

気候変動が土構造物・基礎地盤に及ぼす影響

EFFECTS OF GLOBAL WARMING ON GEOTECHNICAL PROBLEMS

安原 一 哉 *

Kazuya YASUHARA

ABSTRACT : The effects of global warming on geotechnical engineering are considered. Shown are the following three examples for accessing the vulnerability to sea level rise due to global warming as case studies: (1) decrease in bearing capacity, (2) increasing possibility of liquefaction and (3) decrease in slope stability.

KEYWORDS : Sea level rise, Bearing capacity, Liquefaction, Slope stability, Ground water level

1. まえがき

気候変動が社会基盤へ及ぼす影響が懸念され初め、土質工学の分野でも、この事に対する取り組みが始められようとしている。本文は、まず、気候温暖化にともなう土質基礎工学上の問題点を整理し、来るべき状況に対し、土質・基礎工学が寄与できること、あるいは、なすべきことについて考察する。ついで、これらの問題を3つのカテゴリに分け、このうち、水位上昇に伴って生じる具体的課題として、①浅い基礎の支持力、②液状化危険度、③河川堤防の安定を取り上げ、それぞれの評価方法を述べることにする。

2. 気候変動に対する認識

最近の報告¹⁾によれば、過去50年間に地球の温度は年間約0.2℃上昇し、このままいくと、21世紀末までには約3℃上昇し、それにともなう海面上昇は約2mであると予想されている。一方、地球の歴史をさかのぼると、過去には、現在懸念されている予測値よりはるかに大きな海面上昇を経験している。すなわち、最近の14万年間に最大百数十mの海面変動を記録しており²⁾、例えば、後氷期の温暖期（ヒブシサーマル期）には、現在より気温は2℃ほど高かったと言われているが、この時期のCO₂の濃度は低く、温暖化は温室効果によるものではない。この頃の日本は「縄文海進」と言われる時代で、平均すると1年間に約2cm海面が上昇していたと言われる^{3) 4)}。

3. 問題の枠組みと影響伝播図

地球温暖化に伴う問題は、海岸工学の立場から三村ら⁵⁾が枠組みを決め、それを影響伝播図として整理している。図-1はこれを参考にして土質基礎工学の立場から再整理したものである。これによれば、土構造物・基礎地盤に対する温暖化の影響は、(1)海面上昇、(2)大気循環の変動、(3)地表面温度の上昇、(4)降雨特性の変化に大別される。このうち、(1)海面上昇は水深の増大を伴うため、沿岸域への影響がとくに懸念される。また、相対的な海面レベルの上昇は、地下水位上昇につながるため、これによる地盤や土構造物に多様な影響を与えられ考えられる。これに対し、(3)地表面温度上昇は海面上昇以上に幅広い影響が予想されるが、単に土質・基礎工学の領域のみならず、土壌学、地質学、地形学等との境界領域に関わる問題が引き起こされることから、この方面の知識や研究成果の整理が望まれる。また、(4)降雨特性の変化によって集中豪雨が増えたり、降雨継続時間が長くなることが予測されるので、これも土質・基礎工学とは無縁ではない。

4. 具体的課題

図-1に示した修正影響伝播図を基にして、温暖化にともなう生じられると思われる基礎地盤・土構造物における課題を、便宜上、表-1に示すように4つのカテゴリに大別して考えることにする。これによれば、

* 茨城大学工学部都市システム工学科 (Dept of Urban & Civil Eng., Ibaraki Univ.)

海面レベルの上昇に関連する問題が幅広くあるが、多くは、従来の土質力学の知識で解決可能である。ただ、水深の増大に伴う基礎地盤への影響に関する問題は、波浪による外力を動的荷重として評価する方法、及び、このような外力下での土の構成式が確定していない点で検討の余地を残しているといえよう。

降雨特性の変化は、現在、最も不明な点が多いが、自然斜面や土構造物に多大な影響を与えることから、温暖化の影響評価にあたっては、これに関するインプット条件を、できるだけ早く見きわめる必要がある。

地表面温度上昇にともなう問題のうち、風化の促進は、わが国には、風化残積土の災害が多いことから判断して、温暖化との因果関係をはっきりさせることが望まれる。また、凍土地盤の融解に伴う力学的性状の変化についても、現在までの知識を整理する必要がある。

なお、温暖化の台風への影響については、台風の数は増えるが、中心気圧は高くなる、という調査結果と、台風の数は減るが、規模は巨大化して中心気圧も低くなるという相反する意見があって、結論はまだでていない。また、台風の発生数は、むしろ、海水温は低いほど多くなるという説もあって、この辺に関する調査は引き続き検討の余地が残されている。何れにせよ、台風の影響は、基礎地盤や土構造物の安全性にも密接に関わることであるので、このことの結論を見守る必要がある。

4. 問題の評価方法

4. 1 地下水位上昇の影響

i) 基礎地盤の支持力低下の評価法

地下水位が高いと、破壊面の有効応力と摩擦力が減少し、支持力は低下すると考えられる。具体的に、このことを考えるために図-2aのように、砂地盤上に、幅Bで根入れ深さD₁の連続フーチング

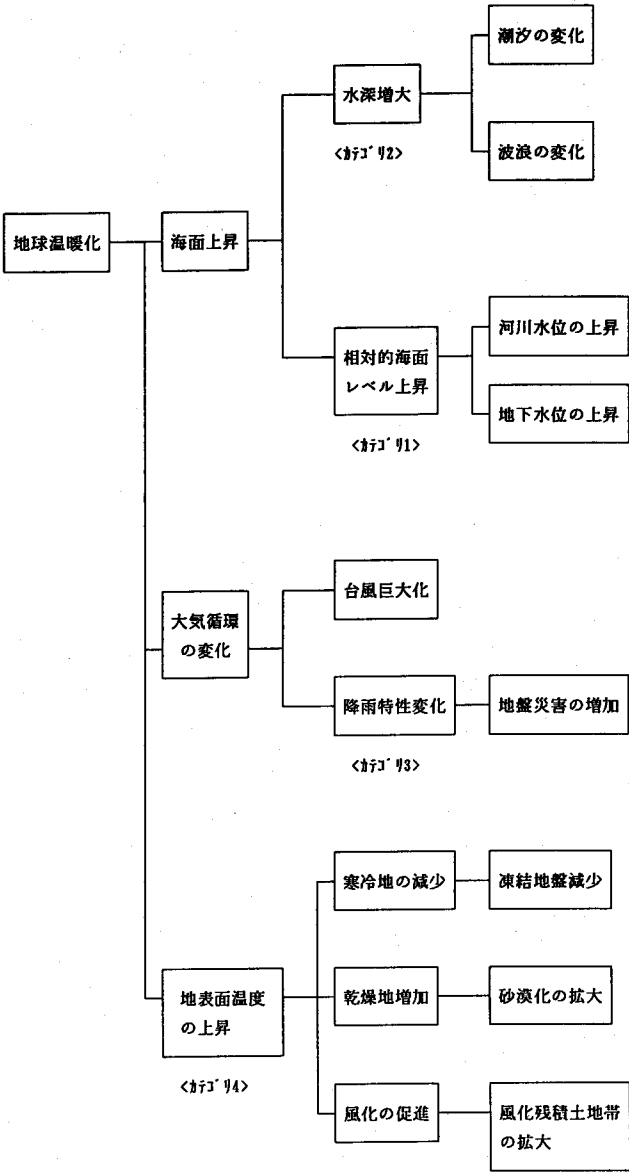


図-1 地球の温暖化が土質基礎工学に及ぼす影響伝播図

表-1 温暖化に伴う物理的現象と具体的問題

		物理的現象	起こり得る具体的現象
海面 レ ベ ル 上 昇	地下水位増加	・有効応力の低下 ・吸水 ・浮力（揚圧力）増加	・地震時液状化 ・支持力低下 ・水浸沈下（コラプス） ・自重の低下／構造物倒壊
	河川水位増加	・浸透	・浸透破壊 ・パイピング
水 深 増 大		・潮汐変動 ・波浪による外力増加	・変形・沈下 ・滑動／転倒／支持力破壊 ・液状化
降雨特性の変化		・降雨時間の長期化 ・降雨強度の増大	・地滑り山崩れの増加
地表面温度上昇		・凍結土の融解 ・風化の促進 ・砂漠の増加	・支持力低下（？） ・風化残積土の災害増加

が築造されている例を考えてみよう。

地盤の支持力に対する地下水位の影響は、その位置がどこにあるかによってきまる。いま、地下水位の位置が地表面より h_w （基礎底面より z_w ）なる深さにあるとすると、その影響は次の3つ場合に分けて考えなければならない。

- ① $d < z_w$ 、つまり、 $d + D_f < h_w$ （ d ：基礎底面からすべり線の最も深い位置までの距離）のとき。
- ② $D_f < h_w < D_f + B$ 、つまり、 $0 < (z_w/B) < 1$ のとき。
- ③ $h_w < D_f$ のとき。

$D_f < h_w < D_f + B$ の場合。

まず、①の場合は、地下水位の影響はないと考えて良い。次に、②の場合は、基礎底面の土の単位体積重量 γ_{ave}^* は、Vesic⁶⁾ によれば、次式によって表される。

$$\gamma_{ave}^* = \gamma' + (z_w/B)(\gamma_t - \gamma') \quad (1)$$

このときの砂地盤の支持力 q_u^* は、次式となる。

$$q_u^* = \gamma_{ave}^* B N_\gamma + \gamma_t D_f N_q \quad (2)$$

この支持力と地下水位の影響のないときの支持力 q_u との比 q_u^*/q_u は、

$$\frac{q_u^*}{q_u} = \frac{(\gamma_{ave}^*/\gamma_t) N_\gamma + 2(D_f/B) N_q}{N_\gamma + 2(D_f/B) N_q} \quad (3)$$

となる。上式は、地下水位の上昇に伴う支持力低下の度合いを示すインデックスとなる。そこで、計算例を示すことにしよう。

いま、 $\phi' = 35^\circ$ $\gamma_t = 1.60 \text{ tf/m}^3$ なる砂地盤を仮定すると、式(3)は、 D_f/B をパラメータとして、計算され、その結果の一例として、地下水位の上昇高さ Δh に対し、支持力低下を示すと、図-3 のようになる。ここで、 γ_{ave}^* は水位上昇高さ Δh を用いて 次のように書き改められている。

$$\gamma_{ave}^* = \gamma' + (1 - \Delta h/B)(\gamma_t - \gamma') \quad (4)$$

$D_f > h_w$ の場合。

次に、図-2 b に示すように、地下水位が基礎底面より上部まで上昇した場合を考えてみよう。このとき、図-2 b における p'_0 は、

$$p'_0 = \gamma_t D_f - \gamma_w (D_f - h_w) = \gamma' D_f + \gamma_w h_w$$

であるから、このときの砂地盤の支持力は

$$q_u^* = \frac{1}{2} \gamma' B N_\gamma + p'_0 N_q \quad (5)$$

と表される⁶⁾ので、支持力比式(3)と同じ形の支持力比は、次のようになる。

$$\frac{q_u^*}{q_u} = \frac{\gamma' B N_\gamma + 2 p'_0 N_q}{\gamma_t B N_\gamma + 2 \gamma_t D_f N_q} \quad \text{ただし、} h_w < D_f \text{ すなわち、} 0 \leq (h/B) < 1 + (D_f/B) \quad (6)$$

図-2 a、b を利用して、地下水位上昇にともなう支持力低下を計算した例を図-3 b にまとめている。

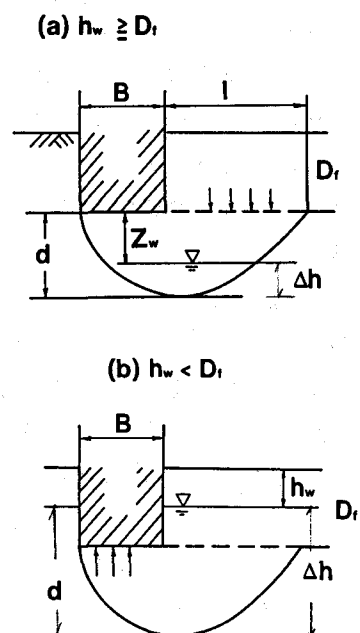


図-2 基礎の支持力に及ぼす地下水位の位置⁷⁾

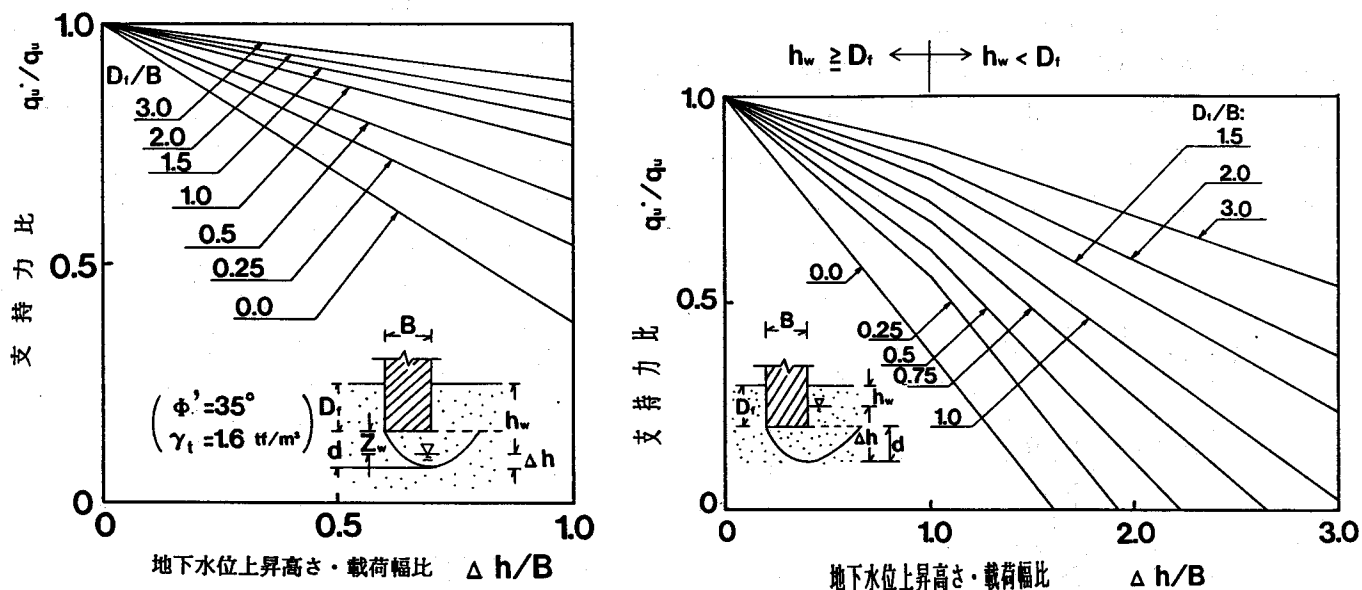


図-3 地下水位上昇にともなう直接基礎の支持力低下の計算例

想定し、温暖化による地下水位の上昇が65cmと110cmのときの極限支持力の低下を示したものである。これによれば、幅2mの基礎は水位の上昇にともなって、水位の影響のない場合に比べて、それぞれ20%と40%支持力が減少することがわかり、とても無視できる値ではないことが理解できる。なお、この計算では、地下水位上昇前の地下水位の位置は、基礎の底面から $d = B$ だけ離れた位置にあったと仮定している。

表-2 水位上昇に伴う支持力低下例

B (m)	Δh (cm)	Δh/B	q_{u*}/q_u
1	65	0.65	0.58
1	110	1.10	0.32
2	65	0.65	0.79
2	110	1.10	0.61
3	65	0.65	0.87
3	110	1.10	0.77

ii) 液状化危険深さの推定

地下水位が上昇すると慣性力が増加するとともに、上載有効圧力が減少する。従って、液状化の危険度が增大することは良く知られたことである。このことを定量的に把握するためには、動的解析が必要であるが、簡便法としては、道路橋示方書の方法¹¹⁾などがある。ここでは、後者を用いて、温暖化にともなって起こると予想される地下水位上昇後、液状化危険度がどのように増加するか事例を示してみよう。

図-4は新潟地震の後調査された昭和大橋の基礎地盤のプロファイルの一例である¹²⁾。この位置では液状化は、生じていない。今、この地盤を簡単のため全層に渡って細砂からなるものとして、図-4のように模式化する。このとき液状化抵抗は、

$$R = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_{v} + 0.7}} + 0.19 \quad (9)$$

ここで、 $N = 2z$ (z : 深度) と近似する。また、有効上載圧 σ'_v は、

$$\sigma'_v = \gamma_{t1} h_w + \gamma'_{t2} (z - h_w), \quad (h_w: \text{地下水位深さ})$$

また、液状化指数

$$F_L = R/L \quad (10)$$

ここで、

$$L = (1 - 0.015 z) k_s (\sigma_v / \sigma'_v) \quad (11)$$

地下水位上昇量高さ $h = 0, 65, 110, 200 \text{ cm}$ を想定して計算された結果が図-5 にまとめられている。これによれば、現在の地下水位では、液状化は生じないことになり、これは実際をよく反映している。また、地下水位が上昇するにともなって、液状化深さは顕著に増大しており、地下水位が地表面にあるときは、深さ 20 m まで完全に液状化してしまう結果となった。このように、地下水位の上昇は、液状化に敏感に影響することが明らかであり、海面上昇に伴う物理現象として無視できない重要な項目であることがわかる。

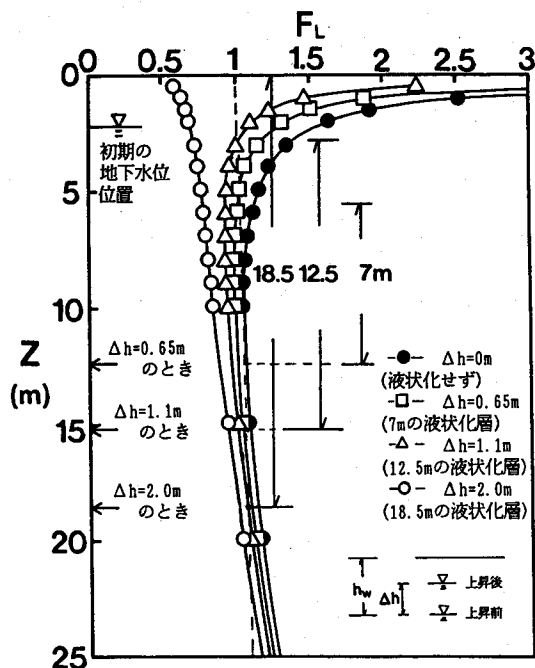


図-5 水位上昇に伴う液状化深さの計算例

4. 2 河川水位上昇の影響

海面の上昇にともなって、河川水位も何らかの影響を受けると考えられる。ここでは、前記の例と同様に、条件を簡略化して、海面上昇と河川水位上昇が $1:1$ に対応するものと仮定して検討を加えることにする。

河川堤防を構成する土は、普通不飽和状態にあると考えられるが、水位の上昇によって水浸されるので、飽和状態かそれに近い状態になると考えられる。このとき、堤体を構成する土の強度特性は変化すると考えられるが、典型的な堤体材料として、締め固めた粘土質砂 ($G_s = 2.65$) を対象にして、まず、三軸試験を用いて、水浸によってこの供試体の強度定数がどのように変化するかを調べてみた。試験は、①水浸前の不飽和供試体と②水浸後の飽和供試体に対する排水せん断試験である。その結果によると、水浸飽和によって、混合土の内

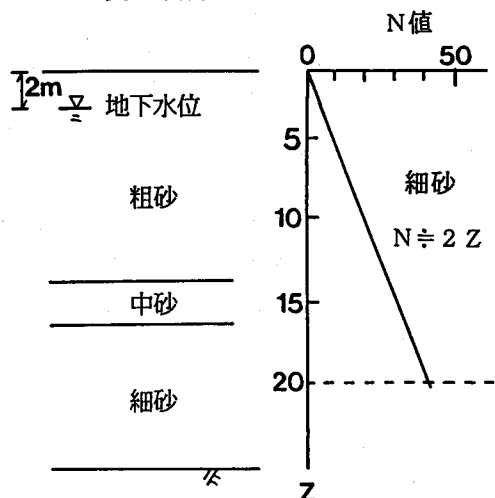


図-4 液状化深さの検討に用いたモデル地盤

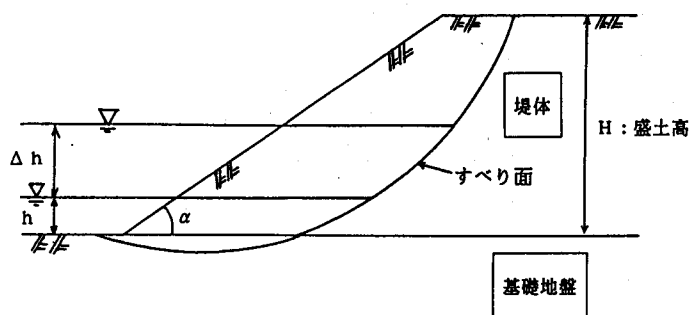


図-6 計算に用いた河川堤防斜面

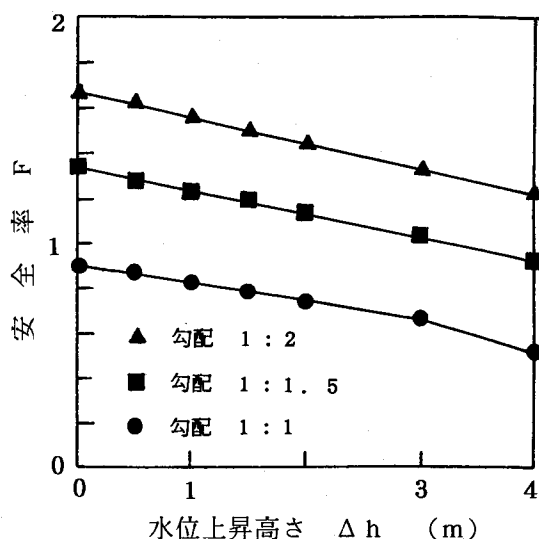


図-7 水位上昇に伴う安全率低下

部摩擦角はわずかに 1° 程度、粘着力は、若干（2割強）低下していることがわかる。この量は、それほど大きなものではないが、土によっては、著しく粘着力を低下させる場合がある。

上記のような実験結果をふまえ、図-6に示すように、実験で用いた堤体材料からなる河川堤防を仮定して、粘着力の低下の程度によって円弧すべりに対する安全率がどのように変わるかを計算してみた。図-7と図-8はこのような計算結果から、斜面ののり勾配をパラメータとして、水位上昇にともなう絶対安全率と相対安全率の低下の様子を示したものである。図-8から水位上昇に伴う相対安全率の低下はのり面勾配の大きさによらずほぼ一定であり、現在想定されている海面上昇による最大の水位上昇高さ1.1mでは、ほぼ1割程度であり、それほど心配するにはあたらないと考えられる。しかし、本計算例は、水浸にともなう粘着力の低下が少ない土の例であるので、その解釈のためには、もう少し丁寧な計算を行って、結論しなければならない。

5. あとがき

本研究では、温暖化が基礎地盤および土構造物及ぼす影響について概観し、そのなかでも、具体的事例として、海面の相対的上昇にともなう地下水位の上昇が①基礎地盤の支持力、②砂地盤の液状化強度および③河川水位が堤体斜面安定に及ぼす影響を取り上げ、その評価方法を構造物とモデル地盤を想定して簡単な計算例を示した。その結果、予想される海面上昇量がそのまま地下水位や河川水位の上昇につながるとすると、沿岸域の社会基盤への影響は大きいので、海面上昇に対する基礎地盤や土構造物の脆弱性の評価に当たっても、無視できない重要な問題であることが示された。

謝辞：本文は、土木学会海岸工学委員会地球環境問題小委員会（委員長渡辺晃東大教授）の委員会活動の一環でまとめられたものである。同小委員会沿岸域インフラWG（主査磯部雅彦東大教授）の各委員には種々御意見を戴いた。記して、ともに謝意を表します。

引用文献

- 1) IPCC (1990) : Climate Change - The IPCC Response Strategies, Island Press.
- 2) 遠藤他(1989) : 千葉県古流山湾周辺域における完新世の環境変遷史とその意義、第4紀研究、Vol. 28, No. 2, pp. 61 - 77.
- 3) Shackleton, N. J. (1987): Oxygen Isotopes, Ice Volume and Sea Level, Quat. Sci. Rev., No. 6, pp. 183-190.
- 4) 陶野(1991): 圧密現象と続性作用、応用地質、43巻、2号、pp. 24-34.
- 5) 三村・磯部・細川・灘岡 (1991) : 地球温暖化による海面上昇・海象変化の影響評価、海岸工学論文集、第38巻、pp. 936 - 940.
- 6) Vesic, A. S. (1975): Bearing Capacity of Shallow Foundations, Foundation Engineering edited by H. Winterkorn, Van Nostrand Co LTD, pp. 138.
- 7) 山口柏樹(1990): 土質力学（全改訂版）、技報堂出版、pp. 260-262.
- 8) 安原・三村：気候変動が土構造物・基礎地盤に及ぼす影響—その1：問題の枠組みと具体的課題—、第19回土木学会関東支部講演発表海講演概要集、pp. 204 - 205, 1992.
- 9) 安原・三村：地球温暖化が土構造物・基礎地盤に及ぼす影響—その2：具体的課題とその評価方法（地下水位上昇の影響I）—、第27回土質工学会研究発表会講演集、1992.
- 10) 安原：気候変動が土構造物・基礎地盤に及ぼす影響—その3：地下水位上昇が液状化に及ぼす影響—、土木学会年次学術講演会講演概要集、第3部、pp. 288-289.
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V、耐震設計編、1980.
- 12) 土木学会新潟震災調査委員会編：昭和39年新潟震災調査報告、土木学会、1966.
- 13) Mimura, N., M. Isobe and Y. Hosokawa : Impacts of Sea Level Rise on Japanese Coastal Zones and Response Strategies, Proc. the IPCC Coastal Zone Management Subgroup Workshop "Rising Challenge of the Sea", 1992.

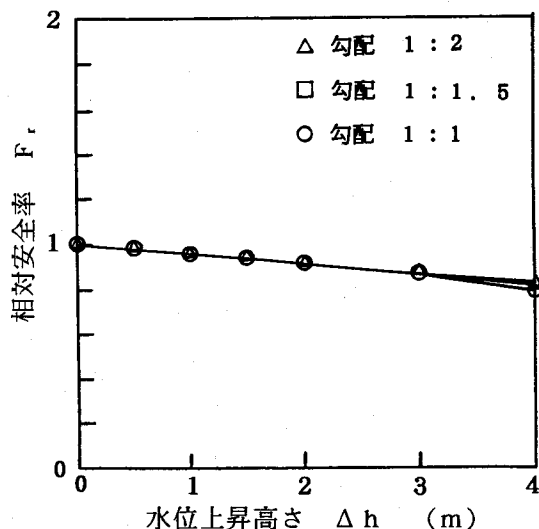


図-8 水位上昇に伴う相対安全率の低下