

臨海部の津波氾濫に関する模型実験

安田 誠 宏*・平石 哲 也**・稲垣 茂 樹***

都市臨海部においては、土地利用の高度化や地下空間の利用拡大といった高度利用が促進される反面、伊勢湾台風を契機に整備されてきた海岸保全施設の老朽化、異常潮位や温暖化による海面上昇など外力条件が厳しくなり、大きなリスクが生じつつある。沿岸津波についてはその危険度が広く認知されているのに対し、津波による臨海部市街地の氾濫災害については、あまり想定されていない。本研究では、建物と地下施設が混在した首都圏の複合市街地を対象に、氾濫水の挙動特性や地下での浸水深、流速などを測定し、津波による浸水危険度の高さを模型実験で調べた。その結果、地下空間の危険度は特に高く、避難が非常に困難な状態になることがわかった。

1. はじめに

政令指定都市に代表される大都市では、多くの大規模なインテリジェント化した高層ビルが建設され、その地下駐車場や地下階と連絡する形で、延べ床面積 100 万² m² におよぶ地下街が展開されている。さらに、市街地道路網や総延長 500 km 以上の地下鉄網と地下空間に埋設された電力、都市ガス、通信といったライフラインのネットワークが集積し、人、もの、情報、エネルギーというロジスティックスに支えられた複合都市空間が形成されている。

ここ数年、都市型水害が多発している。平成 11 年の福岡水害、平成 12 年の東海豪雨水害などは記憶に新しいところである。梅雨前線の発達による記録的な豪雨で、博多駅地下街において浸水被害が発生し、不幸にも 1 人が逃げ遅れて亡くなった。また、東海豪雨災害においては、地下における人的被害は幸いなかったが、莫大な資産的被害が発生している。また、帰宅できない乗客達のために市営地下鉄駅が避難場所として解放されたが、実際に浸水被害に見舞われた地下鉄駅もあり、偶然被害に遭わなかったからよかったものの、非常に危険な状況になりかねなかった。こうしたところにも、地下空間における浸水危険度に対する認識の薄さが現れている。

一方、都市臨海部においては、土地利用の高度化や地下空間の利用拡大といった高度利用の促進が進む反面、伊勢湾台風を契機に整備されてきた海岸保全施設の老朽化、異常潮位や温暖化による海面上昇など外力条件が厳しくなり、大きなリスクが生じつつある。平成 11 年に発生した台風 9918 号に伴う高潮により、宇部市や広島市の市街地では、地下室や低地家屋への浸水被害が発生し、都市機能は麻痺した。このように被災リスクが高い、高度に開発された都市臨海部が直面している高潮、高波、津波による氾濫・浸水の危険度を適切に評価し、受忍可

能および受容可能な防災レベルに応じた防災施策を提案することが強く望まれている。

本研究では、都市臨海部における氾濫・浸水の危険度を評価するために、建物と地下施設が混在した首都圏の複合市街地を対象に浸水模型実験を実施した。臨海部で発生する浸水災害の外力として、津波を検討対象に選んだ。また、臨海都市の模型を製作するにあたって、底面材質の違いによる先端流速の違いについて確認した。

2. 津波の危険度の解析

関東大震災級の地震を想定し、後藤ら (1993) のモデルにより東京湾内に来襲する津波の予測計算を行った。

(1) 津波予測計算

大正 12 年関東地震津波の波源モデルには、Scholz・Kato (1978) の修正モデルを用いた。このモデルは 1 面断層モデルである。現況地形において津波予測計算を行ったところ、以下のような結果が得られた。

- ・湾口での最大津波高は 1.2~1.8 m
- ・湾央での最大津波高は 0.4~0.6 m
- ・湾奥での最大津波高は 0.8~0.9 m

湾奥での計算結果は東京の痕跡値 0.8 m、千葉 0.9 m と一致しており、湾内への津波の浸入をよく再現できたといえる。

(2) 津波の感度分析

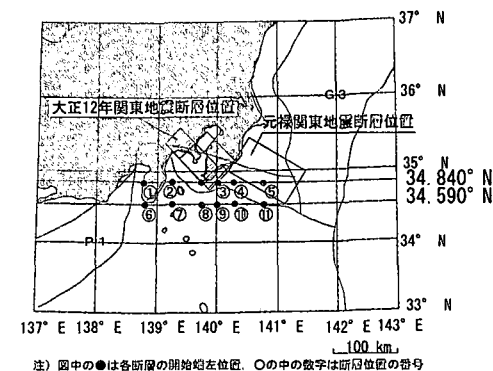
地震断層について、地殻トラフに沿って震源を移動させて最も危険度が高い断層位置を予測するモデルが確立されている (平石ら, 1997)。そこで、過去に発生した地震の実績と断層位置から、断層運動が起こりうる範囲内において、断層位置を経度方向、緯度方向にずらした条件を設定し、津波計算を実施した。これらの予測計算により、断層位置のずれによる東京湾の想定津波について津波高を比較検討し、最も厳しい津波を実験条件として選定することとした。図-1 に大正 12 年関東地震津波 (1923) と元禄関東地震津波 (1703) の断層位置を示す。

東京湾内の臨海部モデル地区における最大津波高について比較した結果、以下のようなことがわかった。

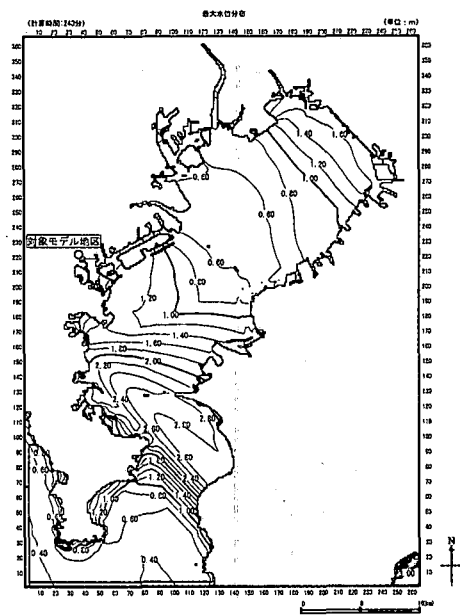
* 正会員 博 (工) (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部

** 正会員 工 博 (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部

*** 正会員 工 修 (株) エコー 沿岸デザイン本部



図一 大正12年関東地震および元禄関東地震津波の断層位置



図二 東京湾における最大津波高分布

・経度方向については、大正12年関東地震の断層位置(緯度 34.840°N)で、 $+0.5^{\circ}$ 移動させた断層位置④の場合に、津波高は 1.64 m で最大となる。

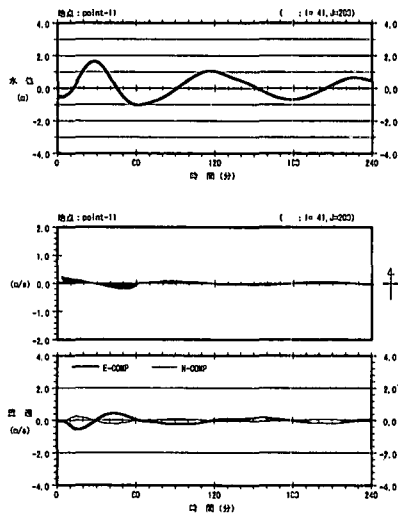
・緯度方向については、 -0.25° 移動させた断層位置⑧の場合に、津波高は 0.84 m 程度で最大となる。

したがって、経度方向にずれた断層位置④が、臨海部モデル地区で津波高が最も高くなる条件といえる。

(3) 実験対象波の選定

図一2に断層位置④における最大津波高の計算結果を示す。図一3は対象臨海部前面での水位および流速の経時変化を抽出したものである。図一3より以下のようなことがわかった。

陸境界に非常に近いため、津波第1波のピークで流速がゼロとなり、津波の進行波的特性は現れておらず、むしろ陸境界の影響を受けて定常波的特徴が現れてい



図三 水位および流速の経時変化

る。第1波の最大水位は 1.64 m であった。初期水位の経時変化からもわかるように、地震による断層運動の結果、地盤が沈下している。つまり、陸側も水位と同様に沈下していると考えられ、陸地に対する相対変動量としては 2.17 m と判断できる。

また、前述した元禄関東地震はかなり大型で、そのマグニチュード M は 8.2 で大正12年関東地震 ($M=7.9$) より大きかった。阿部 (1989) の簡便法を用いると、 M が 7.9 から 8.2 になると津波高は約 1.5 倍となった。そこで、対象モデル地区において危険度がもっとも高い条件として、前述の相対津波高 R を 1.5 倍にした $R=3.3\text{ m}$ 、周期 $T=50.0\text{ min}$ を設定した。また、護岸が崩壊して相対津波高がさらに高くなった場合や、津波の周期が短くなった場合についても、同様に検討することとした。

3. 先端流速検定実験

臨海都市の模型を製作するにあたって、底面材質の違いによる先端流速の相違について確認するため、ダムブレイク実験および浸水流速検定実験を実施した。

ダムブレイク実験および浸水流速検定実験における先端部の挙動について、レイノルズ数を求めた。レイノルズ数の算出に用いた代表長さはダムブレイク実験では水柱高とし、浸水流速検定実験では、水路入口近傍における越流開始時の実験水路床前面の水位と、実験水路端部到達時における実験水路床前面の水位を平均したものである。この平均値は、先端部が水路終端に到達するまでの時刻の平均的な浸水深と考えた。底面条件の違いによるレイノルズ数の相違を図一4に示す。

水理模型実験結果をフルードの相似則で現地換算値とするために必要な最小レイノルズ数は一般的に約 2000

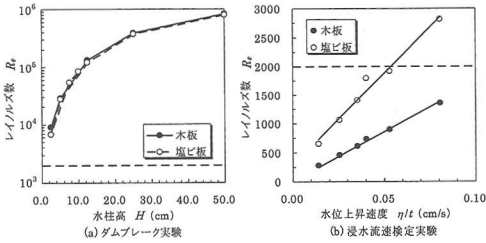


図-4 底面条件の違いによるレイノルズ数の相違

表-1 実験条件

	津波高 R (m)	周期 T (min)	潮位
CASE 1	3.3	50.0	H.W.L.
CASE 2	4.3	50.0	
CASE 3	3.3	33.3	
CASE 4	4.3	33.3	

程度とされている(須賀, 1990)。これは、流れの状態が実験でも乱流状態となり、抗力係数がレイノルズ数によらずほぼ一定となる領域である。ダムブレイク実験では水柱高が充分なためレイノルズ数は大きく、底面素材による違いはみられなかった。一方、浸水流速検定実験では津波先端部の水柱高が非常に小さいため、レイノルズ数は全体的に小さく、底面条件を塩び板とした場合にのみ 2000 を越えた。したがって、フルードの条件下で実験を実施するためには、実地形に近い底面粗度を与えるのではなく、底面摩擦の影響が小さい材質で模型を製作する方が望ましいことが明らかになった。

4. 津波氾濫に関する模型実験

(1) 実験方法

津波の発生には当所の環境インテリジェント水槽の流れ発生装置を応用して、模型前面の水位を変動させることにより津波を擬似的に再現し、市街地へ越流させた。そして、氾濫水先端部の挙動、浸水深、流速、構造物への流体圧および浸水流量を測定した。実験ケースは表-1 に示すとおりである。

(2) 浸水域

図-5 に浸水範囲の経時変化を、水位変動開始時を 0 として示した。実験中に定点から撮影したデジタルビデオ画像を一定の時間間隔で抽出し、浸水流の先端部をトレースした結果である。図中の時間は、実験開始(水位変動開始)からの経過時間の現地換算量である。

津波による浸水範囲の拡がりは早く、津波到達から約 30 分で今回の実験対象域は冠水した。時間が経過するにつれて護岸前面と浸水流先端部との水位差が大きくなるため、越流開始直後よりも時間が経つにつれて、浸水域が急速に拡がる傾向がみられた。また、模型中央下部に位置する地下駐車場への流入は、津波が退いた後も 1 時

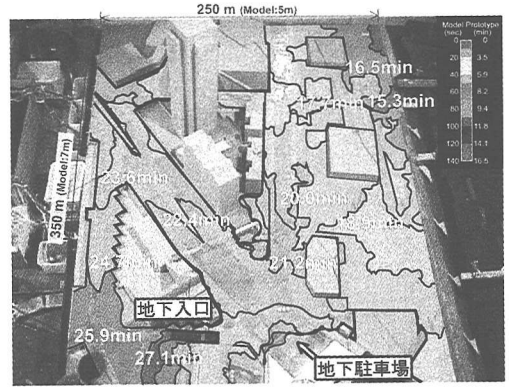


図-5 浸水範囲の経時変化

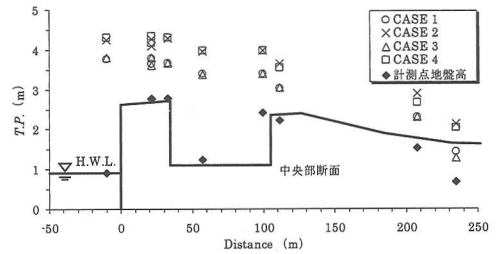


図-6 陸上部における最大水位 (T.P.)

間以上継続していた。

(3) 浸水量

護岸を越流した水を集水して浸水量を測定した。陸上部においては、作用する津波高が大きいほど浸水量が大きくなることを確認できた。地下への流入は、地下の入口が幅 10 m と狭いにもかかわらず、作用する津波高や周期に関係なく、総浸水量の約 10% で非常に多いことがわかった。

(4) 浸水深

最大浸水深を水位 (T.P.) に換算し、護岸距離との関係で示したものを図-6 に示す。図中の実線は、模型中央部の地盤高を示したものである。陸上部では、護岸と道路など場所による違いはあまりみられず約 1 m であった。地盤高が低い所では、人の身長を超える深さ (2 m 以上) になり、危険度は非常に高いといえる。また、地下入口での浸水深はそれほど深くないが、内部では時間が経過するにつれてかなり上昇し、約 2~4 m に達した。

(5) 浸水流速

氾濫水の最大流速を図-7 に示す。氾濫水の最大流速は護岸上で 1~2 m/s であった。図示はしていないが、護岸部では約 1~2 m/s の戻り流れが発生し、引き波によって人が流される危険性がある。道路上では、2~3 m/s と護岸に比べてかなり速くなっており、道路の幅による違いもみられた。

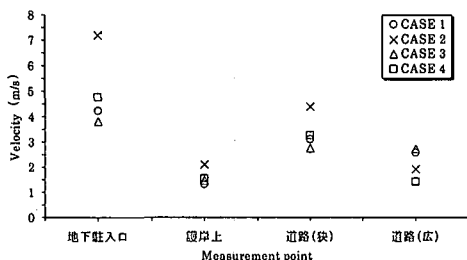


図-7 最大浸水流速

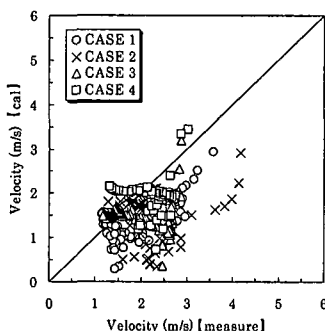


図-8 Bernoulli 流速

一方、図-6からも明らかのように、今回実験対象とした臨海部市街地は、護岸から離れるにつれて緩やかではあるが地盤高が低くなっており、特に護岸距離 130 m 以降で顕著である。このような地形的影響により、浸水流の先端部が市街地内を進むにつれて、流速が徐々に速くなることが推察される。地下駐車場入口は、今回の対象領域で護岸から一番離れたところにあり（図-5 参照）、浸水流速は最も大きく約 4~5 m/s という結果が得られた。津波高の高い CASE 2 では流速はさらに大きくなり、7 m/s 以上であった。

(6) Bernoulli 流速

福岡ら (1997) は、家屋などが密集した地域でない限り、津波による陸上遡上流速を Bernoulli の定理できると報告している。本研究では、高層建造物の建ち並ぶ市街地を検討対象としているが、道路や公園が広く建造物もそれほど密集していない。また、外力として作用する波の周期も比較的に長いので、流れはほぼ定常的なものと考えられる。そこで、陸上部における浸水深測定結果を用いて水位差を求め、Bernoulli の定理を用いて流速（以下、Bernoulli 流速）を算出し、流速測定値と比較した。

図-8 に示したように、浸水流の流れ方向に対して比較的定常的な流れ場（CASE 2 を除く）では、2 点間の浸水深の差から算出できる Bernoulli 流速と測定結果の相関はよいことを確認できた。このことから直接流速計を設置していない点についても、浸水深がわかれば最大流速および定常流速を求めることができると考えられる。

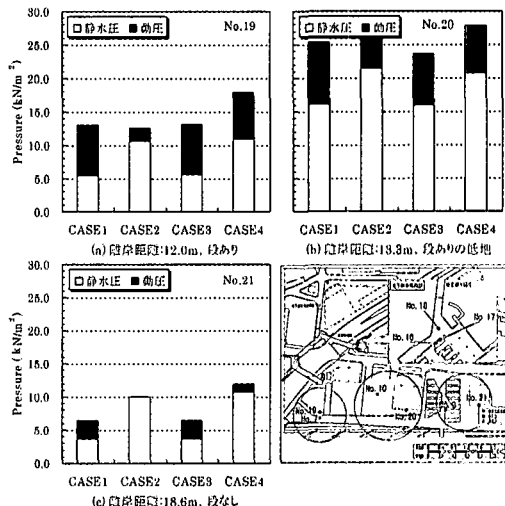


図-9 最大流体圧中の静水圧と動圧

(7) 浸水流の流体圧

護岸背後の建物に作用する最大流体圧の測定値について、最大浸水深から換算した静水圧と、測定値から静水圧を差し引いた動圧の大きさを、図-9 に示す。

計測点 No.21 は他の計測点よりも離岸距離が大きく、護岸背後は平坦な地形となっている。このため、動圧は他の計測点と比べて小さくなった。計測点 No.19 は前面の護岸との間に段がある。この段が堰のようになり、作用する動圧が大きくなった。計測点 No.20 は、護岸よりも低地で、護岸を越流してきた水が落水して作用するため、動圧が大きくなった。また、低地であるため、浸水深が大きく静水圧も大きかった。

このように、護岸との段差がある地点では、衝撃的な流体圧が大きくなるため、注意が必要である。さらに、地盤高が低いところでは、浸水深が大きいので静水圧も大きくなり、危険度はさらに増すことがわかった。

(8) 津波流体力の評価と被害想定

浸水平面実験において測定した流体圧および浸水深から、構造物へ作用する流体力の評価と被害想定を行う。測定した動圧に前面の浸水深を乗じて、建造物に作用する単位幅あたりの抗力を求め、飯塚・松富 (2000) が提案している家屋等への被害判断基準と比較した。

図-10 によると、危険度ランク②に属している結果もある。ランク②とは、コンクリートブロックが小破する危険度レベルである。都市部では、主に鉄筋コンクリート製の建造物が多いと考えられるので、建物が崩壊する危険性は小さい。しかし、エントランスなどのガラス製の部分については、破壊されて 1 階部分が浸水に至る危険性が高いため、注意が必要である。

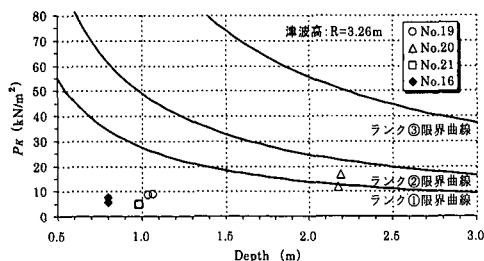


図-10 建造物に対する危険度評価

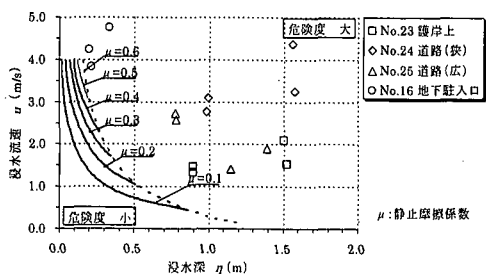


図-11 人の転倒限界による危険度評価

(9) 避難に関わる危険度評価について

都市部などの市街地において浸水災害が発生した場合、陸上部はもとより、特に地下空間などでは内部に人が閉じ込められる可能性もあり、閉じ込められた人が外部への避難が安全にできるかどうか大きな問題となる。そこで、浸水平面実験より得られた氾濫水の外力条件(浸水深 η 、流速 u)に対して、人が安全に避難できる状態にあるかどうかを検討する。

市街地での浸水災害において、人に対する危険度は流れに対する人の転倒で評価できると考えられる。流れと人の転倒の関係について、高橋ら(1992)が構築した転倒限界モデルを適用した。陸上部における流速および浸水深から、人の転倒に対する危険度評価を行った。図-11によると、いずれの地点においても測定結果は転倒限界曲線以上であり、人への危険度は非常に高いことがわかった。護岸付近では浸水深が、地下入口では流速がそれぞれ大きな影響を及ぼしていた。

また、車に対する被害状況について、須賀ら(1995)による指標を参考にして検討した。道路における最大浸水深は0.7~1.0 m程度であった。この場合、車両内からの人の脱出は困難になるだけでなく、車体が浮き上がり流される危険性は高いとされており、津波氾濫によって走行中の車は危険になることがわかった。

5. おわりに

地上と地下を再現した3次元模型実験によって、複雑な地形における氾濫水の挙動特性や地下での浸水深、進

入速度などを再現し、地下空間における浸水の危険度の大きさを検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 津波による浸水域の拡大は早く、今回の対象領域では津波到達から約30分で冠水する結果が得られた。
- (2) 地下駐車場内に流入する流量は、津波条件にかかわらず総流量の約10%であった。
- (3) 陸上部における最大浸水深、最大流速は、地形的な特性を除けば津波高により決まることがわかった。
- (4) 流れがほぼ定常状態であると考えられる地点では、定常状態の流速値は、Bernoulliの式で水位から換算される値で表すことができた。
- (5) 測定した流体圧で建造物の被害想定を行った結果、地形条件によっては許容値を超える場合があり、危険度が大きいことが確認された。
- (6) 浸水災害時における人の避難危険度について検討した結果、危険度指標を大きく越えることを定量的に評価できた。

沿岸津波については、その危険度が広く認知されているのに対し、津波による市街地内の氾濫災害については、普段あまり想定されていない。このような都市部において、津波氾濫が発生すると、たとえ浸水深が小さくとも、人に与える危険度は非常に大きいことを明らかにした。また、地下空間においても、避難が困難になることが明らかになった。今後の臨海部における浸水対策に資することのできる結果が得られたといえる。

最後に、本研究は科学技術振興調整費による「都市複合空間水害の総合減災システムの開発に関する研究」の一環として実施したことを付記する。

参考文献

- 阿部勝征 (1989): 地震と津波のマグニチュードに基づく津波高の予測, 地震研究所彙報, 64, pp. 51-69.
- 飯塚秀則・松富英夫 (2000): 津波氾濫流の被害想定, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 381-385.
- 後藤智明・佐藤一央 (1993): 三陸沿岸を対象とした津波数値計算システムの開発, 港研報告, 第32巻, 第2号, pp. 3-44.
- 須賀堯三 (1990): 水理模型実験, 山海堂, p. 12.
- 須賀堯三 (1995): 利根川の洪水 語り継ぐ流域の歴史, 利根川研究会編, 山海堂, 217 p.
- 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗 (1992): 越波時における防波堤上の人の転倒に関する研究, 港研報告, 第31巻, 第4号, pp. 3-31.
- 平石哲也・柴木秀之・原崎恵太郎 (1997): 津波表示装置による南海道津波危険度評価について, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 331-335.
- 福岡捷二・川島幹雄・横山洋・水口雅教 (1997): 家屋群に作用する氾濫流の流体力に関する実験的研究, 水工学論文集, 第41巻, pp. 693-698.
- Scholz, C. H., T. Kato (1978): The behavior of a convergent plate boundary: crustal deformation in the south Kanto district, Japan. Jour. Geophys. Res., 83, B2, 783-797.