

家屋による抵抗を考慮した津波遡上計算

油屋 貴子*・今村 文彦*

1. はじめに

沿岸地域の津波被害や危険度を予測するためには、土地利用を考慮した津波遡上計算により、津波の挙動を的確に把握する必要がある。従来の津波遡上計算では、Manning粗度を一様に与える方法(相田, 1977), または土地利用毎に数段階に粗度を与える方法(小谷ら, 1999)が一般的であった。しかし、津波の非定常性や個々の家屋を考慮した計算は行われていないのが現状である。そこで本研究では、津波に対する家屋の抵抗をモデル化し、津波遡上計算に取り入れることによって、浸水深や遡上域がどの程度変化するかを従来の方法と比較する。

2. 家屋を考慮した遡上計算手法

数値計算における空間格子間隔と家屋スケールとの関係によって、次の2つの計算手法が考えられる。

① 家屋を高い地盤と考える場合-地形モデル
家屋の大きさに対して格子間隔が小さい場合は、家屋間を流下する際の縮流による流速の増大や家屋の上流側での水位の堰上げなど、細かな流況が再現可能であると思われる。しかし、数m程度の細かい格子間隔が必要であり、実用的な方法とはいえない。

② 家屋を抵抗要素と考える場合-抵抗モデル
大きな格子間隔で解く場合は、家屋によるエネルギー損失をなんらかの形で取り入れなければならない。各格子に粗度を与える方法も抵抗モデルの一つである。

3. 家屋の抵抗モデル

3.1 合成等価粗度の提案

地形モデルやMorison式を用いた抵抗モデルの再現性は高いと考えられるが(原田ら, 2000), 実際に適用するには複雑である。そこで、精度が高く簡便な方法として合成等価粗度を提案する。流水に作用する力は、式(1), (2)で表される底面摩擦力 R_1 と家屋の抵抗力 R_2 の合力である。これを再び等価な摩擦力として置き換えることにより、合成等価粗度は式(3)のように導かれる。

$$R_1 = \rho g D \frac{n_0^2 u^2}{D^{4/3}} dx dy \left(1 - \frac{\theta}{100} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$R_2 = \frac{1}{2} C_D \rho u^2 (kD) \frac{\theta}{100} dx dy / k^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$n = \sqrt{n_0^2 + \frac{C_D}{2gk} * \frac{\theta}{100 - \theta} * D^4} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 n は合成等価粗度、 n_0 は底面粗度、 D は水深、 k は家屋の幅、 u は流速、 θ は家屋占有率、 C_D は抵抗係数、 dx, dy はそれぞれ x, y 方向の格子間隔である。

従来のManning粗度は一定値または経験的に与えられるのに対して、合成等価粗度 n は、 $C_D \cdot$ 家屋占有率 \cdot 水深によって合理的に求まることになる。

3.2 抵抗係数 C_D の算定

津波は非定常性が強く、波力や衝撃力などが作用すること等の影響があるため、定常流における C_D 値を用いた場合、抵抗力を過小評価してしまうと考えられる。そこで、非定常下における C_D を算定するためにFig. 1に示す全長12mの水路で水理実験を行った。水路に

*東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター

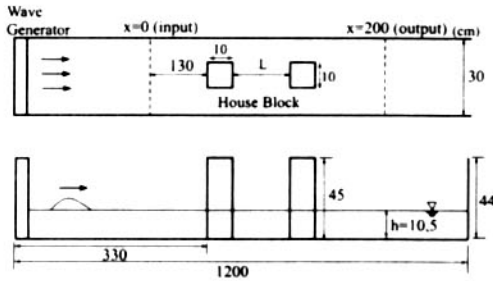


Fig. 1 Experimental set-up

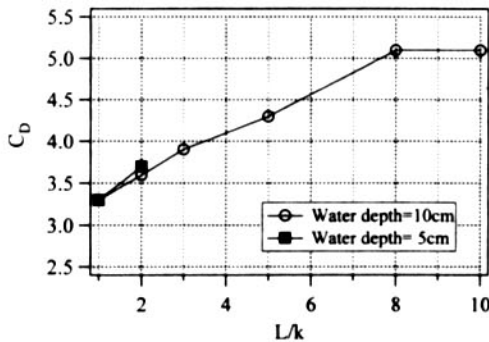


Fig. 2 Drag coefficient evaluated by the hydraulic experiment

は家屋を想定した角柱模型を2つ設置し、水路端の鉛直造波板から段波を発生させた。家屋模型間の距離 L は10, 20, 30, 50, 80, 100cm, 静水深は5cmおよび10cmとした。 C_D はそれぞれの模型で次式(4)より算定し、平均値をとった。 F_{\max} は抵抗力の最大値である。

$$C_D = F_{\max} / \frac{1}{2} \rho u^2 \text{max} k D \quad \dots \dots \dots (4)$$

Fig. 2より C_D は家屋間隔および密度に関係していることがわかる。非定常下の付加質量力も C_D を用いてモデル化しているため、その値は通常より大きい。

本実験で想定した津波を現時スケールに換算すると、住宅地域で6mおよび3m程度の波である。浸水深と家屋被害の関係(首藤, 1994)を考慮すると、最大規模と中規模の津波を想定していることになる。しかし、 C_D は津波の規模には依存しないことがわかった。

3.3 水理実験の再現計算

算定された抵抗係数 C_D を用いて実験の再現

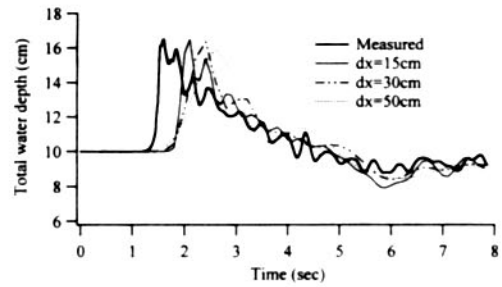


Fig. 3 Comparison between the calculated and measured total depth (Equivalent roughness)

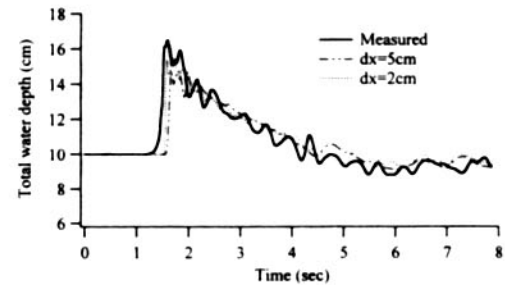


Fig. 4 Comparison between the calculated and measured total depth (Topography model)

計算を行い、合成等価粗度モデルを用いた計算の再現性について検討した。格子間隔 dx は15cm, 30cm, 50cmとした。結果の一例として、静水深10cm, $L/k=1$ の模型通過の全水深をFig. 3に示す。最も大きな $dx=50$ cmではややピークが低下しているが、格子間隔が小さいほど実験値と良好に一致することがわかった。また、地形モデルの再現性についても検討した。格子間隔 dx は2cm, 5cmとした。Fig. 4より、ピーク及び波形勾配ともに実験値とほぼ一致しており、家屋を地盤として扱う地形モデルで最も良い結果が得られることがわかった。しかし、合成等価粗度を用いた場合でもピーク値は十分に再現できることがわかった。

4. モデル地形での津波遡上計算

4.1 計算条件

ここでは、家屋のみの影響を検討するために仙台湾沿岸の荒浜住宅地域を想定したモデ

ル地形を設定し、単純条件下での効果を調べた。モデル地形は居住区の規模が大きなCase-1と小さなCase-2の2ケースを設定した。計算方法は、Table 1に示すように、(a)合成等価粗度、(b)土地利用を考慮した一定粗度、(c)土地利用を考慮しない一様粗度の3種類である。荒浜は住宅が密集した地区であるため、合成等価粗度のは、の場合に相当する3.3を用いた。また、家屋幅 k は10mとした。格子間隔 dx は5, 10, 20, 50, 100, 200mとし、周期10分、振幅4 m, 7 mの正弦波を沖側の境界に強制入力した。また、地形モデル($dx=2$ m)による結果を真値とみなし、それぞれの計算方法による結果と比較を行った。

Table 1 Calculation methods for residential model

Calculation method	Roughness coefficient n	
	Residential area	Others
(a) Equivalent roughness	$n = \sqrt{n_s^2 + \frac{C}{2gd} + \frac{\theta}{100 - \theta} \cdot D^2}$	0.025
(b) Constant roughness-1	0.06	0.025
(c) Constant roughness-2	0.025	

4.2 浸水深の計算結果

まず、最大浸水深について地形モデルとの比較を行った。結果の一例として居住区の規模が大きいCase-2の結果をFig. 5に示す。入射波振幅は7 mである。

(a)の合成等価粗度を用いた結果をみると $dx < 50m$ では精度の向上がみられた。ただし、50mよりも大きな格子間隔については浸水深が低下することがわかった。その原因としては以下のようなことが考えられる。格子間隔が大きい場合には、格子の上流境界と下流境界における流量や水深の差も大きくなるはずである。しかし抵抗力の算定に用いる水深や流速は上流境界の値であるため、格子内の抵抗力が過大評価されてしまうことになる。

一方、(b)についても格子間隔が大きくなるにつれて浸水深が低下しており、合成等価

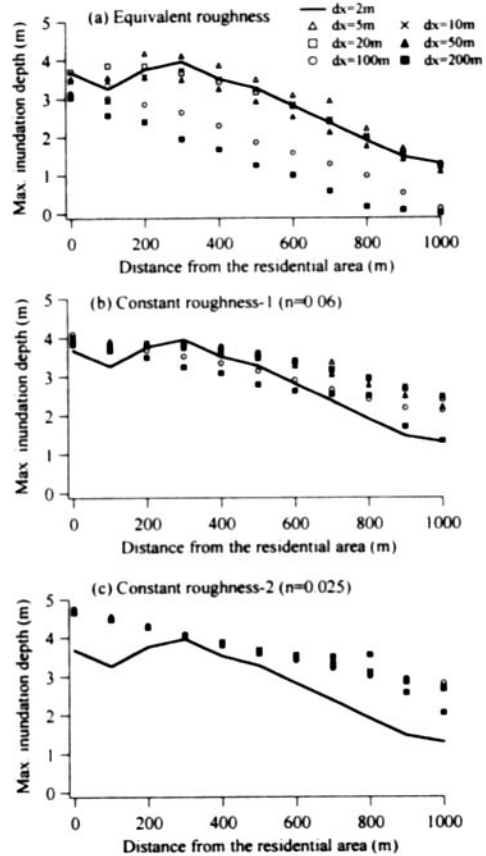


Fig. 5 Calculated maximum in the undation depth (Case-2, Amplitude of incident wave=7 m)

粗度と同様の傾向がみられた。また、土地利用を考慮しない(c)の計算法では、津波規模および居住区規模に関わらず格子間隔による違いはみられなかった。

また、(b)、(c)どちらの結果をみても、居住区から離れるにしたがって地形モデル($dx=2$ m)とのずれが大きくなっている。一定粗度を用いた場合、居住区内におけるエネルギー損失が過小に見積もられるため、居住区通過後の減衰率も小さくなっていると考えられる。

4.3 遡上距離の計算結果

津波がどれだけ遡上したのかについて具体的な値を得るために、岸沖方向の最大遡上距離を算定した。Fig. 6は地形モデルと比較した最大遡上距離の絶対誤差を示した結果であ

る。縦軸が0に近いほど地形モデルによって算定された最大遡上距離と等しいことを示している。地形モデルにより算定された最大遡上距離は、Case-1で振幅4mの場合に1748m、7mの場合に2444mとなっており、Case-2で振幅4mの場合に1476m、7mの場合に2018mとなっている。

どの計算方法においても格子間隔が大きくなるにしたがって最大遡上距離が小さくなっているが、この傾向は (a) (b) (c) の順に顕著である。(b) の一定粗度を用いた場合には、津波の規模や居住区の規模によって結果が異なってくるので、どの格子間隔を用いればよいということは一概にはいえない。このことは土地利用を考慮しない計算方法 (Constant roughness-2) にも当てはまる。ただし、津波の規模が大きく居住区規模が小さい場合、つまり、土地利用があまり複雑でない場合には、一定粗度 (b), (c) のどちら計算方法を用いても、格子間隔によらず良好な結果が得られるということがわかった。

一方、(a) の合成等価粗度は水深によって家屋抵抗が変化するので、津波の規模による

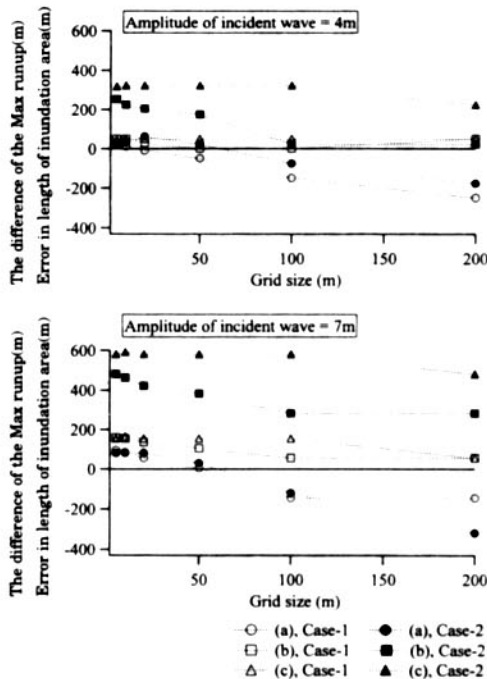


Fig. 6 Calculated length of the inundation area

Table 2 Errors of run-up calculation methods

Grid size (m)	Equivalent roughness		Constant roughness-1		Constant roughness-2	
	Inundation depth	Max run-up	Inundation depth	Max run-up	Inundation depth	Max run-up
5	○	○	△	×	△	×
10	○	○	△	×	△	×
20	○	○	△	×	△	×
50	○	○	○	×	△	×
100	×	×	○	△	△	×
200	×	×	○	△	△	×

overestimation red, underestimation blue
 Maximum run-up
 ~100m ○
 100m~300m △
 300m~ ×
 Inundation depth
 ~50cm ○
 50cm~100cm △
 100cm~ ×

影響を考慮することができる。格子間隔が大きい場合には遡上域を過小評価していたが、どのような津波規模および居住区規模であっても、格子間隔をおおよそ50mより小さくすれば誤差を100m以内に抑えることができ、従来の遡上計算法よりも精度良く遡上域を算定できることがわかった。

4.4 遡上計算法の評価

最大浸水深と最大遡上距離の結果をもとに、それぞれの遡上計算方法を評価した。Case-1を「居住区規模・小」、Case-2を「居住区規模・大」、また、入射波振幅4mの場合を「津波規模・中」、振幅7mの場合を「津波規模・大」としてそれぞれの組み合わせにより4通りの評価を行った。そのうち「津波規模・大、居住区規模・大」の結果をTable 2に示す。最大浸水深の絶対誤差が50cm以下を○、50cm~100cmを△、100cm以上を×で表した。最大遡上距離の絶対誤差については、津波の規模によらず、絶対誤差が100m以下を○、100m~300mを△、300m以上を×で表し、過小評価は全て×とした。計算方法を選択する際の基準として、格子間隔が50m以下では(a)を、それ以上の場合には(b)の方法がよいと判断できる。

5. 実地形での津波遡上計算例

5.1 計算条件

ここでは、仙台湾沿岸の実際の地形データ

を用いて遡上計算を行い、モデル地形の場合と同様に従来の遡上計算法と比較した。格子間隔は25m、沖側の入射波振幅は4mである。土地利用は居住区、森林、その他の3区分とした。(a)の合成等価粗度における森林の C_D は円柱の値、占有面積率 θ と樹木の直径は現地調査結果(油屋, 2000)による平均値を与えた。また、居住区域の C_D 、 k および θ についても各区域の平均値を与えた。(b)における森林の粗度は0.03とした。

5.2 計算結果

Fig. 7の(a)は合成等価粗度、(b)は一定粗度を用いて得られた最大浸水深分布である。合成等価粗度による結果をみると、住宅地域および仙台空港付近で浸水深の大きな領域が生じており、通過後は浸水深が小さくなっている。それに対して(b)では浸水深の大きな領域が広く分布していることがわかる。(b)の結果と土地利用を考慮しない結果では、ほとんど差がみられなかった。また、

(a)と(b)の遡上距離を比較すると600m~700m程度の差が生じており、樹木と家屋の抵抗力を取り入れることによって津波の減衰効果に大きな違いが生じることがわかった。

6. 結 論

家屋を考慮した津波遡上計算法としては、家屋を高い地盤として扱う地形モデルと抵抗要素として扱う抵抗モデルが考えられる。本研究では、実用的な抵抗モデルとして、家屋の影響が水深と占有面積率で評価される合成等価粗度を提案し、水理実験により抵抗係数を算定した。仙台湾沿岸のモデル居住区における1次元伝播計算では、格子間隔が50mよりも小さい場合に最大浸水深と最大遡上距離の精度が向上し、それよりも大きな格子間隔では従来モデルを用いたほうが良いことが示された。仙台湾沿岸における津波遡上計算では、家屋と樹木の抵抗を合成等価粗度により評価し、計算を行った。従来の一定粗度を用いた計算結果と比較すると遡上域が大きく減少することがわかった。

参 考 文 献

- 1) 相田 勇: 陸上に溢れる津波の数値実験 - 高知県須崎および宇佐の場合 - 地震研究所彙報, 第52号, pp. 441-460, 1977.
- 2) 小谷美佐: GISを用いた津波計算と被害推定法の開発, 東北大学大学院修士論文, pp. 18-30, 1999.
- 3) 原田賢治ら: 防潮林の津波に対する減衰効果の検討, 海岸工学講演会論文集, 第47巻, pp. 366-370.
- 4) 首藤伸夫: 北海道南西沖地震津波による家屋の被害, 津波工学研究報告, 第11号, pp. 11-28, 1994.
- 5) 油屋貴子: 仙台湾沿岸における防潮林の津波低減効果, 東北大学工学部土木学科卒業論文, 2000.

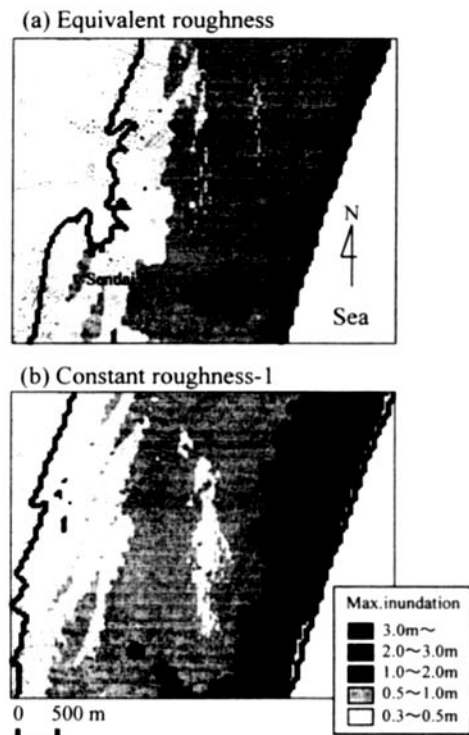


Fig. 7 Maximum inundation near the Sendai airport