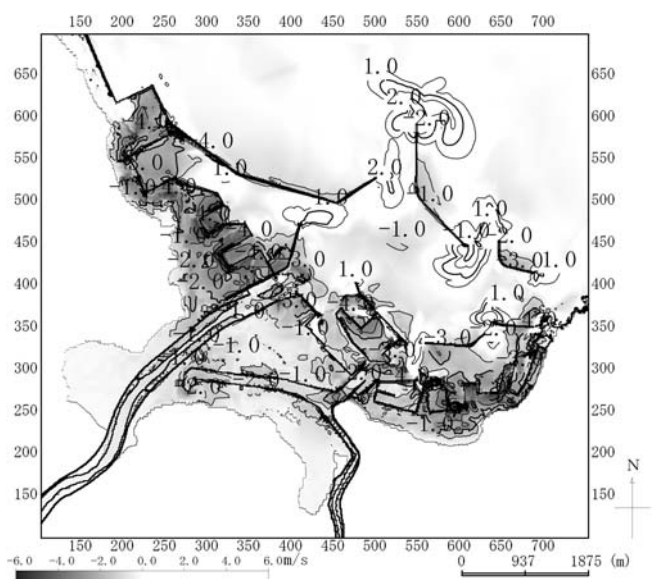


図-9 最大流速の低減効果

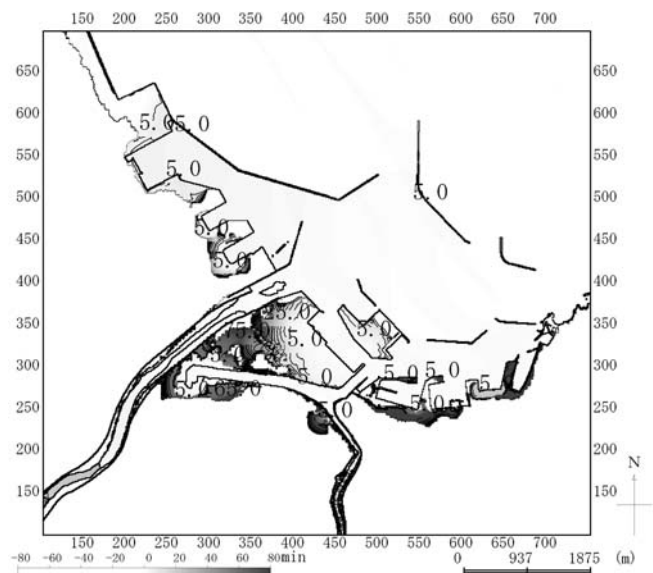


図-10 浸水開始時間の遅延効果

4. おわりに

本研究では、津波による港湾の直接被害、間接被害及び被害波及過程を整理し、防波堤による津波防護効果が一定の効果を有すること示した。モデル港湾における検討、実際の港湾を想定したケーススタディから、防波堤は、津波の浸水深の低減、流速の低減、浸水開始時間遅延の効果を有することが明らかにされた。これより、防波堤の目的として津波対策を位置付ける必要性が高いことが示された。

しかしながら、防波堤により港湾内の全ての機能を防護することは困難である。また、その整備には多額の費用と時間を要する。こうしたことより、今後の課題として以下の項目に関する検討を進めることが必要であると考えられる。

- ①被害波及過程と浸水深・最大流速の低減効果、遅延効果等の津波低減効果に基づく被害軽減予測の定量的評価手法。
- ②防波堤による防護水準の指標化。
- ③個別の施設における対策やソフト対策も含めた港湾における総合的な対策の体系化。

参考文献

熊谷兼太郎・小田勝也(2005): 港湾及び背後地域における津波被害の波及過程に係る検討, 土木学会年次学術講演会(投稿中)。
 谷本勝利・高山知司・村上和男・村田繁・鶴谷広一・高橋重雄・森川雅行・吉本靖俊・中野晋・平石哲也(1983): 1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察, 港湾技研資料 No.470, pp212-217。
 早川哲也(2005): 港湾における津波対策について, 海洋開発論文集, Vol.21(投稿中)。