凍土の変形係数推定に用いる真ひずみ率のひずみ速度依存性

（株）精研　技術開発部　正会員　○大石　雅人
（株）精研　技術開発部　正会員　　上田　保司

１．はじめに　地盤凍結工法において，合成体凍土の設計や凍結土圧の計算に用いられる凍土の変形係数を一軸圧縮試験から求める際，供試体上下端部に乱れた領域が存在するために，供試体全体の軸変位から変形係数を求めると過少になる[1]．そこで，既報[2]では，健全領域にひずみゲージを貼付する代わりに，端部の乱れの影響を評価する指標である“真ひずみ率”を導入して変形係数を推定する方法を提案した．本報では，推定法の適用範囲拡張および新試験方法の確立に向けて，施工現場で生じうるひずみ速度が遅い実験を行い，その影響を確認した．

２．実験方法および簡易推定法　試料土には豊浦砂を用い，文献[1)2)3)]と同様の手順で実験を行った．**図１**に一軸圧縮実験装置の模式図を示す．供試体全体の軸変位を変位計で，健全領域のひずみをひずみゲージで，荷重をロードセルで測定した．土の一軸圧縮試験(JIS A 1216:2009)における標準ひずみ速度 v_εは 1%/min であり，凍土の場合もそれを踏襲している[3]が，本報では，0.01，0.1，0.2 %/min の 3 条件において，供試体高さ H を変えた実験[2]を行った．実験温度は-10℃である．

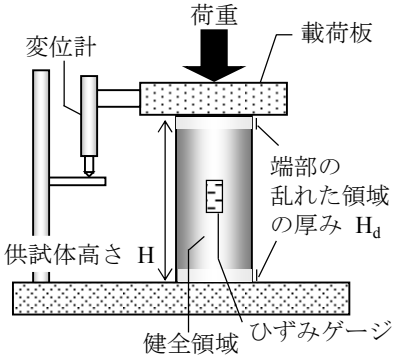

図1　一軸圧縮実験の模式図

変形係数 E_{50} は，応力－ひずみ曲線の載荷開始から最大応力に対する 50%応力点までの応力の割線勾配を示し，次式で定義される．

$$E_{50} = 0.5\ \sigma_{max} / \varepsilon_{50} \qquad (1)$$

ここで，σ_{max} は最大応力，ε_{50} は 50%応力時のひずみである．また，凍土供試体を**図１**のように健全領域と乱れた領域の 2 つの部材からなる弾性体と仮定すると，50%応力点までの供試体全体の軸変位を表す圧縮変位量 $h_{50,a}$ は，式(2)で示すように供試体高さ H の一次関数として表現できる[2]．

$$h_{50,a}(H) = \varepsilon_{50,t} \cdot H + (\varepsilon_{50,d} - \varepsilon_{50,t}) \cdot H_d \qquad (2)$$

ここで，$\varepsilon_{50,t}$ は健全領域のひずみ，$\varepsilon_{50,d}$ は乱れた領域のひずみ，H_d は乱れた領域の厚みである．真ひずみ率 R_t は，式(2)の傾きである$\varepsilon_{50,t}$ と，$h_{50,a}$ を H で除して求めた供試体全体の軸ひずみ$\varepsilon_{50,a}$ との比率を表す式(3)として定義する．

$$R_t(H) = \varepsilon_{50,t} / \varepsilon_{50,a} \qquad (3)$$

さらに，式(4)に供試体全体の軸変位による変形係数 $E_{50,a}$ と R_t を代入することで，簡易推定法における健全領域の変形係数 $E_{50,t}$ が求まる．

$$E_{50,t} = E_{50,a} / R_t \qquad (4)$$

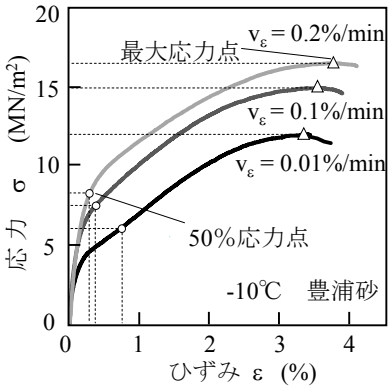

図2　応力－ひずみ曲線の例

３．実験結果　**図２**に各ひずみ速度 v_εにおける応力－ひずみ曲線の例を示す．いずれの条件でも，載荷直後の大きな応力増加勾配は，εの増加に伴って次第に小さくなる．v_εごとに応力－ひずみ曲線を比較すると，載荷開始直後の直線的な応力増加の勾配にほとんど違いはないが，v_εが小さい条件ほど，勾配が変化し始める応力が小さい．また，応力の増加勾配が変化した後の塑性的な挙動領域における応力増加の勾配は，いずれの条件でも大きな違いはない．さらに，ひずみ速度の低下に伴って，σ_{max} は減少し，ε_{50} は増加する傾向を示している．**図３**にひずみ速度 v_εと最大応力σ_{max} との関係を示す．σ_{max} は，v_εの低下に伴い，v_εの対数軸に対してほぼ直線的に低下しており，その傾向は，文献[3]と概ね一致

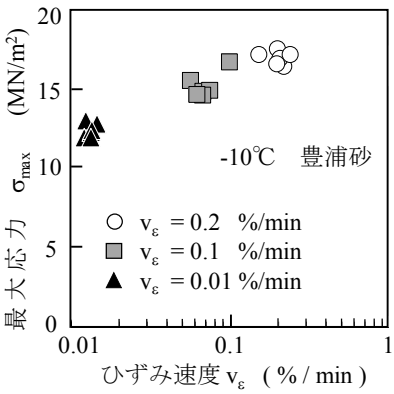

図3　ひずみ速度と最大応力との関係

キーワード　変形係数，凍結工法，上下端部の乱れ，ひずみゲージ，ひずみ速度，ベディングエラー
〒561-0894　大阪府豊中市勝部 1-2-18　TEL.(06)6858-0865　FAX.(06)6858-0903

する．ひずみ速度 v_εとひずみゲージで測定した変形係数 $E_{50,g}$ との関係を**図 4** に示す．文献 [1]のデータも併記する．ひずみゲージで測定した $E_{50,g}$ にはバラつきはあるが，v_εの低下に伴って減少する傾向がみられる．なお，ひずみ速度の低下に伴う最大応力や変形係数の減少の要因としては，長期載荷により，凍土中の氷自身のクリープ変形の影響や氷と土粒子の接着部におけるせん断の影響が卓越していることなどが考えられるが，今後の検討課題の 1 つとしたい．

図 5 に供試体高さ H と圧縮変位量 $h_{50,a}$ との関係を示す．いずれの v_εにおいても，H の増加に伴ってほぼ直線的に $h_{50,a}$ が増加する傾向を示し，既報 [2]と同様，ひずみ速度が異なる条件においても，両者の関係に，式(2)が成り立つことが確認できる．以上の結果は，ひずみ速度が遅い場合でも，変形初期の領域において，凍土を弾性体として扱えるということを示唆している．

図中の破線に示すように，両者の関係に対して求めた式(2)を表す近似直線を比較すると，v_εが遅いほどその傾きが大きくなる．一方で，切片の値は v_εによる違いがほとんど見られない．これは，ひずみ速度が変化しても整形の結果生じる端部の乱れの厚み H_d が変化するとは考えづらいことと，$\varepsilon_{50,t}$ がひずみ速度に依存していることから$\varepsilon_{50,d}$ も同様にひずみ速度依存性を持っていると考えると，切片の値に対しては，乱れの領域の厚みの影響が相対的に小さい可能性も考えられる．

近似直線の傾きから$\varepsilon_{50,t}$ を決定し，式(3)および式(4)から健全な領域の変形係数 $E_{50,t}$ を求めた．**図 6** に供試体高さ H と E_{50} との関係を示す．図中に，既報 [1]の v_ε=1.0%/min のデータを併記する．破線は簡易推定法から求めた $E_{50,t}$ を，記号はひずみゲージによる $E_{50,g}$ を示す．いずれの条件においても $E_{50,g}$ はある程度のバラついて分布しているが，$E_{50,t}$ は概ね $E_{50,g}$ を説明できる値を示している．以上のことから，ひずみ速度が遅い場合でも，供試体全体の軸変位のみを測定する方法から健全な領域の変形係数を推定できることを確認した．

図 7 に供試体高さ H と真ひずみ率 R_t との関係を示す．既報 [2]の v_ε=1%/min のデータを併記する．v_εが遅い条件で R_t が大きくなる傾向であるが，それは，v_εが遅い方が乱れの影響が少ないことを示している．これに，**図 4** の結果を併せると，ひずみ速度が遅くて変形係数が小さい場合，真ひずみ率が大きく乱れの影響が少ないといえる．これは，凍土に関する既報 [2]や未凍結土の力学試験 [4]において，供試体が硬質な場合には乱れの影響が相対的に大きくなる例と傾向が一致している．

４．まとめ　本報では，凍土の一軸圧縮試験において，健全領域の変形係数を簡易的に求めるために導入した真ひずみ率のひずみ速度依存性を確認する実験を行った．成果を以下に列挙する．

・最大応力および変形係数は，ひずみ速度の低下に伴って減少した．
・ひずみ速度が遅い場合も，真ひずみ率を導入した簡易推定法が適用できる．
・ひずみ速度が遅くて変形係数が小さい方が，真ひずみ率が大きく乱れの影響が少ない．

文献　1)上田他(2007):土木，Vol.63，No.2，577-589.　2)大石他(2014) :土木学会学術講演概要集 Ⅲ-128.　3)高志他(1980):土木，Vol.302，79-88.
4) 龍岡他(1994) :土と基礎，Vol.42，No.11，89-92.

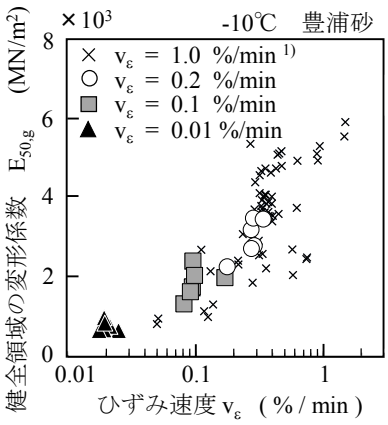

図4　ひずみ速度と変形係数との関係

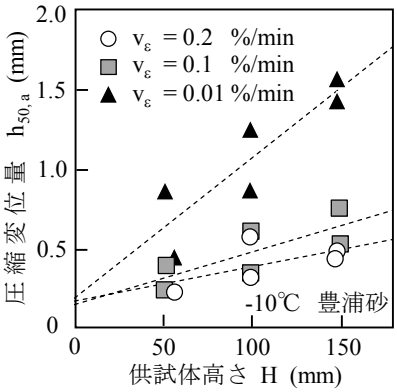

図5　供試体高さと圧縮変位量との関係

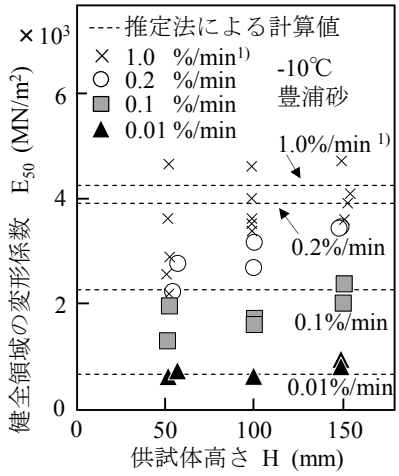

図6　供試体高さと変形係数との関係

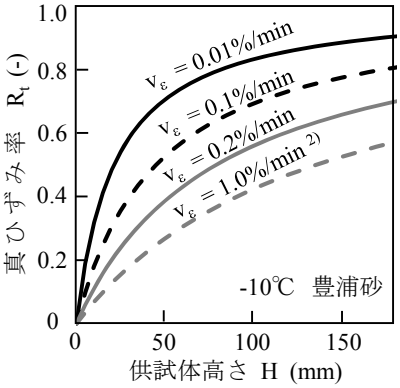

図7　供試体高さと真ひずみ率との関係