

## 修正 GHE モデル

修正 GHE モデル<sup>1)</sup>は、骨格曲線は GHE モデルを用い、履歴法則は Masing 則を改良することにより、任意の  $G/G_{\max} \sim$  関係、 $h \sim$  関係と強度特性（せん断応力の上限值）を満足できるモデルである。

### 骨格曲線

骨格曲線は、Tasuoka and Shibuya<sup>2)</sup> が提案したモデル（GHE model ; General Hyperbolic Equation model）である。これは、双曲線モデルをより一般化したものである。

$$\tau = \frac{G_{\max} \cdot \gamma}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \left( \frac{\gamma}{\gamma_r} \right)} \quad \frac{\tau}{\tau_f} = \frac{\frac{\gamma}{\gamma_r}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \left( \frac{\gamma}{\gamma_r} \right)} \quad (1-1)$$

または、

$$y = \frac{x}{\frac{1}{C_1} + \frac{x}{C_2}} \quad (1-2)$$

ここに、 $x$ 、 $y$  は正規化ひずみ、正規化せん断応力で、 $x = \tau / \tau_r$ 、 $y = \tau / \tau_f$  である。

また、 $C_1(x)$ 、 $C_2(x)$  は補正係数で以下の式によって与えられる。

$$C_1(x) = \frac{C_1(0) + C_1(\infty)}{2} + \frac{C_1(0) - C_1(\infty)}{2} \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{\alpha/x + 1} \right\} \quad (1-3a)$$

$$C_2(x) = \frac{C_2(0) + C_2(\infty)}{2} + \frac{C_2(0) - C_2(\infty)}{2} \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{\beta/x + 1} \right\} \quad (1-3b)$$

式(1-2)において、正規化ひずみ  $x = \tau / \tau_r = 0$  で、 $dy/dx = 1.0$  の条件から、 $C_1(0) = 1.0$ 、正規化ひずみ  $x = \tau / \tau_r \rightarrow \infty$  で、 $dy/dx = 0$  の条件から、 $(dC_2/dx)_x = 0$  が得られる。これらの条件を満足する関数形の中から、式(1-3)を採用している。

## GHE モデルのパラメータ設定方法

GHE モデルには、 $C_1(0)$ 、 $C_2(0)$ 、 $C_1(\infty)$ 、 $C_2(\infty)$ 、 $\gamma_r$ 、 $\tau_r$  という6個のパラメータが存在する。これらのパラメータの設定方法を以下の1)～8)に示す。

- 1) Mohr-Coulomb の破壊基準によりせん断強度  $\tau_f$  を算定し、 $\gamma_r = \tau_f / G_{max}$  により基準ひずみ  $\gamma_r$  を求める。
- 2) 繰り返し試験から得られた  $G / G_{max} \sim \gamma$  関係を図 1.1 に示すように  $y/x \sim y$  関係に変換する。

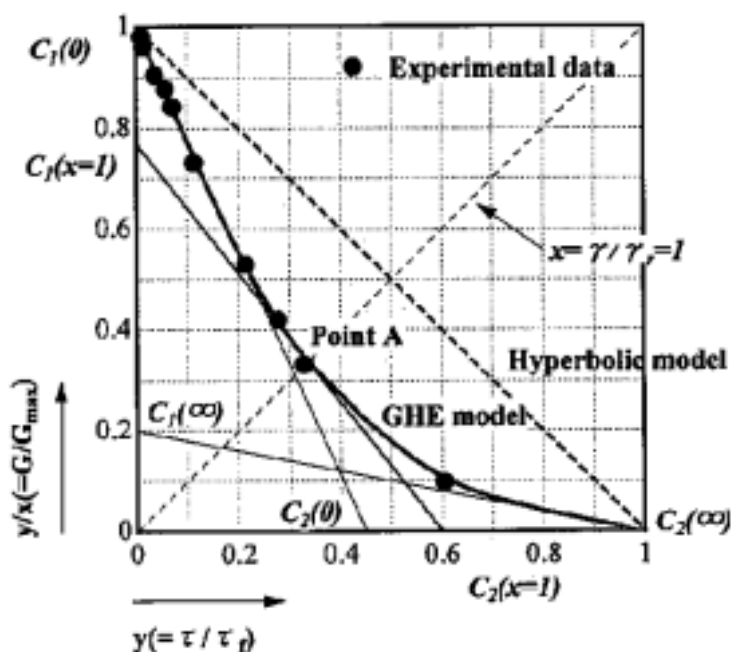
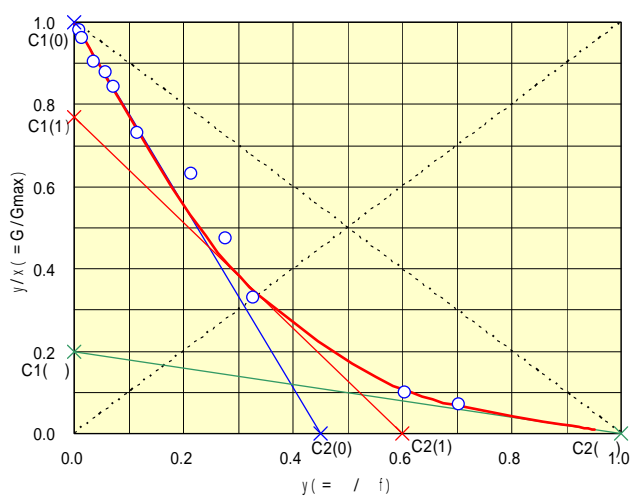


図 1.1 GHE モデルによる実験データの Fitting 例（実験データは霞ヶ関砂）

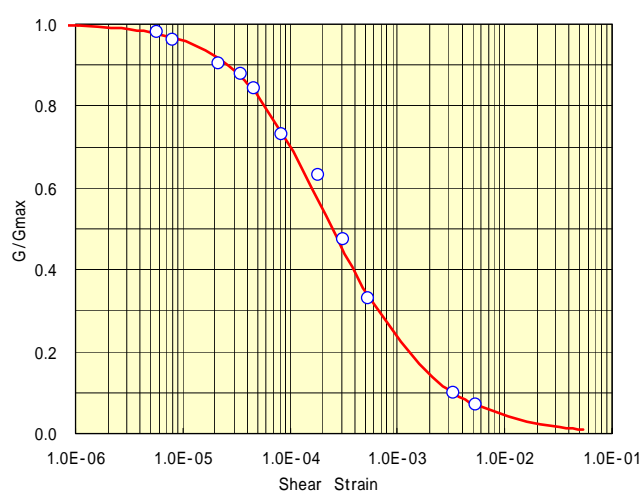
- 3) 正規化ひずみ  $x = \gamma / \gamma_r = 0$  で、 $dy/dx = 1.0$  の条件から、 $C_1(0) = 1.0$  である。
- 4)  $C_2(0)$  は荷重初期の  $y/x \sim y$  関係での  $y$ -軸切片である。ここで、 $y/x$  は割線せん断剛性  $G$  と微小ひずみ（0.001%程度）の最大（初期）せん断剛性の比であり、 $y/x = G / G_{max}$ 。
- 5)  $C_1(\infty)$  と  $C_2(\infty)$  は大ひずみレベルにおける  $y/x \sim y$  関係での  $y/x$ -軸切片と  $y$ -軸切片である。
- 6) 図 1.1 での右上から右下への対角線 ( $x = \gamma / \gamma_r = 1$ ) とデータ曲線との交点 A における実測曲線との接線を求める。
- 7) 6) で求めた接線と  $y/x \sim y$  関係での  $y/x$ -軸切片と  $y$ -軸切片が  $x = \gamma / \gamma_r = 1$  の時の  $C_1(x=1)$  と  $C_2(x=1)$  である。
- 8) 7) で求めた  $C_1(x=1)$  と  $C_2(x=1)$  を式(3)に代入して、 $\gamma_r$ 、 $\tau_r$ （線形指標、linear index）が得られる。

## パラメータの決定例

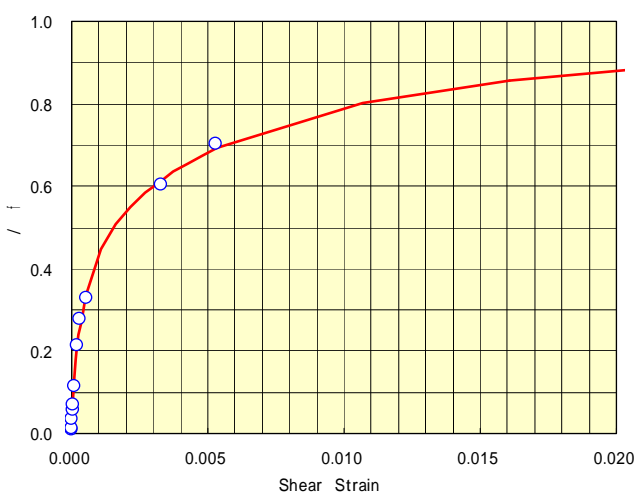
パラメータ		
$C_1(0)$		1.0
$C_1(\quad)$		0.2
$C_2(0)$		0.45
$C_2(\quad)$		1.0
	1.776	$C_1(1) = 0.77$
	1.859	$C_2(1) = 0.60$



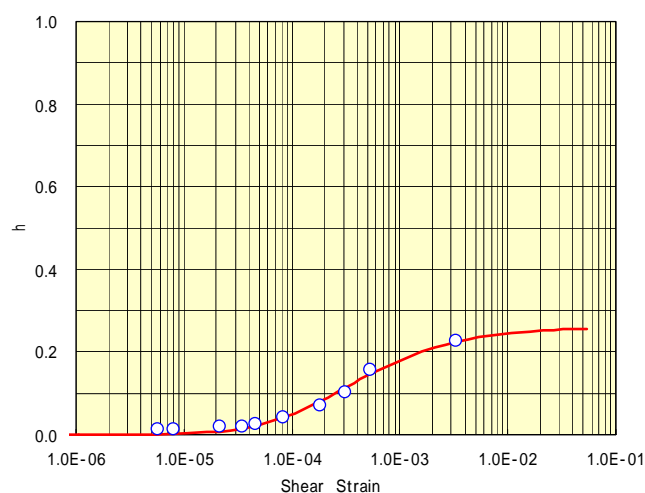
(a)  $y/x (G/G_{max}) \sim y ( / f)$  関係



(b)  $G/G_{max} \sim$  関係



(c)  $/ f \sim$  関係



(d)  $h \sim$  関係

図 1.2 GHE モデルによるフィッティング例

## 履歴法則

履歴法則に Masing 則を適用した時の履歴曲線を示す。

$$\tau \pm \tau_a = G_{\max} \cdot \frac{\gamma \pm \gamma_a}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \left| \frac{\gamma \pm \gamma_a}{2\gamma_r} \right|} \quad (1-4)$$

$$C_1 = \frac{C_1(0) + C_1(\infty)}{2} + \frac{C_1(0) - C_1(\infty)}{2} \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{\alpha / \{(\gamma \pm \gamma_a) / 2\gamma_r\} + 1} \right\} \quad (1-5a)$$

$$C_2 = \frac{C_2(0) + C_2(\infty)}{2} + \frac{C_2(0) - C_2(\infty)}{2} \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{\beta / \{(\gamma \pm \gamma_a) / 2\gamma_r\} + 1} \right\} \quad (1-5b)$$

この式を用いて、等価減衰定数を式(1-6)により算出した結果を図1.4に示す。

基本的には双曲線モデルの改良であること、履歴法則に Masing 則を用いていることから、ひずみが大きい範囲で、実験値と大きくはずれ、減衰定数  $h$  を過大に評価していることが分かる。

$$h = \frac{1}{4\pi} \frac{W}{W} \quad (1-6)$$

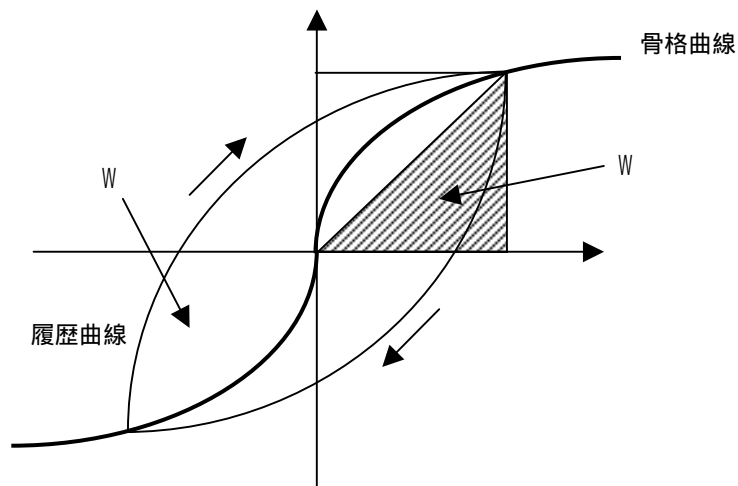


図 1.3 履歴減衰定数  $h$  の定義

そこで、履歴曲線の  $G_{\max}$  をひずみに依存するパラメータ  $G_{\max}(\gamma)$  として考え、履歴曲線で囲まれる面積が、繰り返し試験から得られた  $h \sim$  関係を満足するように決定した。ただし、せん断強度  $\tau_a$  は常に一定とする必要があるため、 $G_{\max}$  を変化させると基準ひずみ  $\gamma_r$  もそれに伴って変化させる必要がある。つまり、骨格曲線上で除荷または載荷が起こった場合には、その除荷・載荷点を通る仮定の骨格曲線（初期剛性  $G_{\max}(\gamma)$ 、基準ひずみ  $\gamma_r(\gamma)$  で想定される）を想定した履歴曲線（式（1-7））を用いる。

ただし、履歴曲線上で除荷や載荷が起こってもこのような操作は行わない。

$$\tau \pm \tau_a = G_{\max}(\gamma) \cdot \frac{\gamma \pm \gamma_a}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \left| \frac{\gamma \pm \gamma_a}{2\gamma_r(\gamma)} \right|} \quad (1-7)$$

## $G_{max}(\lambda)$ と $r(\lambda)$ の設定方法

仮定の骨格曲線は、 $G_{max}(\lambda)$  と  $r(\lambda)$  という2つの未知数を持つことになるが、以下の2つの条件を課すことにより両者の値は決定される。

- a) 除荷点 ( $\lambda_a$ ,  $r_a$ ) を通る。
- b) Masing 則を適用して得られる履歴減衰による等価減衰定数が要素試験結果の  $h \sim r$  関係と一致するようにする。

この考えをまとめると以下のようなになる (図 1.5 参照)

- 1) 最初はオリジナルの骨格曲線を通る (O A)
- 2) 点 ( $\lambda_a$ ,  $r_a$ ) で除荷されると、履歴曲線に移る (A B C)。このとき、通常は A B' C' となるが、ここでは点 A を通る仮想骨格曲線を想定し、この仮想骨格曲線に Masing 則を適用する、ただし、等価減衰定数が任意の  $h \sim r$  関係を満足するように  $G_{max}(\lambda)$ 、 $r(\lambda)$  を設定する。
- 3) 除荷 再載荷の過程 (C A) において、ひずみが以前の最大経験点 A に達するまでは、これ履歴曲線は保持される。つまり、同一の  $G_{max}(\lambda)$ 、 $r(\lambda)$  を用いる。
- 4) 点 A に達すると、再びオリジナルの骨格曲線 (A E) を進行する。

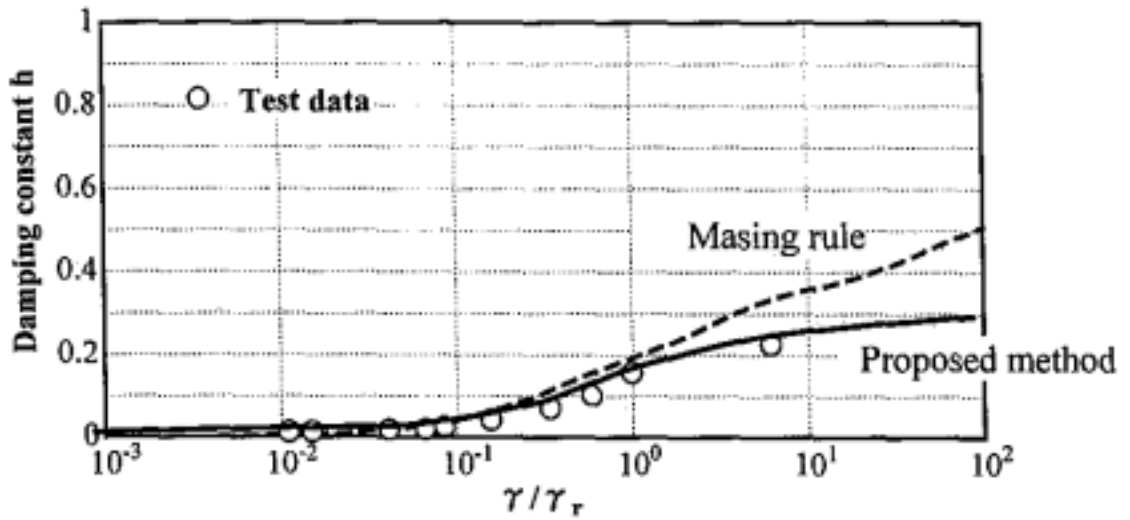


図 1.4 GHE モデルに通常の Masing 則を適用した場合と  $h \sim$  関係に fitting させた場合の等価減衰定数の比較

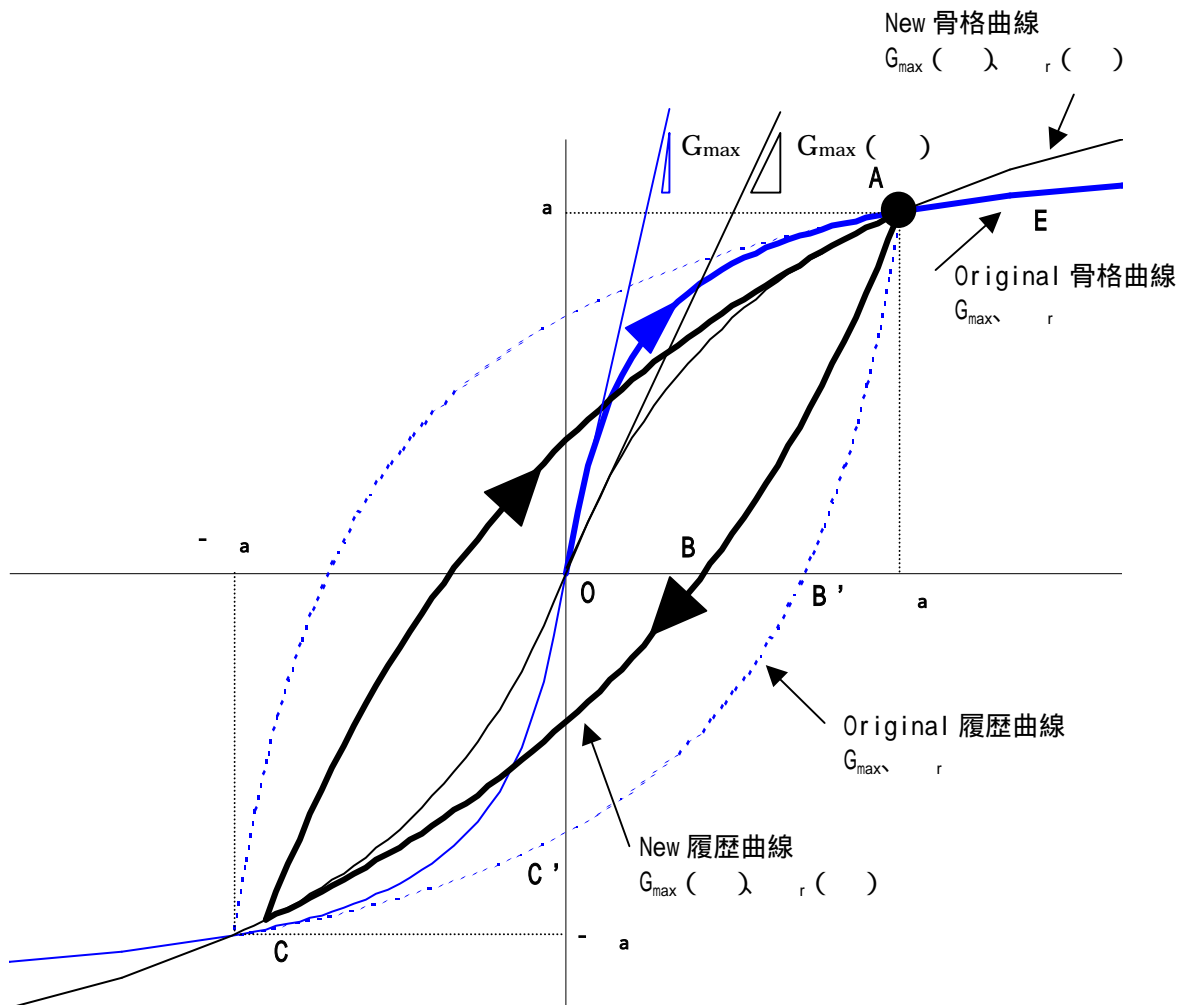


図 1.5 Masing 則の修正方法の概念図

参考文献

- 1) 室野剛隆：強震時の非線形動的相互作用を考慮した杭基礎の耐震設計法に関する研究、  
鉄道総研報告、1999
- 2) 澁谷・龍岡ら：地盤材料の広い範囲のひずみでの応力・ひずみ関係、第26回地盤工学研究発表会