

淤泥地基地震触变研究

张虎臣

(水利部淮委沂沭泗管理局 徐州)

一、问题的提出

淤泥是一种极软弱的粘性土。其天然含水量 $w > 55\%$ ；孔隙比 $e > 1.5$ ；液性指数 $I_L > 1$ ；灵敏度 $S_t \geq 4$ 。地震时淤泥结构易遭破坏，从而引起抗剪强度和承载力降低，即所谓“触变”。淤泥作为地基土，一旦触变，将导致地基失稳，危及上部结构。这是软基设计和研究所面临的重要课题。

二、试验验证

淤泥在7°地震时是否发生触变，以下面三例振动试验加以验证。为了说明淤泥触变后的抗剪强度降低，今设： $\alpha_e = \frac{\tau_d}{\tau_0}$ ， α_e 定义为强度衰减系数； τ_d 为淤泥触变后之动抗剪强度； τ_0 为淤泥触变前静抗剪强度。

(一) 柴河水库坝基淤泥试验

辽宁省柴河水库坝基淤泥质软粘土室内振动三轴试验^[1]，模拟7°地震，频率为1Hz，选用正弦波型；固结比 $K_C = 1.0, 1.5, 2.0$ ；垂直应力 $\sigma_1 = 98\text{kPa}, 147\text{kPa}, 196\text{kPa}$ ；破坏即触变之动剪应变幅为5%；等效循环数 $N = 10$ 次。动三轴试验结果表明，当 $K_C = 1$ ， $\sigma_1 = 98\text{kPa}$ 时，触变之临界动强度，可由图2试验实测曲线相应确定， $\tau_d = 0.026\text{MPa}$ ，而淤泥饱

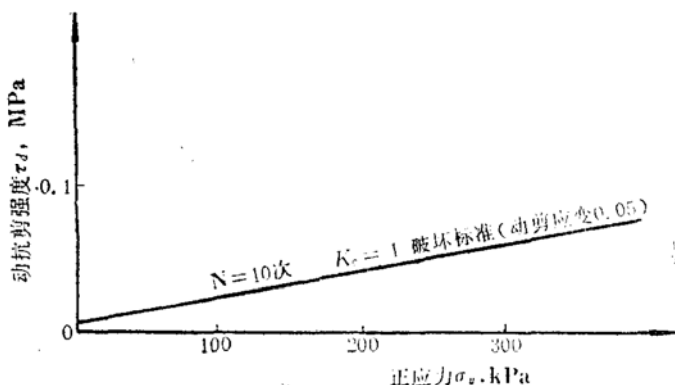


图1 动抗剪强度 τ_d 与正应力 σ_v 关系曲线(柴河淤泥)

和固结不排水剪总应力静抗剪强度 $\tau_0 = 0.056\text{MPa}$, 则由前式 $\alpha_e = \frac{\tau_d}{\tau_0} = 0.46$, 即由于触变, 淤泥抗剪强度衰减了54%。

(二) 蚌埠圈堤堤基试验

安徽省淮河蚌埠市圈堤堤基淤泥质土室内振动单剪试验^[2], 模拟7°地震, 有关试验条件基本同辽宁柴河水库动三轴试验。结果表明, 淤泥发生触变, 即动剪应变幅达5%之临界动抗剪强度, 由 $\sigma_1 = 98\text{kPa}$, 从动单剪试验实测曲线图2上求得 $\tau_d = 0.026\text{MPa}$, 而静抗剪强度 $\tau_0 = 0.044\text{MPa}$ 。于是 $\alpha_e = \frac{\tau_d}{\tau_0} = 0.60$ 。即由于触变, 淤泥抗剪强度衰减40%。

(三) 徐州淤泥试验

徐州市区地基淤泥试样模拟7°地震(徐州市区场地基本烈度为7°)室内动三轴振动试验的动抗剪强度 τ_d 与动剪应变 γ 的关系如图3。由图3可以看到, 当动剪应变幅 $\gamma = 10^{-2}$ 时淤泥发生触变, 其动抗剪强度 $\tau_d = 1.038 \times 10^{-2}\text{MPa}$ 。该试样静三轴饱和固结不排水剪总应力抗剪强度 $\tau_0 = 2.16 \times 10^{-2}\text{MPa}$ 。 $\alpha_e =$

$$\frac{\tau_d}{\tau_0} = 1.038 \times 10^{-2} / (2.16 \times 10^{-2}) = 0.48。即由$$

于触变、淤泥抗剪强度衰减52%。

由上述三例淤泥振动试验可得出这样的结论: 淤泥地震时受振动, 结构可能发生破坏, 即“触变”, 触变时的临界动抗剪强度, 一般等于或小于其静抗剪强度的 $\frac{1}{2}$ 。三地区的淤泥动、静抗剪强度参数值见表1。

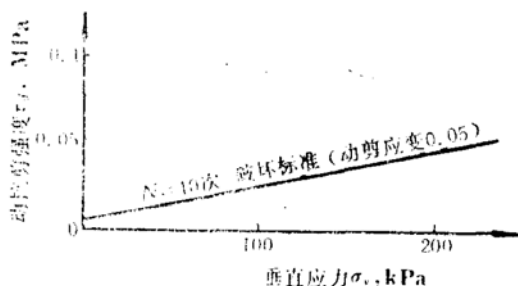


图2 动抗剪强度 τ_d 与垂直应力 σ 关系图(淮河淤泥)

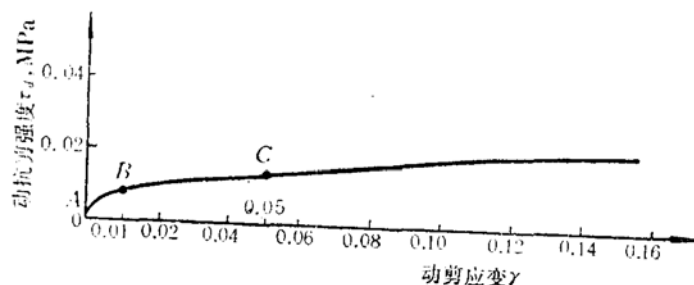


图3 动抗剪强度 τ_d 与动剪应变 γ 关系曲线(徐州淤泥)

三、淤泥地震触变的判别

淤泥地震触变的判别, 可通过室内常规三轴、振动三轴、振动单剪试验, 测定淤泥的最大静抗剪强度、振动触变之动强度、动应变幅, 以作为触变的临界值。然后根据设计地震

表1

徐州, 柴河, 蚌埠淤泥土参数对比一览表

参 数	测 试 方 法	振动三轴 (辽宁柴河)	振动单剪 (安徽蚌埠)	振 动 三 轴 跨孔剪切波速 (江苏徐州)
设计烈度 ($^{\circ}$)		7	7	7
埋 深 h (m)		2—3	3	2—3
层 厚 h_i (m)		2.5	2	3.1
垂直应力 σ_1 (kPa)		98	98	98
固 结 比 K_c		1	1	
含 水 量 w (%)		38.8	36.0	55.1
液 限 w_L (%)		37.5	45	50.6
液性指数 I_L		1.07		1.18
孔 隙 比 e		1.33		1.53
灵 敏 度 S_t		4.65		10
静内摩擦角 ϕ_0 ($^{\circ}$)		21	14	0—7
静粘聚力 c_0 (MPa)		17.64×10^{-3}	19.60×10^{-3}	9.8×10^{-3}
动内摩擦角 ϕ_d ($^{\circ}$)		10	13	0
动粘聚力 c_d (MPa)		7.90×10^{-3}	3.92×10^{-3}	4.90×10^{-3}
静抗剪强度 τ_0 (MPa)		5.49×10^{-2}	4.41×10^{-2}	9.80×10^{-3}
动抗剪强度 τ_d (MPa)		2.55×10^{-2}	2.65×10^{-2}	4.90×10^{-3}
强度衰减系数 α_e		0.46	0.60	0.5
正常容许承载力 $[R]$ (MPa)				6.86×10^{-2}
作深度修正的容许承载力 $[R]_d$ (MPa)				8.42×10^{-2}
触变后的容许承载力 $[R]_d$ (MPa)				5.35×10^{-2}

烈度和土的物理力学性质指标, 计算淤泥地震时可能承受的最大动剪应力或可能发生的动剪应变幅。若计算值等于或大于试验测得之临界值, 淤泥则被判为可能触变。下面叙述三个判别式。

(一) 地震最大动剪应力法^[8]

地震最大动剪应力法实质上是以静力法代替动力法, 即将设计地震时淤泥单元所承受的最大动剪应力(计算值)看作静剪应力, 并与其室内饱和固结不排水剪总应力抗剪强度相比较。若前者大于或等于后者, 淤泥则被判为可能触变。此判别式如下:

$$\left. \begin{aligned}
 \tau_{e\max} &\geq \tau_0 \\
 \tau_{e\max} &= 10^{-3} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i + p_0}{g} \cdot a_{\max} \\
 \tau_0 &= c_0 + 10^{-3} \cdot \sigma_0 \cdot \operatorname{tg} \phi_0
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $\tau_{e\max}$ 为地震最大动剪应力(MPa); τ_0 为淤泥饱和固结不排水剪总应力抗剪强度(MPa); γ_i 为淤泥上覆第 i 层土的容重(kN/m³); h_i 为淤泥上覆第 i 层土的厚度(m); p_0 为淤泥上部附加应力(kPa); g 为重力加速度(m/s²); $a_{\max}$ 为地面水平向最大地震加速度(m/s²); σ_0 为淤泥上部压应力(kPa); ϕ_0 和 c_0 分别为淤泥饱和固结不排水剪总应力法静内摩擦角(°)及静粘聚力(MPa)。

第一判别式比较直观清晰, 但很粗略, 没有考虑淤泥由于振动而发生局部触变, 使抗剪强度降低等动力特性。因而, 建议用于一般建筑的初判。

(二) 地震等效循环剪应力法^[4]

若根据设计地震烈度计算淤泥单元所承受的等效循环动剪应力, 等于或大于室内振动试验淤泥发生触变之临界动剪应力(即临界动强度), 则淤泥被判为可能触变。据此, 建立第二判别式

$$\left. \begin{aligned}
 \tau_{eq} &\geq \tau_d \\
 \tau_{eq} &= 0.65 \times 10^{-3} \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i + p_0}{g} \cdot a_{\max} \\
 \tau_d &= c_d + 10^{-3} \sigma_v \cdot \operatorname{tg} \phi_d
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 τ_{eq} 为地震等效循环剪应力(MPa); τ_d 为淤泥振动试验发生触变之临界动强度(MPa); ϕ_d 和 c_d 分别为其临界内摩擦角(°)及临界粘聚力(MPa); σ_v 为淤泥上覆垂直应力(kPa); 其余符号同前。

第二判别式是在引用 H·B·Seed 等人对土的液化研究中, 认为等效循环剪应力等于地震最大剪应力的 65% 这一成果, 并以室内振动试验淤泥发生触变之临界动强度为根据, 建立起来的。第二判别式, 在理论及实践上比第一判别式更为合理。因而, 建议用于重要建筑的判别。

(三) 地震动剪应变法^[5]

根据设计地震烈度计算淤泥动剪应变幅, 若其等于或大于室内淤泥振动试验发生触变之临界动剪应变幅, 淤泥则被判为可能触变。这就是第三判别式

$$\left. \begin{aligned}
 \gamma_e(\%) &\geq \gamma_t(\%) \\
 \gamma_e(\%) &= 0.65 \frac{a_{\max}}{g} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i + p_0}{G_{\max}(G/G_{\max})_{\gamma t}} \cdot \gamma_d(\%) \\
 \gamma_t(\%) &= 5 \times 10^{-2}(\%)
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 γ_e 为计算地震时淤泥单元发生触变的动剪应变幅; γ_t 为振动试验测定的临界动剪应变幅; $G_{\max}$ 为淤泥初始最大弹性剪切模量(MPa); $(G/G_{\max})_{\gamma t}$ 为淤泥振动触变时的模量比; γ_d 为深度影响系数, 当深度 $h = 0, 1, 2, \dots, 10$ 时; $\gamma_d = 1.0, 0.99, 0.98, \dots, 0.9$, 其余符号同前。

式(3)中 $G_{\max}$ 可由下面三种方法确定:

1. 由跨孔法现场测定淤泥的水平剪切波速 V_s , 再用公式 $G_{\max} = \frac{\gamma}{g} \cdot V_s^2$ 计算 $G_{\max}$ 。当 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$; 淤泥天然容重值 $\gamma = 16.3 \text{ kN/m}^3$; $V_s = 101 \text{ m/s}$ 时, 则淤泥最大剪切模量 $G_{\max} = 17.0 \text{ MPa}$ 。

2. 由张宝山等经验统计公式求 V_s 和 $G_{\max}$, 如 $V_s = 94.99e^{-0.750} \cdot h^{0.255}$; $V_s = 86.83I_L^{-0.215} \cdot h^{0.308}$; $V_s = 100.08c^{0.100} \cdot h^{0.812}$; $V_s = 14.78\gamma^{3.162} \cdot h^{0.240}$, 求 V_s 的平均值, 然后利用上式求 $G_{\max}$ 。

3. 由淤泥室内振动试验确定的动剪应力 τ_d 和动剪应变 γ , 绘制 γ/τ_d 即 $\frac{1}{G}$ 与 γ 的关系曲线, 曲线在纵轴 ($1/G$ 轴) 上的截距之倒数即为 $G_{\max}$ 。由此得徐州淤泥 $G_{\max} = 16.70 \text{ MPa}$ 。

第三判别式、跨孔波速法与振动试验法互相验证, 成果更为可靠, 建议用于重要建筑的判别。

运用上述三个判别式对徐州淤泥在设防烈度 7° 时, 是否触变, 进行了试判, 见表 2。

表2 徐州淤泥地震 (7°) 触变判别

公 式	判别方法	判 别 式	计 算 值	试验临界值	判别结果
1	地震最大剪应力法	$\tau_{e \max} \geq \tau_0$	$\tau_{e \max} \text{ (MPa)}$	$\tau_0 \text{ (MPa)}$	可能触变
			11.76×10^{-3}	9.8×10^{-3}	
2	地震等效循环剪应力法	$\tau_{eq} \geq \tau_d$	$\tau_{eq} \text{ (MPa)}$	$\tau_d \text{ (MPa)}$	可能触变
			7.6×10^{-3}	4.9×10^{-3}	
3	地震最大剪应变法	$\gamma_e(\%) \geq \gamma_t(\%)$	$\gamma_e(\%)$	$\gamma_t(\%)$	可能触变
			$5.93 \times 10^{-2}(\%)$	$5 \times 10^{-2}(\%)$	

四、触 变 机 理

淤泥含较多小于 0.005 mm 的粘粒——准胶体颗粒, 由双电层构成双层水膜联结结构, 见

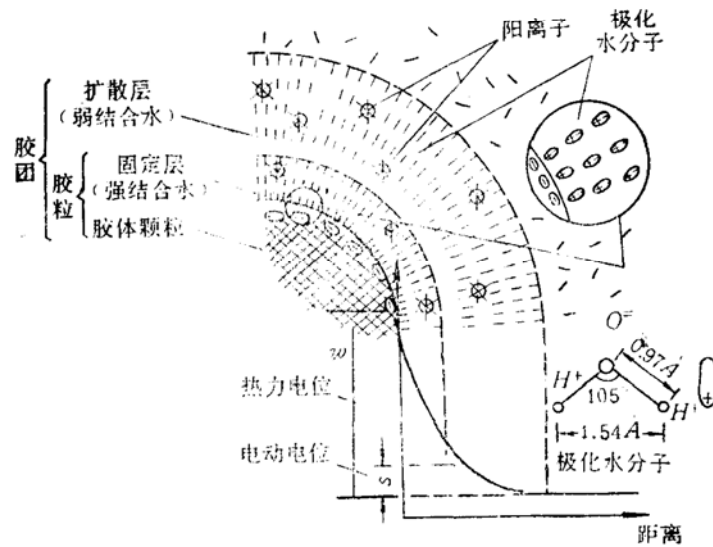


图4 胶体双电层结构示意图

图4。胶粒间具有公共强结合水膜连结力，常称“固化内聚力”；而胶团间具有弱结合水膜连结力，常称“原始内聚力”。淤泥依靠这两种内聚力，构成不稳定的絮状结构。淤泥地震触变的应力-应变关系，类似于粘-弹塑性介质受力情况。徐州淤泥(图3)与柴河水库淤泥振动试验应力-应变关系曲线(图5)都表明了这一点。图3和图5表明淤泥振动时应力应变关系分三个状态：①弹性状态，曲线上的 OA 段， A 为弹性极限；②弹塑性状态，曲线上的 ABC 段， B 为塑性极限， C 为强度极限；③粘性流动状态，曲线上的 C 点以右线段。笔者在宾汉力学模型上增加2个无阻力元件，目的是使弹性、弹塑性、粘性在不同应力条件下分别表现出来，以描述和研究淤泥触变前后的应力应变状态(图6)。现在分别叙述这三个状态。

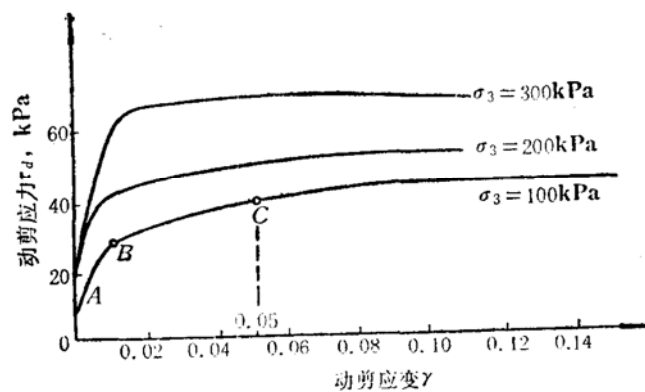


图5 动剪应力 τ_d 与动剪应变 γ 曲线
(据刘宗业：辽宁柴河水库淤泥振动三轴试验)

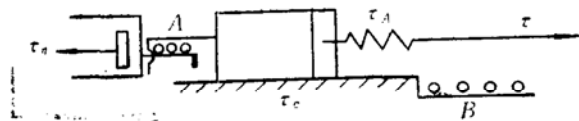


图6 粘性-弹塑性力学模型

1. 初始弹性状态

地震突然发生, 初始剪应力作用于淤泥单元, 胶体颗粒产生微小的弹性剪切变形, 两种内聚力共同抵抗着地震往返动剪应力。模型在动剪应力 τ_d 的作用下, 只有弹性元件的弹性伸长。这时淤泥处于初始弹性剪切变形状态。其应力条件为

$$\tau_d \leq c_f + c_s \quad (4)$$

式中 τ_d 为动剪应力; c_f 为淤泥“原始内聚力”; c_s 为淤泥“固化内聚力”。由图 3 和图 5 剪应力与剪应变双曲线可写方程

$$\tau_d = \frac{\gamma}{\frac{(1+\mu)}{(1+\mu_0)G_{\max}} + \frac{\gamma}{\tau_{\max}}} \quad (5)$$

式中 μ 和 μ_0 分别为变形中的泊桑比和初始泊桑比, 其余符号同前。当淤泥呈流塑状态时 $I_L > 1$, 则 $\mu \approx \mu_0 \approx 0.5$, 则有

$$\tau_d = \frac{\gamma}{\frac{1}{G_{\max}} + \frac{\gamma}{\tau_{\max}}} \quad (6)$$

当 $\gamma \rightarrow 0$ 时, 则 $\gamma/\tau_{\max}$ 与 $1/G_{\max}$ 相比可以略去, 得式(6)为

$$\tau_d = G_{\max} \cdot \gamma \quad (7)$$

此即淤泥初始弹性剪切应变状态方程, 见图 5 OA 段。

2. 弹塑性状态

当地震动剪应力增强或增强到一定数值后持续作用时, 胶团可能发生较大变形、位移并定向排列, 以适应新的应力条件。胶团位移不断增加, 介质便越过弹性限度, 即越过图 3 和图 5 中双曲线上 A 点, 而进入以塑性变形为主的弹塑性剪切变形。模型系统(图 6)中剪应力 τ_d 超过弹性极限 τ_A , 弹簧达到最大伸长后, 带动木块在板面上塑性移动。其应力条件以下式表达:

$$\left. \begin{array}{l} \tau_d \leq c_f + c_s \\ \tau_A < \tau_d < \tau_c \end{array} \right\} \quad (8)$$

式中 τ_d 为地震动剪应力; τ_A 为弹性极限; τ_c 为淤泥触变临界强度极限。应变表达式为,

$$\gamma = \gamma_e + \gamma_p \quad (9)$$

式中 γ_e 为弹性剪应变, γ_p 为塑性剪应变。

3. 粘性流动状态

当地震往返动剪应力强度超过淤泥单元本身的抗剪强度, 其“原始内聚力”和“固化内聚力”大部分丧失, 胶体颗粒所吸附的外层极化水分子重新恢复为自由水分子。同时胶团之间的大量孔隙水, 由于胶团间彼此失去连结力而急剧涌出、且来不及消散和排渗而形成暂时封闭的自由水体。失去水膜连结力的部分胶团和胶粒便分散在这封闭的水介质中(尚有部分胶团和胶粒之间保留有连结力而不同于砂土液化), 发生所谓“胶溶”现象, 此即“触变”的实质。淤泥触变后, 便由弹塑性状态, 进入粘性流动状态, 图 3 和图 5 中曲线 C 点以右近乎水平线, 表明动剪应力保持不变, 而剪切变形却在不断增加。图 6 力学模型中 $\tau_d \geq \tau_c$ 时, 木块从

滑动板面上移动到无阻元件 B 上, 则动剪应力 τ_d 可看作直接作用于粘性元件, 使系统产生粘性流动(这里将弹性元件的微小弹性伸长略去不计)。其应力-应变状态方程为

$$\tau_d = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (10)$$

式中 η 为粘性系数 ($\text{kPa} \cdot \text{s}$); $\dot{\gamma}$ 为动剪应变速率 (s^{-1})。

淤泥室内振动试验(图3和图5)与修改后的宾汉模型(图6)所表现的应力-应变关系吻合较好。可见, 用粘性-弹塑性理论解释和探讨淤泥地震触变机理, 是颇有意义的。

五、结 论

1. 7° 或大于 7° 地震时, 淤泥可能受振触变, 强度衰减 $\frac{1}{2}$ 以上, 承载力急剧降低, 地基可能失稳。对于淤泥地基, 不宜只考虑静态情况下容许承载力满足设计荷载, 而应首先判定设计地震情况下(包括其它机械振动), 淤泥是否发生触变, 以便采取相应措施。

2. 淤泥地震触变的三个判别式, 以地震动剪应变判别式较好。初始弹性剪切模量可通过三种途径测定, 以此计算设计地震情况下淤泥的动剪应变幅, 并与其临界剪应变幅相比较, 从而判定淤泥是否触变。

3. 修改后的宾汉模型与淤泥振动触变过程的应力-应变状态, 吻合较好, 对进一步研究和探讨淤泥触变机理, 颇有意义。

参 考 文 献

- [1] 刘宗业、田玉芬、高秀娟: 淤泥质软粘土动力特性的试验研究, 辽宁水利科技, 1983年第1期。
- [2] 李淑敏, 蚌埠圈堤土样振动液化试验报告, 淮委会、安徽水利科学研究所, 研究报告, 1980年。
- [3] 方鸿琪、王钟琦、赵树栋等, 唐山强震区地震工程地质研究, 中国建筑科学研究院勘察技术研究所, 1981年。
- [4] 王钟琦、谢君斐、石兆吉, 地震工程地质导论, 第1版, 地质出版社, 1983年。
- [5] 刘颖、谢君斐等, 砂土振动液化, 地震出版社, 1984年。