

ベディングエラー

Bedding Error

龍岡文夫 (たつおか ふみお)

東京大学教授 生産技術研究所第5部

木幡行宏 (こはた ゆきひろ)

東京大学助手 生産技術研究所第5部

語源

ベディングエラー (bedding error), 他動詞: to bed (to fix on a base, Longman) に由来する。三軸試験における bedding error とは、供試体本体とキャップとペDESTAL面との間の不完全接触のために生じる「キャップや載荷ピストンの軸変位から求めた軸ひずみ」に含まれる測定誤差を言う(図-1)。これは、次のメカニズムによって生じる。

a) 堆積軟岩、風化軟岩、セメント改良土、硬質粘土、砂・礫(凍結試料とブロックサンプリング試料)などでの硬質な地盤材料の不攪乱試料を整形した時に供試体上下端面で乱れた薄い層が形成される。貧配合の粗な砂や礫の供試体を作成したときに供試体上下端面に相対的に緩い層が形成される。これらの層は、供試体本体よりも圧縮性が非常に高い。

b) 硬質な地盤材料の供試体の上下端面の平滑性とキャップ・ペDESTALとの平行性が悪いことによる不完全接触による過大な軸圧縮。

c) 供試体の上下端面に汙紙やグリースとメンブレンを用いた摩擦軽減層を用いた場合のその圧縮。

この誤差は、供試体の剛性が高く供試体本体の軸圧縮量が小さいほど、供試体の高さが小さいほど大きくなる。またベディングエラーは、三軸圧縮試験のみならず、一軸圧縮試験、繰返し三軸試験、平面

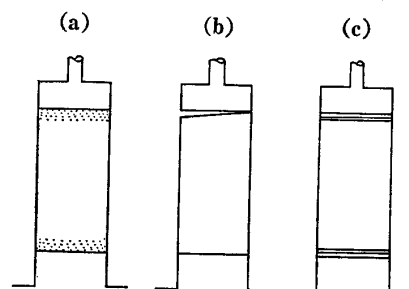


図-1 三軸圧縮試験におけるベディングエラーの模式図

ひずみ圧縮試験、圧密試験でも問題になりうる。

実験例

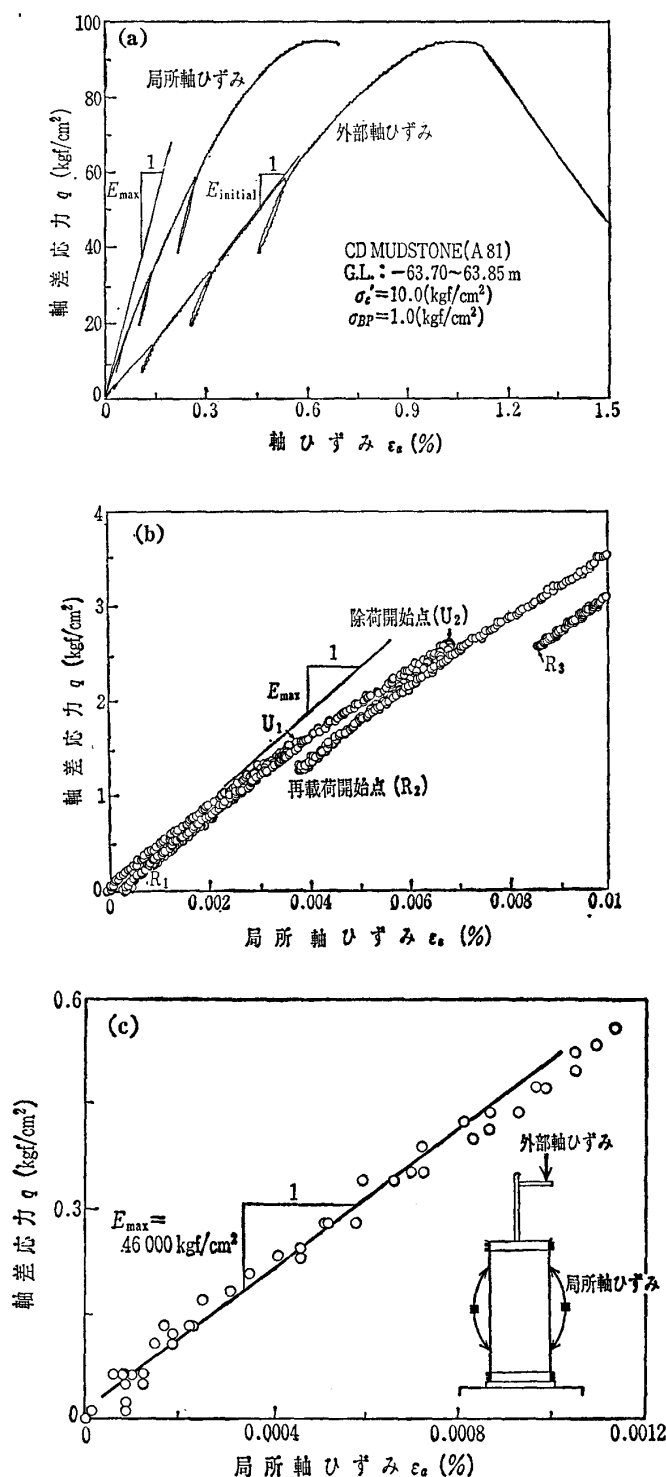
図-2は、堆積軟岩・泥岩(通称土丹)の高さ13.5cm、直径5.4cmのコア試料の圧密排水三軸圧縮試験の結果である。この試験では、載荷途中に微少な繰返し載荷を加えて弾性変形特性の変化を調べている。また、図-2(c)に示すように、載荷ピストンの変位から外部軸ひずみを求め、局所変形測定装置(Local Deformation Transducer, LDT)と言う装置を用いて測定した供試体側面上の2点間の軸圧縮量から局所軸ひずみを求めている。両者の差がベディングエラーである。しかし、ピーク応力状態での軸ひずみの差は0.4%強であり、圧縮量にしてわずか0.6mmであり、目視では認識できない。

LDTは、焼き入れした細い燐青銅の帯の中央に貼りつけたストレインゲージにより、供試体の軸圧縮を帯の曲げとして検知する^{1)~3)}。局所軸ひずみの測定の方法は、ほかにもいろいろある。コンクリートや硬岩のような非常に硬質な供試体の一軸圧縮試験では、従来からストレインゲージを供試体側面に直接貼る方法が用いられている。

図-2(a)から分かるように、外部軸ひずみは全く信用できない。また、局所軸ひずみは0.001%以下から測定されている(図-2(c))。この微小ひずみレベルでは変形特性が可逆的で(図-2(b))、変形係数はひずみ速度にほとんど依存しないので、図-2(c)に示す初期ヤング率 $E_{\max}$ は弾性変形特性を表している。実際、このヤング率 $E_{\max}$ は原位置弾性波速度から求めたヤング率 $E_f = 2(1+\nu) \cdot \rho \cdot V_s^2$ とほぼ一致している⁴⁾。

図-3は、豊浦砂の一次元圧縮の結果である⁵⁾。高さ60cmと20cmの大型供試体と中型供試体では、

技術手帳



図一 2 堆積軟岩・泥岩の応力～ひずみ関係

側方応力／軸応力の比が0.37に固定した載荷・除荷試験であり、載荷時にはほぼ側方ひずみがゼロの一次元圧縮になっている。LDTを用いて正確に局所軸ひずみを測定するとともに、外部変位計により通常の方法で軸ひずみを測定している。高さ2.5cm、直径6cmの標準圧密リングを用いた圧縮試験では、通常の方法で外部軸ひずみを測定している。大型・中型供試体でLDTを用いて正確に測定した軸ひず

みはほぼ同じ値であるが、外部変位計による軸ひずみは大型供試体よりも中型供試体で大きく、標準圧密リングを用いた圧縮試験では格段に大きい。このように、供試体高さが小さくなるほど外部変位計による軸ひずみがLDTによる軸ひずみよりも大きくなるのも、ベディングエラーのためである。

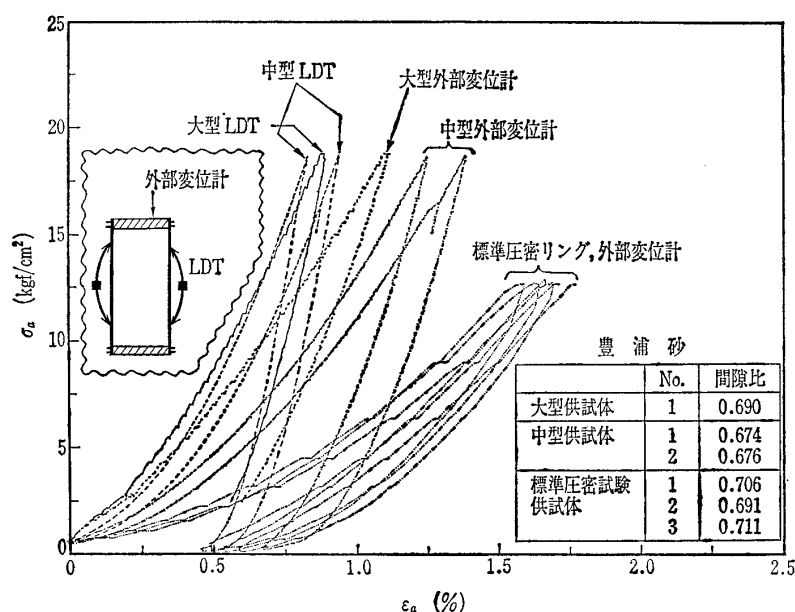
筆者らのこれまでの経験によると、ベディングエラーが無視できるのは以下の場合である。

- 1) 三軸試験において圧密時の軸ひずみが1%以上の柔らかい粘性土の三軸試験。
- 2) 均等係数の大きな粗粒土や細砂で、端面を非常にていねいに仕上げてある供試体。
- 3) 室内でモールド内に打ち込んで作製したセメント改良土で、供試体上下端面を非常にていねいに仕上げて、試験時に石膏等でキャッピングした場合。

背景

最近三軸圧縮試験において、ベディングエラーが無く正確かつ小さな軸ひずみを測定する必要性が認識されてきた背景には、巨大橋梁・高層ビル等の重要構造物の基礎が硬質地盤に建設され、その場合の構造物の変位や地盤の変形を正確に予測する必要性が出てきたことにある。このような場合、地盤内に生じるひずみレベルは大きくはない（概略0.5%程度以下）。例えば、首都高速度道路公団レインボーブリッジの基礎地盤は土丹で、アンカー下部地盤でのひずみレベルは0.01%以下である⁹⁾。

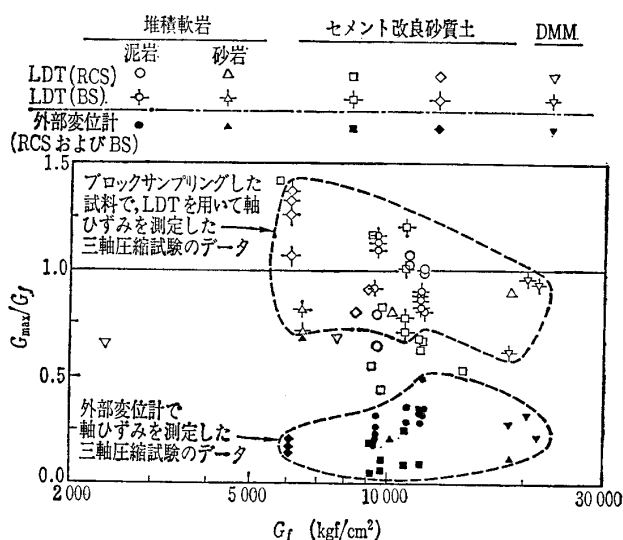
従来、地盤の変形係数は不攪乱試料の一軸圧縮試験・三軸圧縮試験や、孔内水平載荷試験（プレッシャーメーター試験）から求めており、これらは静弾性係数と呼ばれている（例えば図一2(a)に示す $E_{initial}$ ）。この値は、構造物変位や地盤変形から逆算した変形係数あるいは原位置弾性波速度から求めた「いわゆる動弾性係数」よりもかなり小さい（例えば、文献7）。その原因として、従来は試料の乱れによる一軸圧縮試験、三軸圧縮試験による変形係数の過小評価が挙げられていた。この要因は部分的には正しいが、すべての理由ではない。図一4は「自然堆積軟岩」と「セメント改良砂質土地盤・深層混合工法(DMM)によるセメント改良粘性土地盤」から、ロータリーコアチューブサンプリング(RCS)



図一3 豊浦砂の一次元圧縮（大型・中型供試体と標準圧密供試体の比較）

とブロックサンプリング（BS）で採取した不攪乱試料を用いた三軸圧縮試験による初期せん断剛性率 $G_{\max} = E_{\max}/2(1+\nu)$ （ ν はポアソン比）と原位置弾性波速度測定によるせん断剛性率 $G_f = \rho \cdot V_s^2$ の比を G_f に対してプロットした図である⁸⁾。外部軸ひずみから求めた $G_{\max}$ は全般的に G_f よりもはるかに小さく、このデータを信じると試料は大変乱れていたことになる。一方、局所軸ひずみに基づく $G_{\max}$ は全体的に G_f に近い。しかし、局所軸ひずみに基づいても、ロータリーコアチューブサンプリングで得られた試料の $G_{\max}$ は G_f よりも小さいデータが多く、試料が乱れていた場合が多いことを示している。一方、ブロックサンプリングで得られた試料の場合、 $G_{\max}$ と G_f の一致度は高い。

したがって、従来の一軸圧縮試験や三軸圧縮試験で求められた「いわゆる静弾性係数（図一2（a）での E_{initial} ）」が「原位置地盤の変形から逆算した変形係数」や「いわゆる動弾性係数」に比べて相当小さい理由は、①試料の乱れ、②ベディングエラーによる軸ひずみの過大評価、③図一2（c）での $E_{\max}$ のように小さいひずみレベルで変形係数を定義していないこと、にまとめられる。また、通常0.01%以下の小さなひずみレベルでは、ひずみ速度と繰返し载荷の影響は小さく、いわゆる動的载荷試験（共振法土質試験など）と静的载荷試験（三軸試験）で求



図一4 堆積軟岩とセメント改良土の $G_{\max}/G_f$ と G_f の関係

めた変形係数は基本的に一致する。以上のことから、静弾性係数と動弾性係数の区別をする必要がない。

参考文献

- 1) 龍岡文夫・澁谷 啓・スポット ティチャフォラシンスクン・金 有性：土質工学40年のあゆみ—室内試験法—，土と基礎，Vol. 37，No. 12，pp. 33～37，1989。
- 2) 龍岡文夫・木幡行宏：第6回自動化された三軸圧縮試験実技講習会報告，土と基礎，Vol. 40，No. 4，pp. 79～84，1992。
- 3) Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.-S. and Sato, T.: A simple gauge for small strain measurements in the laboratory, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 1, pp. 169～180, 1991。
- 4) 龍岡文夫・越智健三・金 有性・木幡行宏：堆積軟岩の非線形変形特性の調査・試験法，土と基礎，Vol. 40，No. 11，pp. 7～12，1992。
- 5) 龍岡文夫・木幡行宏・亀谷泰久・Siddiquee, M.S.A.・新宅健夫：大型供試体を用いた砂礫の一次元圧縮試験，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集，Vol. III，1994。
- 6) 小田桐直幸・荻原充信・並川賢治・亀谷裕志・平山伸行：レインボーブリッジ基礎地盤の変形特性，第28回土質工学研究発表会講演集，pp. 1361～1364，1993。
- 7) 後藤貞雄・高橋行茂：LNG 地下式貯槽の建設における大深度掘削技術，土木学会論文集，No. 469，III-23，pp. 1～13，1993。
- 8) 龍岡文夫・木幡行宏：硬質地盤材料のサンプリングによる試料の乱れについて，第29回土質工学研究発表会講演集，pp. 1187～1190，1994。

（原稿受理 1994.5.6）