

# 凍結サンプリングによる洪積砂礫試料の採取とその動的性質

後藤 茂 (技術研究所)      赤川 敏 (技術研究所)  
西尾 伸也 (技術研究所)      玉置 克之 (技術研究所)  
社本 康広 (技術研究所)

## § 1. はじめに

これまで室内試験による砂礫の力学的性質に関する研究は、室内で締固めて作成した試料を用いる場合が多かった<sup>1)</sup>。これは、研究対象が盛土など人工地盤であることが多いことも理由の一つであるが、最も大きな理由は砂礫は粒子が大きく粒子間に結合力がないため、現地盤から不攪乱試料を採取するのがきわめて困難なためである。現在までのところ、現地盤から採取した不攪乱試料を用いた研究は皆無に等しいため、砂礫地盤の強度・変形特性は室内で作成された試料の試験結果から推測せざるを得ない。

室内で作成された礫材料の研究によれば、粒子破碎の生じない範囲では礫材料の力学的性質は砂と大きく変わらないとされている。また、せん断に伴う負のダイレイタンスも砂と同様に生じている<sup>2)</sup>ことから、非排水条件下で繰り返し荷重が作用した場合には、間隙水圧が上昇し液状化する危険があると考えねばならない。一方、砂地盤の例ではあるが、凍結サンプリングで採取した質の高い不攪乱試料に比較して、通常の方法で採取した試料や再調整した試料の液状化強度はきわめて小さいことが吉見<sup>3)</sup>によって明らかにされており、砂礫地盤の液状化強度も攪乱試料で求めたものより、はるかに大きい可能性がある。

砂礫地盤は高層ビルなどの支持地盤となっており、また近い将来予定されている原子力施設の第四紀層立地においても有力な候補となっていることから、砂礫地盤の真の動的性質を把握することはきわめて重要である。

今回、砂礫地盤の動的特性の評価方法を確立するた

めに、不攪乱試料の採取方法として凍結サンプリング方法を砂礫地盤に適用するために必要な技術である試料のコアリング方法や、地盤の凍結方法および管理方法などを開発した<sup>4)5)6)</sup>。また、試料の品質評価方法<sup>7)8)</sup>や不攪乱試料の動的試験方法<sup>9)10)11)</sup>も開発した。

上記方法を洪積砂礫地盤に適用することにより、極めて乱れの少ない試料を採取することに成功し、乱れない試料は液状化強度やせん断剛性が著しく大きいこと、攪乱試料は粒度や密度が不攪乱試料と同じでも、液状化強度やせん断剛性が小さいことなどを明らかにした。

本報告では、洪積砂礫地盤で実施した試料採取と動的試験結果について述べる。

## § 2. 試料採取地の地盤状況

試料採取は千葉県中部の万田野砂礫層で行なった。万田野砂礫層は、上総層群の上部に位置する第四紀洪積世の地層である。図-1に、試料採取地の土質柱状図と原位置試験結果を示す。地下水位は GL-8.4 m である。砂礫層は GL-5.5 m 以深に分布している。

試料採取を行なった GL-6 m~GL-9 m の標準貫入試験による  $N_6$  値は 60~140 であり、大型貫入試験による

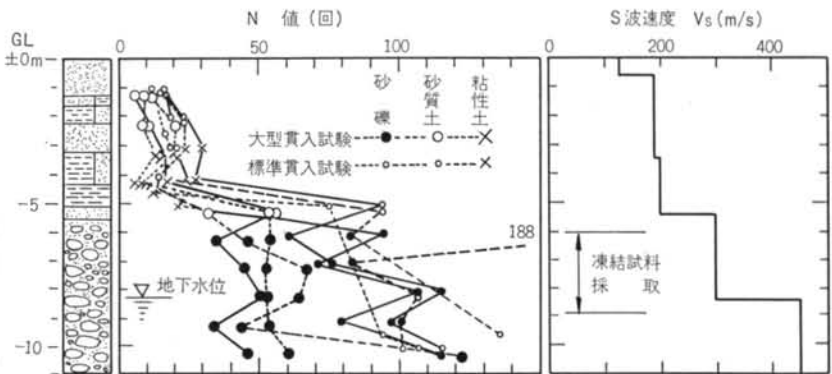


図-1 試料採取地の土質柱状図と原位置試験結果

|           | 標準貫入試験   | 大型貫入試験  |
|-----------|----------|---------|
| サンプラー最大外径 | 51 mm    | 73 mm   |
| サンプラー内径   | 35 mm    | 54 mm   |
| モンケン重量    | 63.5 kgf | 100 kgf |
| モンケン落下高   | 0.75 m   | 1.50 m  |

表一 貫入試験器の比較

る  $N_a$  値は 30~70 である。表一に標準貫入試験と大型貫入試験の仕様を示す。PS 検層による S 波速度 ( $V_s$ ) は 300~450 m/s である。

砂礫層の礫分は 50~60% である。礫の最大の粒径は 80 mm 程度であり、形は角の丸い扁平な物が多い。礫質は、表二に示すように 40% 以上がチャートであり、非常に堅硬である。

| 岩石名  | 構成比 (重量%) |
|------|-----------|
| チャート | 43        |
| 流紋岩  | 28        |
| 安山岩  | 28        |
| 砂岩   | 23        |
| 粘板岩  | 5         |
| 花こう岩 | 0.2       |
| 泥岩   | 0.8       |

表二 礫の岩石組成

### § 3. 凍結サンプリング

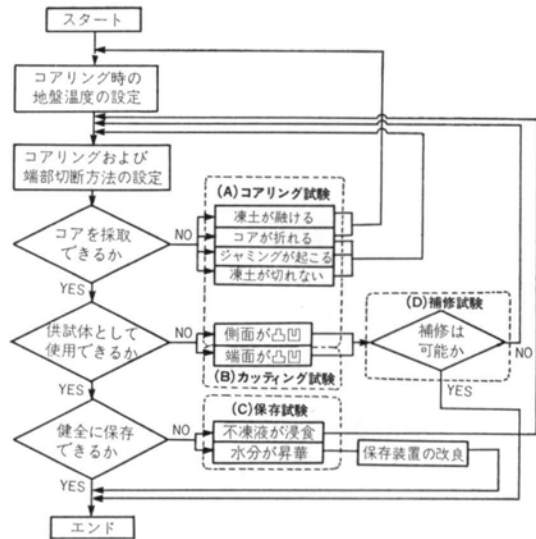
#### 3.1 サンプリング方法の概要

地盤を凍結させて粒子間の結合力を増加させた後に試料採取を行なうことにより、採取時の試料の乱れを防ぐのが凍結サンプリングの基本となる考えである。この場合、乱れの生じる可能性は地盤凍結前と地盤凍結中、および試料採取時にある。

地盤凍結前の乱れとしては、地盤に凍結管などを埋設したときに周辺を乱すことが考えられる。この乱れについては、試料採取位置を凍結管から十分に離すことによって試料が乱れるのを防いだ。

地盤凍結中の乱れは地盤の凍結膨張によって生じる。今回の地盤は細粒分がほとんどなく、拘束圧も  $1.2 \text{ kg/cm}^2$  {118 kPa} 程度期待できることから凍結膨張はほとんど生じない<sup>12)</sup>と考えられるが、確認のために凍結予定領域の周辺に傾斜計を設置して地中変位を計測した。

試料採取時の乱れは、凍結によって増加した粒子間の結合력에比較して、より大きな外力が採取時に試料に作用することによって生じる。この乱れに対しては、粒子間の結合力を高めることと、試料採取時に与える外力を低下させることが有効である。粒子間の結合力は地盤の飽和度が高いほど、また温度が低いほど大きくなる<sup>13)</sup>。今回の試料採取深度には地下水位以上の部分が含まれていることから、地盤内へ注水を行ないながら凍結するこ



図一 凍結サンプリングの検討フローと予備試験

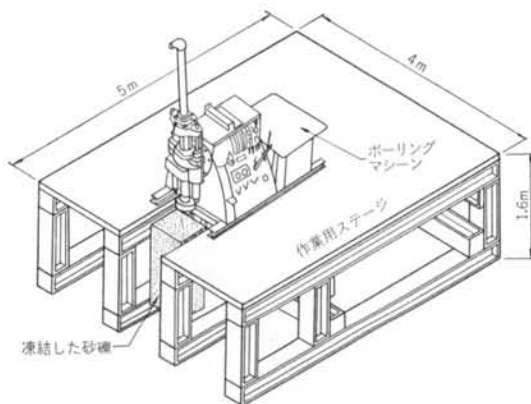
とにより飽和度を高めた。温度については、凍結管や試料採取位置を有機的に組み合わせることにより十分に低下するようにし、地中温度計測システムを用いて厳密に管理した。また、試料採取時の外力については、後述の予備試験を行なって最適な採取方法を検討することにより、試料に作用する外力を低下させた。

一方、砂礫の力学試験には大型の供試体 ( $\phi 300 \text{ mm}$ ,  $h 600 \text{ mm}$ ) が必要であることから、採取した試料を室内で成形するのは容易ではない。そこで、地盤から供試体と同じ径のコア状で試料を採取し、両端面を滑らかに切断するだけで供試体とする方法を用いた。

#### 3.2 予備試験

採取した試料をほとんど成形することなしに供試体として用いるためには、試料が所定の直径や長さで採取できることや側面および端面が滑らかであること、および健全な状態で運搬や保存を行なうこと等が重要である。試料採取時に発生することが懸念される不具合を、図一-2の予備検討フローに示す。そこで、図中に示した予備試験を行なって不具合の発生の可能性と対処方法を検討した。以下に、予備試験のうちコアリング試験について記す。

コアリング試験は、健全なコアの採取方法を検討するためのものであり、予備試験のうち最も主要なものである。試験用土槽 ( $40 \times 40 \times 100 \text{ cm}$ ) に試料採取地の露頭部分から採取した砂礫を詰め、低温室で凍結させた後に図一-3に示すように、ボーリングマシ​​ンを用いてコア採取を行なった。



図一三 コアリング予備試験の模式図

検討すべきパラメータは、ボーリングマシンやコアビットおよびコアチューブの種類、回転速度や挿入圧などの運転条件、切削用冷却液の温度と循環量、砂礫の温度等である。14ケースのコアリングを行なった結果、力学試験の供試体として十分使用可能なコアの採取方法および採取条件を見いだした。

他の予備試験からは、試料を十分に冷却することにより端面は無水で平滑に切断できること、 $-20^{\circ}\text{C}$ 以下で保存した場合切削に使用する程度の濃度の不凍液の浸食はほとんど問題にならないこと、およびコア表面の補修は低温下で湿った砂を塗りつけることにより容易に行なえること等が明らかになった。

### 3.3 地盤凍結

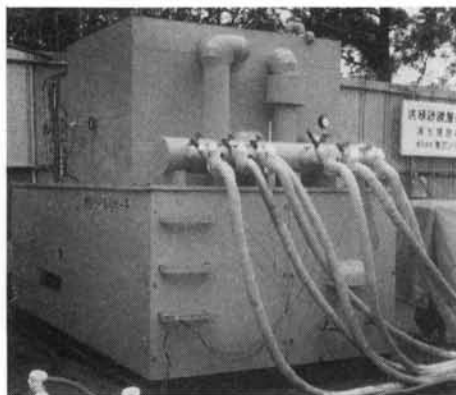
#### (1)冷熱源

地盤を凍結させるための冷熱源として、新たに製作した小型凍結プラントを使用した。従来の砂地盤の凍結サンプリングでは液体窒素 ( $\text{LN}_2$ ) を使用していた。これは、土木工事などで用いられる凍結プラントは大規模であるため運搬や設置に多くの手間や費用を要するので、凍結サンプリングのような小規模の凍結には  $\text{LN}_2$  の方が有利になるためであった。しかし、 $\text{LN}_2$  を使用するためには関係官庁への届出や有資格者の現場常駐が必要であり、場所によっては  $\text{LN}_2$  供給のために高価な特殊装置の設置を義務付けられることもある。また、ラッシングコスト自体は  $\text{LN}_2$  を用いるより、プラントを用いた方が低額になる。

今回、凍結サンプリングに必要な程度の冷却能力を有する小型凍結プラントを製作した。表一三に小型凍結プラントの性能を示し、写真一に外観を示す。このプラントは4tonトラックで運搬ができ、200Vの電源と接続するだけで運転ができるため運搬や設置にほとんど手

|          |                       |
|----------|-----------------------|
| 寸法 (m)   | L3.6, B2.0, H2.5      |
| 重量 (ton) | 2.5                   |
| 動力       | 200 V, 20 kW          |
| 冷媒       | フロンガス                 |
| 能力       | 20馬力, 10,000 kcal/hr  |
| ライン      | 1.3 ton, 60 l/min, 吐出 |
| 冷却温度     | $-35^{\circ}\text{C}$ |

表一三 小型凍結プラントの性能



写真一 小型凍結プラント

間や経費がかからない。また、現地に有資格者等は常駐させなかったが、なんら支障は生じなかった。

#### (2)凍結管等の配置

図一四に、凍結管や試料採取位置等の配置を示す。凍結管は全長9.5mの二重鋼管であり、先端部4mのみが冷却され、他の部分を内側から断熱することにより、不必要な部分の凍結を無くしてエネルギーロスを生じなくしてある。図のように有機的に凍結管を配置することにより、広い領域を早く均一に凍結させることができる。凍結プラントで約 $-30^{\circ}\text{C}$ に冷却したライン(塩化カルシウム溶液)を凍結管内に循環させた結果、約4週間で試料採取可能な状態に凍結した。

試料採取位置は、温度が均一であるように各凍結管の間とし、凍結管理設時の乱れを避けるために礫の最大粒径の2倍以上凍結管等から離して配置した。

注水管はGL-6.5mまで設置し、端部1mにストレーナー加工が施してある。地盤内への注水は管底部およびストレーナー部分から行なわれ、注水量は3 l/分であり、約3週間継続した。

凍結膨張については、凍結管から50cm離れた位置で挿入式傾斜計(精度1/100度)を用いて計測したが、地盤凍結中に地中変位は計測されなかった。したがって、傾斜計の精度などから考えて今回の凍結では $10^{-4}$ 以上のせん断ひずみは地盤内に生じなかったと思われる。

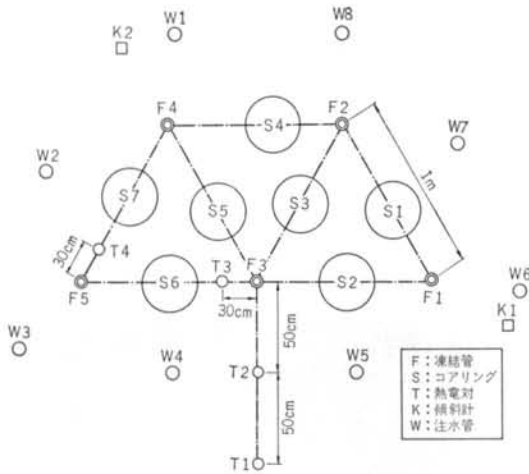


図-4 凍結管や試料採取位置などの平面配置図

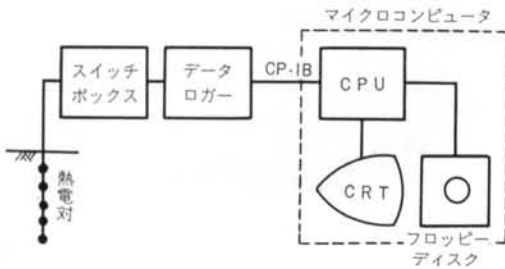


図-5 地中温度計測システム概念図

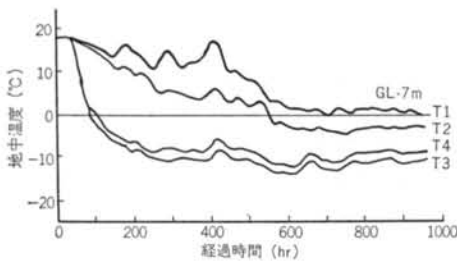


図-6 GL-7m での地中温度の経時変化

(3)凍結管理

地盤の凍結状態を管理するために、図-4に示す4箇所各5深度にわたって熱電対を埋設し地中温度を計測した。地中温度の計測は、地盤凍結実施中およびコアリング中にわたって連続的に行なう必要があるため、図-5に示す地中温度計測システムを用いて自動計測を行なった。このシステムでは、所定の時間毎に自動的に地中温度を計測し、計測データをフロッピーディスクに記録するとともにマイクロコンピュータのCRT上に経時変化として表示する。図-6に温度の経時変化を示す。また、以下に示す方法によって凍結領域全体の温度分布を推定し、コアリング位置の温度が把握できるようになっている。

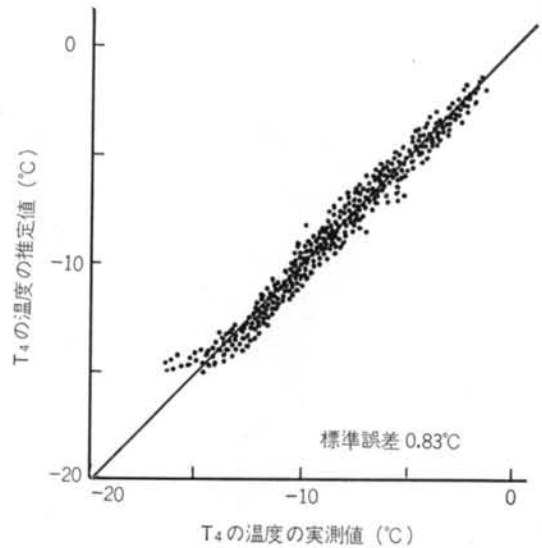


図-7 熱電対 T<sub>4</sub> による地中温度の実測値と準定常解による推定値の比較

地盤内の温度が平面温度場であると仮定すると、支配方程式は式(1)で表わされる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\alpha}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\alpha}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 $T$  は温度、 $\alpha$  は温度伝播率である。

凍結がゆっくり進行している場合には温度分布は準定常的であると考えることができ、 $\partial T / \partial t \approx 0$  となり、重ね合せが可能になる<sup>14)</sup>。また、凍結管1本毎に考えれば  $\partial^2 T / \partial \theta^2 = 0$  であることから、式(1)の特解は式(2)になる。

$$T = A \log(r) + B \quad \dots\dots(2)$$

凍結管が5本であること、および図の対称性から温度の推定式は以下ようになる。

$$T = A_1 \log(R_1 \cdot R_5) + A_2 \log(R_2 \cdot R_4) + A_3 \log(R_3) + A_4 \quad \dots\dots(3)$$

$$R_i = \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2} \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 $X_i$  と  $Y_i$  は凍結管の座標であり、 $A_i$  が未知である。適当な境界条件を用いて  $A_i$  を求めることにより凍結領域内の温度を推定することができる。

図-7に  $T_4$  での温度の実測値と推定値の比較を示す。ただし、境界条件としては  $T_2$  と  $T_3$  の温度の実測値および凍結管の温度の均一性を用いた。推定法の誤差要因としては、平面温度場および温度の準定常状態の仮定の妥当性や、凍結管や熱電対の設置位置のずれ等が考えられるが、図から明らかなように実測値と推定値はよい対比を示している。実測値と推定値の差である推定誤差は平均値が0.1℃、標準偏差が0.83℃程度であり、コアリング時期の決定等に用いても問題はないと思われる。

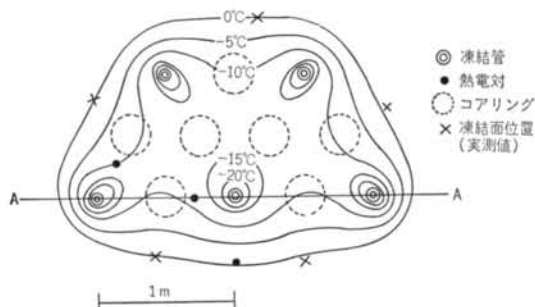


図-8 コアリング開始時におけるGL-6mでの温度の平面分布

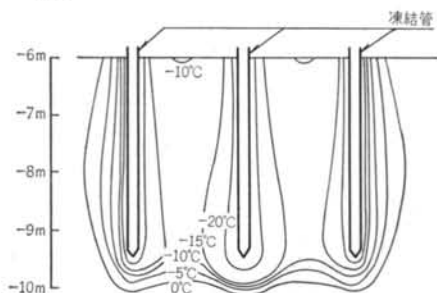


図-9 コアリング開始時の温度の深度分布(図-8のA-A断面)

図-8に、試料採取開始時点でのGL-6mの温度分布(推定値)を示す。今回は所定の領域が凍結した後に深礎工法によりGL-6mまで掘削し、凍結状態を確認した。地盤に鉄筋棒を貫入して確認した凍結面の位置を図中に示すが、上記方法により推定したものと良く適合

している。また、熱電対を設置した5深度にわたって温度を推定することにより、深度方向の温度分布も推定することができる。図-9に深度方向の温度分布を示す。

図-8, 9から、今回行なった凍結方法によれば広い領域にわたって温度がほぼ均一になることが分かる。

このシステムを用いることにより、原位置において凍結領域全体の温度が把握でき、合理的にコアリング開始時期等を決定できた。

### 3.4 コアリングおよび供試体成形

地盤凍結開始後約4週間経過した後、採取予定位置の温度が十分低く(-10°C以下)なったものからコアリングにより試料を採取した。

コアリングは、図-10に示すように前述の深礎坑内に設けたステージ上に大型油圧ボーリングマシン(DH-4)を設置して行なった。また、予備試験の結果に基づき、インプリおよびサーフェス併用タイプのダイヤモンドコアリングビット(内径300mm)とダブルコアチューブ(内径302mm)を用いた。写真-2に、コアリングビットを装着したコアチューブを示す。切削用の循環液としては、-10°C程度に冷却したエチレングリコール溶液を用いた。

試料採取深度はGL-6m~-9mの3mにわたっているが、コアは取り扱いが容易にできるように地盤から1m毎に取り出した。コア底部と地盤との切り離しはセンターホールジャッキを用いて、コアリングチューブごとコアを引き上げるにより行なった。縁切りに必要な

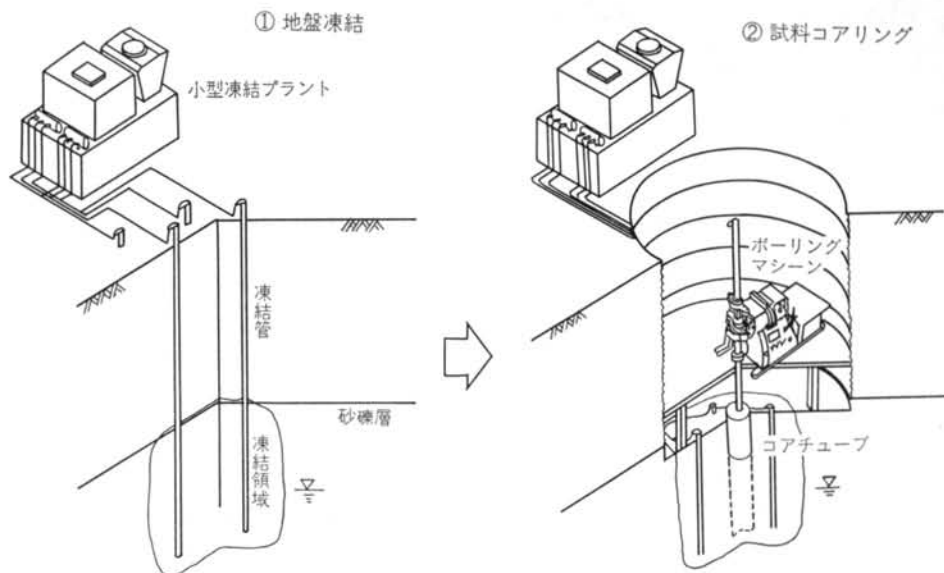
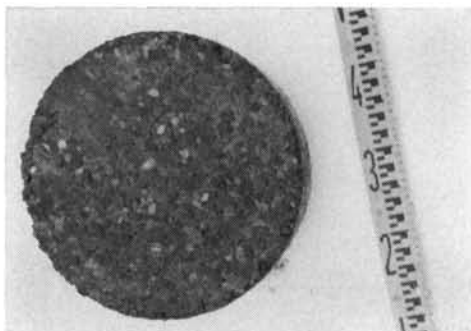


図-10 凍結サンプリングによる不攪乱砂礫試料採取の模式図



写真一2 ダイヤモンドコアリングビットを装着したダブルコアチューブ



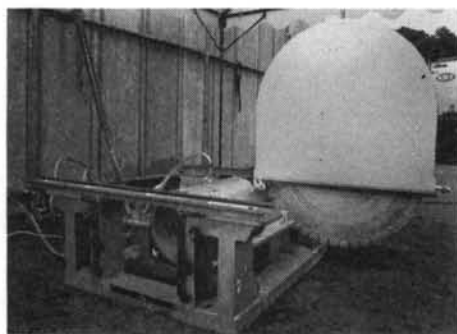
写真一5 凍結砂礫供試体の切断面



写真一3 採取した凍結砂礫試料



写真一6 凍結砂礫供試体



写真一4 コア端面切断用のブレードカッタ

引き上げ力は 10 ton 程度であった。写真一3 に採取したコア状の凍結砂礫試料を示す。試料は礫の部分もきれいに切断されており、直径も 298～300 mm であり、ほぼ一様であるといえる。

採取したコアは、現地において冷凍庫に入れ十分冷却した後、写真一4 に示すブレードカッタを用いて所定の長さで切断した。切断中はコアとカッタブレードに液体窒素を散布することにより、試料が融解するのを防いだ。写真一5 に試料の切断面を示すが、非常に滑らかに切断されている。写真一6 に、供試体状になった凍結砂礫試料を示す。

### 3.5 試料の運搬と保存

供試体状になった試料を動的試験実施まで健全に保つ

ために、図一11に示す保護装置を用いた。図一12に保護装置の断熱効果の確認実験の結果を示すが、この装置を用いることにより  $-20^{\circ}\text{C}$  程度に冷却された試料は、常温下に24時間以上放置されても表面さえ融解しない。これは、保存している冷凍庫が故障した場合でも試料を損なう前に対処できることを意味している。

断熱材には振動の吸収材としての働きもあり、現地から技術研究所まで冷凍車を用い2時間以上かけて運搬したが、試料の損傷は全くなかった。

技術研究所では、実験室内の低温室において  $-20^{\circ}\text{C}$  の環境下で保存した。低温保存時に問題になる昇華に対しては保護装置内のメンブレンが有効に働き、約半年経過した後でも試料が乾燥することがなかった。

## § 4. 砂礫試料の室内動的試験

### 4.1 採取試料の物理的性質と攪乱試料の作成方法

表一4に、試験を行なった供試体の一覧表を示す。供

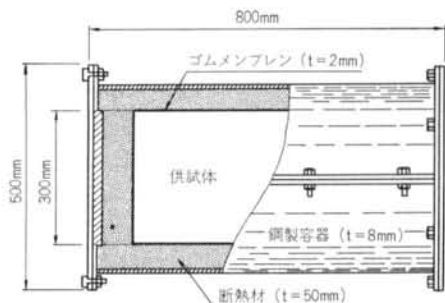


図-11 凍結供試体の保護装置

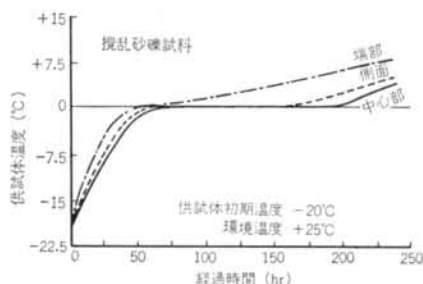


図-12 供試体保護装置の断熱性能試験結果

試体名のUは凍結採取した不攪乱試料を示し、Dは攪乱試料を示す。U 1-6とD-4は動的変形試験を行ない、それ以外は液状化試験を行なった。

不攪乱試料は、現地で端部のみの成形を行なったものをそのまま用いたが、表から明らかのように直径、高さともに均一であった。不攪乱供試体の乾燥密度は1.954~1.971 g/cm<sup>3</sup>であり、相対密度は97~102%であった。相対密度を求めるための最大最小密度試験は、直径15 cm、高さ15 cmのアルミ製モールドを用い、土質試験法に示された方法に準拠して行なった。この方法により求めた、砂礫および豊浦砂の最大および最小密度を表-5に示す。

図-13に、試験後に測定した供試体の粒度分布を示す。供試体間の粒度のばらつきはきわめて少なく、細粒分はほとんどなかった。

供試体側面や端面に凸凹がある場合には、メンブレンペネトレーションなどの影響を避けるために補修を行なう必要があり、試験前に保存中の低温室内で供試体の状態を観察した。今回試験を行なった供試体は側面および端面の状態が良く、補修の必要は全くなかった。

攪乱供試体は、不攪乱供試体と力学特性を比較するために実験室内で作成した。作成に際しては不攪乱供試体と密度および粒度をそろえることに留意し、図-13の平均的粒度分布になるように粒度調整した試料を、φ300 mm、h600 mmのモールドに10層に分けて詰め、一定時間

| Test No. | 直径 (cm) | 高さ (cm) | 乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 相対密度 (%) |
|----------|---------|---------|---------------------------|----------|
| U4-6     | 29.77   | 60.27   | 1.959                     | 99       |
| U5-6     | 30.08   | 60.80   | 1.971                     | 102      |
| U7-6     | 29.90   | 60.40   | 1.966                     | 101      |
| U6-6     | 30.17   | 60.50   | 1.954                     | 97       |
| D-1      | 30.06   | 58.30   | 1.950                     | 96       |
| D-2      | 30.06   | 58.13   | 1.950                     | 96       |
| D-3      | 30.08   | 58.17   | 1.934                     | 92       |
| U1-6     | 30.02   | 60.47   | 1.965                     | 101      |
| D-4      | 30.06   | 59.83   | 1.944                     | 94       |

表-4 不攪乱および攪乱供試体一覧

| 試料    | 最大密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 最小密度 (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------|---------------------------|---------------------------|
| 万田野砂礫 | 1.964                     | 1.646                     |
| 豊浦砂   | 1.645                     | 1.349                     |

表-5 最大最小密度試験結果

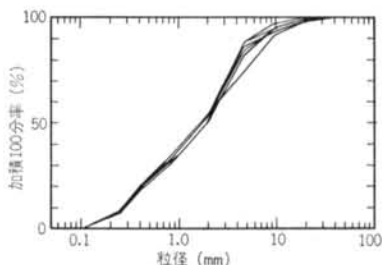


図-13 不攪乱供試体の粒度分布

モールド側面を小型パイブレットで加振して所定の密度にした。

#### 4.2 動的試験装置と試験方法

試験は、直径30 cm、高さ60 cmの供試体の動的三軸試験ができる大型振動三軸試験装置を用いて行なった。試験装置の概要を図-14に示す。拘束圧は10kg/cm<sup>2</sup> (980 kPa) まで可能で、上部の油圧シリンダにより軸荷重±30 tonで0.001~10 Hzの振動数の繰り返し载荷を行なうことができ、下部の油圧シリンダにより静的には200 tonの軸荷重を与えることができる。

軸荷重はセル内に設置したロードセル (5 ton)、間隙水圧はひずみゲージ型の間隙水圧計 (10 kg/cm<sup>2</sup>) によって計測し、軸変位は10<sup>-3</sup>以下の微小ひずみ領域ではセル内の電磁誘導型非接触変位計を用い、それ以上のひずみについてはセル外部の差動トランス型変位計で計測した。

この装置には、凍結供試体を乱すことなく強制解凍するために、拘束圧を作用させた状態で温水を循環させる装置が装備されている。また、図-15に示すS波発生用の水平打撃ピストンが装着しており、供試体のS波速度

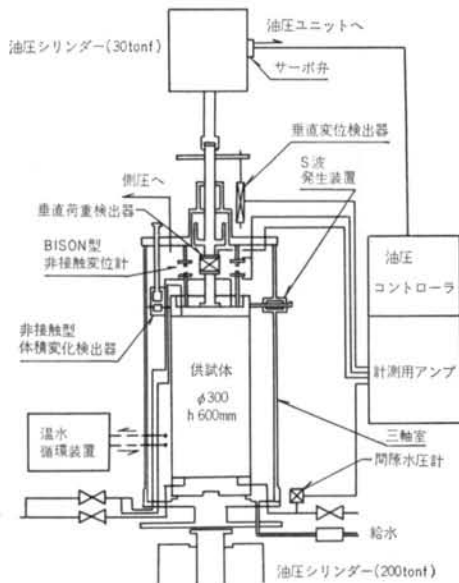


図-14 大型動的三軸試験装置の系統図

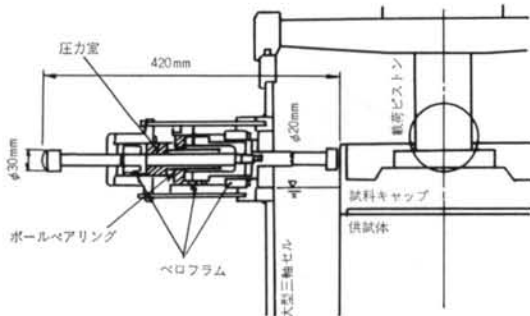


図-15 S波発生用の水平打撃ピストンの構造図を測定することができる。

不攪乱供試体の試験は次に示す手順で行なった。

(1) 低温室から供試体を搬出し速やかに大型セルにセットした後、 $0.35 \text{ kg/cm}^2$  {35 kPa} の拘束圧を与え、約  $40^\circ\text{C}$  の温水をセル内に循環させ供試体を解凍する。解凍に要する時間は約2時間であった。

(2) セル圧を  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  {49 kPa} に変えた後、供試体に炭酸ガス ( $\text{CO}_2$ ) を約15時間通気し、続いて脱気水を約24時間通水する。

(3) 有効拘束圧を  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  {49 kPa} に保ったまま、B値が0.95以上になるまでバックプレッシャーを与える。

(4) 所定の有効拘束圧まで段階的に等方圧密を行なう。各圧密段階では一次圧密終了後、約1時間放置する。

(5) S波速度の測定試験では、三軸セル内の供試体上部のキャップを、前述のピストンを用いて水平に打撃することにより供試体内にS波を発生させる。発生させた

S波を供試体側面2箇所に取り付けた加速度計で受信し、S波初動の時間差からS波速度を求める。

(5) 動的変形試験では、非排水条件で軸方向に圧縮および引張りの繰り返し加重を周期10秒で与えて行なう。繰り返し荷重は一定の値を5回与えた後、徐々に増加させる方法で実施し、間隙水圧の上昇が見られた場合には排水経路を開けて、過剰間隙水圧が完全に消散した後に再び非排水条件にして試験を行なう。

(5) 液状化試験は、周期100秒で軸方向に圧縮および引張りの繰り返し荷重を与えて行なう。

攪乱供試体についても、手順(2)の飽和過程以後は同一の方法により試験を行なった。

試験時の拘束圧は地盤の上載圧に等しい値とし、今回報告する試験では  $1.2 \text{ kg/cm}^2$  {118 kPa} にした。

### 4.3 S波速度の測定試験結果

三軸セル内で解凍した後供試体のS波速度を測定して、供試体の品質(乱れの程度)評価を行なった。従来は適当な方法がなかったために、供試体の品質評価は十分には行なわれていなかった。今回開発した方法は、原位置のPS検層の状態を三軸セル内で再現するものであるため、原位置と室内の測定結果を比較することにより供試体の品質評価を定量的に行なうことができる。また、S波速度  $V_s$  は次式のようにせん断剛性  $G$  と関係付けられているため、微小のひずみレベルのせん断剛性を知ることもできる。

$$G = \rho V_s^2 \quad \dots\dots(5)$$

ここで、 $\rho$  は密度である。

今回の試験では供試体の高さ10cmと50cmの2箇所に加速度計を取付けたが、図-16の供試体各高さで測定したS波波形から分かるように、位置によらずS波の初動は波形が鋭い立ち上がりを示す点(図中の黒三角点)として<sup>15)</sup>明確にとらえることができる。

図-17に、拘束圧を変えて測定したS波速度と拘束圧との関係を示す。原位置のPS検層結果は、地盤の静止土圧係数  $K_0=1$  として図中に示してある。原位置と室内のS波速度は良い一致を示しており、採取した試料の乱れが極めて少ないことが分かる。S波速度と拘束圧は両対数座標上で直線関係になっており、この傾向は図中に示してある動的変形試験で求めた初期せん断剛性  $G_0$  (せん断ひずみ  $10^{-5}$  でのせん断剛性) から推定した値についても同様であった。

### 4.4 動的変形特性試験結果

不攪乱試料のひずみによるせん断剛性の低下を図-18



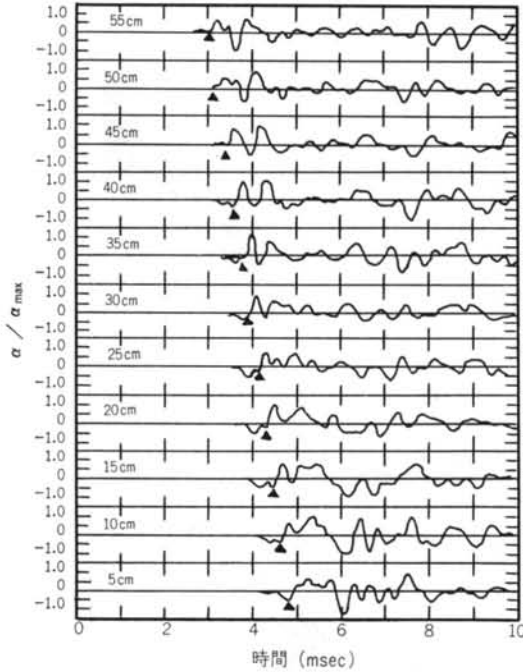


図-16 供試体の各高さにおいて受信したS波波形

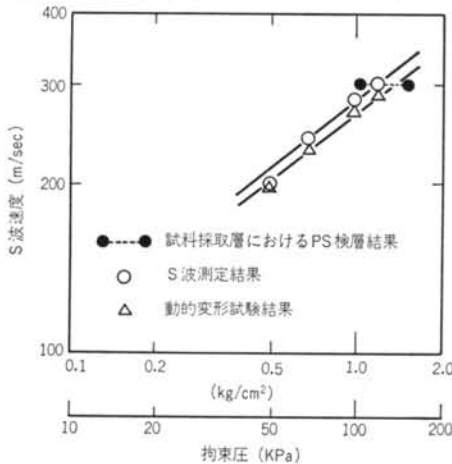


図-17 砂礫の拘束圧とS波速度の関係

に示す。初期せん断剛性  $G_0$  (せん断ひずみが  $10^{-5}$  のせん断剛性) の値は  $1900 \text{ kg/cm}^2$  (185 MPa) であり、この値は原位置のS波速度 ( $V_s=300 \text{ m/s}$ ,  $\rho=2.1 \text{ g/cm}^3$ ) から推定した値と一致している。せん断剛性  $G$  が  $G_0$  の  $1/2$  となる基準せん断ひずみは  $4 \times 10^{-4}$  とかなり小さく、一般の攪乱砂の結果と比較すると下限値に近い。

図中には攪乱供試体の結果も示してある。攪乱供試体は密度が不攪乱供試体とほぼ等しいにもかかわらず、 $G_0$  は  $950 \text{ kg/cm}^2$  (93 MPa) であり、不攪乱のもの  $1/2$  程度である。しかし、図-19に示すようにせん断剛性を  $G_0$

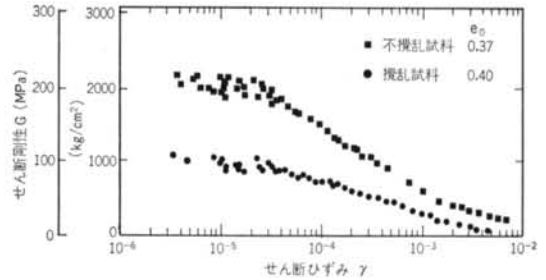


図-18 不攪乱砂礫試料と攪乱砂礫試料のせん断剛性  $G$  とせん断ひずみ  $\gamma$  の関係

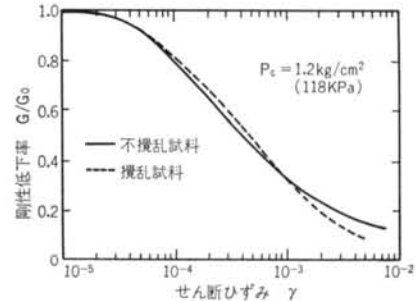


図-19 剛性低下率  $G/G_0$  とせん断ひずみ  $\gamma$  の関係

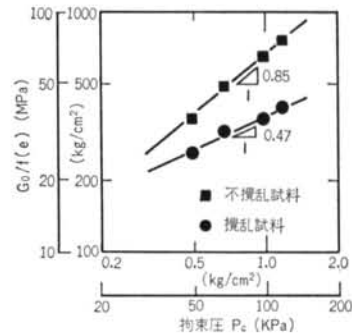


図-20 正規化した初期せん断剛性  $G_0/f(e)$  と拘束圧  $P_c$  の関係

で正規化した値である剛性低下率は、不攪乱と攪乱で顕著な差はない。

試料圧密段階において、 $10^{-4}$ 以下の小さなひずみで動的変形試験を行ない  $G_0$  を求めた。各応力段階における供試体の間隙比の相異による影響を除くために、 $f(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e)$  で正規化した  $G_0$  の値と拘束圧の関係を図-20に示す。ただし、圧密段階における間隙比の変化は小さかった。両者は両対数座標上で直線関係になり、その傾きは不攪乱供試体で0.85、攪乱供試体で0.47であった。従来攪乱砂で得られている値は0.4~0.5であり<sup>16)</sup>、今回の不攪乱砂礫試料の値は著しく大きい。前に述べた供試体のS波速度試験でも同様の結果が求められており、値の信頼性は高いと考えられるが、このよう

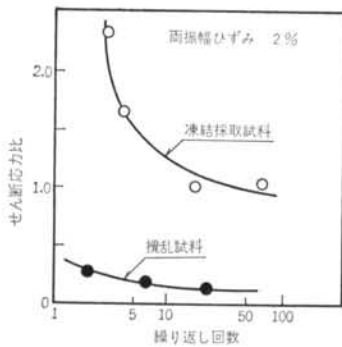


図-21 砂礫試料の液状化強度曲線

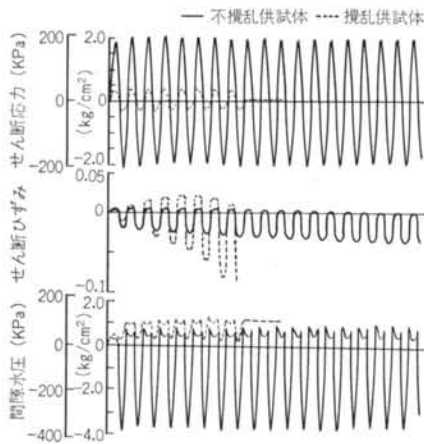


図-22 砂礫試料の代表的液状化試験結果

な値が洪積砂礫地盤特有のものであるか否かを判断するためには同様のデータを蓄積する必要がある。

#### 4.5 液状化試験結果

今回行った不攪乱および攪乱供試体の液状化試験結果を図-21に示す。不攪乱供試体の液状化強度は極めて大きく、繰り返し回数20回で両振幅ひずみ2%になるせん断応力比は1.1となる。一方、攪乱供試体は密度が同一であるにもかかわらず、約1/7~1/6の値であった。

不攪乱および攪乱供試体のせん断応力、せん断ひずみ、過剰間隙水圧の変化を図-22に示す。不攪乱供試体は与えているせん断応力が大きいため、繰り返しの初めの段階から大きなひずみを生じるが、繰り返し回数の増加に伴うひずみの増加は緩慢である。

過剰間隙水圧の変化をみると、不攪乱供試体は正のダイレイタンスによって生じる間隙水圧の減少が著しい。また、繰り返しせん断が進行しても過剰間隙水圧は100%に達していない。攪乱供試体も間隙水圧の減少はみられるが、不攪乱供試体に比べると値が小さく、過剰間隙水圧は3波目で100%に達している。不攪乱供試体

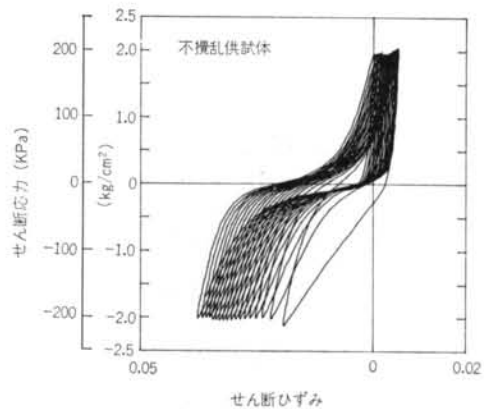


図-23 液状化試験時のせん断応力とせん断ひずみの関係

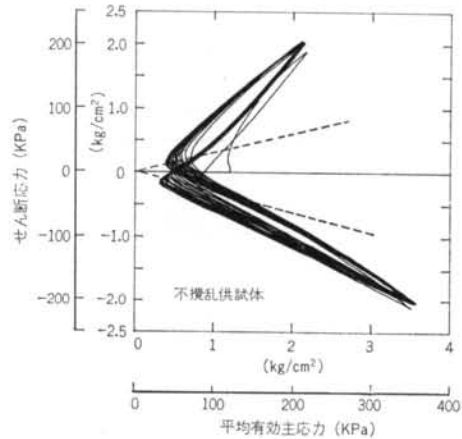


図-24 液状化試験時の有効応力経路

の液状化強度が攪乱供試体に比べて著しく大きな原因は、過剰間隙水圧の値が100%に至らないので極端な剛性の低下が生じないためであると判断できる。

液状化試験時の応力とひずみの関係を図-23に示す。応力とひずみの関係は密な砂と同様に逆S字形のヒステリシスを描く<sup>1)</sup>。図-21の液状化曲線から判断すると、原子力施設の設計に用いる限界地震(S2地震)のようなものでも地盤が崩壊することはないが、より極限状態の地震応答解析を行なう場合には、図-23の応力とひずみの関係を満足するモデル<sup>10)</sup>を用いる必要がある。

試験時の有効応力経路を図-24に示す。変相線の傾きは0.3であり、密な砂の0.5<sup>17)</sup>に比べても小さい。過剰間隙水圧の上昇度もせん断応力の大きさの割には小さく、この供試体の液状化強度が著しく高いことを示している。

## § 5. 結論

砂礫地盤の動的特性の評価方法を確立する目的で、凍結サンプリングによる不攪乱試料の採取方法や採取した試料の品質評価方法、および不攪乱試料の動的試験方法等の研究開発を行なった。本方法を洪積砂礫地盤に適用し、以下のことを明らかにした。

(1)地盤の凍結方法やその管理方法、および地盤に適したコアリング装置やその運転条件を明確にすることにより、凍結サンプリング法を用いて砂礫地盤から動的試験の供試体の形状で、質の高い不攪乱試料を採取することができる。

(2)凍結採取した試料を三軸セル内で乱れの生じないように解凍した後に供試体のS波伝播速度を測定し、原位置でのPS検層結果と比較することにより試料の乱れが極めて少ないことを定量的に評価できる。

(3)凍結サンプリングによる試料は液状化強度とせん断剛性がともに大きく、非排水状態において繰り返し回数20回で両振幅ひずみが2%になるせん断応力比は1.1であり、初期せん断剛性(せん断ひずみ $10^{-5}$ のときのせん断剛性)は $1900 \text{ kg/cm}^2$ {185 MPa}であった。それに対し、同じ粒度および密度になるように室内で詰め直した攪乱試料では液状化強度で1/6、初期せん断剛性で1/2程度の値であり、攪乱試料により原位置の動的特性を把握することが困難である。

謝辞 本研究を行なうに当たり、東京工業大学の吉見教授と東京都立大学の渡部教授には有益なご助言を頂きました。また、原位置試験と試料採取の実施に当たっては(株)東京ソイルリサーチの協力を頂きました。ここに深く感謝いたします。なお、この研究は大崎副社長の指示のもとに、GFDプロジェクトとして行なわれたものである。

### <参考文献>

- 1) 例えば、国生、江刺、嶋田：“くり返し三軸試験における広い範囲での礫材の動的性質”第15回土質工学研究発表会発表講演集(1980年) pp.541~544
- 2) 例えば、松本、渡辺、小川：“ロック材料の最大粒径に着目した三軸圧縮比較試験”土木研究所資料 第1788号(1982年)
- 3) Y. Yosimi, K. Tokimatsu, O. Kaneko & Y. Makihara: “Undrained Cyclic Shear Strength of Dense Niigata Sand” Soils & Foundations, Vol.24, No.4 (1984) pp.131~145
- 4) 大崎他：“洪積砂礫地盤の凍結サンプリング”昭和60年度サンプリングに関するシンポジウム発表論文集(1985年)
- 5) 後藤他：“原位置凍結による洪積砂礫試料の採取”第21回土質工学研究発表会発表講演集(1986年)
- 6) 後藤、赤川、西尾：“砂礫地盤の凍結サンプリングにおける地中温度の計測管理”土木学会第41回年次学術講演会講演概要集(1986年)
- 7) 西尾他：“大型三軸セルを用いたS波の測定”第21回土質工学研究発表会発表講演集(1986年)
- 8) 玉置、社本：“供試体と地盤のS波速度の比較”昭和61年度日本建築学会大会学術講演梗概集(1986年)
- 9) 社本他：“洪積砂礫地盤の真の液状化強度”第21回土質工学研究発表会発表講演集(1986年)
- 10) 社本、玉置：“サイクリックモビリティを考慮した有効応力モデルの洪積砂礫地盤に対する適応性”昭和61年度日本建築学会大会学術講演梗概集(1986年)
- 11) 西尾、後藤：“洪積砂礫地盤から採取した不攪乱試料の動的変形特性”土木学会第41回年次学術講演会講演概要集(1986年)
- 12) 了戒、後藤、赤川：“一定拘束応力下における飽和土の凍土特性”清水建設研究所報 Vol. 33 (1980年) pp. 27~36
- 13) 後藤、赤川、了戒：“室内試験における凍結土の強度および変形特性”清水建設研究所報 Vol. 33 (1980年) pp. 37~49
- 14) 戸部、秋元：“凍土内の温度分布計算式とその応用”冷凍 第54巻、第622号(1979年) pp.3~11
- 15) R. W. Stephenson: “Ultrasonic Testing for Determining Dynamic Soil Moduli(Dynamic Geotechnical Testing)” STP-654, ASTM (1978) pp. 179~195
- 16) 足立、龍岡：“土の力学(Ⅲ)(新体系土木工学・18)”(1981年) pp. 220~222
- 17) 社本：“非排水せん断時の密な砂の有効応力モデル”清水建設研究報告 Vol. 40 (1984年) pp.1~10

