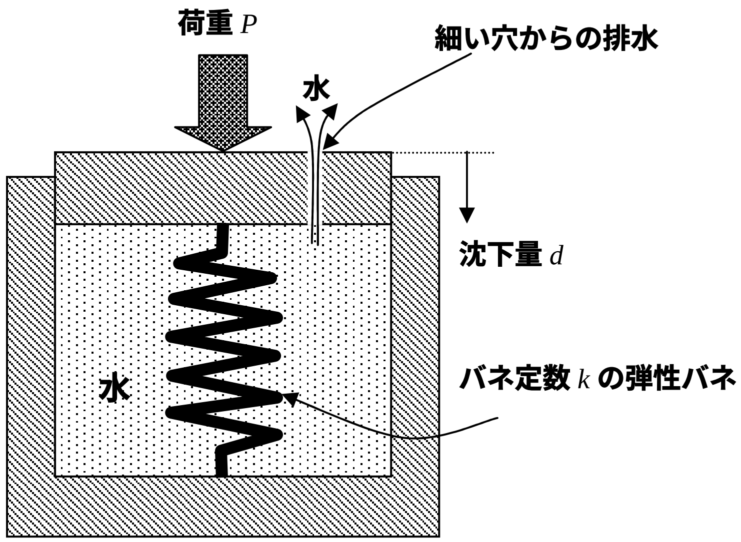
土質力学Ｉ及び演習（Ｂ班：小高担当）　配付資料 No.8　(2004.12.8)

【圧密の単純化モデルと実際の粘土の「バネ」】

(1)圧密のモデル化



（一次元弾性）圧密を説明するのに必ず使用されるモデル

（仮定）

1．箱の中は弾性バネ（土骨格）と水（間隙水）だけ
2．水は非圧縮（もちろんバネも）
3．箱の外とは小さな穴があるのみで水の出入りには時間がかかる（＝粘土の透水性は低い）
4．有効応力（土骨格が受け持つ力）＝バネの弾性力

	載荷直後	載荷から十分に時間経過
全応力増分	$p\,(=P/A)$	p
間隙水圧増分	p	0
有効応力増分	0	$p\,(=k\cdot d/A)$

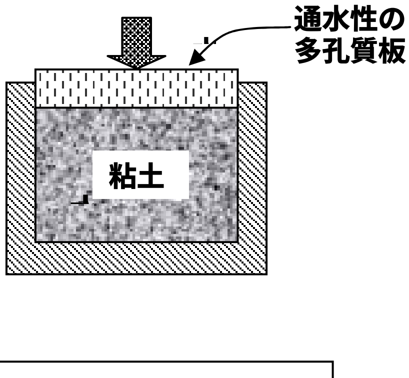
①載荷した場合，バネが縮むためには，箱から水が出なければならない（水は完全に非圧縮であると仮定している)。しかし，水が出るための穴は非常に小さいために，すぐには外に出ることが出来ない。

②水が外に出て行かないということは，バネは縮まない（すなわち全く力が加わっていない）ということなので，載荷直後の状態では，水が荷重のすべてを支えている（すなわち，全応力増分と水圧増分が釣り合っている）ことになる。

③時間の経過とともに，徐々に穴から水が抜けてゆくことにより載荷盤は沈下してバネが縮むが，縮むことによってバネが新たに受け持つ荷重の分だけ，水圧増分は減少する。

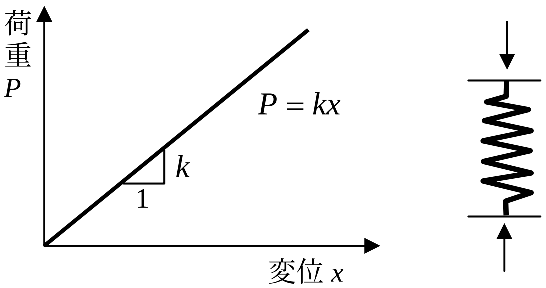
④最終的に，全荷重分を受け持つだけバネが縮んだ時に，水圧増分はゼロに戻り，沈下は止まる。

注意：箱にバネの代わりに有限な厚さの粘土が入っているとしたら, 水が抜けるのにフタの穴だけが抵抗になるわけではなく,（間隙のスキマを流れるために）粘土の至る所に抵抗があるので, 間隙水圧は一様ではなく, ある分布をもつ。しかし，厚さが無視できる小さな土要素と考えれば，十分粘土の「弾性」圧密を表現していると言える。

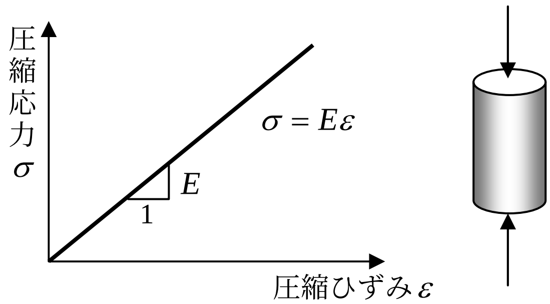


このモデルでは，土骨格を弾性バネで表現している。では，実際の土はどのような「バネ」を持つのか？

(2)土骨格の「バネ」はどんなバネ？



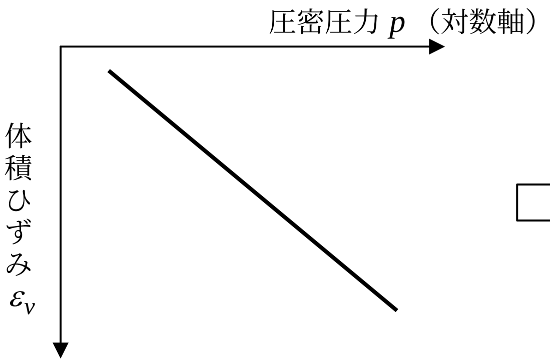
典型的な弾性バネ

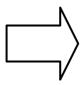


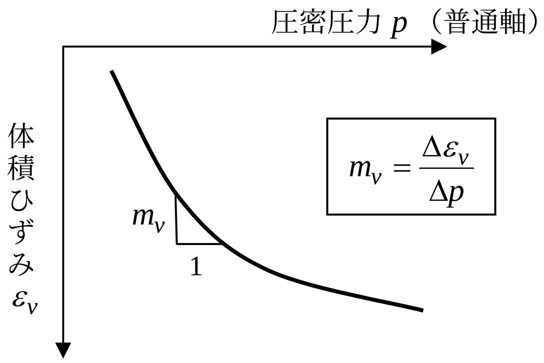
ゴム円柱のような弾性体

上の図の例は本当の弾性体である（ただし，各諸量は自然状態からの増分で定義）。
では土の場合を考えるため，上の図を 90 度時計回りに回転させる

その際，圧縮ひずみは体積ひずみ（圧縮を正），圧縮応力は圧密圧力と読み替える。ここでは，一次元の圧密のみを考えるので，沈下量から求められる「ひずみ」は「体積ひずみ」である。また，圧密圧力 p を用いる場合は，その p に対してのひずみと間隙比は完全に圧密が終了している（間隙水圧増分がゼロに戻っている）段階での値であることが前提である。要するに，p は有効応力である。







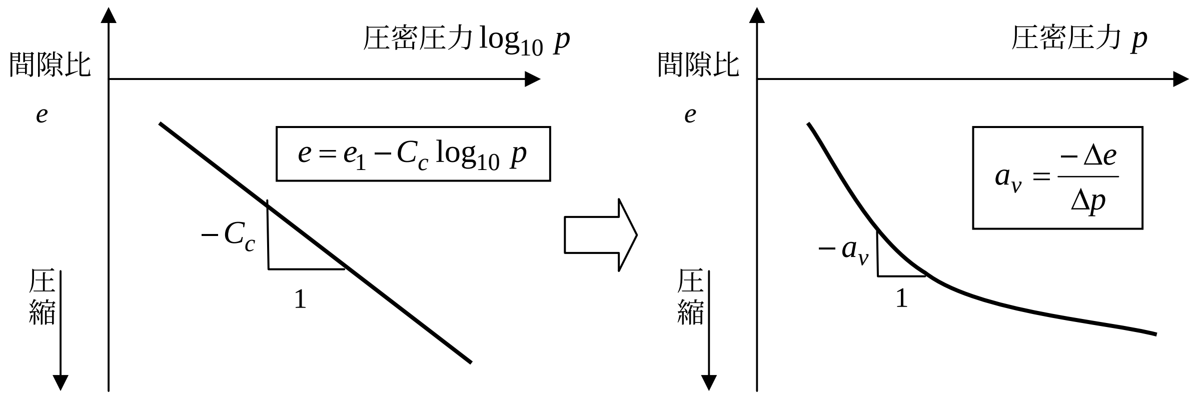
一見，上と同じ弾性体に見える。しかし，よく見ると横軸は対数軸（$\log_{10} p$）であることに注意する。

横軸は普通軸にすると当然直線では無くなる。この曲線の接線勾配を m_v：体積圧縮係数と呼ぶ。当然，曲線のどの部分か（すなわち p の値）によって値は変わる。

土の体積変化は，体積ひずみ ε_v よりも間隙比 e の変化で表す方が一般的である。なぜなら，土は圧縮曲線が曲線になることからもわかるように，その時々の e の値によって土自身の性質（圧縮性や強度等）が異なり，e 自身が重要な情報であるからである。

縦軸の体積ひずみを間隙比に替える。 $\varepsilon_v = \dfrac{-(V - V_0)}{V_0} = \dfrac{-(e - e_0)}{1 + e_0}$

（上式で，分子に－が付くのは，体積ひずみは圧縮を正で定義するため。）



e〜$\log_{10} p$ 関係の勾配を圧縮指数 C_c と呼ぶ。
e〜$\log_{10} p$ 関係（圧縮曲線）は，圧密圧力の広い範囲にわたって直線で近似できることから，大きな荷重増分に対しての圧密沈下量の予測に重用されることが多い（後で詳述する）。

この曲線の接線勾配を a_v :圧縮係数と呼ぶ。
m_v と同様に曲線のどの部分か（すなわち p の値）によって値は変わる。

a_v と m_v との関係は，

$\varepsilon_v = \dfrac{-(e-e_0)}{1+e_0}$ より $\Delta\varepsilon_v = \dfrac{-\Delta e}{1+e_0}$ となるので，これを $m_v = \dfrac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta p}$ に代入すると，

$$m_v = \frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta p} = \frac{-1}{1+e_0}\frac{\Delta e}{\Delta p} = \frac{1}{1+e_0} a_v$$ となる。

ひずみも間隙比も圧密圧力 p に対して非線形となっているので，上式の初期間隙比 e_0 は，圧密圧力増分 Δp を与える直前の粘土の間隙比としなければならない。

m_v は p の大きさのレベルによって異なる係数であるが，載荷する圧密圧力増分 $\Delta p (= dp)$ が微小である区間で考えれば，

$$d\varepsilon_v = m_v \cdot dp$$

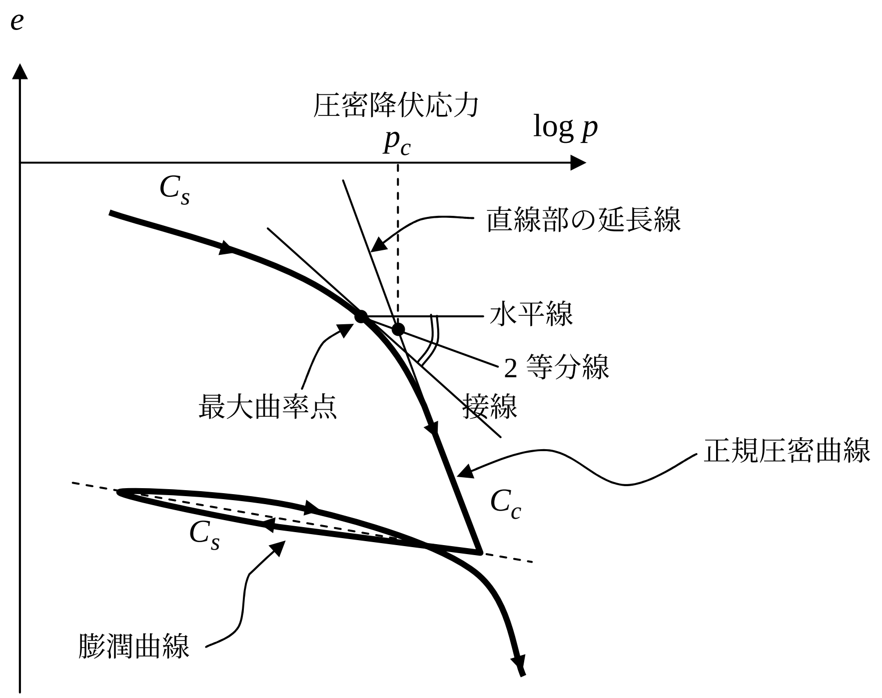
一次元なので，$d\varepsilon = m_v \cdot dp = m_v \cdot d\sigma'$ と表すことができ，一見，フックの法則に従う普通の弾性体のようになる。（この関係を Terzaghi の弾性圧密理論で用いる）

m_v は体積弾性係数 K の逆数となっており，圧力の逆数の次元である。

弾性係数と圧縮係数

弾性係数	体積圧縮係数
硬い材料ほど大きい 変形しやすい材料ほど小さい	軟らかい材料ほど大きい 圧縮（変形）しやすい材料ほど大きい
例： E（ヤング率）：$d\sigma = E \cdot d\varepsilon$ G（せん断弾性係数）：$d\tau = G \cdot d\gamma$ K（体積弾性係数）：$d\sigma_m = K \cdot d\varepsilon_v$ （土に用いるなら応力は有効応力とする）	例：一次元では $d\varepsilon = m_v \cdot dp \ (= m_v \cdot d\sigma')$ 多次元では $d\varepsilon_v = m_v \cdot d\sigma_m{}'$ （土を想定して有効応力で記述）
SI 単位： kN/m^2(=kPa), MN/m^2(=MPa)	SI 単位： m^2/ kN(=kPa^{-1}), m^2/MN (=MPa^{-1})

(3) 圧縮曲線(e～$\log p$ 曲線)は本当に直線か？



実際の粘土を現地から採取（サンプリング）してきて「圧密試験」を実施すると，圧縮曲線（図の太線）が得られるが，よく観察すると大きく分けて **2** つの勾配の直線部があることに気が付く。（なぜ，２つの直線部に分かれているのかについての考察は**配付資料 3** にて詳述する）

通常の標準圧密試験で得られる圧縮曲線は，数カ所選んだ各荷重段階において，一定荷重を載荷した時の圧縮量から得られた数点のデータをつなぎ合わせて描かれたものである。しかし，最近では非常にゆっくりと載荷重を増やしていき，連続して圧縮量を計測する圧密試験も行われるようになった。（後日の圧密試験の講義でまた詳細を述べる）

初期の荷重段階では緩やかな勾配で圧縮するが，そのうちに急に圧縮量が大きくなり勾配の大きな直線，すなわち「正規圧密曲線」※となる。この勾配が変わる境界での圧密圧力を特別に「圧密降伏応力 p_c 」と呼ぶ。しかし，自然の粘土ではこの境界を見極めるのは非常に難しいので，機械的に誰でもそこそこの値が求められるような方法が色々と提案されている。最も有名なのは，（Casagrande **カサグランデ**）の方法である（具体的に上の図に示してあるので参照のこと）。

※　正規圧密および正規圧密曲線は，その土が未経験の荷重で圧縮されているという意味を込めて，歴史的に処女圧縮および処女圧縮曲線(Virgin Compression line の和訳)とも呼ばれている。これは，処女航海，処女地の類であるが，現代日本ではあまり使われなくなった。