

くり返し応力を受けた土の硬化現象について

東北大学 正員 ○小 川 正 二

范 世 亮

まえがき

土の変形は土粒子相互の位置の変化や土粒子の配列状態の変化によって生じる塑性変形とミセルの弾性変形や土粒子構造の弾性変形によって生じる弾性変形からなる。土の硬化現象の大部分はこのような変形を受けることによって生じるものであり、永久変形を伴う硬化現象と永久変形を伴わない硬化現象の二つの場合が考えられる。このような土の硬化現象に影響をおよぼす土の構造の変化や土粒子間力の変化なども定量的に測定することは非常に難しいことなので、一般には、土の硬化効果を土の変形に基づいて現象的に表わす場合が多い¹⁾。

土の硬化効果はその土に働く外力の大きさ、その載荷方法あるいは土供試体の性質によって異なる。河上・小川^{2),3)}は締め固めた不飽和粘土にくり返して応力を載荷して、土の強度と変形との関係について研究を行い、「土がくり返し応力を受けると、載荷回数の少ないときには、土粒子の移動が容易に生じるために、大きな塑性変位を生じる。同時に、変形を伴う硬化現象がみられ、塑性変位の増加の割合が急激に減少する。また、載荷回数が増すと、永久変形を伴わないシキソトロピー性の硬化現象が生じて土の強度特性が変化する。さらに、これらの硬化現象は供試体の性質、くり返し応力の大きさ、あるいはその載荷回数によって異なる」ことを明らかにした。

本報告は締め固めた不飽和供試体に載荷されるくり返し応力の大きさと任意の載荷回数で増大することによって、以前に受けた土の硬化効果がその後の土の塑性変位(残留ひずみ)、弾性変位(弾性ひずみ)あるいは降伏応力に与える影響について述べたものである。

試験方法

試験にくり返し応力載荷試験機、一軸圧縮試験機を用いた³⁾。供試体はシルト質粘土ローンを標準締め固めの最適含水比の状態に締め固めたもので、直径5 cm、高さ12.5 cmの内筒形であり、その飽和度(S)は92%である。試験に用いた土の性質は次のとおりである。

比 重	L:L	P:L	最適含水比	湿式の乾燥密度	三角座標による分類	粒 径
2.72	64%	32%	32.5%	1.39 g/cm ³	シルト質粘土ローン	1.2 mm以下

試験に際しては、はじめにある大きさの応力を $N=10^2, 10^3, 10^4$ 回まで載荷し、その後に応力を増大して $N=10^5$ 回までくり返して載荷した。さらに、このようにくり返し応力を受けた供試体を一定の載荷速度($\dot{\sigma}=0.016$ Kg/cm²/sec.)で一軸的に圧縮した。くり返し応力を受ける土の変位は応力を除いたときに残留する残留ひずみと弾性的には回復する弾性ひずみとからなり、実験中には、これらの変位とくり返し応力の載荷回数と対応させて測定した。

残留ひずみと硬化現象との関係

残留ひずみは載荷回数の少いときに著しいが、同時に土には変形を伴う硬化現象が生じ、残留ひずみの増加の割合は載荷回数の増加とともに急激に減少する。また、 $\sigma_r = 0.50, 0.81$

1.06 Kg/cm^2 の応力を $N=10^2, 10^3, 10^4$ 回までくり返して載荷した後、応力を $\sigma_r = 1.43 \text{ Kg/cm}^2$ に増大したときの残留ひずみの変化は図-1のようになる。すなわち、以前に小さくなり返

し応力で硬化した供試体の残留ひずみは以前に大きくなり返し応力で硬化した供試体の残留ひずみより小さく、硬化効果が大いように見えるが、荷重を増大したことによって生じる残留ひずみは大きい。したがって、供

試体が破壊しないかぎり、大きな応力をくり返して載荷した場合に硬化効果の著しいことがわかる。図-2は $\sigma_r = 1.06 \text{ Kg/cm}^2$ の応力を $N=10^2, 10^3, 10^4$ 回載荷した後、応力を $\sigma_r = 1.43 \text{ Kg/cm}^2$ に増大した場合の残留ひずみと載荷回数との関係を示すが、曲線が平坦であるほど以前に載荷した応力による硬化効果の大きいことを示しており、同じ大きさの応力を受ける場合に、その載荷回数の多いほど硬化効果の著しいことがわかる。

弾性ひずみと硬化現象との関係

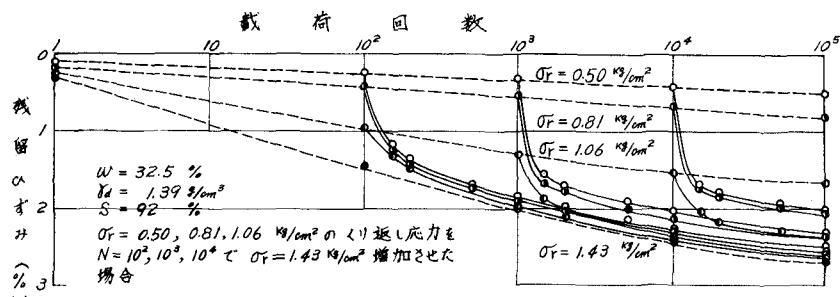


図-1 残留ひずみへの硬化効果の影響

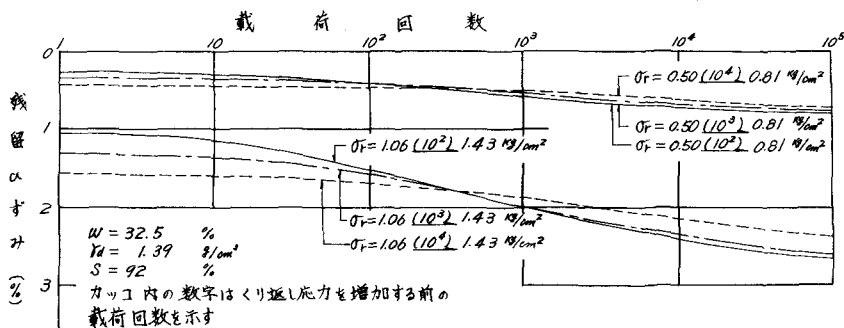


図-2 残留ひずみへの硬化効果の影響

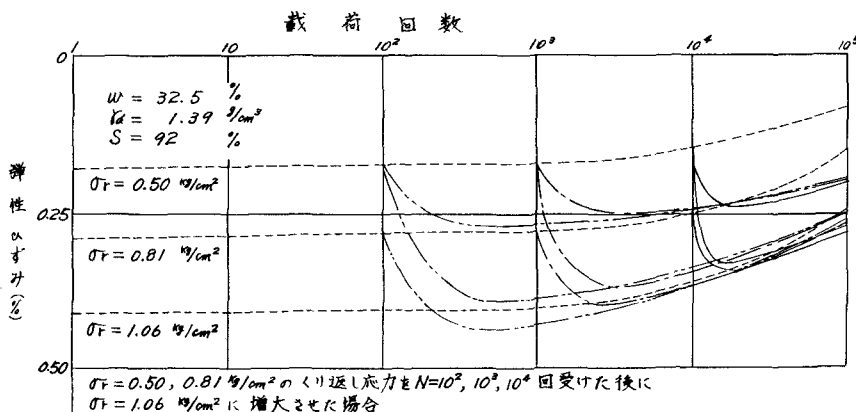


図-3 硬化効果の弾性ひずみへの影響

図-3は $\sigma_r = 0.50, 0.81 \text{ kg/cm}^2$ の応力を $N = 10^2, 10^3, 10^4$ 回繰り返し応力を受けた後に、 $\sigma_r = 1.06 \text{ kg/cm}^2$ に増加したときの弾性ひずみの変化を示す。くり返し応力を増大させたときの弾性ひずみは、はじめからその大きさの応力を受けた弾性ひずみとほとんど一致しているが、これは同図中の実線を示すように、硬化効果による弾性ひずみの変化が少いときに応力を増大させたためであり、以前の硬化効果がその後の弾性ひずみにあまり影響してないことがわかる。しかし、 $N=10^4$ 回以上になると弾性ひずみは硬化効果のために次第に減少する。この硬化効果は強度の増加によるものでなく、弾性ひずみと間歇比の間に一定の関係を見出すことが出来ない(図-4)。

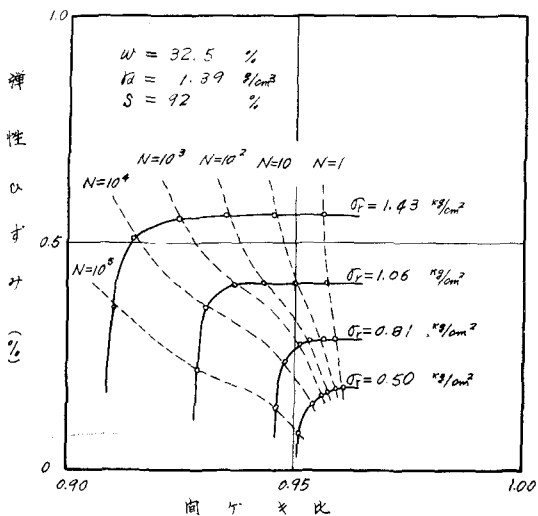


図-4 弾性ひずみと間歇比の関係

降伏応力と硬化現象との関係

くり返し応力を受けた供試体を一定の応力速度で圧縮し、レオロジー模型に基いてその結果を解析すると上の降伏応力を簡単に求めることが出来る。

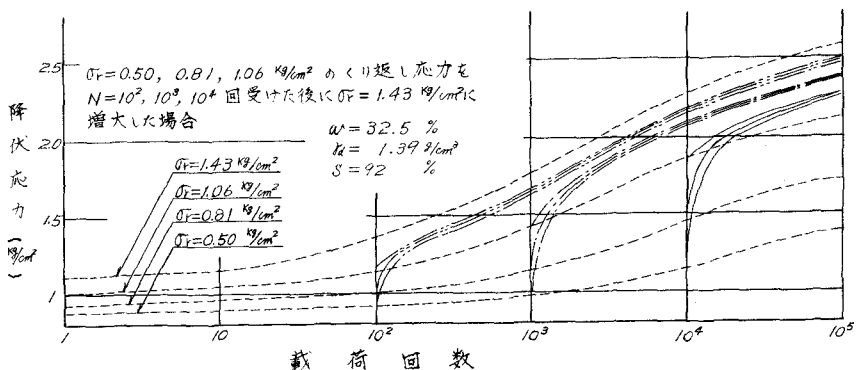


図-5 硬化効果の降伏応力への影響

上の降伏応力はくり返し応力載荷による硬化現象のために増大する。その増加の割合はくり返し応力の大きなほど大きいが、以前にくり返し応力を受けて硬化した供試体にさらに大きな応力を載荷

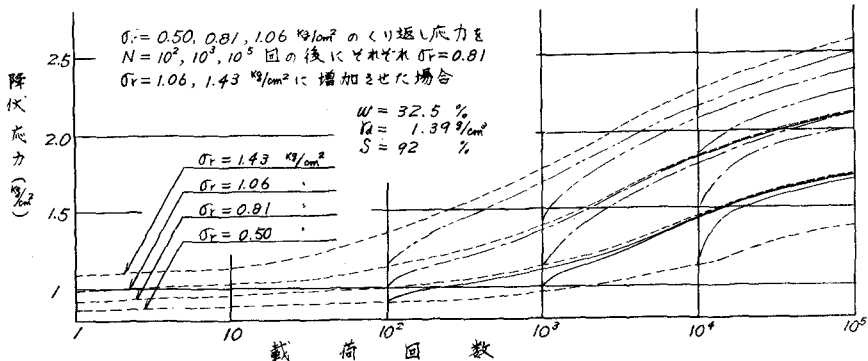


図-6 硬化効果の降伏応力への影響

いても、始めから大きな応力を受けている供試体の降伏応力より小さい(図-5)。これは以前に受けた硬化現象の影響によるためであり、以前にくり返し応力を受けた供試体の降伏応力とくり返し応力を受けない供試体の降伏応力の差は2つのくり返し応力の差が小さいか、以前のくり返し応力による硬化効果が小さいと思われる載荷回数の少ないほど小さくなる(図-6)。

降伏応力の増加はくり返し応力の大きなるほど著しいことから、残留ひずみの大きなるほど大きいように見えるが、図-7に示すように、必ずしも残留ひずみの増加によってのみ生じるものではない。また、弾性ひずみと降伏応力との間にも一定の関係はなく(図-8)、降伏応力の増加はくり返し応力載荷中の変形によって生じる粒子間力の増加による硬化効果によるものと考えられる。

結論

- 1) 土の硬化現象は供試体が破壊しないかぎり大きな応力を数多く受けるほど著しい。
- 2) ある大きさのくり返し応力による変形を減少させるためには、その応力を載荷する以前に、より小さな応力を数多く載荷することによって達成される。
- 3) くり返し応力によって硬化した土はその後に大きなくり返し応力を載荷しても硬化効果の増加は小さい。したがって、このような場合の降伏応力は始めから大きな応力を受けている場合の降伏応力より小さい。

参考文献

- 1) Seed, H.B. and CK Chan "Thixotropic Properties of Compacted Clays" Jour. of Soil Mech. and Found. Div. ASCE. Vol. 83, no. 2
- 2) Kawakami, H. and S. Ogawa "Mechanical Properties of Soil Subjected to Repeated Stress Application" オセシア地試国際土質基礎工学会 Vol. 1
- 3) 河上義典、小川正二 "くり返し応力を受けた締固め土の力学的性質" 土木学会論文集 第96号
- 4) 河上義典、小川正二 "くり返し応力を受けた締固め土の弾性係数および降伏応力について" 土木学会論文集 第114号

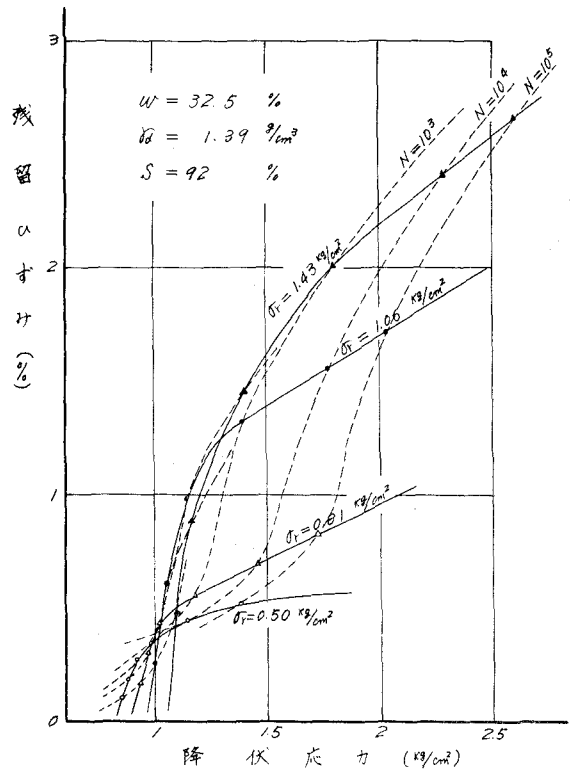


図-7 降伏応力と残留ひずみとの関係

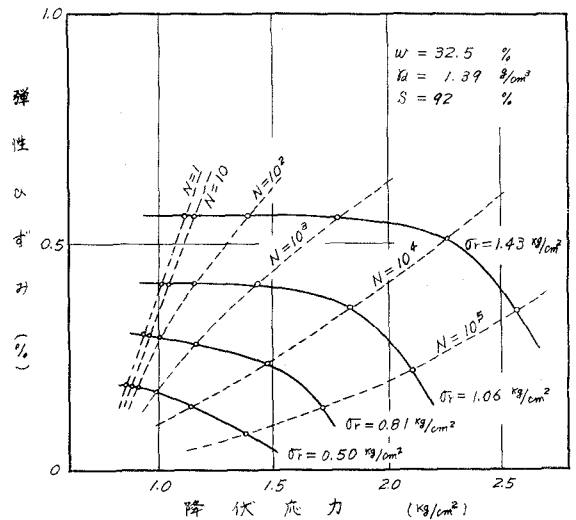


図-8 降伏応力と弾性ひずみとの関係