

孔内載荷試験の新しい試験法 (2005/01/07 改訂)

1. 孔内載荷試験とは

日本国内ではLLT、プレシオメータ、KKT等が一般的に使用されている。

- ・ LLT (応用地質、他多くのコンサルタント)
- ・ プレシオメータ (基礎地盤コンサルタント)
- ・ KKT (川崎地質)
- ・ Goodman Jack (アメリカ、KKTの原型)

土木学会の「孔内載荷試験法の現状と課題」では次のように分類されている。

LLT、エラストメータ、プレシオメータ……等圧分布載荷方式

KKT……等変位載荷方式

しかし、国際的な【プレッシャーメータ】の定義は以下のとおりである。

ボーリング孔内において薄いメンブレンを介し、孔壁に荷重を加えその変位を測定する装置。

したがって、剛体載荷を行う Goodman Jack のような装置はプレッシャーメータとは呼ばない。プレッシャーメータに関する国際会議においても Goodman Jack は議論の対象にはなっていない。

但し、誤解がないようにしてほしいが、これはLLTとKKTの優劣の問題ではない。両者は全く異なる試験であるが、同じ用途に使用しているということであり、どちらが優れているかという問題ではない。

KKT、Goodman Jack は剛体載荷板で文字どおり載荷試験を行い、Eを求める試験である。これに対し、LLT、エラストメータ等は半径方向に圧縮力が作用し、接線方向には同じ大きさの引張応力が作用している。したがって、これらの試験における載荷は、圧縮させているのではなく、せん断させているのであり、得られる結果もG、c、 ϕ である。EはGよりポアソン比を介して換算することになる。

LLT、エラストメータ、プレシオメータ……せん断試験(G、c、 ϕ を求める試験)
KKT、Goodman Jack……載荷試験(Eを求める試験)

2. プレッシャーメータに関する最近の動向

1990年頃からプレッシャーメータの *New Trend* が始まった。その要点は以下のとおりである。

- ・地盤を完全弾塑性体と仮定し、無限に長い円筒形の空洞を押し上げた場合の荷重強度～空洞ひずみ曲線の勾配は、 $2G$ になる。
- ・初期勾配から求めた G_i は、孔壁の乱れの影響を強く受けており、実際の地盤の G よりも小さくなる。
- ・徐荷～再載荷ループは全てのプレッシャーメータ試験において実施するべきである。初期勾配から求めた G_i は孔壁の乱れに敏感であるのに対し、繰り返し載荷により求めた G_{ur} は孔壁の乱れに影響されにくい。

第3回プレッシャーメータ国際会議(1990,Oxford)において Mair は以下のように述べている。

- ・ G_i は孔壁の乱れに著しく影響された値であり、その値を地盤の変形係数として直接使用するべきではなく、特に過圧密地盤においてその問題が大きい。
- ・ G_{ur} の測定値はプレッシャーメータ試験において極めて重要であり、除荷～再載荷ループの測定を標準的な試験法として実施すべきである。

この問題に関しては、Marsland 他(1977)、Windle 他(1977)、Wroth(1982)、Jamolkowski 他(1985)、Robertson 他(1986)、Mair 他(1987)、Powell(1990)等、多数の報告がなされており、ほぼ同様の指摘をしている。

原位置の G をより適切に求めるためには、除荷～再載荷のサイクリック測定を行い、そこで得たヒステリシスループの両端を結ぶ直線勾配($2G_{ur}$)を地盤の G として評価する方法が国際的には標準となりつつある。

また、 G_{ur} が除荷～再載荷ループのひずみの大きさに依存することが Wroth(1977)、Hughes 他(1977)により報告され、更に Jamolkowski 他(1985)、Belloti 他(1989)はひずみ依存性の他に砂地盤においては応力レベル依存性があることを指摘している。

3. プレッシュャーメータ試験の载荷パターン

プレッシュャーメータ試験の大きな目的は以下のようになるが、このような目的に対応して、载荷パターンも従来のような方法とは異なってくる。

- ①弾性係数のひずみ依存特性を求める。
- ②せん断強さを求める。

弾性係数のひずみ依存性を求めるためには、ひずみの大きさを変化させた繰り返し载荷が必要となる。また、せん断強さを求めるためには、降伏後の応力～ひずみ曲線をできるだけ長く得る必要がある。そして、ひずみ依存性とせん断強さの両方を同時に求めようとすれば、繰り返し载荷をしつつ、降伏後の応力～ひずみ曲線も長く得なければならない。このように、目的に応じて载荷パターンは異なってくる。

プレッシュャーメータ試験の新しい载荷パターンを模式的に示すと図-1のようになる。また、実施例を図-2に、解析例を図-3に示す。

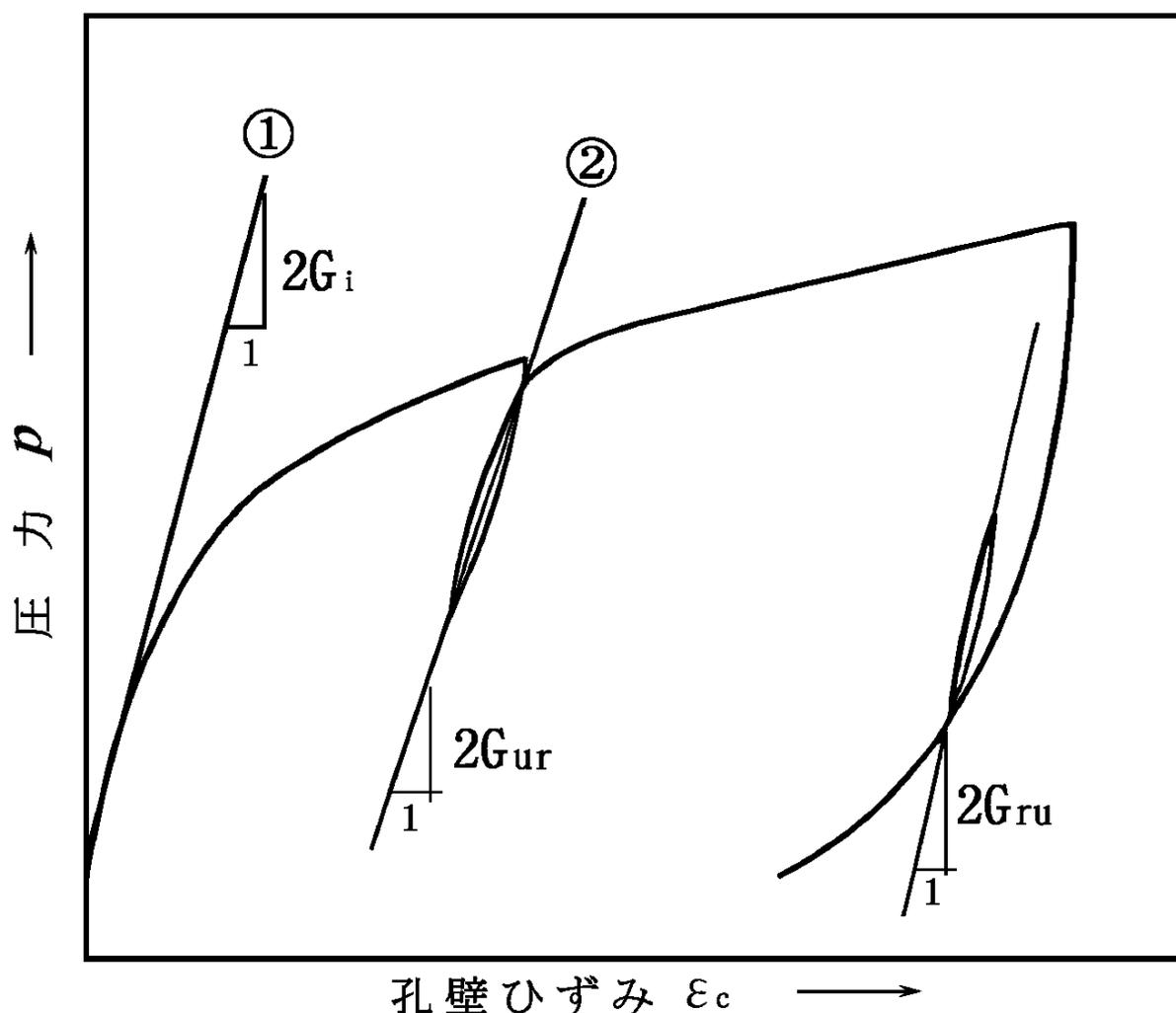


図-1 プレッシュャーメータ試験の標準的な载荷パターン

No.	深度: m		位置:					
地質:					岩級区分:			
静止土圧 (P ₀): 1.92 MN/m ²					使用機器: エラストメーター2			
降伏圧 (P _y): 1.65 MN/m ²					降伏点圧 (P _y ') : 3.57 MN/m ²			
繰返回数	半径 (cm)		荷重強度 (MN/m ²)		地盤係数 K (MN/m ³)	せん断弾性係数 G (MN/m ²)	弾性係数 E (MN/m ²)	せん断ひずみ γ
	R ₁	R ₂	P ₁	P ₂				
0	3.8860	3.8938	1.92	3.57	213	414	1,076	1.99E-03
1	3.9263	3.9372	3.73	6.43	247	480	1,248	2.80E-03
2	3.9515	3.9686	4.05	7.44	198	384	998	4.40E-03
3	3.9819	4.0047	4.32	8.27	173	336	873	5.87E-03
4	4.0068	4.0520	3.73	9.07	117	229	595	1.16E-02
粘着力 (c') : 0.44 MN/m ²								
(MN/m ²) 内部摩擦角 (φ') : 32.61 °								

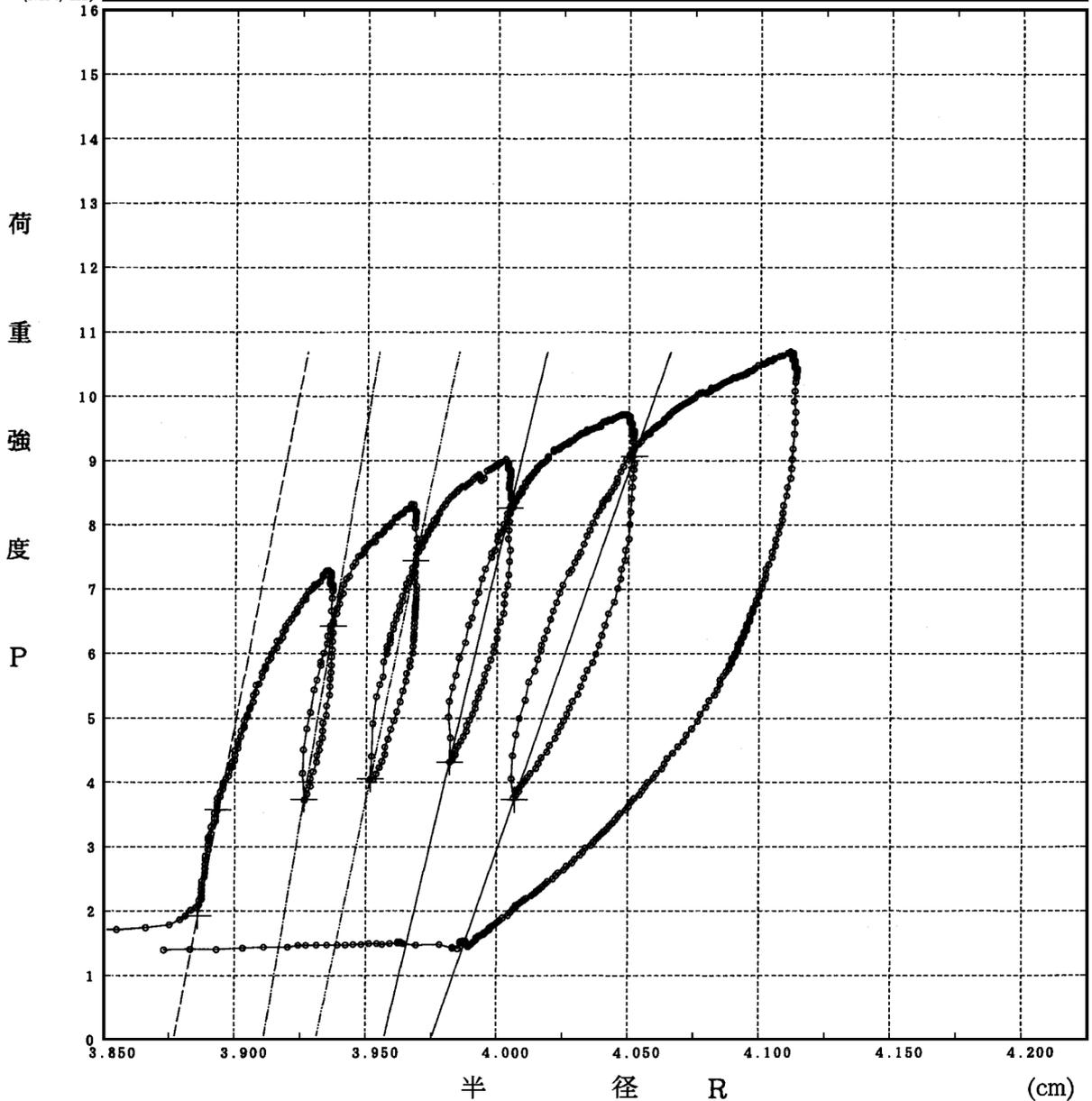


図-2 プレッシャーメータ試験の測定例

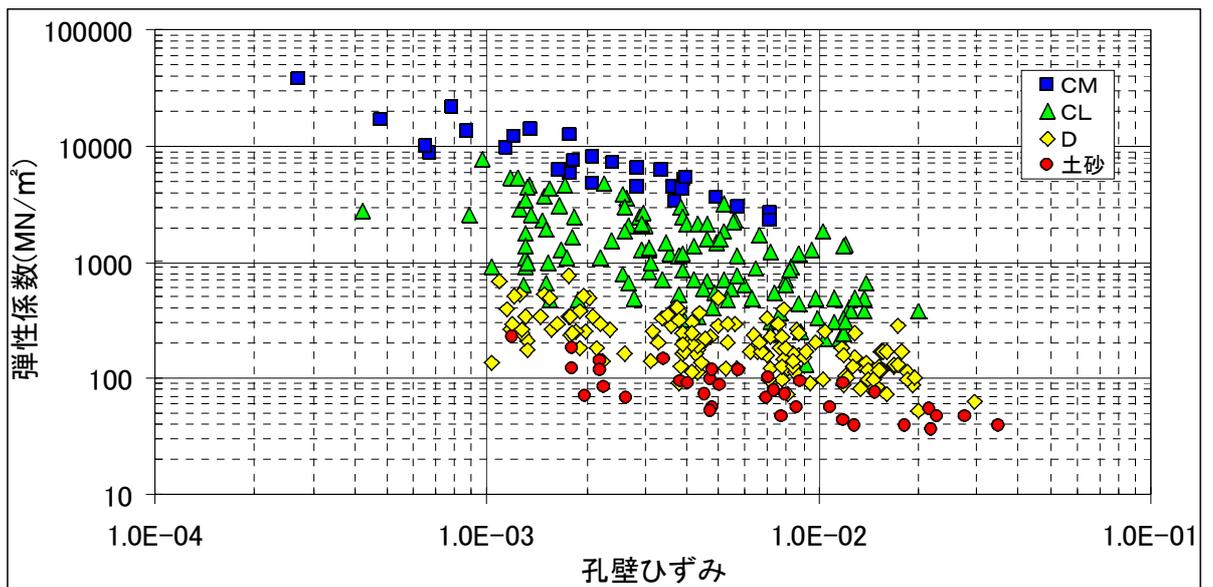
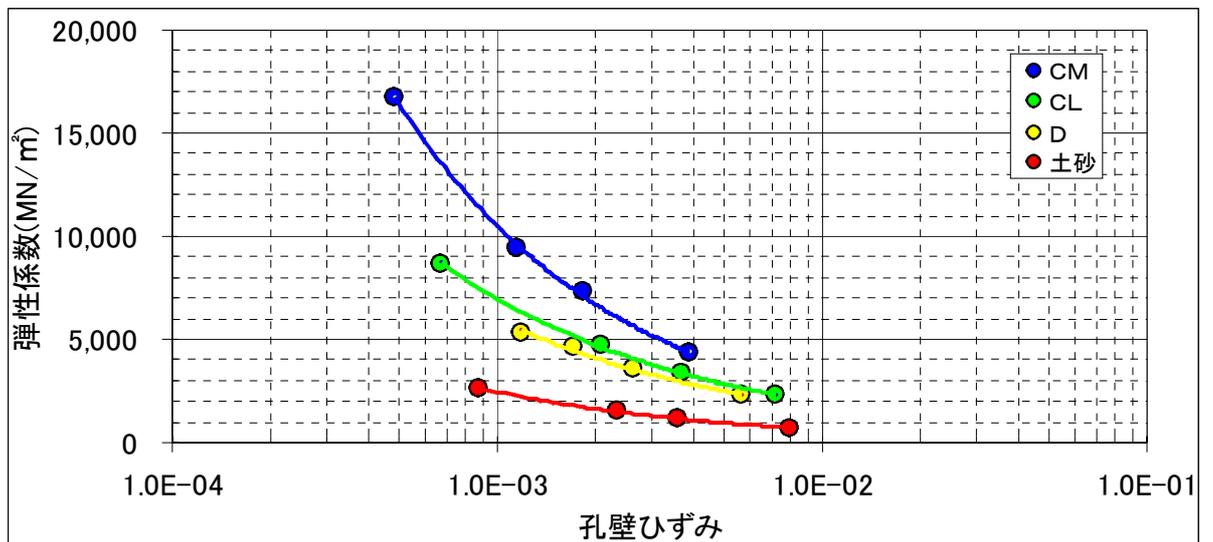
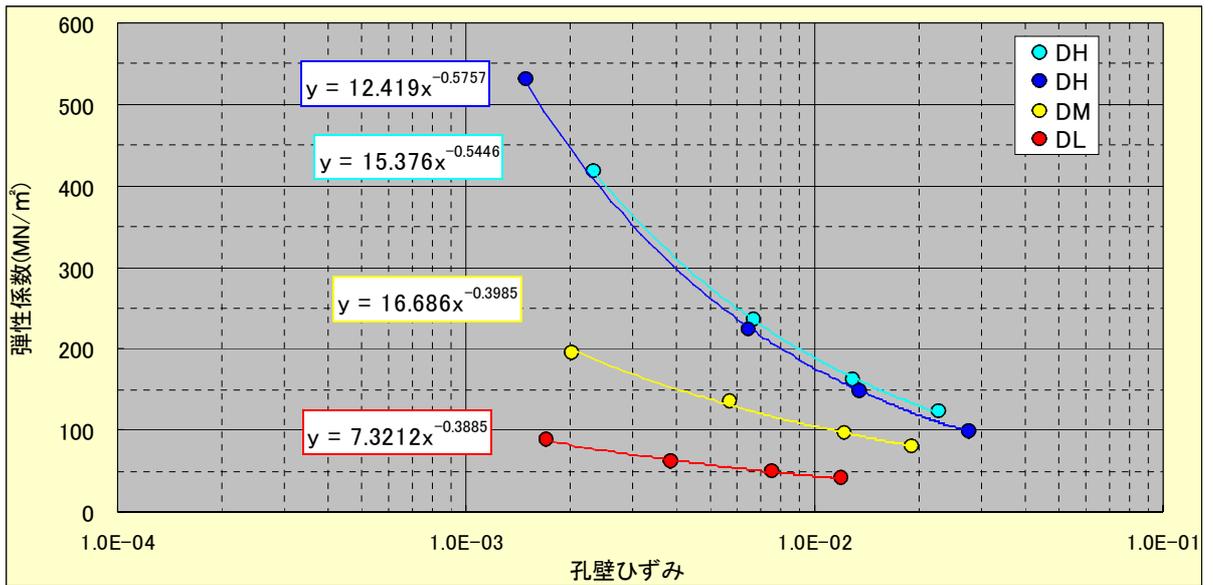


図-3 プレッシャーメータ試験による弾性係数のひずみ依存性解析例

ひずみ依存性とせん断強さを同時に求める場合の載荷方法

最初は単純載荷とし、降伏点を確認するまで連続的に載荷する。
降伏点確認前に繰り返し載荷を行うと降伏点強度が読みとれないことがある。

これは c, ϕ を精度よく求めるために必要なことである。

P_o, P_y が正確に得られないと c, ϕ を正しく算出することができない。降伏前に繰り返し載荷を行うと P_y の決定が困難となることが多い。

したがって、 c, ϕ の解析を行う場合は、降伏前に繰り返しを実施してはならない。但し、ひずみ依存性の把握のみが目的である場合には、むしろ降伏前に繰り返しを行った方がよい。

降伏後、ひずみレベルを変化させながら繰り返し載荷を行う。

繰り返し載荷は従来のように応力レベルで制御するのではなく、ひずみレベルにより制御する。注意すべきことは、繰り返し幅は小さいひずみから始め、次第に大きくしていくことである。最初に大きいひずみの繰り返しを行うと「ひずみ硬化」の影響により正しいひずみ依存特性を求めることができない。ひずみレベルは、理想的には 10^{-4} 、 10^{-3} 、 10^{-2} 、 10^{-1} の4段階程度とすることが望ましいが、現場でこのような対応をすることは難しい。そこで、現場的には表-1のような繰り返し幅を目安として設定しておけばよい。

GeoLoggerの液晶表示盤に表示される半径の値を見ながら、表-1の値だけ半径を減ずるようにポンプの圧力を調整する。但し、繰り返しループはあくまでも線形弾性とみなせる範囲で行う必要がある。繰り返し幅が大きくなると非線形になってしまう場合もあるので、常に応力～変位曲線をモニターしながら表-1の数値にとらわれることなく現場で即時に判断して繰り返し幅を変更する必要がある。この点は熟練を要する。

表-1 繰り返し載荷幅の目安

		土 砂	D級岩盤	CL級岩盤	CM級以上
繰 返 し 幅	1回目	5	5	5	3
	2回目	15	15	10	7
	3回目	30	25	15	10
	4回目	50	35	20	—

(単位: 1/100mm)

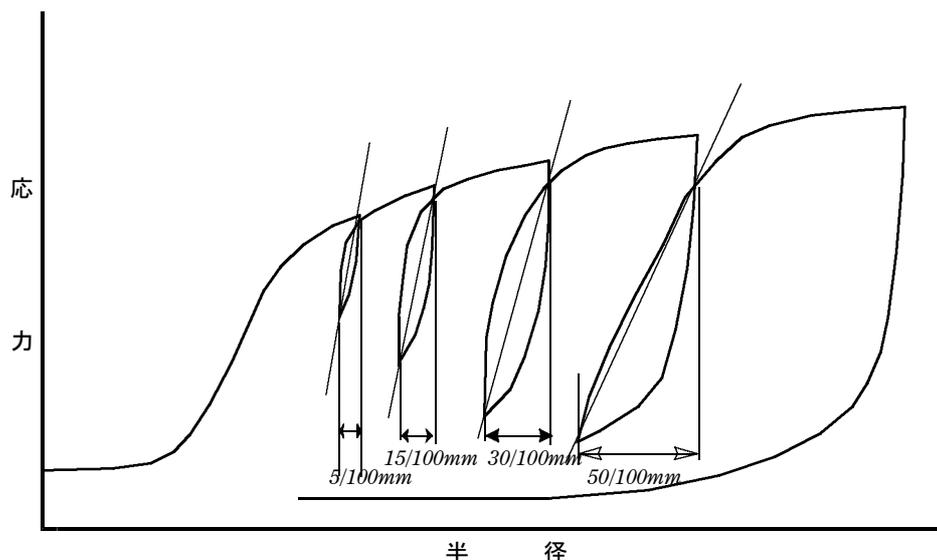


図-4 繰り返し载荷パターン模式図

繰り返しループが線形弾性とみなせるかどうかは、図-5に示すように除荷から再载荷に移るときの曲線パターンで判断すればよい。図-5の(a)のように繰り返しループが対称に近いようであれば線形弾性とみなしてもよい。しかし、図-5の(b)のように繰り返しループが非対称であり、再载荷時の上昇曲線が下に凸の曲線になるようでは線形弾性とはみなせなくなる。

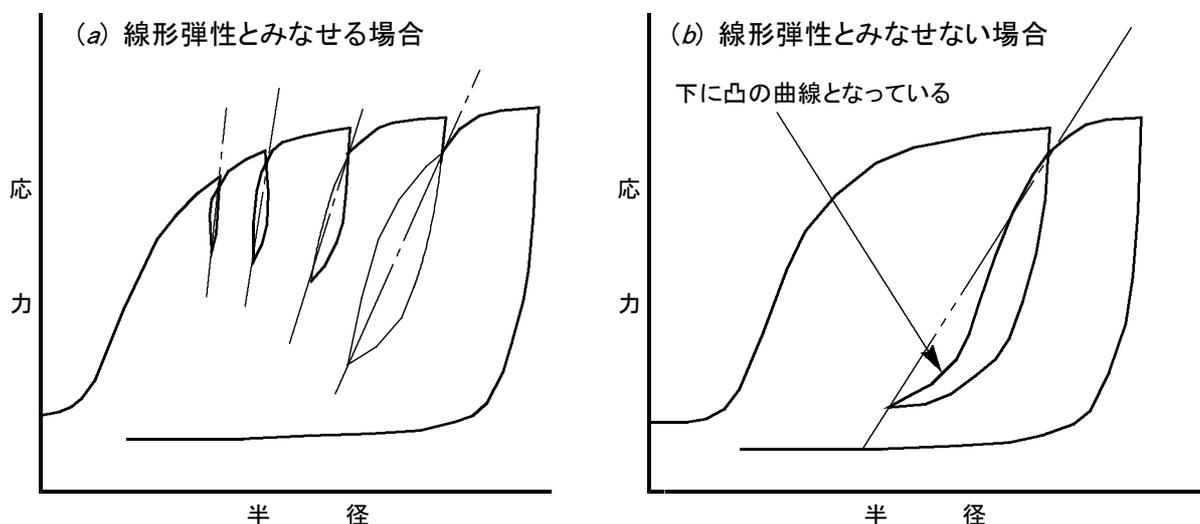


図-5 繰り返しループの線形評価

繰り返しの実施タイミングは測定作業の中で最も判断が難しい事項である。c, ϕ の解析を兼ねる場合には特に重要であり、繰り返しの実施タイミングが不適切であると解析が困難になってしまう。これについては次節のc, ϕ の解析の項で詳しく述べる。

c、 ϕ は降伏後の荷重強度～空洞ひずみ曲線より求めるので、降伏後、できるだけ長く測定を行う。

従来の荷重パターンでは、降伏点を確認した段階で試験を終了していたが、c、 ϕ の解析を行うためには降伏点確認後の曲線が必要となる。

ここで一番問題となるのが繰り返し荷重との関係である。c、 ϕ の解析を行うためには、繰り返しループの影響が完全に無い状態での応力～変位曲線が必要となる。そのため、c、 ϕ の解析においてはかえって繰り返しループが邪魔になる。

繰り返しループが終了しても元の応力～変位曲線に完全に戻るまでには、しばらく荷重を必要とするので、完全に元に戻った段階から更に荷重を続け繰り返しループの影響が無い状態の曲線をしばらく得た上で、次の繰り返しループに入らなければならない。

これまでの失敗例を見ると、元の応力～変位曲線に戻って直ぐに次の繰り返しループに入ってしまう、c、 ϕ の解析に必要な降伏点確認後の曲線が長く得られていないことが多い。繰り返しループの間隔が狭すぎるとc、 ϕ の解析は困難となることに十分留意する必要がある。

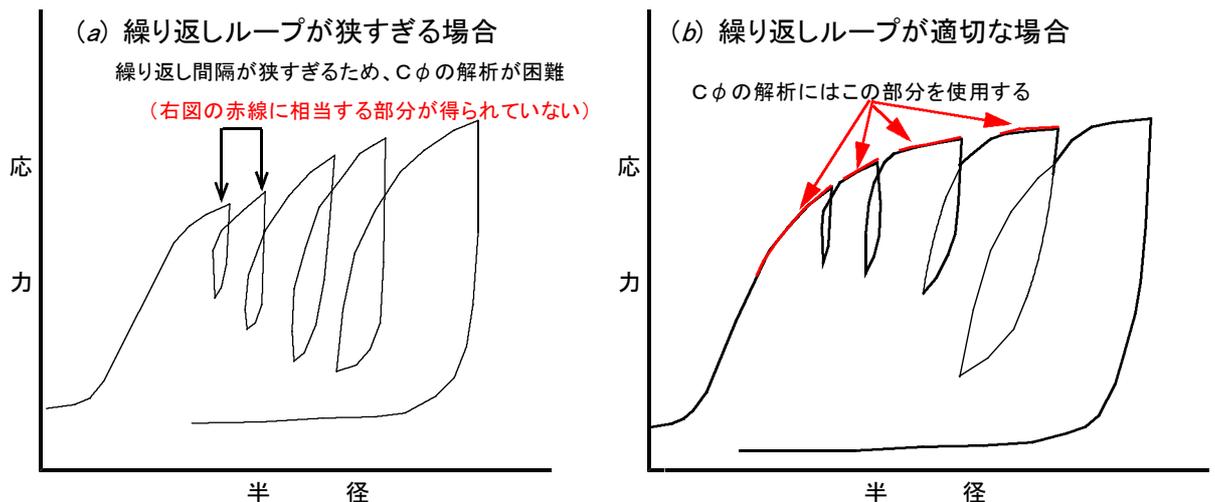


図-6 繰り返し荷重とc、 ϕ 解析を行う場合の注意点

GeoLoggerのサンプリングは2秒毎とする。

従来の荷重では、一般的には0.1MPa毎にデータのサンプリングを行うことが多かった。しかし、c、 ϕ の解析を行うためには未知数が5つある連立方程式を解く必要があり、できるだけデータ数が多い方が解が安定する。そこで、データ数を多くするため、GeoLoggerのサンプリング間隔は2秒毎とする。これまでの経験では、1回の試験におけるデータ数は、おおよそ300～1000データ程度となる。

ここでの失敗例としては、荷重速度が速すぎて、かえってデータ数が大幅に減少してしまったという事例がある。0.2MPa/秒近い速度で急速荷重したために2秒毎のサンプリングでは0.4～0.5MPa間隔でしかデータが得られておらず、 P_o, P_y の決定も困難で、当然c、 ϕ の解析も不可能であった。

このような事が無いよう、荷重速度は0.5～1.0MPa/分程度とすることが望ましい。

4. c、φの解析

軟岩は、c、φ両方の特性を有し、ダイラタンシー的性質を持つ材料としてモデル化する必要がある。そして、地盤がモール・クーロンの破壊基準に準じ、非結合的流れ則に従って体積膨張をするものと仮定すれば、プレッシャーメータ試験の荷重強度～空洞ひずみ曲線は理論的に次式で説明できる。

$P_o \leq P \leq P_f$ の時

$$\frac{u_{r_o}}{r_o} = \frac{P - P_o}{2G}$$

$P \geq P_f$ の時

$$\frac{u_{r_o}}{r_o} = -\frac{1}{2G} \left(b_1 \left(\frac{r_f}{r_o} \right)^{\frac{(m-1)}{m}} + b_2 \left(\frac{r_f}{r_o} \right)^{\frac{(n+1)}{n}} + b_3 \right)$$

$$b_1 = -\frac{2m}{m-1} \left[(1 - \nu') \left(\frac{1+m}{m+n} \right) - \nu' \right] (P_f - P_o)$$

$$b_2 = 2n(1 - \nu') \left(\frac{m+1}{m+n} \right) (P_f - P_o)$$

$$b_3 = (1 - 2\nu') \left(\frac{m+1}{m-1} \right) (P_f - P_o)$$

$$\frac{r_f}{r_o} = \left(\frac{P(m-1) + \sigma^*}{P_f(m-1) + \sigma^*} \right)^{\frac{m}{m-1}}$$

$$\sigma^* = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'}$$

$$m = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad n = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'}$$

$$\sin \phi' = \frac{\sin \phi' - \sin \phi_r}{1 - \sin \phi' \cdot \sin \phi_r}$$

ここで、

P : 応力 (MN/m²)

P_o : 初期応力 (MN/m²)

P_f : 降伏応力 (MN/m²) (= $c' \cos \phi' + P_o' (\sin \phi' + 1)$)

G : せん断弾性係数 (MN/m²)

u_{r_o} : 半径方向変位量 (m)

r_o : ボーリング孔の初期半径 (m)

r_f : 降伏時半径 (m)

c' : 粘着力 (MN/m²)

ϕ' : 内部摩擦角 (°)

ϕ_r : 残留摩擦角 (°)

ϕ' : ダイラタンシー角 (°)

実測された応力・変位曲線を以上の式で近似させ、ニュートン法によるパラメータ最適化計算を行うことにより地盤のせん断強度(c、φ)を求めることができる。

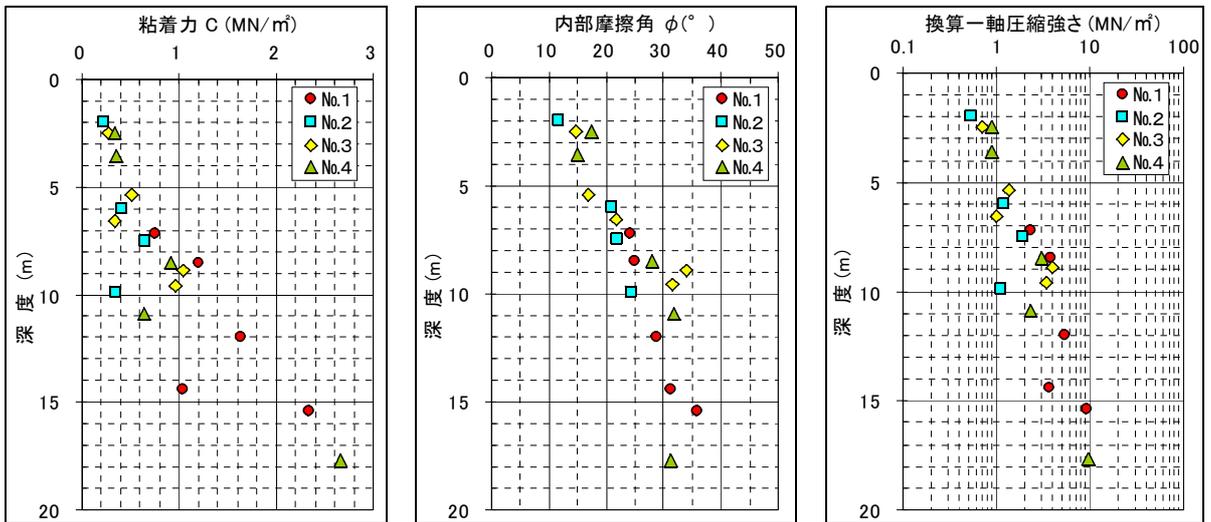
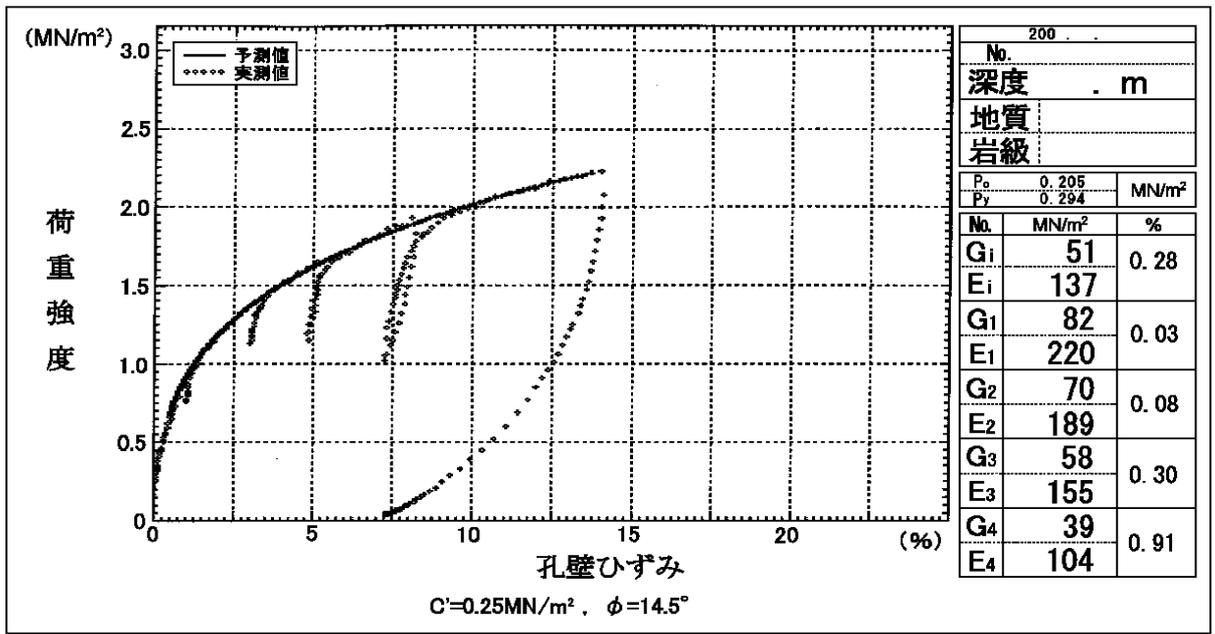


図-7 プレッチャーメータ試験による c 、 ϕ の解析例

参考文献

C.M.Haberfield and I.W.Johnston (1990)
The interpretation of pressuremeter tests in weak rock — the theoretical analysis —
Proceedings of the Third International Symposium on Pressuremeters, pp169-178

以上の解析は、従来一般的な試験方法では十分に対応できません。
 計画段階、あるいは試験実施前にご相談下さい。

◎問い合わせ先

Q Tech
 〒631-0801 奈良市左京2-3-1-5-504
 TEL 0742-72-1204, FAX 0742-72-1207
<http://homepage2.nifty.com/q-tech/>

阿部 求