

# レベル2地震動に対する地盤強度の判定法

## —液状化によってP波は増幅するか—

櫻井鉄工（株） ○宮前繁也

### 1. はじめに

レベル2地震動を対象とした地盤の液状化の判定、さらにはその対策工法としてこれを改良しより強固にして、設計地震動に対応し得る合理的な強度の地盤を如何にして造るかの定量化の問題が今後起こってこよう。これについて先に論文<sup>1)</sup>を発表したが、その後の検討分と既発表のものを合わせて全体について記述したい。

すなわち現地盤および地域内の工法・強度を変えた数ブロックで、バイプロハンマー等により地盤震動を与える原位置液状化試験と現地震動試験<sup>2) 3)</sup>を行った。これにバイプロハンマー位置を変えた複数の震動試験を加え、各ブロックでの加速度・過剰間隙水圧・せん断弾性係数等の測定値から、ブロック毎の地盤強度を求める。これ等を設計地震動と対比し最も合理的な工法を選定するものである。なおこれらに先だて、現地土質試料による室内振動3軸圧縮試験も行っている。

### 2. 原位置液状化試験

#### (1) 試験概要<sup>1) 4)</sup>

対象地盤の地質は第四紀沖積世の河川氾濫原堆積物の細・中砂で、飽和してN値も低く、地震時の液状化が懸念されたため原位置液状化試験を行った。すなわち、この地盤にバイプロハンマー鋼矢板打ち(22Hz)により動的応力を与え、ボーリング孔底にセットした加速度計等により地盤内部の動的挙動を測定した。図-1は試験の配置を示す。

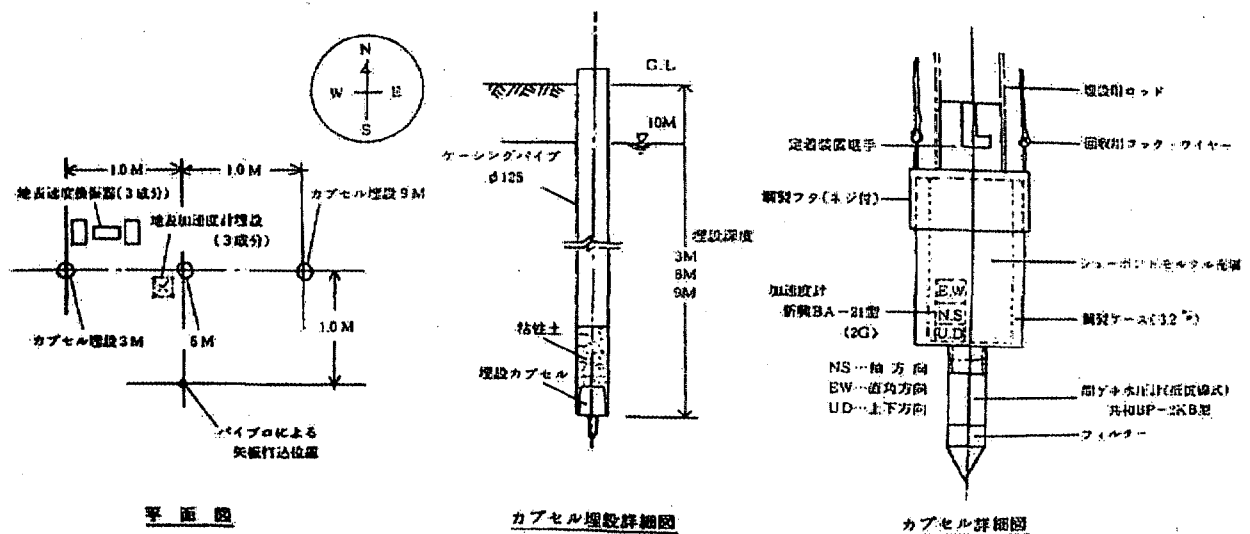


図-1 試験の配置

キーワード：動的、液状化、S波、P波、原位置試験、

連絡先：(自) 〒060-0005 札幌市中央区北5条西9丁目5 Tel 011-251-3312

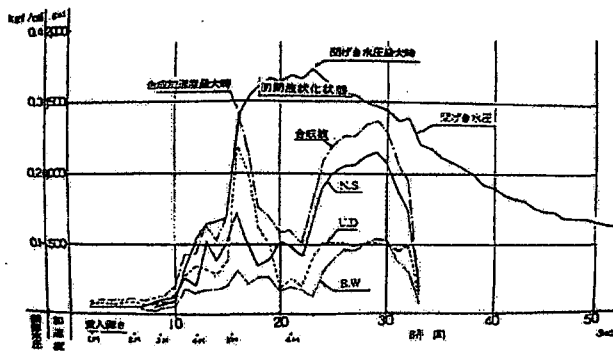


図-2 加速度・間げき水圧の時刻歴 (-6m点) 現地盤

## 2) 試験結果と考察

図-2は、深度6mの測定計器から平面で1m離れた位置への鋼矢板貫入時の3成分加速度(NS、EW、UD)とこの合成波R(3成分のベクトル和)および間隙水圧の時刻歴を示す。なお加速度はその振動の正負の最大振幅の包絡線を示している。図の加速度の波は二つの山{以後第1波、第2波と呼ぶ}からなっている。試験時の動的入力と過剰間隙水圧の上昇の状況から判断して、第1波のピーク後の減衰は準定状態によるものと考えられたが、第2波の増大の理由が不明であった。そこで図-2の各加速度が震源からの直接波である実体波が主体であると考えられることから<sup>3)</sup>、NS・EW・UDをP波・S波に分別した。

### a) P波とS波の分別<sup>1)</sup>

図-3に、ある時間断面での諸数値を示す。{図の断面配置での一例}。ここに

z: 矢板(パイプロ)貫入深さ(m)

a: 測定器(観測点)~貫入位置の離かく距離(m)

b: 測定器深さ(m)

$\theta$ : 矢板先端~測定器の線と垂直軸との交角( $^{\circ}$ )

$\theta'$ : 点震源~測定器の線とNS軸との平面角( $^{\circ}$ )

とすればS波およびP波の加速度は次のように表わされる。

$\theta' = 0$  の場合 (図-1、図-4の平面図参照)

$$S = \sqrt{(NS \cos \theta + UD \sin \theta)^2 + (EW)^2} \quad (1)$$

$$P = |NS \sin \theta - UD \cos \theta| \quad (2)$$

ここで合成波Rは

$$R^2 = S^2 + P^2 = NS^2 + EW^2 + UD^2 \quad (3)$$

となりS波、P波の算出にあたっての計算チェックに便である。

$\theta'$ がある場合 (図-1および図-4参照)

貫入深さが同じである場合は、同じ起震力によるS波・P波の大きさは座標軸の方向にかかわらず同じであることから

$$S = \sqrt{(NS' \cos \theta + UD \sin \theta)^2 + (EW')^2} \quad (4)$$

$$P = |NS' \sin \theta - UD \cos \theta| \quad (5)$$

ここに

$$NS' = \sqrt{NS^2 + EW^2} \times \cos(\alpha - \theta') \quad (6)$$

$$EW' = \sqrt{NS^2 + EW^2} \times \sin(\alpha - \theta') \quad (7)$$

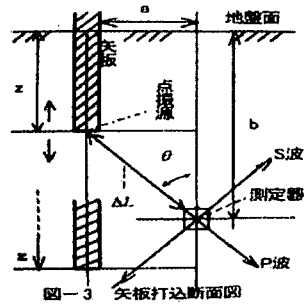


図-3 矢板打込断面図

(4) (5) 式についても (3) 式は成り立つ。ここに

$$\cos \alpha = \frac{NS}{\sqrt{NS^2 + EW^2}} \quad (8)$$

$$\sin \alpha = \frac{EW}{\sqrt{NS^2 + EW^2}} \quad (9)$$

ここで $\theta' = 0$ のとき  $NS' = NS$ 、 $EW' = EW$ となる。図-4に $\theta'$ 、 $\alpha$ の意味を示す。

以上から今回の試験( $\theta' = 0$ の場合)のR、S、Pを(1)(2)(3)式によって計算したものが図-5である(図-2から間隙水圧を除いたもの)。

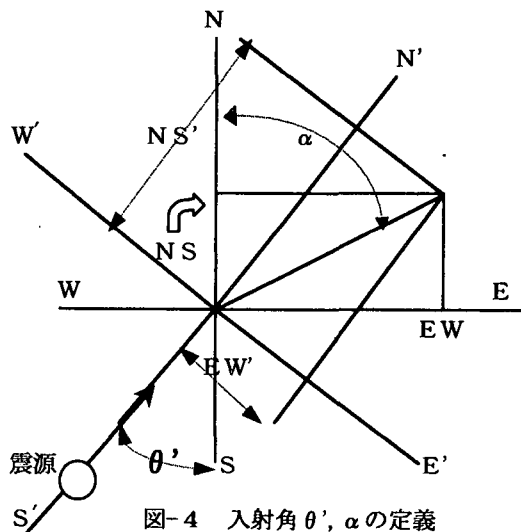


図-4 入射角 $\theta'$ 、 $\alpha$ の定義

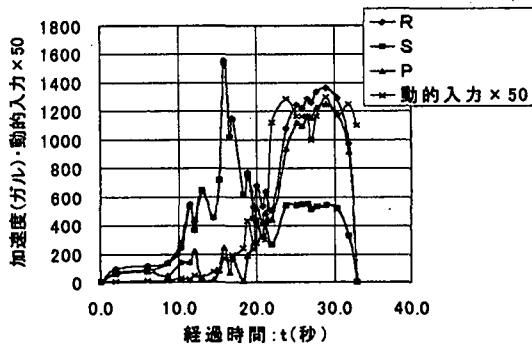


図-5 加速度R・S・Pと動的入力時刻歴

図-5のR、S、Pを図-2のR、NS、EW、U Dと比較するとP波・S波の成り立ちがよく分る。またこのようなP波・S波の分別によって地盤・基礎構造物や一般構造物へのそれぞれの力の関わり方が分り、現象(例えば液状化)の理解が容易になる。

**b) 動的貫入抵抗と動的入力<sup>1)</sup>**

図-2と図-5において、各加速度の時間的変動から現象を正しく理解する為には、その元になる測定器への動的入力(加速度)とその原因となる地盤の動的貫入抵抗の大きさを知る必要がある。そのため図-2のX軸に記してある貫入深さの時刻歴から、 $\Delta t/\Delta z$ (単位深さ当りの所要時間)の値を求め図-6に示すが、値が大きいほど貫入抵抗が大きいことを意味する。なお図-6で0~20秒間の2本線の下のは、矢板先端~測定器間の距離減衰( $1/\Delta L^2$ に比例)を考慮したものである。

図-7は図-5と図-6を複合せたうえ、X軸は時刻No.、Y軸は対数で表示したもので、動的入力と加速度の関連をよく示している。なお、図-7の中で  $N_{VC} = \Delta t/\Delta z \times$  (パイプロの周波数  $n$ 、 $22\text{Hz}$ ) であり  $m$  当りの打撃回数を意味し、 $N_{VC}/m \times \Delta L^2$  は貫入深さ1mあたりの打撃回数に距離減衰を含ませたものであり、これを動的入力の指標とする。図-8には試験地盤付近の土質柱状図を示す。

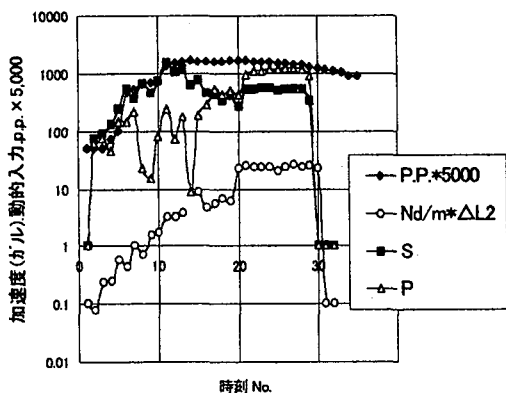


図-7 動的入力・加速度・間隙水圧の時刻歴

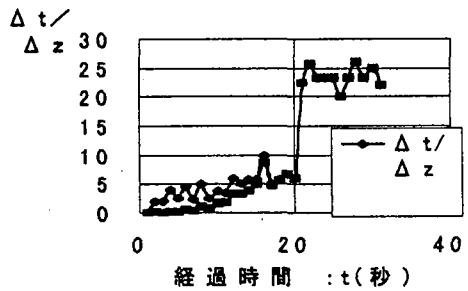


図-6  $\Delta t/\Delta z$ の時刻歴

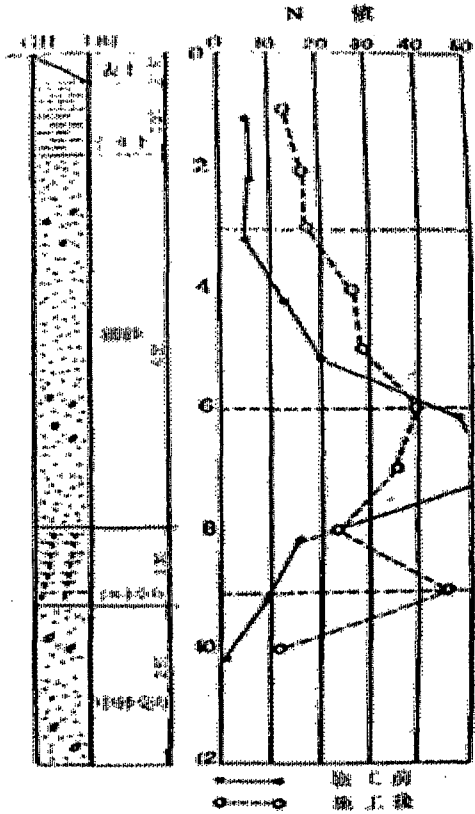


図-8 パイプロ施工前後のN値(柱状図)

**C) 液状化の判定<sup>2) 3)</sup>**

先に述べたように図-2から加速度の波は第1波、第2波と表われている。第1波で合成波Rは矢板貫入開始後10秒位から急増大し、これが間隙水圧の急上昇と極めてよい一致を示しているが、この時点では図-5からS波が卓越していることが分る。図-7からS波の上昇線は動的入力のそれと平行しており、両者が線形的な関係にあることが分る。

16秒(図-7のNo11)位をピークとしてRとSは急低下するが、動的入力と間隙水圧(図-2・図-7より)は上昇率を減らしながら上昇を続けており、この段階でこの地盤はせん断剛性を失い始め準液状化状態に至ったものと判断される。このときの液状化応力または液状化抵抗力はこのピーク点をとらえ、後述の方法(第4章)で求める。<sup>1) 2) 3) 4)</sup>

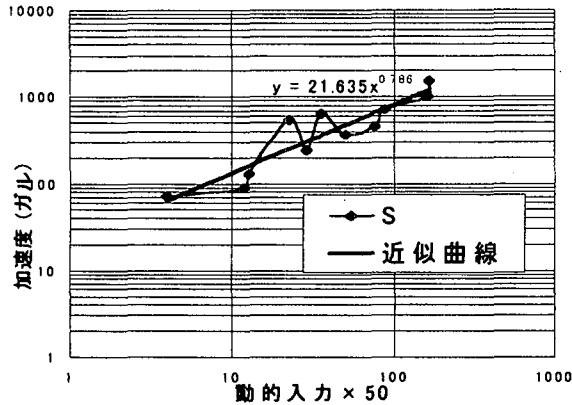


図-9 S波近似曲線(累乗)

図-9にS波のピーク点を求める1例を示す。すなわち右肩上がりの動的入力～加速度カーブの最右端点が目標点である。この先の加速度値は急激に低下する。

d) 液状化によるP波の増幅<sup>1) 4)</sup>

図-5ではこのあとRとSは下降を続けるが、図-7によれば動的入力は増減しながらも上昇している。一方P波はこれに伴って上昇し、準液状化によって減衰(非線型化)するS波に替わって大きくなり、矢板が地層の堅い部分(深さ6m前後。図-8参照)に当たってさらにRの中で卓越し第2波の主体を形成するものと思われる。

第2波のなかでのP波の増幅の理由については論文<sup>1) 4)</sup>に詳しいが、概要を述べる。

P波の振動のエネルギー流量Iは次式で表わされる。

$$I = 2 \pi^2 n^2 a^2 \rho \cdot V \quad \text{erg/cm}^2 \quad (10)$$

ここに V: P波の速さ(m/s) n: 振動数 a: 振幅  $\rho$  g/cm<sup>3</sup>: 媒質の密度 とすると

$$I_i = I_r + I_t \quad (11)$$

が成り立つ。ここに

$I_i, I_r, I_t$  は境界面での入射波、反射波、透過波のエネルギー流量であり、エネルギー保存則が成り立つ。

これはさらに

$$1 = \beta^2 + \alpha \gamma^2 \quad (12)$$

と簡単になる。ここで $\beta^2, \alpha \gamma^2$ は入射エネルギー流量1に占める反射エネルギー流量、透過エネルギー流量の率である。

図-10は(12)式をグラフ化したものである。すなわち図-10のX軸上のどの位置でもこの関係式が成り立つ。この図から  $\alpha_L \gamma_L^2 / \alpha_{NL} \gamma_{NL}^2$

(液状化時/非液状化時の透過エネルギー流量率の比)をグラフ化したものが図-11である。

図-11は動的応力により地盤が液状化すると、それまで固体であった地盤が液体化してP波の伝播速度が

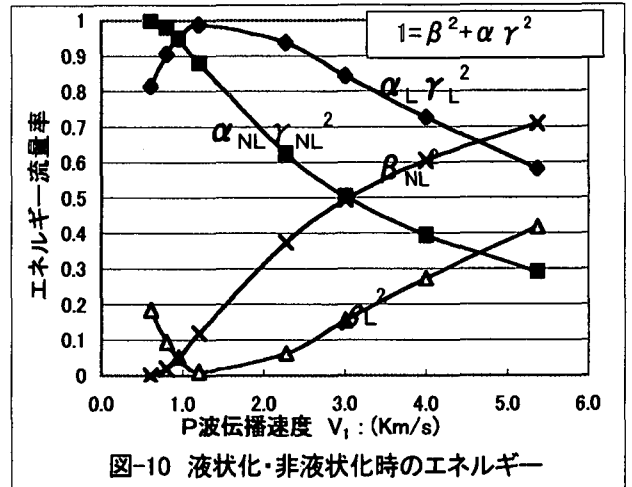


図-10 液状化・非液状化時のエネルギー

増大する。今の場合0.6Km/s位から1.5Km/sへの増大と考えられ、これによるP波の透過エネルギー流量が1~2倍程度増幅するが<sup>4)</sup>、この割合は震源の地盤の物性(波動インピーダンス $\rho v$ )が大きいかほど大きくなることを示している。

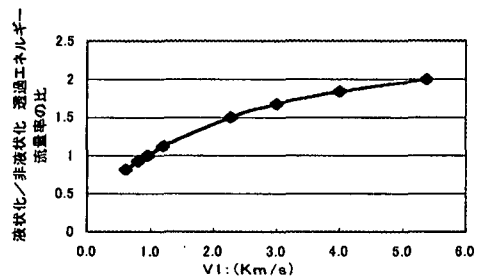


図-11 液状化/非液状化透過エネルギー流量比

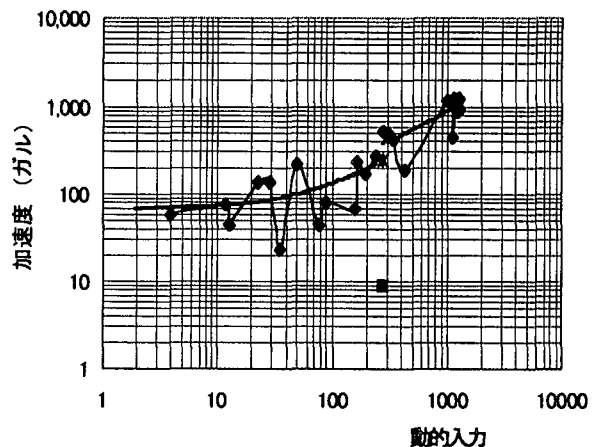


図-12 P波近似曲線

図-12は、パイロハンマーの貫入開始から終了迄の、動的入力とP波加速度の関係を示す近似曲線で右肩上がりである。曲線の中にギャップがあり、これは加速度の値から準液状化が始まった時点(図の×印)と判断されるが、ここでカーブはシフトアップして右肩上がりが続いている。この点以前を弾性領域(線形部分)として、線をそのまま延長し、仮に液状化しないとした場合の値として実測値と比較してみると、その比は約1.7となり前記の液状化によるP波振動の増幅と考えられる。ここに述べた事から、第2波が大きく表れた事は、貫入矢板が堅い地層に当たりまた液状化したことによるP波の増大が要因と考えられる。

このほかP波の増幅の要因として、地盤の液状化による粘性係数の数オーダーの減少が考えられるが<sup>4)</sup>、これについては別の機会にゆづりたい。

以上のことは1995年兵庫県南部地震でポートアイランドでの液状化時に、地表地盤が大きく上下動したと関連があるかもしれない。

#### e) 動的入力とS波・P波の減衰性および間げき水圧

すでにb)~d)で述べたが、動的入力とS波・P波の減衰性との関係が、図-5・7・9・12を見るとよく分る。S波は動的入力と比例的に増大し、ある入力で土が準液状化または塑性化して減衰するが、P波は入力とともに増大していく状況が見られる。また間げき水圧の上昇・消散はS波に依存し、P波に影響されないことが分る。

これらの事は既往の概念どおりであるが、S波とP波の合成波RをS波と見誤ったり、とくに増幅したP波を含んでいたりする時は注意が必要ではなからうか。

### 3. 現地地震動試験<sup>2) 3)</sup>

前章2で現地地盤が地震による繰り返しせん断応力(当時の設計地震力)で液状化することが分ったので、パイロコンポーザー工法(深さ7m、直径600m/m、碎石投入、ピッチ1.9m、正方配置、使用機パイロハンマーV-75、振動数4.5Hz)で締め固めを行った後、同機を用いて再び現地地震動試験を行った。この結果今回は間隙水圧の上昇は全く無く、塑性化も起らなかった。

この時得られた加速度等の測定値を用い後述(第4章)の手法で計算すると、せん断応力として0.92Kg f/cm<sup>2</sup>が得られたが、地盤はこれ以上の強度を持っていた(後述4(2)参照)。前述(第2章)の無処理地盤の液状化応力が0.12Kg f/cm<sup>2</sup>(室内動的三軸圧縮試験値0.10~0.13とよい一致)であったのに比べて、充分締め固め効果があり、当時の設計値も満たしていた。(詳しくは文献<sup>2) 3)</sup>参照)

なお、図-8の土質柱状図にはパイロコンポーザー工法の施工の前後のN値が載っている。

## 4. レベル2地震に対する現地地盤または改良地盤の強度をどう判定するか

### (1) 地盤強度の判定法<sup>1) 4)</sup>

今後レベル2の強大地震に対して大きな設計地震動が設定された場合、現地地盤や軟弱地盤の改良を行って設計上対応し得るような強固な地盤を造成して、その強度を定量的に判定することが必要になる。そこで参考のため原位置で液状化強度および強化地盤強度を調べる手法<sup>2) 3)</sup>を紹介する。要点のみを述べたい。

a) 2. に述べたようにパイロハンマー等の動的起振力によって地盤震動を与える。これによる地盤内波動を「等方均質の無限弾性体内の点震源から発する弾性波動」と考え、次式より所定の測定点のせん断ひずみを求める。ここに $V_{(t)}$ :粒子速度、 $v_s$ :せん断波速度とすると

$$\gamma = V_{(t)} / v_s \quad (13)$$

b) ここで測定点における加速度の各方向成分NS, EW, UDの波形を積分して速度波形とし、これらのS波成分(速度)を(1)式( $\theta = 0$ の場合)または(4)式( $\theta$ がある場合)から求めて $V_{(t)}$ とする。

(いま対象とする諸量が加速度、速度または変位であっても(1)~(9)式は同じ形で使い得る。これは設計地震動がgal, kine, cmのいずれに設定されても、これらの式で対応し得るという有用性があることを意味している。)

c) せん断弾性係数Gや $v_s$ は事前の現場実測により求められたもの(P S検層など)を、動的応力作用時のせん断ひずみに応じて適正に評価減減して求める。

d) 上記a)~c)で得られた諸値を用いて

$\tau = G \gamma$  よりせん断応力を求め設計地震力と対比すればよい。この場合せん断応力あるいは液状化抵抗の周波数依存性が小さいことはすでに幾つかの試験<sup>3)</sup>で確かめられており、上式の適用が可能であると考ええるが、より高い動的応力と地盤強度に対しては今後検討の必要があろう。

e) 検証地盤が試験時に液状化した場合は、Gが有意値を持つ準液状化状態までの液状化強度を上記の手法で計算すればよい。

上記のa)~e)によって2.章の液状化地盤、3.章の非液状化地盤(レベル2地震クラスに対応)に対する地盤強度の判定を行う。

### (2) 現場試験法

震動試験地域内の測定器配置の一例を図-13(a)(b)に示す。工法・強度等を変えたA(A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>…強度大~小)、B(B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>…)…の各ブロックに複数の測

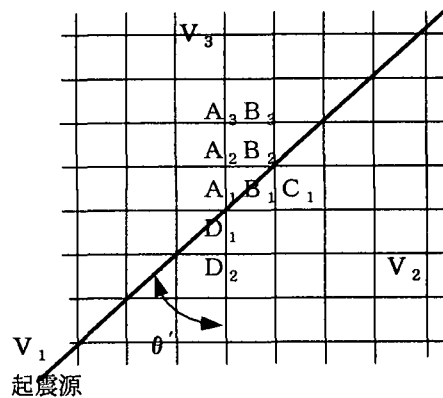
定器（加速度計、間隙水圧計など）を設置する。起震源  $V_1$  でパイロハンマーを作用させ地盤に一定エネルギーを与え、各ブロックで同時測定をする。 $V_1$  試験終了後目的に合わせて  $V_2$ 、 $V_3$  … に移動して同様の試験を行う。得られた数値を図-14 のパターン a ~ e で整理し、設計地震動（値とする）を基準にして次の選択をする（図中の黒○は降伏点または液化化点を示す）。

- 起震力不足または距離減衰により対象外、次試験に回す。
- 強度不足で除外する。前章 2. の液化化試験の例。
- 降伏点は値に達しないが局限耐力は到達する。
- 降伏点は値に達する。
- 降伏点は充分値に達するが、定量化の目的上経済性に問題がある。前章 3. の筆者らの現地地震動試験の例。

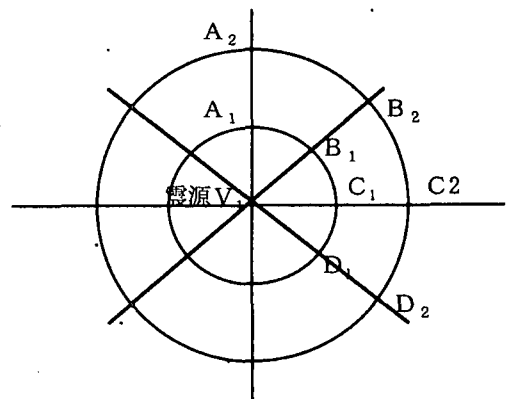
検討の対象になるのは c ~ d である。例えば  $A_1$  ~  $A_2$  間の間挿法などにより、定量的で最も合理的な工法を設計者の工学的判断で選ぶ。

## 5. まとめ

今後レベル 2 地震動の対応において、地盤や基礎構造物の液化化強度や、強化地盤の強度評価が必要になる。先年地盤の震動試験を行い、これから S 波と P 波の分別や、その S 波と動的入力との関連から液化化の判定と、強化地盤の強度の判定を行った。また液化化時の P 波の増幅の可能性を示した。これらに基づいて地盤強度の定量的判定を目的とする現場試験法の例を示した。今後多くの実証により精度を上げ、この問題解明の手掛りが得られれば幸いである。



(a) 格子状配置



(b) 放射状配置

図-13 現場試験法

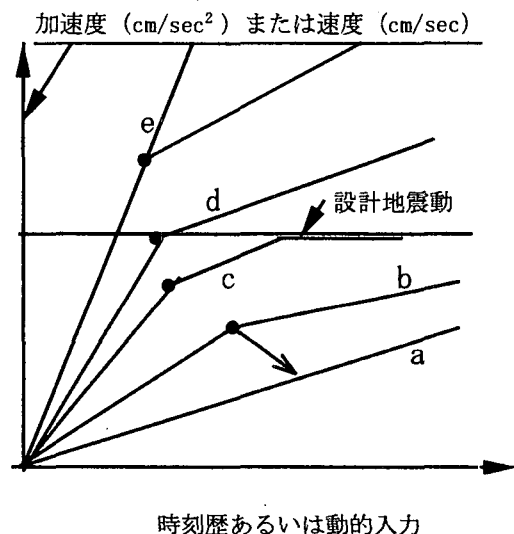


図-14 地盤・基礎の破壊パターン

## 参考文献

- 宮前繁也：強大地震に対する地盤強度の判定法—液化化によって P 波は増幅するか？—、論文報告集第 57 号 土木学会北海道支部、p p. 546-549、2001
- 宮前繁也・小谷清・塩谷常吉：現地液化化試験について、技術資料報告第 15 号 土質工学会北海道支部、p p. 95-104、1975
- 宮前繁也：現地液化化試験の実際、地中埋設管の液化化による被害の実態とその対策、佐武正雄ほか編、日本科学技術協会、p p. 157-175、1988.
- 宮前繁也：液化化によって P 波は増幅するか—強大地震に対する地盤強度の判定法—、土と基礎 地盤工学会、No. 470, pp. 33-35、1997

(原稿受理日 ? )