

# 海面埋立地の最適地盤高

川北 米良

## 1. まえがき

海面水域を埋立てて土地を造成する場合は、内陸の場合と異なり、特に台風や地震津波に起因する異常高潮の発生による土地の浸水災害の危険性を計画当初に考慮する必要がある。埋立地を高潮浸水災害から防御するためには、埋立地盤高を高くするか、あるいは埋立地周辺を防潮堤または防潮壁で包囲する方法が考えられるが、ここでは埋立地盤高を高くする方法を考えることにする。

もし、その海岸における発生可能の絶対最高潮位がなんらかの方法で求められれば、高潮浸水災害に関する限り、この潮位にもとづいて埋立地盤高を決定すれば安全であるが、このような絶対最高潮位の推定は現在までのところ不可能である。このため従来は、その海域の天文潮位である平均満潮位に台風などにもなって生ずる最大潮位偏差を加え、さらに経験的な余裕高を足した高さに決定されている。

将来、地盤沈下が予測される場合には、その予測沈下量がさらに加算される。最大潮位偏差としては、既往最大の高潮偏差、あるいはモデル台風が当該地に最大の高潮を発生させると考えられる経路で襲来した場合の潮位偏差の推算値が用いられている。このモデル台風には過去に大災害をもたらした最大規模の台風が想定される。けれど

も、こうして決定された高潮の偏差値は、さらに大きな高潮が発生すると、計画値としての意味が薄れ、埋立地の高潮に対する安全性に疑問が生じ、そのつど計画に用いた高潮偏差値の更新と埋立地盤高あるいは防潮施設の天端高の嵩上げの必要に迫られる場合がある。

たとえば東京都の高潮対策事業における計画高潮位の経年推移を見ると、1949年8月31日襲来の Kitty 台風時の高潮にもとづき1950年に計画高潮位は  $A P + 3.15m$  に定められ<sup>1)</sup>、これが1956年には1917年10月1日の台風のさいの東京港の既往最高潮位  $A P + 4.21m$ <sup>5)</sup> に改定され、さらに1959年の伊勢湾台風の発生により再び改定されて  $A P + 5.10m$  となった。

また、高潮偏差の実測値と推算値について見ると、1966年9月25日の6626号台風による駿河湾奥部の田子の浦における高潮偏差の実測値は  $1.06m$  であるのに対し、推算値は  $0.42m$  であり、1970年8月21日の7010号台風による土佐湾奥部の桂浜での偏差実測値は  $2.35m$  であるのに対し、推算値は  $0.85m$  であり、高潮偏差の推算値より実測偏差の方が大きいことがある。

さらにまた、実測潮位と設計天端高の比較例を見ると、1953年2月1日の Rotterdam におけるアイスランド低気圧による高潮の実測値は、海岸堤防の設計天端高より  $0.5 \sim 0.7m$  も高い平均海面上  $3.75m$ 、偏差  $2.7m$  であった。

このようなことから、埋立地の完成後に地盤や

かわきた よねお 日本大学 理工学部土木工学科  
〒101 千代田区神田駿河台1-8

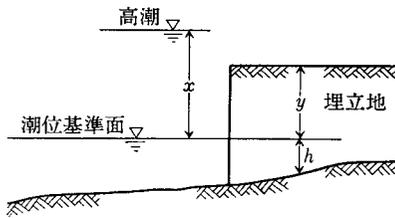


図1 高さおよび水深の記号

防潮施設の嵩上げ工事の必要性が生じて、すでに土地利用が高度化して社会的諸機能の活動に大きな障害を与えるため、嵩上げ工事が困難となることが多い。よって海面埋立地の造成においては、当初に合理的で妥当な埋立地盤高を決定することが肝要である。

本論文は公共の海面埋立土地造成を対象とし、高潮発生頻度、埋立土地の建設費、土地利用に対応する damage potential の高潮浸水被害の危険性および埋立工事竣工後の地盤沈下の有無を考慮した埋立地盤高の決定法について理論的考察を行なったものである。

埋立地盤高の算定モデルは、建設費と高潮浸水被害の期待値の和を最小にする確率的計画法で、地盤沈下のない場合、地盤沈下が短期に終了する場合、および地盤沈下が長期間継続する場合、の3つに分類した。そして泉州沖の埋立土地造成を例にとり、この方法を適用し、それぞれのパラメータを変動させて埋立地盤高の試算を行ない、この方法の妥当性と合理性を検討した。

## 2. 最適埋立地盤高とその算定モデル

一般に埋立土地の建設費  $M$  は埋立地盤高  $y$  を高くすればするほど増大するので、 $M$  は  $y$  の関数と考えられる。また埋立予定地の海域で発生する高潮の潮位  $x$  の発生頻度は通常、長期的に見るとき無作為の確率事象とみなされる。したがって埋立地が完成後に高潮の浸水被害を受けた場合を想定して、その被害予測値を埋立地の年間高潮浸水被害の期待値  $\Psi$  で評価することにする。

いま埋立地の damage potential を一定とする

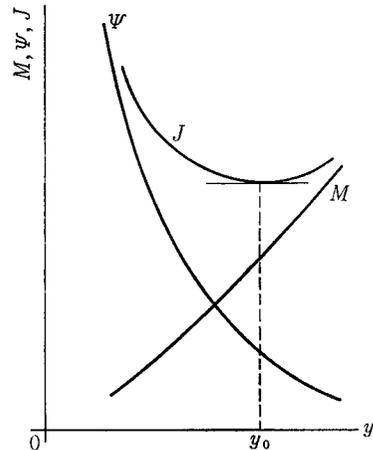


図2 埋立地盤高  $y$  の変化に対する  $M$ ,  $\Psi$  および  $J$  の関係

と、 $\Psi$  は、地盤沈下を考慮に入れれば、 $y$  と経過年数  $t$  の関数と考えられる。 $\Psi$  は金額表示できるものとする。 $x$  および  $y$  は、それぞれある潮位基準面より測った潮位および埋立地盤高である。以下、この潮位基準面を東京湾平均海面 (TP ± 0) に定める<sup>2)</sup> (図1参照)。

埋立地盤高の変化に対する建設費と年間高潮浸水被害の期待値との関係は、 $y$  を高くすれば  $M$  は大となり、 $\Psi$  は小となる。逆に  $y$  を低くすれば  $M$  は小となり、 $\Psi$  は大となる。すなわち埋立地の高潮対策は、まれに起こる高潮災害に対して、費用を防備のために費すか、被害のために失うかの問題に帰着する (図2)。

そこで毎年期末の社会的割引率を年率  $r$  の複利計算として、建設費と年間高潮浸水被害の期待値の累年の和の現在価値  $J$  を求める。 $y$  の変化に対する  $J$  の変化の様子は1つの極小値を有する連続関数である。 $J$  が最小となる場合が investment-risk trade off の状態で、この場合の埋立地盤高を、このモデルにおける最適埋立地盤高と定義する。

モデルの定式化を簡単にするため、埋立土層は土地利用による載荷重に対し十分な支持力を有し、土層の圧縮沈下は生じないように施工されるものとする。そして計画埋立地盤高はモデルから

求められる最適埋立地盤高の計算値に、土地利用の機能上の支障の有無、地盤高を越える高潮発生 of return period, 事業予算、隣接地域との関連性などについての適否の検討が加えられて最終的に決定されるものとする。埋立地の水際線における波浪の越波に対する防護施設は必要に応じて別途計画されるものとして、ここでは論及しない。

## 2.1 地盤沈下のない場合のモデル

このモデルは埋立区域の海底基礎地盤が堅固で、地盤沈下が生ずることなく、計画埋立地盤高が将来も一定に保持されるものとみなし得る場合に適用する。地盤沈下のない場合の年間高潮浸水被害の期待値は  $y$  のみの関数で、これを特に  $\Psi_0$  で表わす。土地利用開始の年を初年度として、第  $t$  年期の  $\Psi_0$  の現在価値は  $\Psi_0/(1+r)^t$  であるから、 $J$  は次式のように書ける：

$$(1) \quad J = M + \sum_{i=1}^t \{\Psi_0/(1+r)^i\} \\ = M + \{1 - (1+r)^{-t}\} \Psi_0/r$$

埋立土地の耐用年数は理論的に無限大とみなされ、埋立地周辺の護岸や係船岸などの諸施設の耐用年数も  $t=50\sim 80$  年と、かなり長い。社会的割引率は  $r=0.06\sim 0.1$  の値が想定されるので、 $(1+r)^{-t}$  の値は 1 に比してはるかに小さいから省略する。よって、建設費と年間高潮浸水被害の期待値の累年の和の現在価値  $J$  は  $t \rightarrow \infty$  に対する

(1) 式の収束値

$$(2) \quad J = M + (\Psi_0/r)$$

で求められる。(2) 式で与えられる  $J$  は  $y$  のみの関数である。(2) 式の  $J$  を最小ならしめる  $y$  の値が地盤沈下のない場合の最適埋立地盤高で、これを  $y_0$  で示す。

## 2.2 短期沈下終了モデル

埋立土地造成後に生ずる地盤沈下が数年以内の比較的短期間に終了することが予想される場合には、計画埋立地盤高  $y$  は沈下終了時に、地盤沈下のない場合の最適埋立地盤高  $y_0$  に収束するように、あらかじめ  $y_0$  に高さの増分を加えて  $y$  を決定する。軟弱土層が地中深くにあり、この軟弱土層

の土質改良による耐支力の増強が困難な場合には、埋立地盤高を高くすればするほど、埋立土の自重が増し、そのために基礎の軟弱土層が圧縮されて、最終圧密沈下量が増す。いま埋立地盤高を  $y$  としたときの軟弱土層の最終圧密沈下量を  $S_0$  とすれば、 $S_0$  は  $y$  の関数で

$$(3) \quad y = y_0 + S_0(y)$$

と書ける。 $y_0$  が与えられるとき、(3) 式を満足する  $y$  がこのモデルにおける計画埋立地盤高である。しかし、この  $y$  は経済的な意味では最適値とならない。

## 2.3 長期沈下継続モデル

埋立地の地中深くに軟弱土層があり、その土質改良工事が不可能で埋立地の完成後に長年月にわたる緩やかな圧密沈下現象が継続することが予測される場合には、(3) 式によると埋立地盤高が過大となり、埋立土地造成事業が経済的に実現困難となることがある。このような場合にこのモデルを適用して最適埋立地盤高を求める。そして諸施設の耐用年数と考え合わせて、ある期間を経過した将来時点で地盤高を更新する計画を当初より立案するものとする。地盤沈下のある場合は、埋立地表面が年数の経過とともに低下し、高潮が浸水した場合には、その低下量だけ浸水深さが増すので、高潮被害が増大する傾向にある。ゆえに年間高潮浸水被害の期待値  $\Psi$  は  $y$  と  $t$  の関数で、これを次のようにおく：

$$(4) \quad \Psi = \Psi_0 + \delta_t$$

ここに  $\delta_t$  は第  $t-1$  年期末から第  $t$  年期末までの 1 年間の地盤沈下による埋立地の年間高潮浸水被害の期待値の増分で、 $t$  は埋立土地利用開始の年を初年度とする経過年数である。 $\delta_t$  の現在価値は  $\delta_t/(1+i)^t$  であるから、(4) 式を用いれば第  $t$  年期末の  $J$  は

$$(5) \quad J = M + \{1 - (1+r)^{-t}\} \Psi_0/r + \sum_{i=1}^t \{\delta_i/(1+r)^i\}$$

となる。よって  $t \rightarrow \infty$  に対する (5) 式の収束値は

$$(6) \quad J = M + (\Psi_0/r) + \sum_{i=1}^{\infty} \{\delta_i/(1+r)^i\}$$

で与えられる。(6) 式の  $J$  は  $y$  のみの関数で、こ

の  $J$  を最小ならしめる  $y$  の値がこのモデルの最適埋立地盤高である。

### 3. 建設費

埋立土地造成の建設費  $M$  は  $y$  に関する工費をとりあげ、護岸工費  $M_1$ 、係船岸工費  $M_2$  および埋立工費  $M_3$  の項に分け、それぞれ最適埋立地盤高の近傍において近似的に

$$(7) \quad \begin{cases} M_1 = a_1 l_1 (y + h_1)^2, \\ M_2 = a_2 l_2 (y + h_2)^2, \\ M_3 = a_3 A (y + h) \end{cases}$$

で表わせるものとする。

ここに  $l_1$  は護岸延長、 $l_2$  は係船岸延長、 $A$  は埋立面積、 $h$  は埋立予定地の平均水深、 $h_1$  は護岸施工箇所の水深、 $h_2$  は係船岸施工箇所の水深、 $a_1$  および  $a_2$  はそれぞれ護岸および係船岸の工費の式の係数、 $a_3$  は単位体積当りの埋立工事単価である。

そのほか埋立地の完成後に年数の経過とともに維持費が必要となるが、この経費は他の費用に比べてはるかに少ないので、年間高潮浸水被害の期待値に含めて考慮されるものとする。(7)式を用いて建設費  $M$  は次のように書ける：

$$(8) \quad M = \sum_{i=1}^3 M_i = m_2 y^2 + m_1 y + m_0,$$

$$(9) \quad \begin{cases} m_0 = a_1 l_1 h_1^2 + a_2 l_2 h_2^2 + a_3 A h, \\ m_1 = 2(a_1 l_1 h_1 + a_2 l_2 h_2) + a_3 A, \\ m_2 = a_1 l_1 + a_2 l_2. \end{cases}$$

### 4. 高潮浸水の被害関数

埋立地が高潮浸水被害を受けた場合、その程度が数量評価可能のものと困難なものがある。数量評価可能の場合は、その単位の選択が必要になる。貨幣単位で被害を統一総合評価できれば便利である。しかし被害を貨幣価値に換算するさいに問題がある。

被害額評価のさいは、被災対象物の使用年数を考慮した残存価値で被害程度を表わす場合と、被災前の効用回復のための復旧費で表わす場合がある。このとき被災対象物の効用に対する価値観の

変遷や、物価の変動の問題の処理がともなう。数量評価の困難な被害には、人命、心理的民生安定、利便性、景観、歴史および芸術的資産などの有形無形の損害がある。さらにまた複合災害の原因別被害評価の問題もある。これらについては適当な配慮がなされるものとして、本論文では埋立地の高潮浸水被害の総合的数量評価に、統計資料の比較的多い金額表示を採用する。そして年次の異なる被害額については基準年次を定めて修正するものとする。

なお、上記のような被害評価の不確実性のほかに、**damage potential**の時間的推移もあるから、計画時点における埋立地盤高の算定モデルに用いる高潮浸水被害の推定値としては将来を考慮した概数値をとらざるを得ない。そこで高潮が発生したとき、その潮位が埋立地表面以下の場合は、埋立地内に高潮被害は生じないものとし、潮位が埋立地表面以上の場合は、[6]にもとづき[4]により埋立地内に、潮位と埋立地盤高との差で表わされる浸水深さに比例する高潮被害が生ずるものと仮定し

$$(10) \quad \varphi(x, y, t) = \begin{cases} k\{x - y + S(y, t)\}, & (x > y) \\ 0, & (x \leq y) \end{cases}$$

とする(図1)。ここに  $\varphi(x, y, t)$  は1回の高潮の発生による完成後の埋立地内の浸水被害の推定額で、これを被害関数と名づける。 $S(y, t)$  は埋立地の地中に圧縮性の軟弱土層がある場合の時刻  $t$  における圧密沈下量で、 $k$  は被害の程度を表わす係数で、これを被害係数と呼ぶことにする。

### 5. 年間高潮浸水被害の期待値

埋立地の完成後に高潮の襲来により浸水災害が発生した場合の年間被害期待値は、 $f(x)$  を高潮の発生確率密度関数とし、 $t = 0$  における埋立地盤高が  $y$  に計画されたとすると、 $(t - 1)$  年から  $t$  年までの1年間の高潮浸水被害の期待値  $\Psi(y, t)$  は(10)式を用いて次式で与えられる：

$$\Psi(y, t) = n \int_{t-1}^t \int_y^{\infty} \varphi(x, y, \tau) f(x) dx d\tau$$

$$=nk \int_{t-1}^t \int_y^\infty \{x-y+S(y,\tau)\} f(x) dx d\tau$$

$$=nk \left[ \int_y^\infty (x-y) f(x) dx \right. \\ \left. + \int_{t-1}^t \int_y^\infty S(y,\tau) f(x) dx d\tau \right],$$

$$(11) \quad \Psi(y,t) = \Psi_0(y) + \delta_t(y,t), \quad (t=1,2,3,\dots).$$

ここに、 $n$  は平均年間高潮発生度数で、また

$$(12) \quad \Psi_0(y) = nk \int_y^\infty (x-y) f(x) dx,$$

$$(13) \quad \delta_t(y,t) = nk \int_{t-1}^t \int_y^\infty S(y,\tau) f(x) dx d\tau \\ = nk \int_{t-1}^t \left[ S(y,\tau) \int_y^\infty f(x) dx \right] d\tau$$

である。

## 6. 高潮の発生頻度分布と再現期間

(11)式を計算するためには、埋立計画海域における高潮の発生確率密度関数  $f(x)$  が必要である。高潮の発生頻度分布については、その潜在的存在性の理論も分布関数形の設定も未だないが、ここでは、その分布形を仮定し、高潮の偏差過高値と天文潮位の合成潮位を変量とし、その特定値以上の潮位を母集団とする。埋立地盤高の計画はまれに起こる大きな高潮を対象とするから、分布の下限が有限あるいは $-\infty$ で、上限が $+\infty$ の関数形が考えられる。ここでは  $f(x)$  に指数分布、対数極値分布および Gumbel 分布を仮定し、これらを地域特性に応じて選択することにする<sup>3)</sup>。すなわち：

指数分布

(14) 確率密度関数 (PDF) :

$$f(x) = \begin{cases} \lambda \exp\{-\lambda(x-b)\}, & (b \leq x < \infty) \\ 0, & (x < b). \end{cases}$$

(15) 累積分布関数 (CDF) :

$$F(x) = \begin{cases} \int_b^x f(u) du = 1 - \exp\{-\lambda(x-b)\}, & (b \leq x < \infty) \\ 0, & (x < b). \end{cases}$$

ここに  $F(x)$  は  $f(x)$  の累積分布関数で、 $\lambda$  および  $b$  は指数分布のパラメータである。

対数極値分布

$$(16) \quad \text{PDF} : \begin{cases} f(x) = \frac{\lambda_i}{x-b_i} \exp(-\xi - e^{-\xi}), \\ \xi = \lambda_i \ln \frac{x-b_i}{x_i-b_i}, \quad (b_i < x < \infty). \end{cases}$$

$$(17) \quad \text{CDF} : F(x) = \int_{b_i}^x f(u) du = \exp(-e^{-\xi}).$$

ここに  $\lambda_i > 0$ ,  $b_i > 0$ ,  $x_i > 0$  で、これらは対数極値分布のパラメータである。

Gumbel 分布

$$(18) \quad \text{PDF} : \begin{cases} f(x) = \lambda_g \exp(-\zeta - e^{-\zeta}), \\ \zeta = \lambda_g(x-x_g), \quad (-\infty < x < \infty) \end{cases}$$

$$(19) \quad \text{CDF} : F(x) = \int_{-\infty}^x f(u) du = \exp(-e^{-\zeta}).$$

ここに  $\lambda_g > 0$ ,  $x_g > 0$  で、これらは Gumbel 分布のパラメータである。

高潮発生の再現期間は(15), (17), (19)のいずれか適合度の良い分布の  $F(x)$  を用いて次式で計算する：

$$(20) \quad T = 1/\{n(1-F(x))\}.$$

ここに  $T$  は潮位  $x$  の発生再現期間である。

指数分布はこの場合のような部分統計値の母集団に対して合理性を有するが、地域によって十分な適合度が得られない。対数極値分布、および Gumbel 分布は年最大あるいは最小値の母集団に対する分布であり、この場合の潮位資料に対して理論的には適当といえない。しかし、これらの分布は平均年間高潮発生度数が 1~2 回程度となるような、かなり高い潮位以上の高潮統計資料に対して良い適合性を有する [5]。

西ドイツの Husum 港では 1634 年以来的 300 年以上の高潮観測記録による高い精度の高潮発生確率の計算値がある。またオランダでは Delta Plan [7] の契機となった 1953 年 2 月の洪水は Hoek van Holland 港で基準面上 3.85m と観測され、その発生確率は 300 年 [12] と 400 年 [1] とも記されている。そして 1953 年の洪水の海岸修復事業における設計潮位は基準面上 4.25m で、1,000 年確率と言われ [1]、さらに Delta Plan における締切堤の設計潮位は基準面上 5m で、10,000 年確率とされている [12]。

表 1 各地の高潮発生頻度分布のパラメータ

パラメータ	東京	名古屋	淡輪	小松島	三角
$\lambda_i$	3.236	2.500	3.195	3.333	12.195
$b_i$ (m)	1.397	1.847	1.508	1.752	2.087
$x_i$ (m)	1.731	2.137	1.797	2.087	3.905
$\lambda_g$	—	—	10.520	—	5.366
$x_g$ (m)	—	—	1.799	—	3.903
$\lambda$	3.834	2.236	4.340	4.095	4.668
$b$ (m)	1.575	1.832	1.658	1.942	3.789
$n$ (1/year)	1.28	1.8	2.04	1.28	2.18

これらの再現期間の数値は埋立地の造成計画のさい、参考となる。

既往最高潮位の付近より高くなると、わずかの潮位差で高潮の再現期間が大きく変化する。すなわち、このあたりの高さで埋立地盤高を少し増すだけで、埋立地の高潮浸水に対する安全性を確率的に大きく増大できることは注目値する[14]。日本各地の高潮発生頻度分布のパラメータを示せば表1のようである。

### 7. 最適埋立地盤高の算定式 J

仮定する高潮の発生頻度分布と地盤沈下の有無にしたがって導いた式 J の形を次に示す。

#### 7.1 地盤沈下のない場合のモデルの式 J

(2)式に(8), (9), (12), (14), (16), (18)式をそれぞれ用いれば次式を得る：

指数分布を用いた場合

$$(21) \quad J = m_2 y^2 + m_1 y + m_0 + nk(\lambda r)^{-1} \exp\{-\lambda(y-b)\}.$$

対数極値分布を用いた場合

$$(22) \quad J = m_2 y^2 + m_1 y + m_0 + nkr^{-1} [(x_i - b_i) \gamma(\kappa, \eta) - (y - b_i) \{1 - \exp(-\eta)\}].$$

$\gamma(\kappa, \eta)$  は第1種不完全ガンマ関数で、次式で計算される：

$$(23) \quad \gamma(\kappa, \eta) = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j \eta^{\kappa+j}}{j! (\kappa+j)}, \quad (j=0, 1, 2, \dots)$$

$$(24) \quad \begin{cases} \kappa = 1 - \lambda_i^{-1}, \\ \eta = \{(x_i - b_i)/(y - b_i)\}^{\lambda_i}, \end{cases}$$

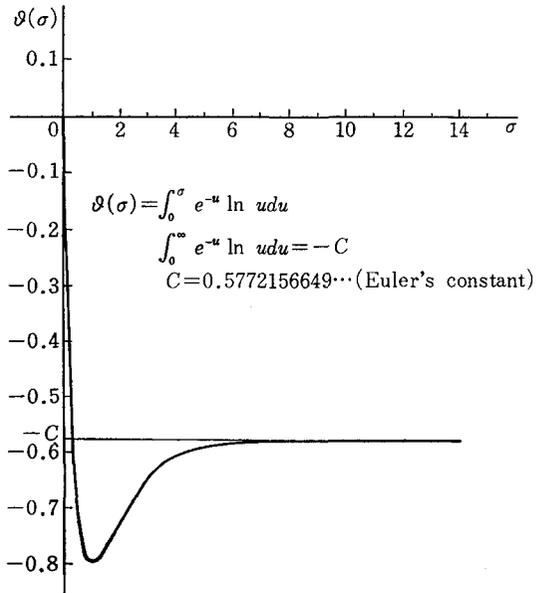


図 3 関数  $g(\sigma)$

Gumbel 分布を用いた場合

$$(25) \quad J = m_2 y^2 + m_1 y + m_0 + nkr^{-1} [-\lambda_g^{-1} g(\sigma) - (y - x_g) \{1 - \exp(-\sigma)\}],$$

$$(26) \quad \begin{cases} g(\sigma) = \int_0^\sigma \exp(-u) \ln u du, \\ \sigma = \exp\{-\lambda_g(y - x_g)\}. \end{cases}$$

関数  $g(\sigma)$  の値は数値積分により求められる(図3参照)。

#### 7.2 短期沈下終了モデルの埋立地盤高の計算式

埋立地の完成後の残留沈下量の推算に1次元圧密理論を適用し、 $C_c$ 法あるいは $m_v$ 法を用いる[10], [11], [2]。

$C_c$ 法を用いる場合

埋立地盤高を  $y$  としたときの予測最終圧密沈下量  $S_0(y)$  は

$$(27) \quad S_0(y) = \beta_1 \ln(\beta_2 + \beta_3 y),$$

$$(28) \quad \begin{cases} \beta_1 = 0.43429 C_c H_0 / (1 + e_0), \\ \beta_2 = 1 + p_v^{-1} \{(\gamma_i - \gamma_w) h + q\}, \quad \beta_3 = \gamma_i / p_v \end{cases}$$

で与えられ、(27)および(28)式を(3)式に代入して次式を得る：

$$(29) \quad y = y_0 + \beta_1 \ln(\beta_2 + \beta_3 y).$$

ここに  $C_c$  は軟弱土層の圧縮指数、 $H_0$  は圧密層

の厚さ、 $e_0$ は圧密層の土の初期間隙比、 $p_0$ は圧密降伏応力、 $\gamma_t$ は土の単位体積重量、 $\gamma_w$ は海水の単位体積重量、 $q$ は地表に載荷される平均鉛直圧力、 $h$ は埋立予定地の平均水深である。(29)式を満足する $y$ が地盤沈下終了時に、沈下の生じないとした場合の最適埋立地盤高 $y_0$ に収束するための計画埋立地盤高である。(29)式から $y$ を求めるにはiterative methodによる。

### $m_v$ 法を用いる場合

この場合  $S_0(y)$ は次式で与えられる：

$$(30) \quad S_0(y) = \gamma_1 + \gamma_2 y,$$

$$(31) \quad \gamma_1 = m_v H_0 \{ (\gamma_t - \gamma_w) h + q \}, \quad \gamma_2 = m_v H_0 \gamma_t$$

ここに  $m_v$  は圧密土層の体積圧縮係数である。

(30)および(31)式を(3)式に用いれば、計画埋立地盤高 $y$ は次式で求められる：

$$(32) \quad y = (y_0 + \gamma_1) / (1 - \gamma_2).$$

### 7.3 長期沈下継続モデルの式 $J$

埋立地完成後の沈下量の進行状態の推測には Terzaghiの1次元圧密度の式[11]、[9]を指数関数で最小自乗近似させた著者の式[5]を用いる。

すなわち

$$(33) \quad \begin{cases} U = 1 - \exp(-\nu t), \\ \nu = 2.858 c_v H^{-2}. \end{cases}$$

ここに $U$ は1次元圧密度、 $c_v$ は圧密係数、 $H$ は圧密層の最大排水距離である。埋立地盤高を $y$ としたときの時刻 $t$ における圧密沈下量 $S(y, t)$ は、(33)式を用いて次式で求められる：

$$(34) \quad S(y, t) = U S_0(y) = \{1 - \exp(-\nu t)\} S_0(y)$$

(34)式の $S_0(y)$ には(27)あるいは(30)式を用いる。

次に $(t-1)$ 年から $t$ 年までの1年間の地盤沈下による高潮浸水被害の期待値の増分 $\delta_i(y, t)$ は、(13)式に確率密度関数と累積分布関数の関係

$$\int_y^\infty f(x) dx = \int_{-\infty}^\infty f(x) dx - \int_{-\infty}^y f(x) dx \\ = 1 - F(y)$$

を用いれば次のように書ける：

$$(35) \quad \delta_i(y, t) = nk \{1 - F(y)\} \int_{t-1}^t S(y, \tau) d\tau, \\ (t=1, 2, 3, \dots).$$

式 $J$ は高潮発生の頻度分布形と地盤沈下の推算法の組合せにより、次の6とおりが示される：

### 指数分布と $C_c$ 法を用いる場合

(6)式に(21)、(27)、(34)および(35)式を用いて次式を得る：

$$(36) \quad J = m_2 y^2 + m_1 y + m_0 + nk(\lambda r)^{-1} \exp\{-\lambda(y-b)\} + nk\beta_1 [r^{-1} - \nu^{-1} \{1 + r(1 - \exp(-\nu))^{-1}\}^{-1}] \ln(\beta_2 + \beta_3 y) \exp\{-\lambda(y-b)\}.$$

### 指数分布と $m_o$ 法を用いる場合

(6)式に(21)、(30)、(34)および(35)式を用いて次式を得る：

$$(37) \quad J = m_2 y^2 + m_1 y + m_0 + nk(\lambda r)^{-1} \exp\{-\lambda(y-b)\} + nk[r^{-1} - \nu^{-1} \{1 + r(1 - \exp(-\nu))^{-1}\}^{-1}] (\gamma_1 + \gamma_2 y) \exp\{-\lambda(y-b)\}.$$

### 対数極値分布と $C_c$ 法を用いる場合

(6)式に(22)、(27)、(34)および(35)式を用いて次式を得る：

$$(38) \quad J = m_2 y^2 + m_1 y + m_0 + nkr^{-1} [(x_i - b_i) \gamma(x, \eta) - (y - b_i) \{1 - \exp(-\eta)\}] + nk\beta_1 [r^{-1} - \nu^{-1} \{1 + r(1 - \exp(-\nu))^{-1}\}^{-1}] \ln(\beta_2 + \beta_3 y) \{1 - \exp(-\eta)\}.$$

### 対数極値分布と $m_e$ 法を用いる場合

(6)式に(22)、(30)、(34)および(35)式を用いて次式を得る：

$$(39) \quad J = m_2 y^2 + m_1 y + m_0 + nkr^{-1} [(x_i - b_i) \gamma(x, \eta) - (y - b_i) \{1 - \exp(-\eta)\}] + nk [r^{-1} - \nu^{-1} \{1 + r(1 - \exp(-\nu))^{-1}\}^{-1}] (\gamma_1 + \gamma_2 y) \{1 - \exp(-\eta)\}.$$

### Gumbel 分布と $C_c$ 法を用いる場合

(6)式に(25)、(27)、(34)および(35)式を用いて次式を得る：

$$(40) \quad J = m_2 y^2 + m_1 y + m_0 + nkr^{-1} [-\lambda \sigma^{-1} \vartheta(\sigma) - (y - x_0) \{1 - \exp(-\sigma)\}] + nk\beta_1 [r^{-1} - \nu^{-1} \{1 + r(1 - \exp(-\nu))^{-1}\}^{-1}] \ln(\beta_2 + \beta_3 y) \{1 - \exp(-\sigma)\}.$$

### Gumbel 分布と $m_o$ 法を用いる場合

(6)式に(25)、(30)、(34)および(35)式を用いて次式を得る：

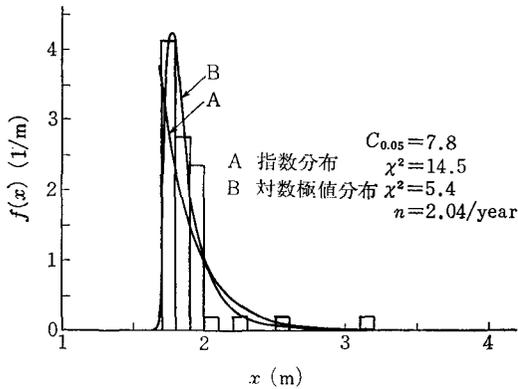


図4 淡輪におけるHWL+0.943m(=TP+1.705m)以上の高潮発生頻度分布

$$(41) \quad J = m_2 y^2 + m_1 y + m_0 + n k r^{-1} [-\lambda \sigma^{-1} g(\sigma) - (y - x_0) \{1 - \exp(-\sigma)\}] + n k [r^{-1} - \nu^{-1} \{1 + r(1 - \exp(-\nu))^{-1}\}^{-1}] [\gamma_1 + \gamma_2 y] \{1 - \exp(-\sigma)\}.$$

上記の(36)~(41)式の中から、いずれか適合する式 $J$ を選ぶ。長期間地盤沈下が継続する場合の最適埋立地盤高は、選ばれた式 $J$ を最小ならしめる $y$ の値である。 $J$ の最小値は $y$ に順次数値を与えて $J$ の値を数値計算することによって求められる。

## 8. 泉州沖の埋立地盤高の試算例

泉州沖に埋立土地造成計画を想定し、最適埋立地盤高の試算を行なう。埋立水域の潮位については淡輪検潮所における1954~1978年の25年間の潮位観測資料を用いる。淡輪における朔望平均満潮位(HWL)はTP+0.762mで、HWL+0.943m以上の高潮の発生頻度分布は図4のようである。指数分布、対数極値分布およびGumbel分布のパラメータは表1のとおりである。これらの分布形のうち対数極値分布の適合度が最も良い。このほか埋立地盤高の試算データを次のように想定する：

$h = 20.7\text{m}$ ,  $h_1 = 21.0\text{m}$ ,  $h_2 = 21.0\text{m}$ ,  $A = 12,300,000\text{m}^2$ ,  $l_1 = 17,000\text{m}$ ,  $l_2 = 300\text{m}$ ,  $a_2 = 52,083\text{yen/m}^3$ .  $a_1, a_3$ および $k$ についてはそれぞれ

れ次のとおりを想定する：

$$a_1 = 2.5 \times 10^4, \quad 3.5 \times 10^4, \quad 4.5 \times 10^4 \text{yen/m}^3.$$

$$a_3 = 1.5 \times 10^9, \quad 2.0 \times 10^9, \quad 2.5 \times 10^9 \text{yen/m}^3.$$

$$k = 1 \times 10^{11}, \quad 5 \times 10^{11}, \quad 1 \times 10^{12} \text{yen/m}.$$

また $r$ については次の2とおりを試算する：

$$r = 0.07, \quad 0.09$$

次に埋立計画地の海底地盤の土質定数を次のように仮定して、短期沈下終了モデルおよび長期沈下継続モデルの計算データとする。

$$p_v = 25,000 \text{kgf/m}^2 \quad q = 5,000 \text{kgf/m}^2$$

$$\gamma_v = 1,700 \text{kgf/m}^3 \quad \gamma_w = 1,030 \text{kgf/m}^3$$

$$e_0 = 1.5 \quad C_c = 0.5 \quad c_v = 10 \text{m}^2/\text{year}$$

$$H_0 = 30\text{m} \quad H = 15\text{m} \quad (\text{両面透水})$$

$$H = 30\text{m} \quad (\text{片面透水})$$

高潮の発生頻度分布には指数分布と対数極値分布を用いる。地盤沈下を考える場合は沈下量の推定に $C_c$ 法を用い、圧密層の上面が透水層に接する場合(片面透水)および上下両面が透水層に接する場合(両面透水)について検討する。上記のデータを用いて地盤沈下のない場合、短期沈下終了の場合、および長期沈下継続の場合について最適埋立地盤高を試算した結果を総括して示せば表2~表4のようである。

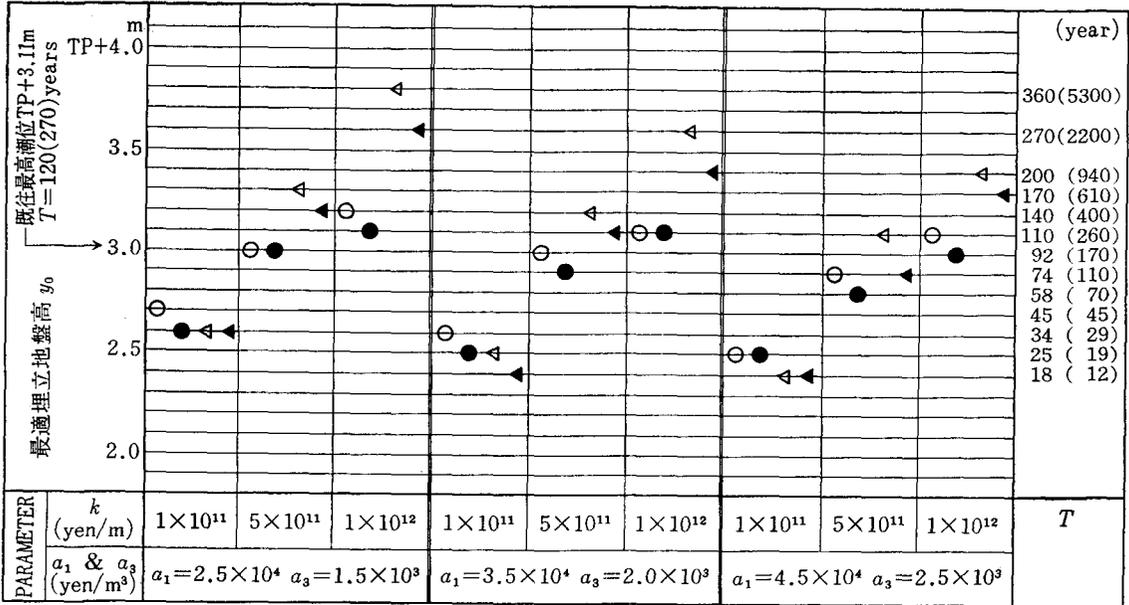
## 9. 結言

最適埋立地盤高を算定するための式 $J$ は $y$ の変域において唯一の極小値を有することが試算例で明らかとなった。また本論文に用いた高潮の発生頻度分布の仮定はおおむね妥当で、その選択による最適埋立地盤高におよぼす影響は少ないことがわかった。さらに $k$ の変動に対する最適埋立地盤高の変化は、 $k$ が大なるほど最適埋立地盤高は高くなる。すなわち、埋立地の利用が高度になるほど最適埋立地盤高は高く算定される。一方、建設費が高くなればなるほど最適埋立地盤高は低く算定される。経済変動による社会的割引率 $r$ の変化に対する最適埋立地盤高の影響は $r$ が大きくなるほど最適埋立地盤高は低くなるが、その影響は軽

表 2 地盤沈下のない場合の最適埋立地盤高 $y_0$ およびReturn Period  $T$

(凡例)  $\tau$  指数分布 対数極値分布  
 0.07 ○ ◁  
 0.09 ● ◀

(泉州沖埋立)

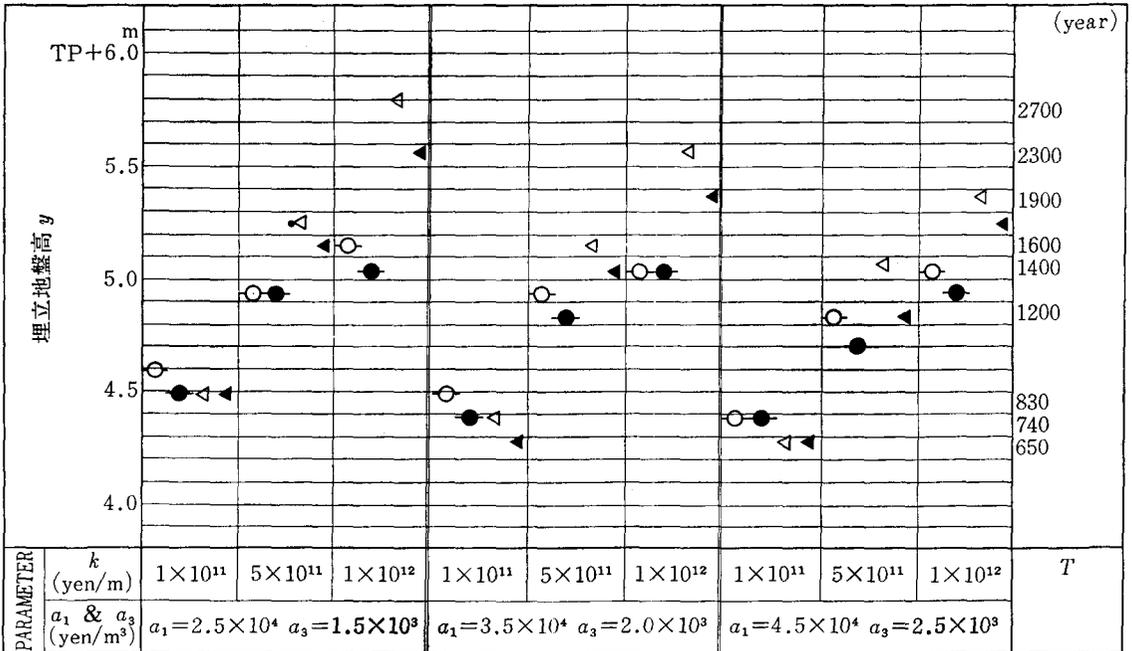


(注)  $T$ の値は、無カッコの数値が対数極値分布で、カッコの数値は指数分布による。

表 3 短期沈下終了モデルを用いた場合の地盤高 $y$ とReturn Period  $T$

(凡例)  $\tau$  指数分布 対数極値分布  
 0.07 ○ ◁  
 0.09 ● ◀

(泉州沖埋立)



(注)  $T$ の計算は、対数極値分布を用いた場合の値である。



微である。埋立土地造成計画の策定段階では不確定なことの多い  $k$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  などには概数値を与えることで良いことがわかった。

以上により本論文は高潮の発生頻度分布、建設費、社会的割引率、埋立地の利用に対応する高潮浸水被害などの自然条件、工学的条件および社会的条件を考慮した最適埋立地盤高の算定法として有意義であると考えられる。

#### 脚 注

- 1) APは荒川量水標 (Arakawa Peil) の±0を基準とする潮位を意味する。Peilはオランダ語で量水標の意味。1873年6月、内務省地理局により隅田川河口の霊岸島検潮所に立てられた量水標の±0の高さの位置をAPと記し、荒川工事基準面と呼ばれる。東京港の土木工事の基準面として使われている ([3], [8] 参照)。
- 2) TPはTokyo Peilの略記で、東京湾平均海面を意味する。1979年以前は東京湾中等潮位と呼ばれていた。1873年6月から1879年12月までの間のうち4カ月の欠測期間を除く6年3カ月間の霊岸島検潮所における潮位観測値の平均潮位を基準面と定めTP±0とした。これが日本における土地の高さを測る基準面となっている。TPとAPの関係は $TP = AP + 1.1344\text{m}$ と定義されている ([3], [8] 参照)。
- 3) ここで収集する潮位の観測値は、まれに起こる大きな高潮を対象とするため、一般にサンプル・サイズが小さいので極値統計理論の厳密な適用が困難なことが多い。したがって、ある特定値以上の部分統計資料を用いることにした。この資料収集の方法やここで仮定した  $f(x)$  の形の選定が最適埋立地盤高の計算結果に与える影響は小さいことが計算例からわかる ([4], [5])。
- 4) 土の圧縮指数  $C_c$  および体積圧縮係数  $m_v$  を用いる圧密沈下量の計算法をそれぞれ  $C_c$  法および  $m_v$  法と便宜的に呼ぶことにした。
- 5) 1917年10月1日に東京港で観測された既往最高潮位は、 $AP + 4.21\text{m}$ と記された文献と  $AP + 4.12\text{m}$ と記された文献とがあり、どちらが正しいか不明である。

#### 参 考 文 献

- [1] 土質工学会：土質工学ハンドブック，(1965)，949.
- [2] 土質工学会：土質試験法，土質工学会，(1969).
- [3] 川北米良：日本の沿岸における天文潮位の出現度数分布について，災害の研究，第11巻，(1980)，87-95.
- [4] 川北米良：海面埋立土地造成における最適地盤高のオペレーションズ・リサーチによる決定法，災害の研究，第14巻，(1983)，95-110.
- [5] 川北米良：海面埋立土地造成における埋立地盤高の決定方法とその泉州沖埋立への適用について，災害の研究，第17巻，(1986)，78-90.
- [6] 建設省河川局：昭和42年水害統計，(1968).
- [7] Paula：Holland bezwingt das Meer，Verlag Wereldvenster Baarn，Holland，(1960).
- [8] 斎藤錬一：潮位の意味，災害の研究，第11巻，(1980)，78-86.
- [9] Taylor, D.W.：Fundamentals of Soil Mechanics，Wiley，New York，(1948).
- [10] Terzaghi, K.：Theoretical Soil Mechanics，Wiley，New York，(1943)，265-296.
- [11] Terzaghi, K. und Fröhlich, O.K.：Theorie der Setzung von Tonschichten，Franz Deuticke，Leipzig und Wien，(1936).
- [12] 戸嶋英樹：オランダの土地政策，土木学会誌，Vol. 66, No. 3, (1981)，87-89.

× × × ×

× × × ×