

冲击载荷下饱和砂土渗流和破坏的实验研究¹⁾

张均锋 孟祥跃 俞善炳 谈庆明 郑哲敏

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 对饱和砂土在冲击载荷下发现的变形和流动效应进行了落锤模拟实验研究, 发现砂土骨架出现纵向排水通道和横向断裂等现象, 对可能影响这些现象的主要因素进行了对比的实验, 对上述实验现象进行了初步的解释.

关键词 饱和砂土, 冲击, 渗流, 裂纹

引 言

近几年来, 在我国南方沿海一些地区进行的爆炸密实饱和砂土地基的工程中, 发现了许多现象不能给予解释, 如排水通道的形成和分布, 影响砂土结构密实程度的因素等. 在岩土工程中, 饱和砂土在动力载荷作用下发生的液化现象, 已引起人们的极大关注. 近 20 年来, 对饱和砂土在循环载荷下的液化问题, 国内外都做了大量的研究^[1~6], 取得了许多成果和经验; 但是对于冲击载荷下饱和砂土动态特性的研究却很少, 有一些讨论爆炸密实饱和砂土地基的文献与此相关, 其中尤以现场实验居多. 这些实验主要是反映现场的经验关系, 而在实验室中进行机理方面的模拟实验研究却很少. W.A. Charlie 和 G.E. Veyera^[7,8] 曾用一维的冲击实验研究了饱和砂土液化的条件, 得到了饱和砂土达到液化时砂土颗粒的速度峰值、砂土骨架的应变峰值等, 他们在水平放置的管中进行了不排水实验, 这里重力效应并不重要, 对砂土结构在冲击载荷下的破坏和孔隙流体的渗流问题并没有研究. 为了研究饱和砂土在冲击载荷下结构的变形、破坏与渗流强化的耦合问题, 揭示其内在的机理, 我们设计和加工了一套落锤式模拟实验装置, 并进行了初步的实验研究.

1 实验装置与砂样

1.1 实验装置

我们曾用内径分别为 6 cm 的钢管、6~9.2 cm 的透明有机玻璃管和 11 cm 的玻璃钢管等, 内装饱和砂土试样, 作了对比实验, 发现在这些装置中, 受到足够强的冲击作用以后, 在饱和砂土的上表面, 都能观察到砂土中出现排水通道的现象. 为了便于观察砂土结构的破坏情况和边壁对渗流的影响, 选用透明有机玻璃管作为主要的实验装置. 有机玻璃管的内径为 9 cm, 外径 11.2 cm, 长度为 45 cm, 上下端各有一个法兰, 下端是完全密封的, 上端法兰开孔 (孔径为 6 cm), 法兰间用拉杆拉紧 (见图 1).

1.2 砂样

实验所用的砂样是较细的建筑用砂. 先用孔径 1.1 mm 的筛子将大的砂粒 (主要是砂砾石)

1998-06-25 收到第一稿, 1998-10-20 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金和中国科学院应用基础重点研究项目资助项目.

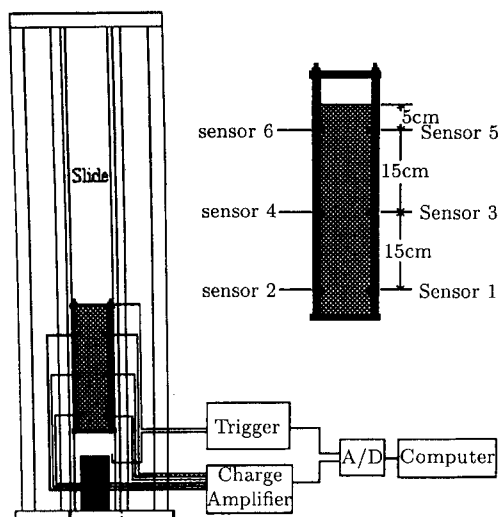


图 1 实验装置

Fig.1 Experimental setup for examining structural change in saturated sands cylinder upon impact

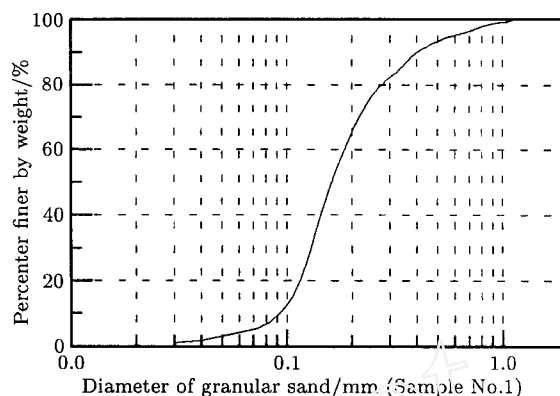


图 2 砂样 1 的粒径级配

Fig.2 Size grading of sand sample No.1

筛掉, 再通过标准检粒筛进行粒径的分级, 粒径级配见图 2(砂样 1), 其它的主要参数为: 有效粒径 $d_{10} = 0.09 \text{ mm}$, 不均匀系数 $i = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 2.0$, 最大孔隙比 $e_{\max} = 0.65$, 最小孔隙比 $e_{\min} = 0.44$, 干砂材料的比重为 $\gamma_s = 2.62 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. 在静水压头作用下, 砂样定常渗流的最大渗透系数为 $k_{\max} = 4.72 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, 最小渗透系数为 $k_{\min} = 2.46 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.

我们采用的装砂方法是先将管内装满水, 在管的上端放一个铝箔制作的多孔凹形筛 (孔径 $1.5 \sim 2 \text{ cm}$), 筛底浸没在水中, 慢慢向筛内加入饱和砂土 (砂样浸泡在水中一个月以上), 始终使筛内保持有饱和的砂土. 这样的装砂方法有两个优点: (1) 保证了实验中砂样的完全饱和, 不易使空气随砂粒进入管中; (2) 得到的砂样密度分布较为均匀. 对砂样进行测量, 其孔隙比为 $e = 0.62$, 相对密度 $D_r = 14.3\%$, 比重 $\gamma = 2.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

2 实验现象与定性测量结果

为观察饱和砂土受冲击载荷时的渗流和破坏现象, 将装好砂样的有机玻璃管放入滑道, 在一定高度上将砂样自由落下, 地面有一表面平整的铁块 (质量 20 kg , 厚度 28 cm), 撞击时就会产生一压缩波在饱和砂土中自下而上传播. 变换砂样的下落高度, 即可调节冲击载荷强度.

实验中我们注意到, 当竖直下落高度在 15 cm (折算的冲击速度为 1.7 m/s) 以上时, 发生下面三类典型现象: 1) 在透明有机玻璃管的侧面, 发现饱和砂土的结构中出现了横断裂纹的现象, 作者尚未见到对这一现象有过报导的文献; 2) 在上表面也可看到渗流过程中形成的排水通道口; 3) 从透明有机玻璃管的侧面还可以观察到砂面的沉降.

通过观察和测量可知: 饱和砂土受到冲击后约 20 s 左右, 砂土结构内就出现水平横向的裂纹, 最上面的大裂纹距砂土上表面 3 cm 左右, 大裂纹间的间距在 $2 \sim 3 \text{ cm}$ 左右 (见图 3(a)). 大裂纹持续的时间在十到几十秒不等. 裂纹张开的厚度也不等, 最大的可张开 4 mm . 图 3(b) 给出了一条大裂纹的张开与闭合随时间的变化. 横断大裂纹的消失分两种情况: 1) 裂纹面以上

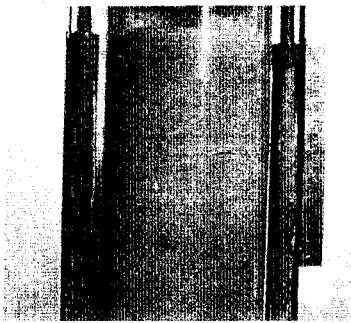


图 3(a) 冲击后出现的横向裂纹

Fig.3(a) Horizontal cracks in saturated sands

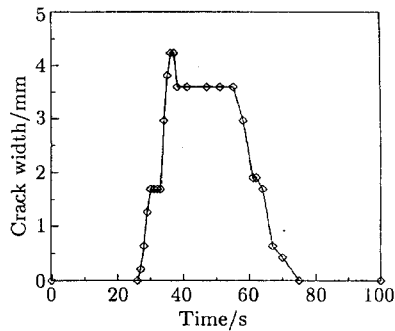


图 3(b) 横向裂纹的张开与闭合

Fig.3(b) Opening and closing of a horizontal crack

的砂土颗粒逐渐下落; 2) 在裂纹的某个位置处, 水突然向上涌出, 裂纹上层砂土很快下降。

从管的上方观察砂土表层的渗流现象, 在冲击后 5s 就能看到砂土表面逐渐渗出一薄层水, 砂面同时沉降, 10 多秒后, 在砂面上开始出现一些小的排水通道口 (排出的以水为主), 携带较细的砂粒形成直径在 0.5 cm 左右的小鼓包 (见图 4(a)), 接着在砂面的某个部位 (一般是在管的中央, 而不是管壁) 出现了大的排水通道口, 水夹带着大量的砂土向上表面涌出, 持续时间在十至几十秒的量级上。随着砂面的下降, 排水通道口逐渐看不清楚, 但从侧面仍能看到砂面的沉降, 表面水层逐步增厚, 但砂面下降速度明显低于先前出现大排水通道口时的速度。待砂面不再沉降, 上层水中的漂浮颗粒逐渐沉淀后 (水层厚度约 1 cm), 吸出上表面的水 (尽量不扰动砂面), 发现在出现过排水通道的位置有较大的鼓包 (见图 4(b)), 较大的鼓包中央还会有些凹陷, 鼓包的高度和直径各不相同, 间隔也并不规律, 最大鼓包高度 0.3 cm, 半径 2 cm, 有的鼓包连在一起, 通常情况下, 有管的中央出现鼓包的机会很大, 但有时也会出现在边壁处。

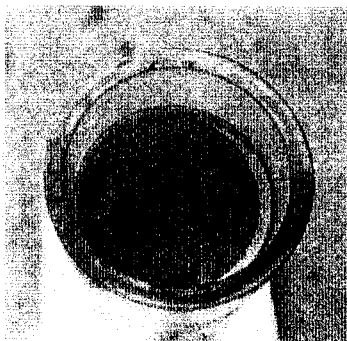


图 4(a) 纵向排水形成的表面小鼓包

Fig.4(a) Channeling and non-uniform seepage

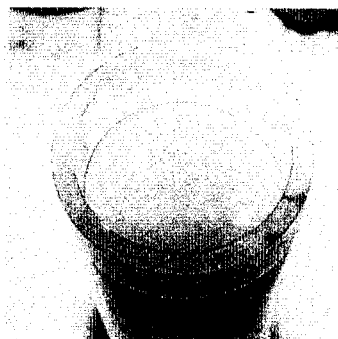


图 4(b) 渗流较快时形成的表面大鼓包

Fig.4(b) A large bubble

总结上述实验现象, 可以得到下面几点定性规律:

(1) 冲击载荷下饱和砂柱结构中会出现横向断裂, 在某几个截面上出现比较明显的横贯整个截面的裂纹 (一般出现 3 条), 而没有横贯整个截面的裂纹却时隐时现, 总裂纹数可达 6 条 (包括横贯整个截面和没有横贯整个截面的);

(2) 横断裂纹之间的间距一般在 2 ~ 3 cm 之间;

(3) 裂纹出现的时间是在冲击后约 20s 左右, 张开到闭合的时间为几十秒;

(4) 冲击载荷下饱和砂土液化后的渗流不是均匀的, 砂土中会出现纵向排水通道, 出现的时间是 10s 左右, 持续时间为几十秒, 各个通道口的半径不同, 最大的排水通道一般在管的中央.

3 几个重要参数对实验现象的影响

由于饱和砂土是不均匀的松散结构, 故各种条件的控制较为困难. 我们先后对不同粒径级配的砂土, 不同的冲击落高, 以及用不同直径的圆管作了对比实验, 得到了一些定性的结论.

(1) 砂样的落高: 将砂样分别提高到 35 cm, 30 cm, 20 cm, 15 cm, 10 cm, 5 cm, 2 cm 处落下, 冲击速度按自由落体计算分别为: 2.6 m/s, 2.4 m/s, 2 m/s, 1.7 m/s, 1.4 m/s, 1.0 m/s, 0.6 m/s. 一般地, 下落高度大于 15 cm 时, 会出现上述横断裂纹和纵向排水通道两种现象, 下落高度小于 10 cm 时, 则不会出现横断裂纹的现象. 落高越高, 出现的横向裂纹数目就越多; 反之, 落高越低, 出现的裂纹数目也越少. 落高并不明显影响裂纹间的间距, 实验中, 裂纹间的间距基本上都在 2~3 cm 左右. 较小的落高 (大于 0.5 cm) 就可出现排水通道. 落高对砂样沉降有较大影响, 落高越高, 砂样的沉降量就越大, 但不是成正比例关系, 沉降量有一最大值.

(2) 粒径级配: 除了用前面提到的砂样 1 外, 我们还对另外三种砂样 (砂样 2, 3 和 4) 做了定性实验, 这些砂样的粒径级配见图 5(a), 图 5(b) 和图 5(c), 其它参数见表 1. 饱和砂土的粒径越大, 出现横断裂纹所需要的冲击载荷也越强, 而且比小粒径的饱和砂土出现裂纹的时间要早, 裂纹持续时间较短 (砂样 2 的持续时间不到 5 s), 排水也很快.

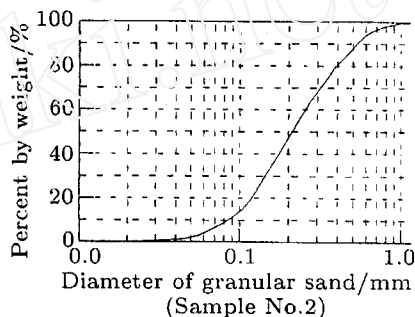


图 5(a) 砂样 2 的粒径级配

Fig.5(a) Size grading of sand sample No.2

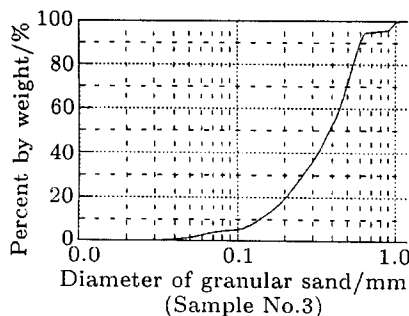


图 5(b) 砂样 3 的粒径级配

Fig.5(b) Size grading of sand sample No.3

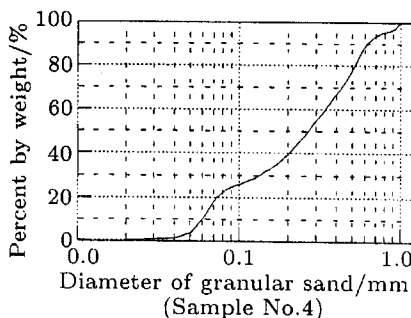


图 5(c) 砂样 4 的粒径级配

Fig.5(c) Size grading of sand sample No.4

此外, 我们还对级配比较均匀的砂样进行了对比实验, 砂样的粒径级配及其它参数见表 2. 通过实验可知, 这些砂样在受到冲击载荷时 (落高低于 40 cm), 都不出现横向裂纹, 而纵向的排水通道也很细, 基本可认为是在整个表面上均匀分布的, 只是渗流速度不断变化而已. 待砂面

不再沉降后, 从砂样上表面也看不到鼓包. 这说明砂样粒径级配越好, 砂土就越容易出现前面所述的现象 (包括横向裂纹和纵向排水通道); 反之, 粒径级配越差 (粒径分布范围小), 就越不易出现裂纹等现象.

表 1
Table 1

Sand samples	Effective diameter of particles $d_{10}(\text{mm})$	Maximum ratio of void	Minimum ratio of void	Maximum coefficient of permeability ($\times 10^{-4} \text{ m/s}$)	Minimum coefficient of permeability ($\times 10^{-4} \text{ m/s}$)	Density of sand material ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)
No.2	0.084	0.58	0.42	6.4	1.7	2.3
No.3	0.13	0.70	0.50	3.8	1.6	2.5
No.4	0.06	0.61	0.38	0.73	0.43	2.5

表 2
Table 2

Sand samples	Range of size particles (mm)	Density of sand material ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	Maximum ratio of void	Minimum ratio of void
No.5	0.63~0.40	2.6	0.83	0.56
No.6	0.40~0.315	2.63	0.79	0.58
No.7	0.315~0.15	2.70	0.89	0.62
No.8	0.15~0.10	2.82	0.97	0.69

若将管中分层装入两种粒径的砂样, 则观察到的实验现象为: (a) 上面的砂样粒径大下面的粒径小时, 不出现排水通道和裂纹, 砂面会发生沉降; (b) 上面的砂样粒径小下面的粒径大时, 在两种砂样的分界面上, 会出现短暂的含水层, 很快会在某个位置发生失稳, 形成较大的排水通道, 且很快消失. 出现上述非均匀的失稳现象, 可作如下解释: 在砂样中的渗透性发生突然变化而且下面的渗透系数比上面的大的情况下, 处于渗透性分界面以下的砂土颗粒沉降较快, 而分界面以上的砂土颗粒沉降较慢, 故从下面向上渗透的水就会在渗透性发生突然变化的分界面处累积, 形成看得到的含水层. 由于含水层上面的砂土颗粒继续沉降, 而这种沉降在整个横截面上并不均匀, 在沉降较慢的某一位置处会突然形成较大的排水通道, 含水层中的水沿此通道很快排出. 分界面以上的砂土很快沉降, 重新与下面的砂土连接起来.

(3) 管径大小: 我们采用了不同内径的透明有机玻璃圆管来验证管径和边壁对实验现象的影响, 圆管的内径分别为: 5 cm, 6 cm, 8 cm, 9 cm. 根据实验, 管径对纵向排水通道和横向裂纹等现象影响不大, 不同内径的圆管边壁的影响与不是很明显, 只是相对来说用较细的管时, 在边壁处出现排水通道的机会多一些.

(4) 含弱透水层的影响: 为了验证砂样中含有薄弱透水夹层 (渗透性较差) 对渗流和结构破坏的影响, 我们在装砂过程中有意地在某些位置造成由细砂粒构成的薄薄的弱透水夹层. 一般来说, 在这些弱透水层的位置都会有横向裂纹, 有的裂纹在持续较长时间后才逐渐消失.

(5) 冲击次数: 将砂样从某一高度落下, 待砂样中渗流结束, 砂土颗粒不再沉降, 再次将砂样提起到原来的高度, 重复上次的过程. 这样反复多次, 观察发生的现象. 等二次冲击后, 在第一次形成的大裂纹处, 往往再次出现裂纹. 随着冲击次数的增加, 裂纹越来越窄, 直至不再

出现. 各次冲击引起的砂面沉降量随冲击次数的增加越来越小, 逐渐至没有明显的沉降.

4 实验现象的初步分析与解释

对前面所述的饱和砂土在落地冲击载荷作用下发生的结构断裂和渗流强化的实验现象和大致过程, 我们提出如下的定性解释.

当饱和砂土受到冲击载荷后, 短时内的加卸载作用使砂土骨架结构发生不可恢复的变形, 从而使得整个饱和砂土体系中的应力发生转移, 砂土骨架的有效应力减小而孔隙水压力增大. 砂土颗粒在重力作用下逐渐下落, 骨架的组织结构重新排列; 孔隙水则在超孔隙水压力作用下向上渗透. 由于砂土颗粒有一定的级配, 初始的饱和砂土砂样不可避免的存在着某种程度的不均匀性, 在砂土颗粒较细的位置透水性较差, 也就是说其渗透系数较小; 反过来, 在砂土颗粒粗的位置渗透系数较大. 砂土结构中出现横断裂纹的现象很可能是渗流过程中孔隙水与砂土颗粒运动的一种失稳现象. 比如, 在冲击液化后的砂样中, 砂土颗粒粗的位置上, 孔隙水渗流的速度快, 由于粘性的影响, 根据 Stokes 定律可知, 孔隙水流动所能带走的砂土颗粒粒径就大, 小于某一粒径的颗粒将被带走; 而在砂土颗粒细的位置, 孔隙水渗流的速度慢, 孔隙水流动所能带走的砂土颗粒粒径就相对较小, 孔隙水从其他位置携带至此的细颗粒有些不能被带走. 这样, 在初始细颗粒多的位置处, 在渗流过程中细颗粒越来越多, 而初始颗粒较粗的位置, 细颗粒却越来越少, 砂土结构中逐渐出现了含细颗粒较多的夹层. 这些夹层相对来说透水性较差, 是一种弱透水层. 因此, 饱和砂土结构的渗透性随位置的不同, 出现了强、弱间隔的分布. 如果确实存在某种失稳机制, 那么这种间隔可能与某个 (或某几个) 扰动的频率或波长有关. 经过一定的时间, 在这些弱面处逐渐积聚了渗透向上的孔隙水, 出现了水层. 当这些含水层发展到与管壁相交时, 就是我们透过有机玻璃管壁观察到的砂土结构中的横向裂纹. 随着渗流的进一步强化, 弱面处孔隙水的积累越来越多, 我们就可观察到横贯截面的大裂纹的扩张. 由于大裂纹的上方, 饱和砂土是悬浮在裂纹中的水上的, 随着孔隙水的逐渐排出, 在重力作用下, 砂土颗粒不断下落并逐渐将裂纹填满, 这是裂纹闭合的第一种情况; 裂纹闭合的第二种情况是由于裂纹中各处的砂土颗粒下落不均匀, 在下落较快的某个位置逐步失稳, 孔隙水聚集该处, 很快沿结构不稳定的路径形成了大的排水通道, 孔隙水沿排水通道涌出, 裂纹与通道很快闭合.

孔隙水在排出过程中, 由于渗流的不均匀性, 水沿砂土结构较弱的方向逐渐连通而形成了排水通道. 而由于孔隙水的粘性影响, 将不断携带较细的砂土颗粒向上流出, 这就是我们在上表面看到的涌砂现象. 从砂土的上表面看, 排水通道携带出来的砂土颗粒形成了一个个小鼓包 (小砂丘), 排水通道位于这些鼓包的中心. 渗流结束后, 由于排水通道的闭合而使鼓包中心有些凹陷.

要说明的是在整个过程中, 饱和砂土的液化渗流与结构破坏是相互耦合在一起的: 一方面渗流使得结构发生破坏; 另一方面破坏了的结构进一步强化了渗流.

5 结 语

冲击载荷下, 饱和砂土中会出现纵向排水通道和横断裂纹的现象. 这些现象与砂样的性质、冲击载荷的强度等都有关系. 对这些现象的合理解释, 具有对工程的指导意义. 但是要完全从机理上阐明这些现象, 还必须作更系统的实验, 对砂土结构在冲击载荷下的变形、破坏及渗流的发生、发展和强化等进行研究, 真正把握其本质的规律, 建立合理的理论分析模型.

参 考 文 献

- 1 Seed HB. Soil liquefaction and cyclic mobility evolution for level ground during earthquakes. *J of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1979, 105 (GT2)
- 2 Finn WDI. Liquefaction Potential Developments Since 1976. International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 1981
- 3 Housner GW. Liquefaction of Soil during Earthquakes. Washington DC: National Academy Press, 1985. 73~82
- 4 Andress VH, Dobry R. The Behavior of Undrained Contraction Sand and Its Effect on Seismic Liquefaction Flow Failures of Earth Structure. (A Partial Requirement for the Degree of Doctor of Philosophy). RPI, Troy, New York, 1988
- 5 Mohamad R, Dobry R. Evaluation of Seismically-induced Liquefaction Flow Failure of Earth Dam. Research Report No CE-85-1, Department of Civil Engineering RPI, Troy, New York, 1985
- 6 谢定义. 饱和砂土液化的若干问题. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 90~98 (Xie Dingyi. Some problems about the liquefaction of saturated sand. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, 14(3): 90~98 (in Chinese))
- 7 Charlie W A. Veyera GE. Explosive induced porewater pressure increases. Proceedings of the 11th Inter Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 1985. 997~1000
- 8 Veyera GE, Charlie WA. Liquefaction of shock loaded saturated sand from soil dynamics and liquefaction. Cakmak AS ed. Computational Mechanics Publications. Elsevier Science Publisher, BV, 1987. 205~219
- 9 Byron J Prugh. Densification of soil by explosive vibrations. *Journal of the Construction Division, ASCE*, 1963, 89(CO1): 79~100

EXPERIMENTAL STUDY ON PERMEABILITY AND SETTLEMENT OF SATURATED SAND UNDER IMPACT LOADING¹⁾

Zhang Junfeng Meng Xiangyue Yu Shanbing Tan Qingming Zheng Zhemin
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract An experimental study on the deformation and filtration of saturated sands under impact loading is carried out by examining the behavior of a saturated sand column dropping to the ground. The longitudinal drainage pathways and horizontal cracks in the skeleton of saturated sands are discovered. By means of analyzing the images, the phenomena (Occurring in sand sample No.1) can be summarized as follows: (1) Some horizontal cracks cross the full sections, generally, the number of these cracks is three. Some small horizontal cracks non-crossing full sections occur also in sometimes. The total number of the cracks is not more than six. (2) The interval between two cracks is 2~3 cm. (3) The time is about 20 s when the cracks appear. The cracks can last several tens seconds. (4) The seepage of saturated sand after impact-induced liquefaction is nonuniform. The longitudinal drainage pathways occur at about 10 s. The radiuses of the longitudinal drainage

Received 25 June 1998, revised 20 October 1998.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China and the Chinese Academy of Science.

pathways are difference. The maximum drainage pathway occurs in the center of the sand column. The factos which may affect these phenomena are studied by means of comparative experiments, such as changing drop-height, or changing the distribution of sand samples. At last, a qualitative explanation of the above phenomena is proposed.

Key words saturated sand, impact, permeability, crack

www.cnki.net