

地震時の液状化現象とは？

運輸省港湾技術研究所 構造部構造振動研究室 菅野 高弘

1. はじめに

液状化とは、ゆるく堆積した砂質地盤が地下水位以下の部分で、地震動によって液体状になる現象である。この液状化現象が多大な被害をもたらすことが認識され、科学的に研究される契機となったのが1964年に発生したアラスカ地震と新潟地震である。

港湾関係でも被害が発生しており、例えば、1968年十勝沖地震では、函館港北浜ふ頭の斜控杭式鋼矢板係船岸に被害が出ており、1973年根室半島沖地震では、花咲港の重力式係船岸が海側へ約60cm移動し約30cm沈下した¹⁾。

最近の地震では、1993年釧路沖地震において液状化対策を施した岸壁の耐震安定性が確認された²⁾。また、1995年兵庫県南部地震では、神戸ポートアイランドや六甲アイランドのような大規模な人工島における液状化が報道等でクローズアップされたことは記憶に新しいところである。

本稿では液状化現象のメカニズムを他の専門書や参考書とは異なった切口で「わかりやすく」説明する。

2. 液状化被害

ゆるく堆積した砂質地盤は、常時（地震時以外の時）には比較的支持力も大きく、圧縮性が小さい地盤である。この地盤が、地震時に液状化が生じることによって非常に弱い地盤に変化する。この様な現象によって発生する液状化被害を簡単に整理してみると以下のようにまとめられる。

地盤沈下：

杭によって支持された構造物の周辺に段差が生じたり、液状化部分と非液状化部分の境界で埋設管等の切断が生じる。

側方流動：

1964年新潟地震の前後の航空写真の分析から、液状化した地盤が水平方向に数mから10m以上も移動していることが発見され³⁾、その後の地震でも同様の現象が確認されている。これによって地中埋設管や、杭基礎に被害が発生する。近年、最も注目され

ている液状化被害形態のひとつである。

地下埋設物の浮上：

地中埋設管や地下タンク等の比較的軽い構造物が、液状化した地盤の浮力で浮上することがある。1995年釧路沖地震ではマンホールが1m以上も浮上した写真を見た記憶のある読者も多いかと思われる。

構造物の沈下、傾斜：

鉄筋コンクリート造のアパートが沈下しながら転倒した1964年新潟地震の被害のように、基礎が十分でない場合に、重い構造物は沈下や傾斜を生じることになる。

土構造物の崩壊：

基礎部分の液状化によって、すべり破壊や盛土全体が沈下する。また、盛土天端やのり面に大きなクラックが発生する。

以上のような被害形態が挙げられるが、これらの被害を引き起こすメカニズムについて次項で検討する。

3. 液状化のメカニズム

液状化のメカニズムを知る上で、重要なキーワードがいくつかある。これらのキーワードをおさえることによって理解していただきたい。これらは、土質力学の専門用語であるが「わかりやすい地震工学」No.4ということで、直感的な理解を目標として説明する。

有効応力：

地盤を土粒子と間隙を満たしている間隙水から構成されていると仮定する。図-1に示すように、地盤の上に構造物が載っている時に、これを支えているのが土粒子同志の噛合い、摩擦抵抗や電気化学的結合である。

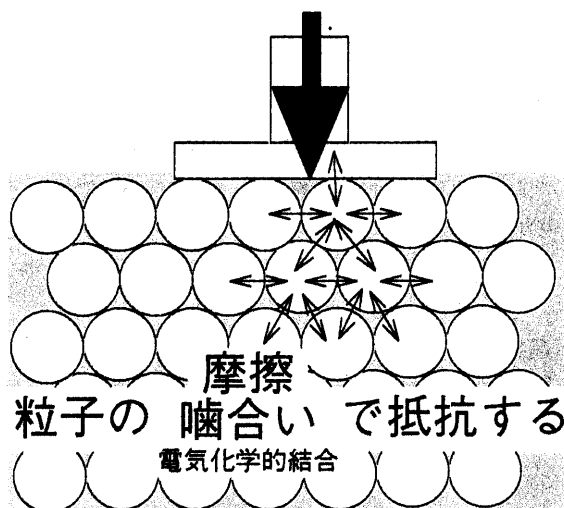
土質力学では静水圧状態を基準とするので間隙水の静水圧水圧状態をゼロとして、過剰間隙水圧(u)として表す。透水性の小さい粘土で問題となる圧密を考えてみると、外からの荷重によって間隙水が搾

り出される現象であり、載荷直後は荷重を粘土粒子と間隙水圧で受け持ち、水圧が消散するにしたがって、粘土粒子のみで荷重を受け持つ（圧密終了）ことになる。これを式で表示すると、

$$\sigma = \sigma' + u \quad (1)$$

(全応力) = (有効応力) + (過剰間隙水圧)

となる。即ち、土が外からの力に抵抗するには、土粒子同志の噛合い、摩擦及び電気化学的結合と間隙水圧とが協力しているということになる。



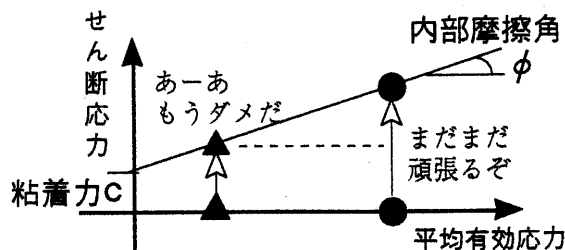
図－１ 地盤内の砂粒子配列の概念図

粘土のように粒子が小さく表面活性が大きな場合には電気化学的結合による、いわゆる粘着力が支配的であるが、砂のように粒子が大きい場合には、噛合いや摩擦が支配的である。

拘束圧依存性：

おにぎりを例に考えて見ることにする。力を入れてしっかり握ったおにぎり、軽く握ったおにぎりではどちらが強い？土も同じで、拘束圧の大きな場合には強く、小さな場合には弱くなる。縦軸にせん断応力、横軸に平均有効応力（おにぎりを握る強さ）をとって土が破壊するせん断応力をプロットしたのが図－２である。この破壊線は普通我々が使う範囲では直線で近似され、直線の切片が c （粘着力）、勾配が ϕ （内部摩擦角）ということになる。

一般的に砂の場合には、粘着力成分が小さく、破壊線が原点を通る形になる。

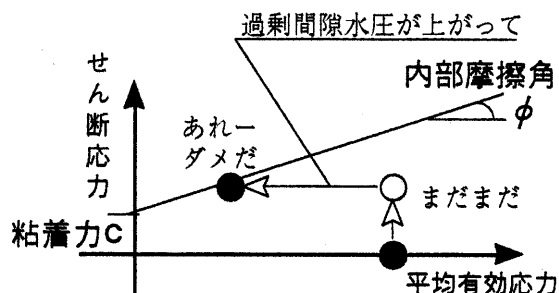


図－２ 土の破壊基準と拘束圧依存性

土の破壊：

図－２に示したように有効拘束圧の異なる土（おにぎりを握る強さ）にせん断応力をかけていくと、先に△が破壊線に達して破壊してしまうが、○は△と比べて大きなせん断応力に耐える。

さて、過剰間隙水圧が大きくなったらどうなるか？図－３に示すように、十分余裕を持って荷重を支えている状態から、過剰間隙水圧が上昇したとすると平均有効応力が小さくなって破壊線に達してしまう。



図－３ 過剰間隙水圧上昇による応力経路

このように、外からの荷重が大きくなり、土の持つ抵抗限界を越えて破壊する場合と、荷重は限界内で変化しなくても、過剰間隙水圧が大きくなり有効応力が減少して破壊する場合がある。

液状化は、この極端な場合である有効応力がゼロに近づき液体状になり破壊する現象といえる。

液状化の定義（地震が来たらどうなる？）：

簡単のために砂粒子を円と仮定し、ゆるく詰まった砂地盤を図－１のように表す。外からの載荷を砂粒子の接点での摩擦や接点力で受け持ってる。ここ

に地震が来ると、せん断されて図-4のように変形しようとする。もし、間隙水の逃げ道がなければ水圧が上昇することが容易に理解できる。ここで、この変形が非常にゆっくりと進行するならば、過剰間隙水圧は消散していくが、地震のように非常に速くせん断変形が繰返し発生する場合には水圧の上昇と消散のバランスの関係から、徐々に過剰間隙水圧が上昇していくことになる。

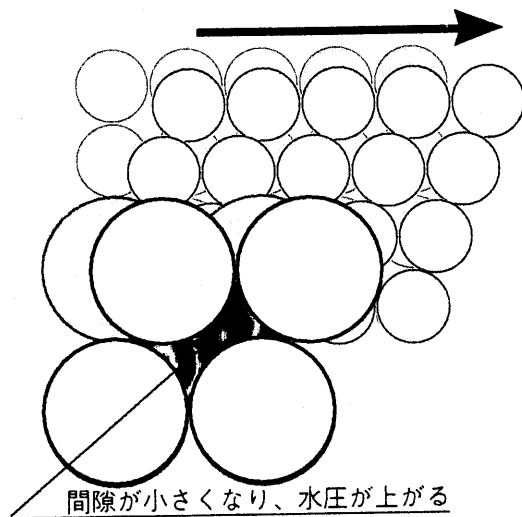


図-4 地震時の粒子配列の変形

有効応力の式で考えると、 u が大きくなって σ' が小さくなっていくことになる。ここで、 $\sigma' = 0$ となった時には粒子間の摩擦や接点力の成分の受け持ちが無くなったことを意味し、これが液状化状態の定義となる。

$$\sigma = \sigma' + u \quad (2)$$

液状化した地盤が、全体として砂粒子の懸濁した液体状(図-5)となる。

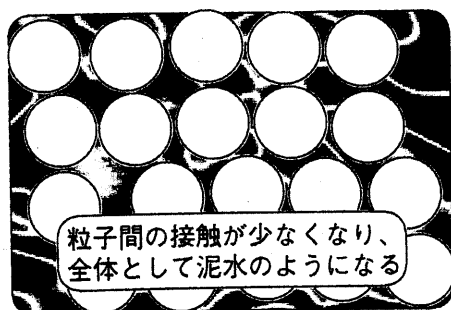


図-5 液状化状態の概念図

繰返し非排水三軸試験⁴⁾:

実際の地震では複雑な動きをするので、ここでは簡単のために実験室で行われる繰返し非排水三軸試験を例に考えてみる。この「繰返し非排水三軸試験」という用語は、従来、「振動三軸試験」・「液状化三軸試験」等と言われてきた試験のことであり、地盤工学会の基準で1990年に定められたものである。

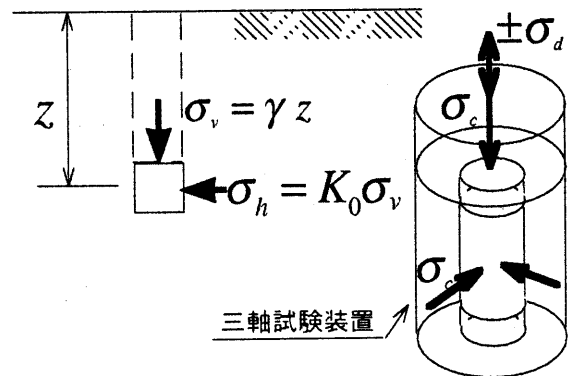


図-6 実地盤と三軸試験装置の応力状態

図-6に示すように、三軸装置は地盤の中の想定している要素の応力状態を実験室内で再現できる装置で、ゴム膜で包んだ供試体に圧力(おにぎりの握る強さ)をかけた状態から繰返しせん断応力を载荷するものである。この試験では、主に载荷するせん断応力の最大値を一定に保ってサイン波を作用させる。

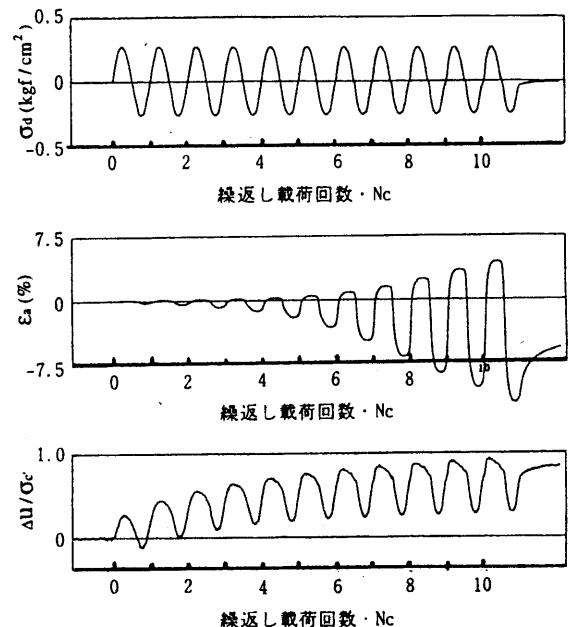


図-7 繰返し非排水三軸試験

大きな載荷せん断応力の場合には少ない回数で液状化し、小さな場合に液状化するまでにはたくさんの載荷回数を要する。

ここで時刻歴(図-7)を見てみると、載荷を開始すると少しずつ過剰間隙水圧が上昇しはじめる。最初は発生するひずみの量が小さいが、過剰間隙水圧が上がってくると急にひずみが大きくなる。そして液状化に至る。

繰返し非排水三軸試験における液状化の定義は、まだはっきりしていないが、軸ひずみが5%を越えた所や過剰間隙水圧が初期拘束圧の95%以上になった時点までの載荷回数等を目安にすることが多い。

横軸に載荷回数、縦軸に載荷せん断応力を拘束圧で正規化したせん断応力比をとって、載荷応力比を変えた3~4回の実験結果を整理すると図-8のような曲線が得られる。この曲線が右上のほうにあれば、液状化抵抗が大きいことになり、左下にプロットされれば液状化抵抗が小さいことになる。

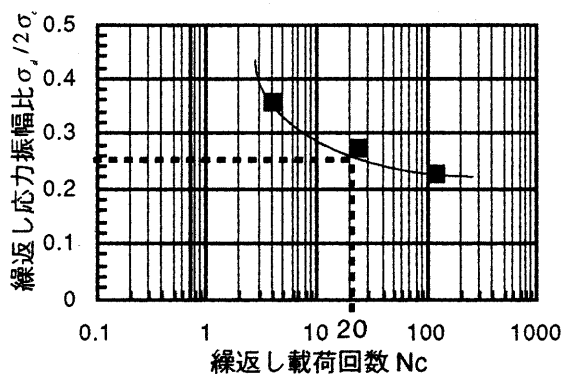


図-8 繰返し応力振幅比—繰返し載荷回数

通常、この曲線の代表値として20回で液状化する繰返しせん断応力比を用いる。

水平成層地盤の液状化：

水平成層地盤内の土の要素(図-6)を考えてみる。この要素には、常時では土被り応力 $\sigma_v = \gamma z$ が上から作用しており、水平方向には静止土圧係数 k_0 に土被り圧力をかえた σ_h が作用している。ここに地震による繰返しせん断応力が作用すると、過剰間隙水圧が上昇してきて有効応力が減少していく。この時、粒子間の摩擦抵抗や噛合いも小さくなるため、伝播してくる地震のせん断応力も伝達されにくくなり、振幅が小さくなる。

ここまでの説明で液状化現象のメカニズムについて概略を述べた。直感的にわかりやすく説明するために、学問的には厳密さを欠く部分もあるが、その点については各自専門書を参照していただきたい。

4. 液状化判定⁵⁾：

次に実地盤における液状化の判定について簡単に説明する。

粒度とN値による予測・判定：

調査地点の各層における粒度分布曲線によって分類を行う。均等係数の大小に応じて二つの判定図が示されており、対象土が(A)：特に液状化の可能性あり、(B f)(B c)：液状化の可能性ありのどれに当てはまるかを判定する。(図-9)

(B f)の場合は当該土層のN値を、(A)及び(B c)に判定された場合に等価N値を求める。

これらの判定基準は、1964年新潟地震以降の地震後液状化調査及び模型振動実験結果の分析に基づいて決められたものであり地震を経験する毎に再検討されてきたものである。

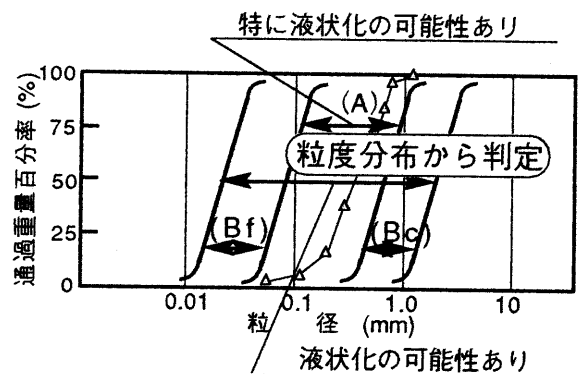


図-9 液状化の可能性のある土の粒度

現地調査や模型振動台実験で得られる情報は、地表面加速度や比較的浅い地点での液状化現象であることが多いことから、標準的に地下水位が2mにある地盤の地下水面下3mの位置における地盤の液状化/非液状化の判定基準となっている。加速度は地表面加速度を基にしており、深度5m付近における値に補正して、せん断応力比を算定している。

このため、等価N値として、判定しようとする土層におけるN値を有効上載圧 0.66 kgf/cm^2 相当のN値に補正している。(図-10)

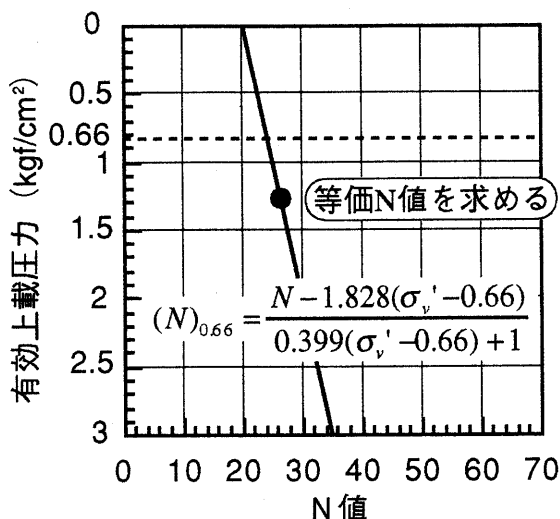


図-10 等価N値算定用チャート

次に分母部分は、地盤の応答解析から等価加速度を求める。計算から求められる想定土層深度に発生する最大せん断応力から地表面加速度に変換して等価加速度とする。

次に、求められた等価N値と等価加速度を予測のためのグラフ(図-11)にプロットし、分類表のⅠⅡⅢⅣに従うことになる。このグラフは過去の地震被災調査結果を総合的に分析し、ⅠⅡⅢⅣのランクに分けたものである。

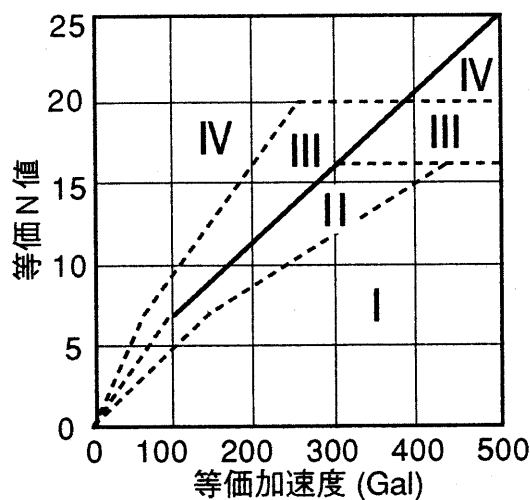


図-11 等価加速度と等価N値による
液状化予測のための土層の分類

粒度-N値法の場合には、判定基準の根拠となる現地調査結果や模型振動実験における地下水位-2m、深度5m地点での値に変換する作業(図-12)があることに注意を要する。

以上の手順により判定を行うが、式に値を入れるだけであれば中学生にでも出来る仕事である。技術者としては、これらの判定基準の策定経緯や適応範

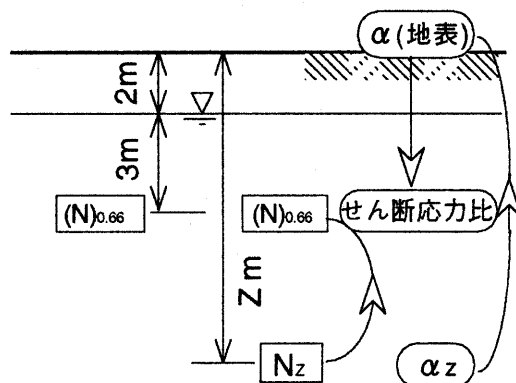


図-12 粒度-N値法の計算の流れ

囲に注意して、すべての情報を勘案して、総合的に判定する必要がある。

液状化安全率：

斜面の安定の場合の安全率は

$$F_s = \frac{\sum (cl + W \cos \alpha \tan \phi)}{\sum W \sin \alpha} \quad (3)$$

即ち、土の持つ抵抗力を外力で除した結果が1より大きければ「安全」と判定する。

液状化現象に当てはめてみると、土の持つ液状化に対する抵抗力を、想定している地震が対象とする地盤を伝播してきた際に発生するせん断応力で除すことによって求められる。

繰返し三軸試験を用いた液状化予測・判定：

分母部分は、地盤の応答解析から求まるせん断応力の最大値を用い、有効上載圧で除して求める。この場合、想定している土層深度地点における最大せん断応力比となる。

一方、分子部分は、繰返し三軸試験結果から20回で液状化するせん断応力比を基準に、想定地震波形による補正、等方圧密と実地盤の K_0 圧密の補正、地震波の多方向性に関する補正を行って求める。

$$F_L = \frac{R_{\max}}{L_{\max}} : \frac{\text{地震応答解析から}}{\text{繰返し非排水三軸試験から}} \quad (4)$$

F_L が1より小さければ、液状化すると判定される。

液状化被害を防ぐためには？：

液状化判定により液状化が発生すると予測された場合の対策は、液状化が発生するメカニズムを基に、液状化発生要因を取り除くことになる。

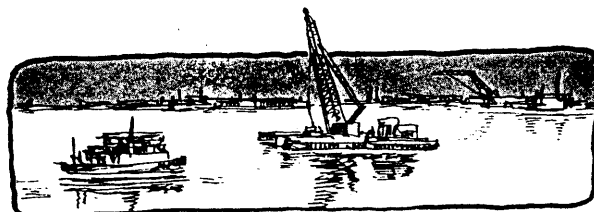
次号で液状化対策を取り上げる。

5. おわりに

液状化現象について簡単に説明を試みた。現行の液状化に関する考え方は、安全率の概念で代表されるように「液状化する」<>「液状化しない」のどちらかである。近年の地震被害等を調査してみると、完全に液状化はしていないが被災している構造物も多々みうけられる。今後は、液状化に至る途中における挙動に関する研究も必要であると考えている。

〈参考文献〉

- 1) 土質工学技術普及委員会、地盤の液状化、1989年、p. 4
- 2) 上田他、1993年釧路沖地震港湾施設被害報告書、港湾技研資料、No.766、1993年、p.448
- 3) 濱田他、液状化による地盤の永久変位の測定と考察、土木学会論文集、No.736、Ⅲ－6、pp.211-220、1986年
- 4) 土質工学会、土質試験の方法と解説、1990年、pp.421-450
- 5) (財)沿岸開発技術研究センター、埋立地の液状化対策ハンドブック、1993年

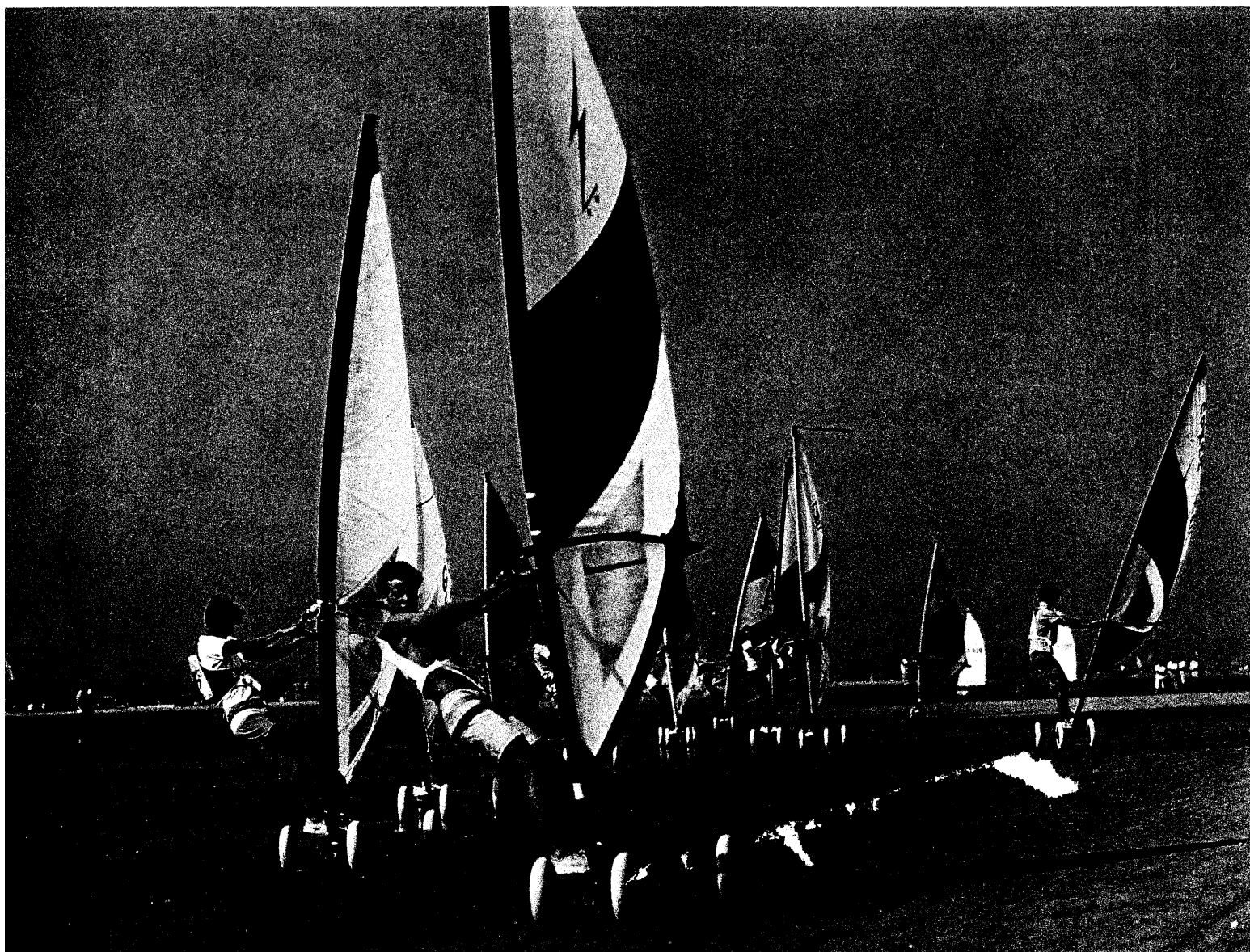


地球温暖化（海面上昇）
について

波しなぎさ

季刊 **130**
vol.

WAVE & BEACH 1996/8



港灣海岸防災協議会