

固态水膜对土中力链传递的影响机理

段晓梦^{1,2}, 邵龙潭^{1,2}

(1. 大连理工大学 大连工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116023; 2. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116023)

摘要: 土骨架所承担的荷载是经由力链传递的。当颗粒直接接触时, 力链中的荷载直接由粒间作用力而传播。但对于具有吸附性的岩土材料, 则应审慎考虑土水相互作用对土骨架承载机理的影响。通过总结土中吸附水的性质, 将具有类固态性质的吸附水定义为固态水, 明确了固态水膜所引起的水化力的定义及其作用机理, 进而详细分析了土中力链的传递机理: 当颗粒被固态水膜所包裹时, 力链构型为“颗粒-固态水-颗粒”形式, 此时颗粒并非直接接触, 因而力链中的荷载是经由固态水膜所提供的水化力在粒间传递的; 若荷载足够大且边界约束严格, 则可将粒间固态水膜完全挤出以实现颗粒直接接触, 此时力链构型为“颗粒-颗粒”形式, 力链中的荷载即由实际粒间接触压力来传递。若土的吸附能力较强且含水量较高, 虽然整个加载过程中力链会不断变化与重构, 且伴随部分粒间吸附水的挤出, 但当颗粒接触点在力链重构中分开时, 原本被挤出的粒间固态水膜会迅速恢复, 进而继续影响力链的后续变形与重构。考虑到固态水膜的润滑作用, 显然该作用机理是土体湿摩擦强度始终低于干摩擦强度的原因之一。

关键词: 吸附水; 固态水; 力链; 水化力; 粒间力; 摩擦

中图分类号: TU973.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)06-0905-04

The effect mechanisms of solid water layer on the force chains in soils

DUAN Xiaomeng^{1,2}, SHAO Longtan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 2. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: The load carried by the soil skeleton is transmitted in soils by force chains. If particles contact each other directly, the load in force chains is transmitted via inter-particle pressure among soil particles. However, for the adsorptive geomaterials, the solid-water interactions should be taken into account when analyzing the bearing mechanisms. In this work, after reviewing the properties of adsorbed water, the part of it which acts as semi-solid is defined as solid water, and then the definition of hydration force due to solid water and its effects on inter-particle force are illustrated. After that, the force chains in soils are analyzed considering the existence of solid water layer: if particles are wrapped by solid water layer, the force chains are in the form of “particle-solid water-particle”, so particles are indirectly contacted and load is transmitted via hydration force; If the load is large enough and the confinement is rigid enough, the inter-particle solid water could be extruded to realize the direct inter-particle contact, so the force chains are in the form of “particle-particle” and the load is transmitted via real inter-particle pressure. If a soil is strong adsorptive with higher saturation degree, although some inter-particle solid water could be extruded in the process of changing and reforming of force chains, it will recover immediately after the contact points are separated, which could affect the reforming of force chains during the whole loading process. Considering the lubrication due to solid water, it is obvious that the existence of solid water layer in force chains is a key reason to make the wet friction strength always lower than the dry friction strength.

Key words: adsorbed water; solid water; force chain; hydration force; inter-particle force; friction

土是自然界中广泛存在的颗粒物质, 是由多种组分所构成的复杂体系, 具有明显的离散性和随机性。其中, 矿物颗粒是土体固相的核心组成, 其堆积而成的结构可称为颗粒骨架^[1]。如果相邻矿物颗粒相互接触, 则可形成诸多强度迥异的力链,

由几个至十几个颗粒组成, 并相互交织构成非均匀的网络贯穿于土中, 其是土骨架传递外荷载的途径, 也是土力学研究的主要矛盾^[2]。在整个受荷、加载过程中, 力链网络会不断发展演变、断裂和重构, 并对整个加载过程中的土体力学行为

收稿日期: 2019-04-06

修改稿日期: 2019-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479023); 国家留学基金资助项目(201706060154)

第一作者: 段晓梦(1986—), 男, 博士生, 主要从事非饱和土力学研究。E-mail: xmd2132@126.com

产生影响^[3]。

根据力链的定义可知,对于单纯由颗粒所构成的堆积结构而言,力链所承担的荷载是经由颗粒接触产生的粒间相互作用力所传递的。然而,天然土是多种组分所构成的非饱和孔隙颗粒材料,即使处于常温常态下,土也可以从空气中吸附水分子并将其物理固着^[4]。诸多研究成果表明,土颗粒表面吸附水的结构与物理特性都与重力水存在差异^[5]。不难想象,不同的水分子结构决定了水的性质差异,其会对诸多岩土工程问题产生影响,诸如渗流、扩散、冻融、徐变、松弛、强度、膨胀和固结等^[6]。

当前,针对土水相互作用,虽然颗粒物质力学中已考虑了液桥力的影响^[2],但关于吸附水的作用机理却涉及不多。因此,本文致力于分析固态水对土中力链的影响:首先简介吸附水的性质,并将之定义为固态水,进而阐明颗粒表面所覆盖的固态水膜对力链传递的影响机理。分析表明:固态水膜具有一定强度,能够产生可观的水化力,因而能够与颗粒一起承担并传递荷载,意味着土中力链的构型是“颗粒-固态水-颗粒”,因此,力链中传递的荷载是经由水化力在颗粒间传播。若粒间固态水可以在适当条件下被挤出,则颗粒可以实现直接接触,从而出现真实的“颗粒-颗粒”形式的力链。此外,粒间固态水膜还能润滑粒间摩擦,即使部分固态水能被挤出,但在力链重构过程中可以不断地迅速恢复,从而在整个加载过程中都对力链变化产生影响,使得土体湿摩擦强度始终低于干摩擦强度。

1 固态水的定义与性质

由于部分吸附水与土骨架之间的电化学相互作用力非常强,以至于呈现固体或者半固体的性质,其能与土骨架一起承受和传递荷载^[7-8]。因此,将这部分孔隙水定义为固态孔隙水;与之相对,将其余仍呈现液体性质且不能传递荷载的孔隙水定义为液态孔隙水^[1]。

当前,根据对吸附水性质的不同理解,存在有两种代表性的吸附水模型:①类固态模型(类冰模型);②二维流体模型^[5]。两种固态水模型的主要区别在于抗剪强度:类固态模型认为,吸附水具有远大于液态水的强度,可以同时抵抗正应力和剪应力;但二维流体模型认为,吸附水只能一定程度上抵抗正应力,但承受剪应力时其抗剪强度甚至比液态水更低,因为矿物表面约束的影响,

使得吸附水分子间可形成的氢键数量少于常态水。但两种模型均认同:吸附水的法向强度远高于液态水^[5]。这就意味着,吸附水的强度模量介于重力水和固体颗粒之间^[9],使之足以与土骨架一起承担并传递荷载。大量试验数据表明,吸附水的真实性更符合二维流体模型^[5]。而较新研究表明,吸附水不仅能够提供水化力^[10-11],且能带来显著的润滑作用^[11-12],可见二维流体模型比类固态模型更为合理。

显然,土中部分水的性质已被土水相互作用而改变,因此,将固态孔隙水视为独立相,可以详细分析土中的固态水膜对土体力学性质的影响机理。

2 固态水引起的水化力

紧邻颗粒表面的吸附水膜受到颗粒的强力吸附,使得有序排列的水分子有能力抵抗挤压以避免被挤出,因此,当两个被吸附水分开的极性表面间距小于 3 nm 时,其间会出现强大的短程斥力,称之为水化力(hydration force)^[11-13],其广泛存在于黏土、矿物甚至玻璃中^[10]。对于水溶液中的亲水表面而言,水化力是一种单调斥力,其大小与表面吸附能力及表面基团种类有关^[14]。也就是说,对于具有较强亲水性的矿物表面,很难使具有较厚和较强吸附水层的两颗粒相互迫近,亦即难于使两颗粒间的吸附水层完全挤出从而实现颗粒与颗粒的直接接触。鉴于水化力的存在,可认为两个亲水表面是由吸附水层所隔开的。

假设一个微小的水箱中仅含一个土颗粒(设水压均匀并忽略重力),如图 1(a)所示。起初,在仅受水压而无外荷载时,土颗粒被固态水膜所包裹,处于类悬浮状态,因此,颗粒与缸底并非直接接触,而是由固态水膜所隔开。假如对颗粒施加外力 F ,随着 F 增大,则接触点间的固态水膜会被渐渐挤出。由于固态水膜可以提供可观的水化力,因此,在固态水膜挤出的过程中,外力 F 是由固态水膜提供的水化力 F^H 传递至土颗粒的;与此同时,固态水膜仍将水压强传递至颗粒表面,因此,在固态水膜被彻底挤出之前,土颗粒的受力状态如图 1(c)所示。当外力 F 超过固态水膜所能提供的水化力最大值时,则接触点间的固态水膜会被彻底挤出,从而实现颗粒与缸底的直接接触,如图 1(b)所示。此时,在直接接触点处,水压强会引起压强接触压力 u_w^c ,而外力 F 则会引起相应的外力接触压力 F^c ,则土颗粒的受力状态如图 1(d)所示。显然,虽然图

1(c)和(d)所示的平衡状态类似, 但两种情况所含的接触力的物理本质存在明显区别。

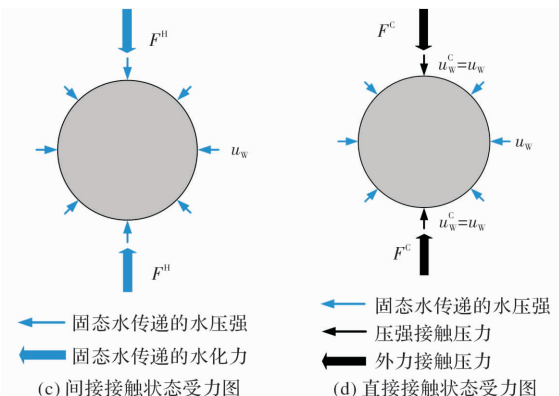
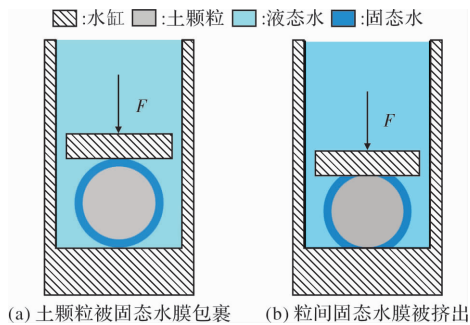


图 1 固态水膜对土颗粒接触性质的影响机理示意图

Fig. 1 Single soil particle-tank system with constant water pressure and non-gravity

3 固态水膜对力链传递的影响机理

根据图 1 可知, 当土颗粒被固态水膜包裹时, 颗粒间并非直接接触, 因此, 在粒间固态水膜被彻底挤出前, 力链中的荷载是经由水化力在粒间传递的。对于颗粒骨架而言, 由于固态水膜具有一定强度, 如果颗粒运动未被严格约束, 则粒间固态水可能难于被挤出: 当颗粒相互靠近至一定程度, 受固态水膜强度的影响(水化力的影响), 颗粒骨架将会自发变形重构以避免粒间固态水被挤出。

假设一个颗粒骨架如图 2(a)所示, 当其受到外力 F 作用时, 颗粒会首先相互趋近, 此时, 颗粒 A 的受力状态如图 1(c)所示, 即在颗粒靠近的过程中, 会出现粒间水化力来抵抗颗粒靠近, 同时粒间错动受到了固态水膜的润滑, 且各颗粒的侧向运动并未受到约束, 因此, 当颗粒相互接近至一定程度后, 各颗粒将自发向两侧运动以避免粒间固态水被挤出, 也就是说, 颗粒间的相互错动比相互靠近更容易。因此, 原颗粒骨架会自发变形重构, 当重构完成后, 颗粒已无法进一步移动, 随着外力 F 逐渐增大, 接触点间的固态水会被逐

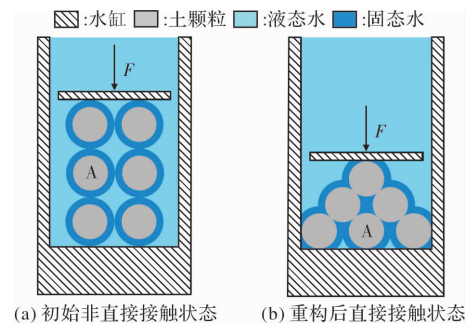


图 2 非严格侧限的力链重构示意图

Fig. 2 Particle skeleton with solid water bearing

external force without lateral restriction

渐挤出, 最终实现颗粒间的直接接触, 如图 2(b)所示。此时, 颗粒 A 的受力状态如图 3 所示: 由于颗粒 A 与相邻颗粒和缸底直接接触, 因此接触点处为接触压力 F^C 。

如果颗粒运动受到严格限制, 颗粒骨架就无法自由重构, 此时, 颗粒就只能不断相互接近, 直至粒间固态水被完全挤出。假设给予上述颗粒骨架严格的侧向约束, 如图 4(a)所示, 此时各颗粒由固态水膜相隔, 因此荷载 F 在粒间传递时, 是经由固态水膜所提供的水化力 F^H 来实现的, 因此, 两条力链中的粒间接触力如图 4(b)所示。当外力 F 不断提高时, 由于颗粒侧向运动受到限制, 因而颗粒骨架无法自由变形, 只能互相靠近, 直至接触点间的固态水都被挤出, 此时颗粒与颗粒及缸底都将直接接触, 如图 4(c)所示, 此时, 各颗粒直接接触, 荷载 F 在颗粒骨架中由粒间压力 F^C 直接传递, 则力链中的粒间接触力如图 4(d)所示。

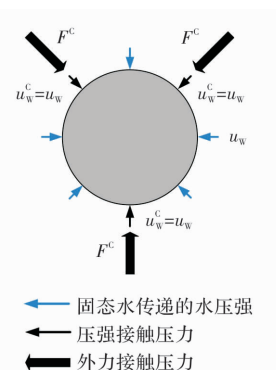


图 3 颗粒 A 受力状态示意图

Fig. 3 Illustration of the force equilibrium of Particle A

综上所述, 当土中存在固态水时, 颗粒间可能并非直接接触, 因此力链所传递的外荷载是经由固态水膜所提供的水化力来实现粒间过渡的。当荷载够大且外部约束条件适当时, 就能够完全挤出粒间固态水, 此时颗粒实现直接接触, 力链中的荷载直接由粒间接触压力来传递。

4 讨论：固态水膜对摩擦强度的影响

常温常湿环境下，常规试验所用的土试样中始终包含固态孔隙水，因此试验结果可能已经包含了固态水膜润滑作用的影响，尤其对于具有较强吸附性的黏土。如果试验具有如图4所示的严格约束，则试验过程中一些粒间固态水可能会被挤出。但对于吸附能力较强的黏土，可能需要极大的有效应力才能充分挤出粒间固态水，例如蒙脱土^[15]。然而，即使有效正应力增加至600 MPa，蒙脱土的湿摩擦强度仍然只是干摩擦强度的一半^[15]。由此可见，包裹土颗粒的固态水膜对于强吸附土的摩擦强度有着巨大影响。如果固态水膜在试验中始终存在，即便在某些瞬时，部分力链中的一些粒间吸附水可以被挤出，但颗粒表面的其余固态水膜会始终影响土中的力链重构。尤其在高饱和度时，当颗粒接触点在力链重构中分开后，原本被挤出的粒间固态水膜会迅速恢复，进而影响后续的力链变化。这正是湿摩擦强度始终低于干摩擦强度的关键原因之一。

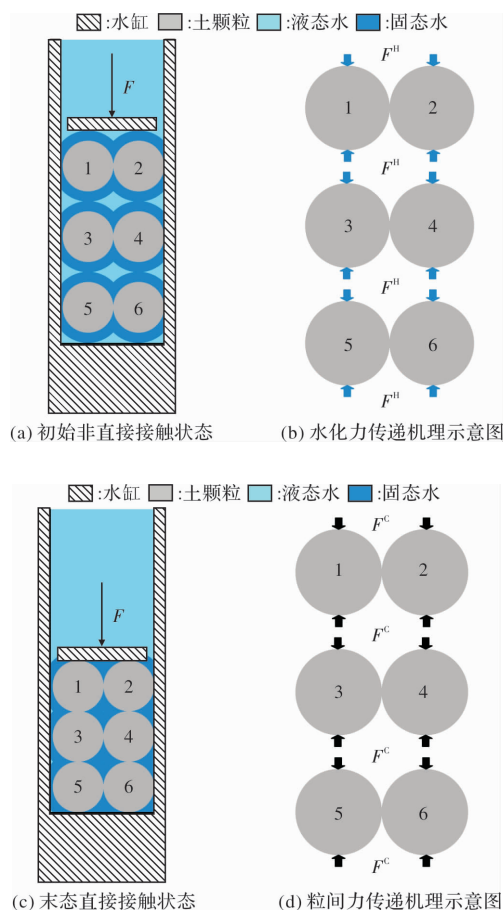


图4 严格侧限的颗粒骨架及力链传递示意图

Fig. 4 Particle skeleton with solid water bearing external force with lateral restriction

5 结论

(1) 固态水呈现固体或者半固体的性质，其能与土骨架一起承受和传递荷载，不仅能包裹并分隔土颗粒，更能提供显著的水化力。

(2) 当颗粒被固态水膜包裹时，力链呈“颗粒—固态水—颗粒”形式，此时力链中的荷载通过水化力在粒间传递；当荷载与约束条件适宜时，可将粒间固态水挤出并实现颗粒直接接触，此时力链中的荷载直接通过粒间接触压力传递。

(3) 固态水膜在力链变形与重构的过程中，会实时挤出或恢复，从而始终影响粒间接触点的摩擦性质，使得湿摩擦强度总是低于干摩擦强度。

参考文献 References

- [1] 段晓梦, 曾立峰. 非饱和土的承载结构与岩土广义结构性[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3103-3112.
DUAN Xiaomeng, ZENG Lifeng. Bearing structure of unsaturated soil and generalized structural properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(9): 3103-3112.
- [2] 孙其诚, 金峰. 颗粒物质的多尺度结构及其研究框架[J]. 物理, 2009, 38(4): 225-232.
SUN Qicheng, JIN Feng. The multiscale structure of granular matter and its mechanics[J]. Physics, 2009, 38(4): 225-232.
- [3] 孙其诚, 金峰, 王光谦. 密集颗粒物质的多尺度结构[J]. 力学与实践, 2010, 32(1): 10-15.
SUN Qicheng, JIN Feng, WANG Guangqian. The multiscale structure of dense granular matter[J]. Mechanics in Engineering, 2010, 32(1): 10-15.
- [4] OSIPOV V I. Nanofilms of adsorbed water in clay: mechanism of formation and properties[J]. Water Resources, 2012, 39(7): 709-721.
- [5] MARTIN R T. Adsorbed water on clay: a review[Z]. 196228-70.
- [6] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of Soil Behavior[M]. 3rd. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
- [7] SHAO L, ZHENG G, GUO X, et al. Principle of effective stress for unsaturated soils[C]// Conference 6th Interna Conference on Unsaturated Soils (UnSAT 2014), Sydney: Taylor & Francis, 2014.
- [8] SHAO L, GUO X, LIU S, et al. Effective stress and equilibrium equation for soil mechanics[M]. London: CRC Press, 2018.
- [9] ZHANG Z, CHENG X. Effective stress in saturated soil: a granular solid hydrodynamics approach[J]. Granular Matter, 2014, 16(5): 761-769.

(下转第924页)