

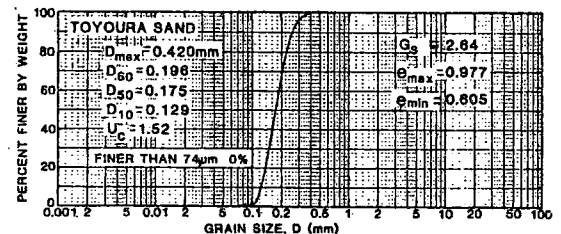
1. はじめに

昨今耐震関連の調査が増えるに従って砂質土のサンプリングが多くなっている。通常細粒分の少ない砂質試料は現地でサンプリング後水抜きなどの処理を行ったのち、ドライアイス等で凍らせてから試験室に運ばれ各試験（三軸圧縮試験・繰返し非排水三軸試験等）が行われている。凍結した砂質試料は（社）地盤工学会の土質試験法¹⁾によると、正、負圧問わず 0.2 kgf/cm^2 程度で解凍することとある。負圧の場合πメーターなどを用いて直接解凍後の体積変化量を求めることができるのに対し、正圧の場合軸変化量から解凍による供試体の体積変化量を計算式より求めることとなる。初期体積変化量は密度に影響を与え、それは液状化強度にも関係する。本研究は凍結試料を解凍する方法の違いにより供試体の密度や液状化強度への程度影響するかを検討した。

2. 供試体作製方法

サンプリングされた砂質試料は現場で水抜きをしてから凍結される。しかし完全に水を抜くことはできないので多少水分を含んだものになる。よって今回行う試験も砂質試料に水分を持たせたものを作製した。供試体には豊浦標準砂を使用した（図-1）。これは砂の統一試験などでよく使用される細粒分の少ない均等な砂である。

供試体作製はロートの先にく形孔を付け空気乾燥した砂を高さ10cm、直径5cmの2つ割りモールドに空中落下させて所定の密度になるよう一定の距離を保ったままモールドいっぱいまで入れる。その後このモールドを水をはったバケツに静かに入れる。この時モールドの上面まで水がくると砂が流れ出してしまうので少なめに水をはっておき、あとで水をモールド上部いっぱいまで加える。そしてそのまま放置しておきモールドの隙間から水が入り砂試料がほぼ飽和する。その後冷凍庫にモールドごと入れ一晚凍結させる。この凍結した砂試料の上部は水分が多い（氷となってせり出す）ため上部より約1センチのところを切断し円柱形に仕上げる。この方法で圧密後の $D_{rc}70\%$ （密な砂、落下高さ45cm）と $D_{rc}50\%$ （緩い砂、落下高さ10cm）の2種類を作製した。

図-1 使用した豊浦標準砂の物理特性²⁾

3. 試験方法

正圧の場合凍結した供試体を試験機にセットし、ゴムスリーブを被せたのちアクリル円筒をセットする。その後セル水を供試体が被る位置まで入れ、空気圧をかけて等方状態で解凍する。この時供試体上下排水コックは開けておく。初期セット時の圧力の違いによる影響を見るため 0.1 、 0.2 kgf/cm^2 の2種類の初期解凍圧力を用いた。

次に負圧の場合は供試体をセット後ゴムスリーブを被せた状態で負圧 0.05 kgf/cm^2 をかける。その後垂直変位計をセットし試験機上部重量キャンセル用の空気圧をかけたのち供試体上部に負圧をかける。よって供試体はゴムスリーブを被せた状態のみで解凍することになる。この場合も負圧 0.1 、 0.2

kgf/cm²の2種類とする。

解凍時間は正、負圧ともに2時間とした。これは事前にセル水のもとで行ったデータを基に決定した。正圧の場合は垂直変位計の読みより解凍時体積変化量 ΔV_F (cm³)を次式より計算する¹⁾。

$$\Delta V_F = \frac{3 \Delta H_F}{H_0} V_0$$

- H_0 : 凍結した供試体高さ (cm)
- ΔH_F : 解凍に伴う高さ変化量 (cm)
- V_0 : 凍結した供試体体積 (cm³)

負圧の場合解凍に伴う体積変化量は垂直変化量と供試体直径から求められる。直径を計るためにπメーターを使用する。これは円柱状のもの円周を直接計ることによりその直径を読み取ることができるものである(図-2)。最小読み取り値は0.1mmである。直径を計る際にまずゴムスリーブの厚さを供試体下部のペディスタル(φ=5cm)上の直径から求め、供試体直径を上、中、下部と測定する。その後次の作業に移行するため負圧を正圧に変換し飽和作業を行い、背圧は2.0kgf/cm²を使用、B値(0.95以上)確認のあと圧密($\sigma_c' = 0.5, 1.0$ kgf/cm²で1時間)を行い、載荷周波数 $f = 0.2$ Hzで繰返し非排水三軸試験を行った。

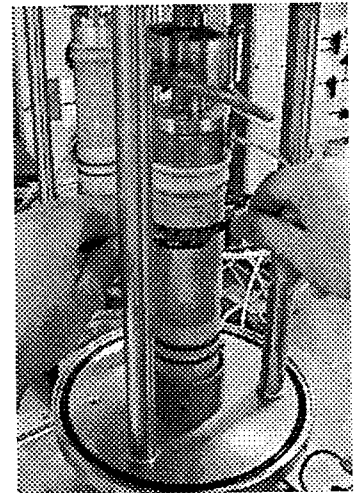


図-2 πメーター測定方法

4. 実験結果

4.1 解凍時の体積変化量

初めに初期沈下量(mm)と体積変化量の関係を見る。表-1からDrc70%の正圧2種類では大きな差はない。負圧の場合も同様であるが、計算より求めた体積変化量がいずれも実測値を若干上回っている。

次にDrc50%の場合は正、負圧いずれも初期拘束圧0.2kgf/cm²の方が初期沈下量が大きい。また体積変化量は負圧の場合実測値がいずれも計算値を上回っている。特に負圧0.1kgf/cm²は倍近くにもなる。これより緩い砂の場合垂直変化量から求めた計算式による体積変化量は実測値より小さい値になるので、密度等を小さく取ることになる。

表-1 初期沈下量・体積変化量・相対密度(平均)

Drc (%)	条件	初期拘束力 (kgf/cm ²)	σ_c' (kgf/cm ²)	初期沈下量 (mm)	計算による体積変化量 (cm ³)	実測による体積変化量 (cm ³)	初期 Drc (%)	計算による Drc (%)	実測による Drc (%)	
70	正圧	0.1	0.5	0.481	2.8		61.4	73.1		
			1.0	0.401	2.4		61.5	73.2		
		0.2	0.5	0.524	3.1		59.3	71.0		
	負圧	0.1	0.5	0.406	2.4		61.8	72.8		
			1.0	0.512	3.0	2.3	63.0	71.8	70.9	
		0.2	0.5	0.425	2.5	2.0	64.7	76.6	75.6	
1.0			0.471	2.8	2.7	61.2	71.6	71.3		
50		正圧	0.1	0.5	0.394	2.3	1.7	68.1	78.4	77.1
				1.0	0.336	2.0		38.6	48.5	
	0.2		0.5	0.385	2.3		35.6	45.7		
	負圧	0.1	0.5	0.480	2.8		33.8	45.4		
			1.0	0.502	2.9		34.8	48.7		
		0.2	0.5	0.364	2.1	3.8	37.3	50.4	52.3	
0.2	1.0	0.256	1.5	3.7	35.3	46.2	52.8			
	0.5	0.477	2.8	3.3	37.3	49.2	50.6			
		1.0	0.464	2.7	3.9	34.5	48.6	51.7		

4. 2 相対密度変化

次に相対密度の変化を考える。豊浦標準砂の最大・最小密度³⁾は $\rho_{max}=1.645 \text{ g/cm}^3$ 、 $\rho_{min}=1.335 \text{ g/cm}^3$ であり、 $\rho_s=2.64 \text{ g/cm}^3$ とすると最大・最小間隙比は $e_{max}=0.977$ 、 $e_{min}=0.605$ となる。表-1より相対密度も負圧時の計算値と実測値の関係は4.1と同じくDrc50%はすべて実測値が計算値より大きい傾向にある。

4. 3 繰返し三軸試験結果

試験方法は(社)地盤工学会の「JSFT 541-1990 土の繰返し非排水三軸試験」¹⁾によった。液状化強度は密度との関係が強い。よって今回行った試験の値をそのまま使用するのではなく目標のDrcから逸脱したものは補正する必要がある。図-3は実験結果の一部を $\sigma_d/2\sigma_c'$ (DA1%が生じるまでの平均)をパラメータとして、DA5%が生じる N_c の対数とDrcの関係を示したものである²⁾。図-3から同一の $\sigma_d/2\sigma_c'$ の値に対してほぼ一義的なDrc $\sim N_c$ 関係があることが分かる。これに従いすべてのDA5%が生ずるまでの载荷回数を補正する。図-4は補正前後のデータで、このようにDrcにより载荷回数 N_c が変わる。補正後の試験結果を図-5(a)~(h)に示す。

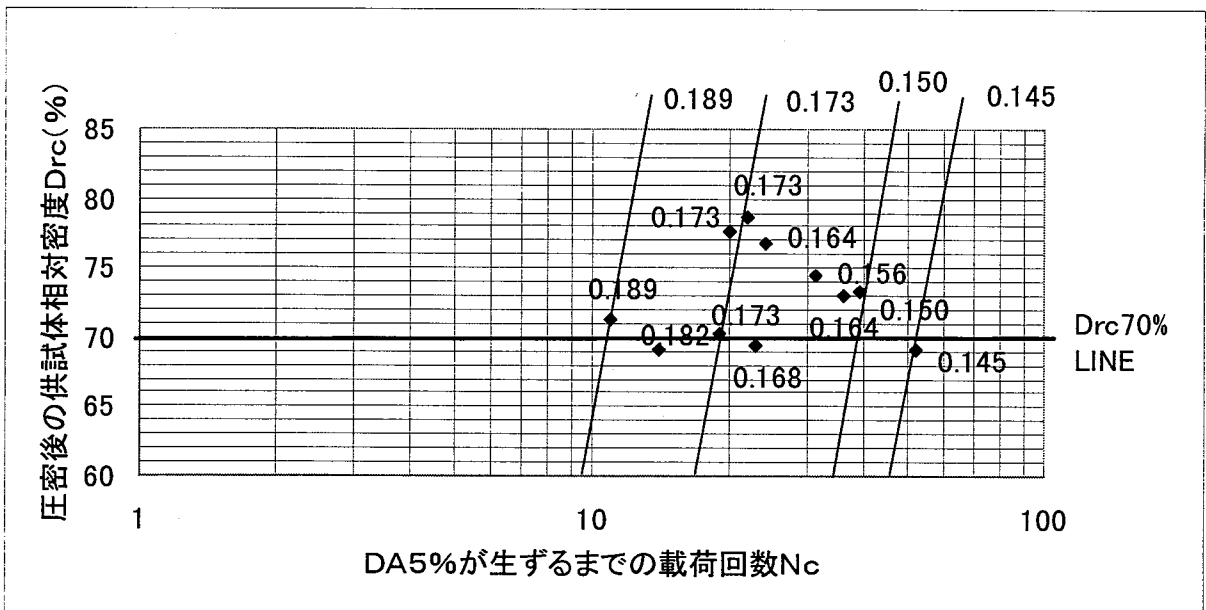


図-3 同一の $\sigma_d/2\sigma_c'$ に対するDA5%を生じた载荷回数 N_c と圧密後供試体相対密度Drcの関係

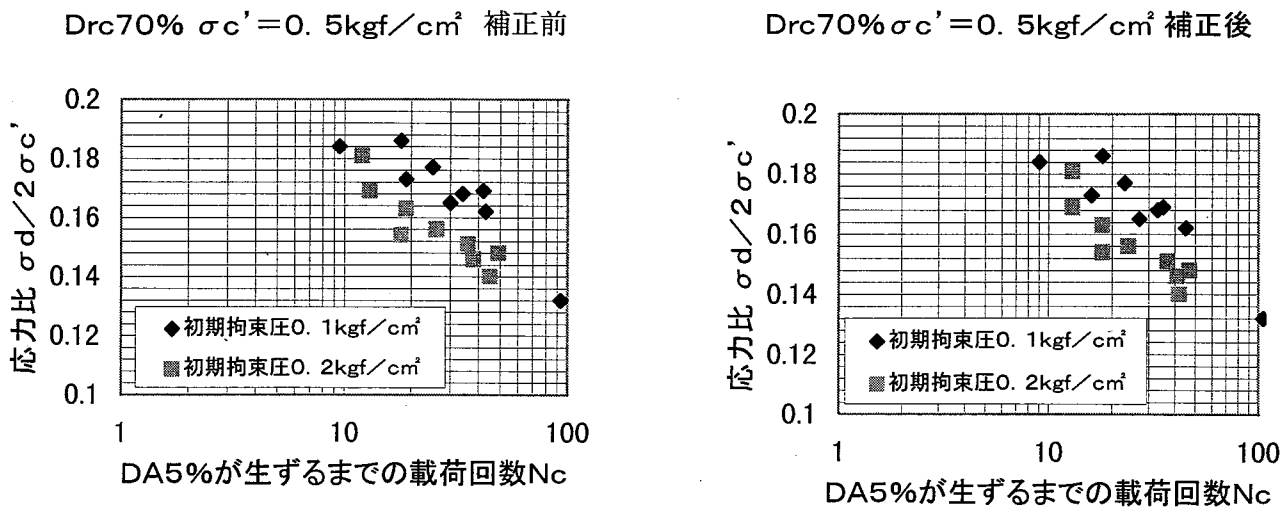
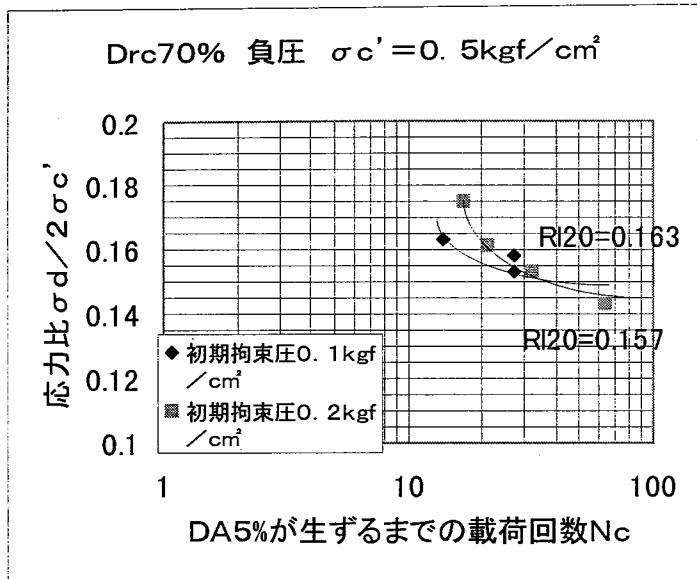
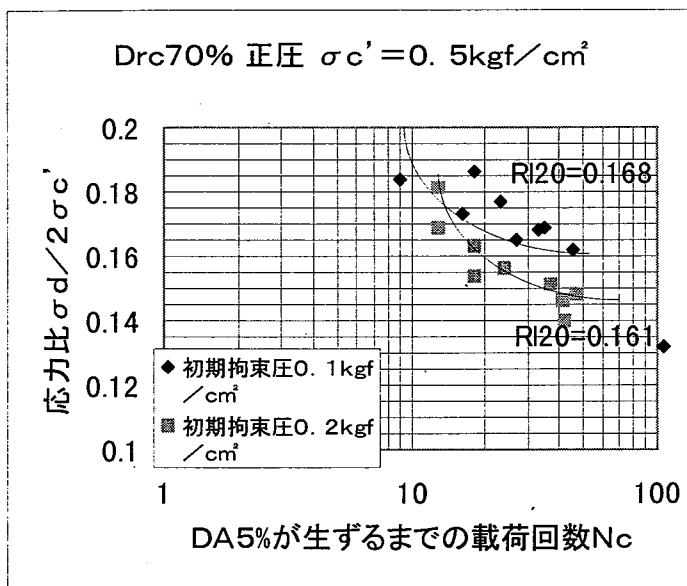


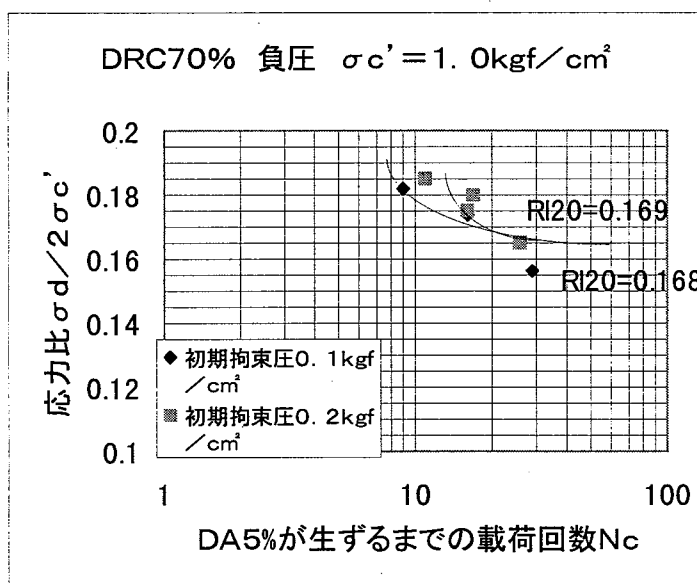
図-4 補正前後のDA5%载荷回数と応力比関係図



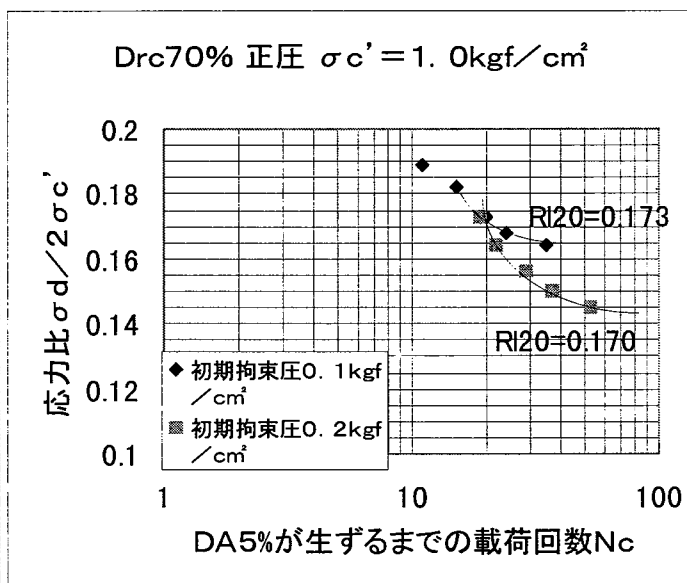
(a)



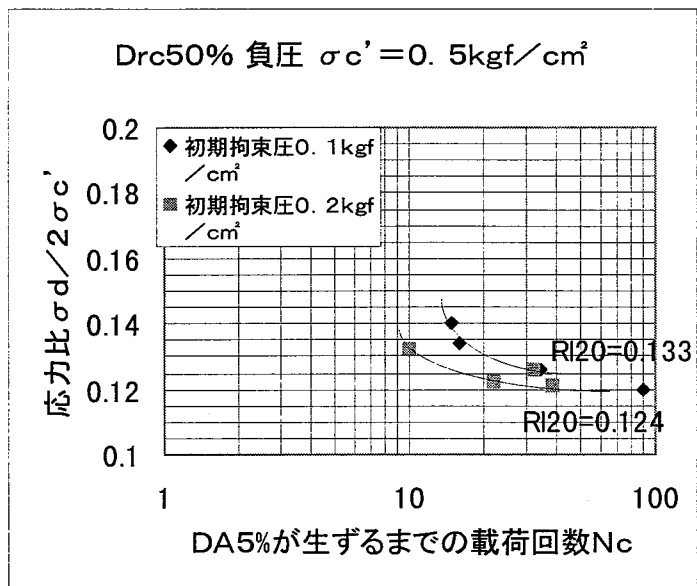
(b)



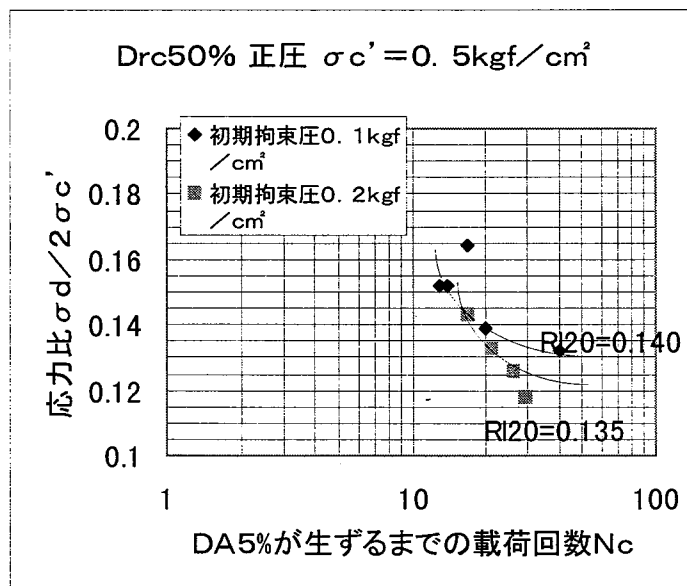
(c)



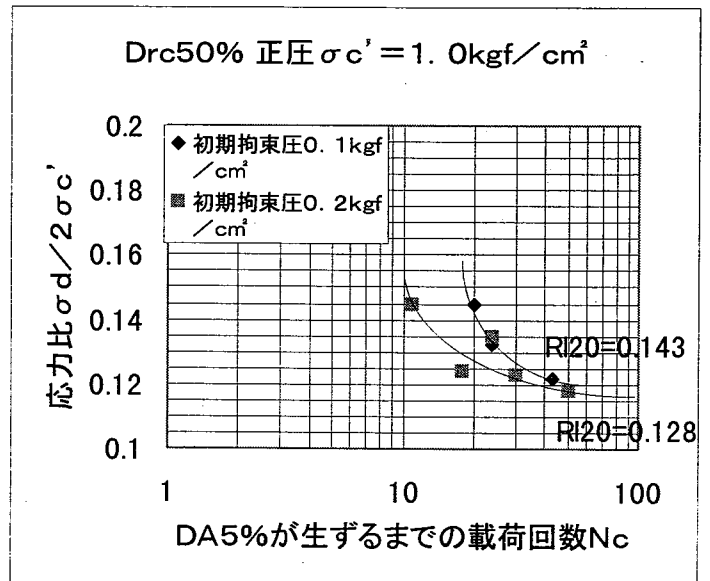
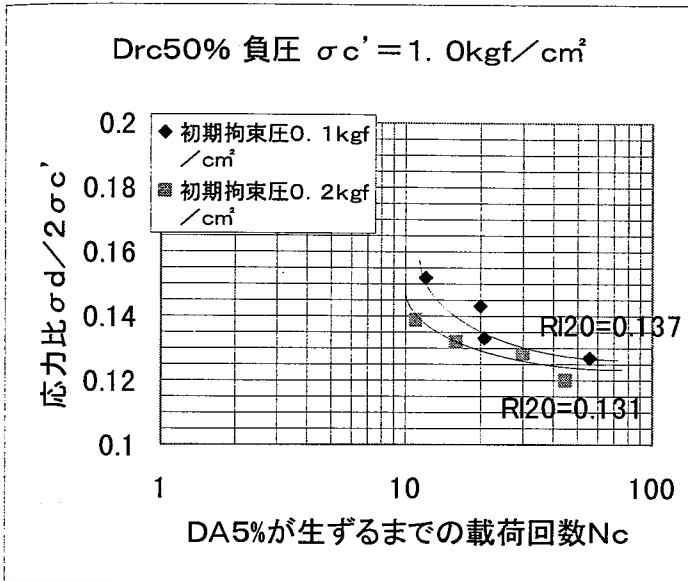
(d)



(e) 図-5 補正後の各繰返し三軸試験結果



(f)



(g) 図-5 補正後の各繰返し三軸試験結果 (つづき) (h)

図-5 から各液状化応力比 R_{120} を読み取ったものが表-2である。これはDA5%が生ずるまでの荷回数 N_c と応力比 $\sigma_d / 2\sigma_c'$ (通常3~4種類の応力比がある) を結んだ曲線と、ある規定の回数 (今回は20回で考える) との交点の読みが液状化応力比 R_{120} である。

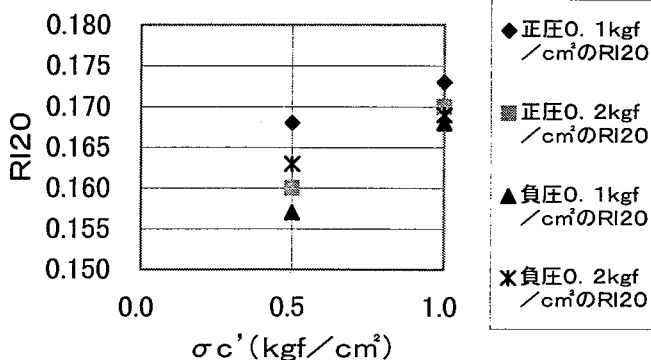
Drc 70% の R_{120} を見ると正圧はいずれも 0.1 kgf/cm^2 の方が大きな値を示す。これは計算により初期体積変化量をやや大きく算出したためである。負圧は 0.2 kgf/cm^2 が若干大きくなる。しかし密な砂では σ_c' が大きくなるにつれ初期拘束圧の違いによる R_{120} の差は小さくなる。

Drc 50% では正、負圧とも 0.1 kgf/cm^2 が大きな R_{120} をとる。また負圧 0.2 kgf/cm^2 が一番小さい値をとるのは供試体の乱れが少なく、かつ初期体積変化量が真値に近い為ではないだろうか。

表-2 液状化応力比 R_{120}

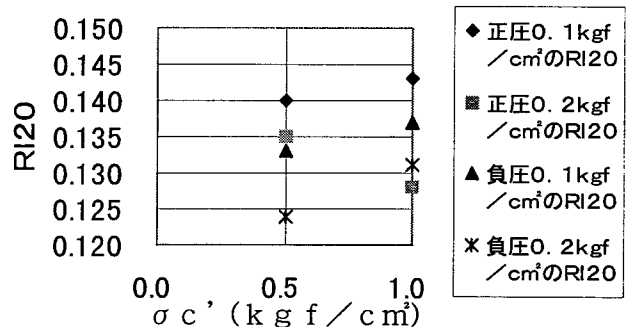
Drc (%)	条 件	初期拘束圧 (kgf/cm^2)	σ_c' (kgf/cm^2)	R_{120}
70	正圧	0.1	0.5	0.168
			1.0	0.173
		0.2	0.5	0.161
	負圧	0.1	0.5	0.157
			1.0	0.168
		0.2	0.5	0.163
50	正圧	0.1	0.5	0.140
			1.0	0.143
		0.2	0.5	0.135
	負圧	0.1	0.5	0.133
			1.0	0.137
		0.2	0.5	0.124
			1.0	0.131

Drc 70% σ_c' と R_{120} 関係図



(a) 図-6 圧密応力 σ_c' と R_{120} 関係図

Drc 50% σ_c' と R_{120} 関係図



(b)

緩い砂の σ_c' による R_{120} の変化（正圧 0.2 kg f/cm^2 を除く）はすべて同じ間隔を保ったままである。しかし図-6 (b)の正圧 0.2 kg f/cm^2 を見ると、 σ_c' が大きくなるのに値が下がっている。これは計算上求めた解凍時の体積変化量が実際の値より小さく計算され、その結果圧密後の体積はやや大きい値となる。そのため圧密後の断面積がやや大きくなり、繰返し偏差応力 σ_d が小さく計算されるからである。次に全体の初期拘束圧の正、負圧間で見ると正圧が大きい傾向にある。これも計算による初期体積変化量の影響と思われる。

図-7は過去に行われた一斉試験^{2) 4)}のデータに今回の試験データをプロットしたものである。

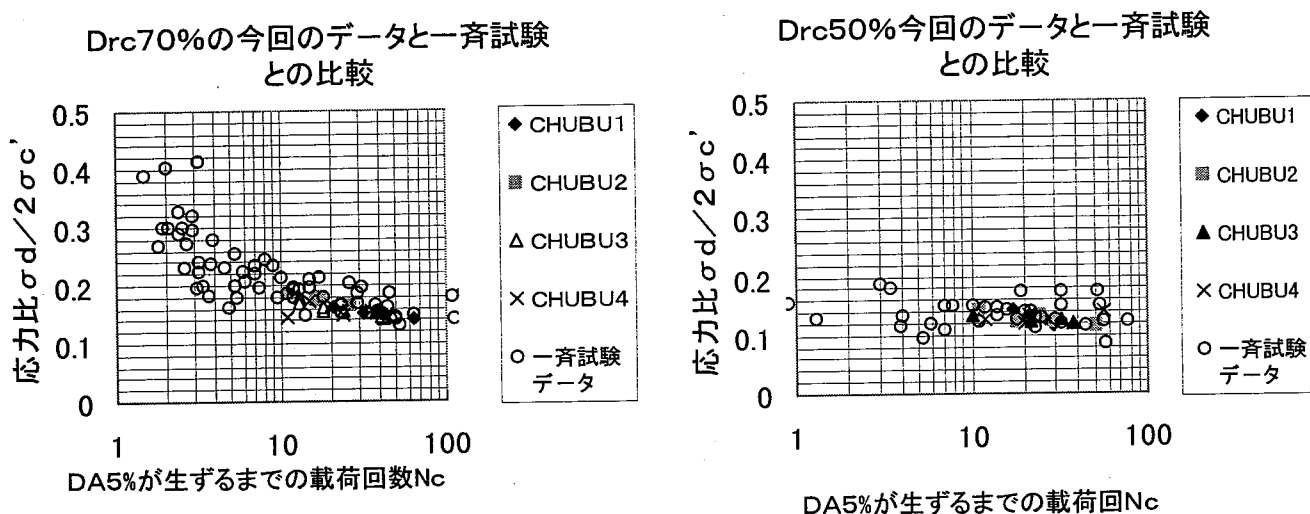


図-7 今回の試験データと一斉試験との比較^{2) 4)}

5. まとめ

解凍方法による違いを確かめるべく今回の実験を行った。これにより以下のことがわかった。

1. 相対密度の小さな砂は解凍時垂直変化量から求める計算法では体積変化量を実測値よりも小さくみることになる。したがって相対密度が小さな場合は負圧法で解凍することが望ましい。
2. 解凍時の初期拘束圧の違いの影響を知るため、 0.1 kg f/cm^2 と 0.2 kg f/cm^2 の場合を実験してみたが、その2種の拘束圧の間では、液状化強度への影響は見られなかった。したがって試験準備時の供試体を乱さないための安全性を考慮すれば、 0.2 kg f/cm^2 程度の初期拘束圧を用いるのがよいと判断できた。
3. π テープによる測定は、相対密度の小さなものに対しても適用できることを確認したが、供試体に直接接触する作業を行うため、供試体を乱さないための慎重な作業が必要である。

謝辞

本報告をまとめるに際し、種々の助言をいただきました当協同組合技術顧問の植下 協名古屋大学名誉教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) (社)地盤工学会：土の繰返し非排水三軸試験、土質試験の方法と解説、pp424~446,1990.
- 2) 砂地盤の工学的性質の評価法に関する研究委員会：飽和豊浦砂の繰返し非排水三軸試験における変形特性に及ぼす諸要因に関する共同研究報告、砂質土および砂地盤の変形・破壊強度の評価に関するシンポジウム論文集、pp7~22,1984.
- 3) (社)地盤工学会：砂の最大密度・最小密度試験、土質試験の方法と解説、pp106~114,1990.
- 4) 飽和砂の非排水繰返し三軸試験方法に関する研究委員会：飽和豊浦砂の共通使用に基づく全国一斉非排水繰返し三軸試験結果について、土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム論文集、pp1~35,1988.