

膨胀土崩解特性及其影响因素研究

赵悦岐

同济大学土木工程学院地质与水利工程系 上海 200092

【摘要】：膨胀土因富含蒙脱石等强亲水性黏土矿物，在降雨入渗与干湿交替气候条件下极易发生结构崩解与强度衰减，是诱发边坡失稳、路基沉陷及隧道围岩劣化的重要致灾介质。与常规黏性土不同，膨胀土的崩解表现出显著的水敏主导性与裂隙控制特征，其破坏过程本质上是基质吸力释放、晶层水化膨胀与孔隙气闭效应共同驱动的结构失稳过程。在此基础上，重点分析了物质组成、初始含水率、干密度、干湿循环及应力边界条件等关键变量对崩解特性的影响规律。结果表明，膨胀土的崩解行为受内在结构状态与外在水力环境的双重制约，呈现显著的非线性演化特征。未来应聚焦于微观损伤的定量表征与非饱和土多场耦合崩解模型的构建，为工程防灾提供理论支撑。

【关键词】：膨胀土；崩解机制；影响因素；干湿循环；基质吸力

DOI:10.12417/2811-0536.26.05.009

1 引言

膨胀土是世界上分布最为广泛的特殊土之一，在我国华中、西南及华南等地区更是广为发育，且与人口居住和经济活动密集区高度重叠。由于富含蒙脱石、伊利石等亲水性矿物，膨胀土具有显著的胀缩性、裂隙性和超固结性，对气候变化、人类活动等外部因素极为敏感^[1]。长期以来，膨胀土因其在水环境作用下易产生剧烈的体积变形与抗剪强度衰减，一直被视为复杂工程地基与边坡中的关键风险源。

在自然界降雨与蒸发交替的循环作用下，膨胀土反复经历吸水膨胀与失水收缩过程，土体内部逐渐发育并形成贯通的三维裂隙网络。当水分再次沿裂隙入渗时，土体结构将发生剧烈的解体、碎裂甚至整体剥落，这一散体化破坏现象即为崩解。崩解不仅意味着土体力学强度的急剧降低，更标志着结构性骨架的不可逆损伤，是诱发膨胀土工程边坡失稳与地基沉陷的直接诱因与内在演化机制。

尽管现有研究已从宏观试验角度对崩解现象进行了探讨，但针对多重环境因素的系统归纳及其内在耦合机制的统一认识仍相对滞后。本文以影响因素为主线，对膨胀土崩解特性的机制进行系统梳理与分析，旨在为防灾减灾提供理论依据。

2 膨胀土崩解的本质特性与力学机理

2.1 多重驱动的结构失稳机理

岩土体的崩解本质上是软岩或土体遇水后抗剪强度严重降低并导致结构破裂散体的过程。针对膨胀土这类富含亲水性矿物的特殊土体，其崩解机理受微观物理化学与宏观力学作用的共同驱动。

现有研究表明，导致崩解的三种主要破坏机理：

孔隙气体压缩产生的张应力、不均匀水化膨胀产生的附加应力，以及颗粒间胶结强度的衰退^[2]。

首先，膨胀土浸水后会出现表里不均匀膨胀，导致内部产生显著的不均匀应力，这是促使土体骨架碎裂解体的重要原因。

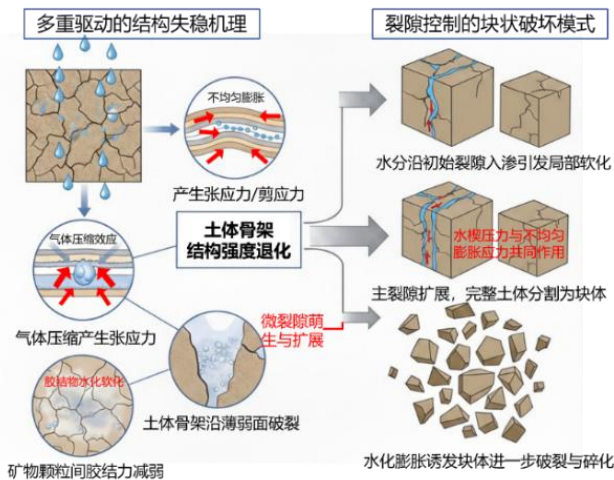
其次，当干燥的土体浸水后，水分迅速封闭表面孔隙引发“孔隙气闭效应”，导致内部气压急剧积聚，当局部气压产生的张应力超过土骨架的抗拉强度与颗粒间吸力^[6]，即发生气爆式破裂。促使土体骨架沿薄弱面破裂^[3-5]。

此外，膨胀土颗粒间存在的天然胶结物在水的作用下发生稀释、软化或溶解，进一步加速了土体结构的丧失与散体化^[7]。

2.2 裂隙控制的块状破坏模式

土体崩解的发生必须具备特定的边界与环境条件，包括水的存在、土体表面存在初始裂隙或易在水力作用下产生裂隙、结构浸水后产生不可逆损伤、颗粒间胶结物水稳性弱，以及存在不稳定的临空面。在这些要素的相互促进下，膨胀土的崩解表现出鲜明的裂隙控制特征。天然沉积或干缩产生的裂隙构成了水分优先入渗的优势通道，使得水流沿结构面发生集中扩散。

这一过程通常呈现出显著的阶段性演化特征：水分沿裂隙快速入渗并引发局部软化；随后，主裂隙在水楔压力与不均匀膨胀力的共同作用下加速扩展，将完整的土体分割为若干独立的块体；最终，分割后的块体在剧烈的水化作用下进一步膨胀破裂与碎化。这种受结构弱面切割控制的块状崩解模式，决定了膨胀土的破坏往往具有极强的突发性和空间不均匀性。



图：膨胀土多重驱动与裂隙控制崩解机理示意图

3 膨胀土崩解特性影响因素

膨胀土的崩解行为是土体内部结构状态与外部环境条件高度耦合作用的结果。

3.1 物质组成特征

土体的物质组成是决定其抗崩解性能的内在基础。黏土矿物的种类与含量直接决定了水敏性的强弱。蒙脱石含量越高的膨胀土，遇水后的晶层水化膨胀越剧烈，崩解速率通常越快。相反，有机质作为天然胶结剂，通过增强粒间胶结强度并利用疏水基团降低亲水性，对崩解起显著的抑制作用^[3]。

3.2 初始含水率

初始含水率通过改变基质吸力水平与孔隙气体状态，成为调控崩解剧烈程度的核心变量^[8]。当土体处于低含水率状态时，内部基质吸力极高，与外部水体形成巨大的水势梯度，水分入渗速率极快^[3]。这种瞬态的高速入渗极易封闭表层孔隙，致使内部空气无法逸出而被强烈压缩，形成孔隙气体封闭效应。急剧积聚的孔隙气压与膨胀应力相互叠加，最终导致土体发生爆裂式崩解，破坏迅速且碎化程度极高^[2,6]。当土体处于高含水率状态时，基质吸力较小，入渗驱动力减弱，水分入渗趋于缓慢；同时，由于部分膨胀势能已经释放，其遇水后的破坏多表现为表层的温和软化与缓慢剥落。

3.3 干密度

干密度对孔隙结构与膨胀势能的影响呈现出明显的延迟启动与强化破坏双重物理效应。对于低干密度土体，其内部孔隙较大，水分入渗快，但受限于松散的骨架，其产生的膨胀应力相对较小，崩解往往迅速发生但破坏力有限^[9]。反之，高干密度土体由于孔隙受压致密，水分入渗受阻，使得崩解启动时间显著滞

后；然而，致密土骨架内部储存着巨大的膨胀势能，一旦水分缓慢渗入并触发水化反应，在无侧限条件下多呈剧烈的大块状解体破坏；若处于侧限约束下，则可能仅发生局部软化而不完全崩解。

3.4 干湿循环

干湿循环是诱发膨胀土结构劣化的核心外部动力，本质上属于一种水力疲劳损伤的累积机制。在循环初期，每一次的胀缩变形都会在土颗粒接触面上产生微裂隙，导致胶结物逐渐疲劳断裂，孔隙结构趋于松散化。随着循环次数的增加，微裂隙逐渐扩展并连通形成裂隙网络，土体的整体渗透系数大幅提高，水分入渗更加迅速^[10]。前1~3次循环对土体结构的破坏最为显著，崩解速率急剧增加；而在经历3~5次循环后，内部结构损伤趋于饱和，崩解特性逐步演化至残余稳定状态。

3.5 水化学环境与 pH 值

孔隙水溶液的离子浓度与 pH 值通过改变微观电学平衡，进而调控宏观崩解行为。根据双电层理论，高浓度的盐溶液能够有效压缩黏土矿物表面的双电层厚度，降低渗透吸力，从而抑制晶层水化膨胀，在宏观上表现为减缓或抑制崩解。相反，低离子浓度的纯水则会显著增强水化作用。此外，极端偏酸或偏碱的 pH 环境可能诱发土体中天然胶结物（如钙质或铁铝氧化物胶结）的化学溶蚀，加速土骨架的结构性丧失。

3.6 温度与冻融循环

温度变化与相变过程对土体结构的物理损伤作用极为显著。持续的高温气候会加剧地表水分的快速蒸发，诱发土体产生更深、更宽的干缩裂隙，为水分入渗提供优先通道。而在寒冷地区，冻融交替引发的冰晶体积膨胀会在土体内部产生强烈的冰晶楔裂效应。冻融循环与干湿循环的叠加交替作用，会呈指数级加速膨胀土内部微裂隙的发育与贯通，导致土体抗崩解能力急剧下降。

3.7 应力边界条件

真实的工程约束效应对膨胀土崩解具有决定性的影响。传统的室内无侧限崩解试验往往会高估土体的破坏程度。在实际工程环境中（如深埋隧道围岩、路基深部），土体普遍承受着上覆荷载、三向围压或支护结构的强约束作用。这种侧限应力不仅能在宏观上有效抑制土体的体积膨胀、限制原生裂隙的张开，还能在微观上挤密孔隙，降低土体的渗透系数^[5]。因此，深部高应力状态下的膨胀土多表现为吸水软化膨胀而非彻底的散体化崩解；严重的崩解灾害主要集中在存在

于应力释放显著、缺乏有效约束的浅表层及开挖临空面的情况下。

3.8 影响因素的多场耦合机制

上述各单一影响因素并非孤立存在，而是互为因果、相互促进的动态平衡中。从岩土力学机理角度剖析，膨胀土的崩解是其内在物质结构与外在环境于多物理场耦合下的宏观力学响应。具体而言，土体的矿物成分、胶结类型及初始微观结构构成了其抗崩解能力的物质基础；而降雨入渗、蒸发失水及干湿交替等环境变化则是诱发结构失稳的外部动力。在崩解演化过程中，水分沿裂隙网络的入渗打破了土体内部原有的平衡状态，引发基质吸力场、湿度场与应力场的剧烈重分布。水敏性矿物的非均匀水化膨胀力与封闭孔隙气压力相互叠加，共同作用于土骨架；当合成的局部拉应力超过土颗粒间的粒间吸力与胶结强度时，土体即发生破裂与散体化。因此，膨胀土的崩解行为实质上呈现出“水分入渗—吸力衰减—应力调整—结构

损伤”的连续耦合演化特征。

4 总结与展望

4.1 总结

(1) 膨胀土崩解本质上是基质吸力释放、晶层水化膨胀与孔隙气闭效应共同驱动的结构失稳过程，宏观上呈现出受物质组成、初始含水率及干密度等内在因素非线性制约的“裂隙控制”特征。

(2) 干湿循环诱发的水力疲劳损伤是导致结构劣化的核心外部动力，而实际工程中的应力边界条件与水化学环境通过改变微观力学平衡与渗透特性，对土体崩解表现出显著的加速或抑制效应。

4.2 展望

尽管现有研究已从宏观层面揭示了各因素的影响规律，但室内试验多基于无侧限或静水边界条件下，难以反映工程现场的复杂工况。因此，未来的研究应基于非饱和土力学，引入损伤变量，建立考虑真实应力路径的动态崩解本构模型。

参考文献:

- [1] 叶为民,孔令伟,胡瑞林,等.膨胀土滑坡与工程边坡新型防治技术与工程示范研究[J].岩土工程学报,2022,44(07):1295-1309.
- [2] MORIWAKI Y.Causes of slaking in agillaceous materials[D].California:University of California,Berkeley,1975.
- [3] CARON J,ESPINDOLA C R,ANGERS D A.Soil structural stability during rapid wetting:Influence of land use on aggregate properties[J].Soil Science Society of America,1996,60(3):901-908.
- [4] TERZAGHI K,PECK R B.Soil Mechanics in Engineering Practice,2nd edition[M].New York:John wiley&sons,1967:52-65.
- [5] TERZAGHI K.Theoretical soil mechanics[M].Lon-don:Chapman and Hall,1951.
- [6] 张抒,唐辉明.非饱和花岗岩残积土崩解机制试验研究[J].岩土力学,2013,34(6):1168-1174.
- [7] 刘长武,陆士良.泥岩遇水崩解软化机理的研究[J].岩土力学,2000,21(1):28-31.
- [8] XIA D,ZHAO B Q,LIU D X,et al.Effect of soil moisture on soil disintegration characteristics of different weathering profiles of collapsing gully in thehilly granitic region,South China[J].PloS One,2018,13(12):e0209427.
- [9] 夏振尧,张伦,牛鹏辉,等.干密度初始含水率坡度对紫色土崩解特性的影响[J].水土保持学报,2017,15(1):121-127.
- [10] LIU W P,SONG X Q,HUANG F M,et al.Experimental study on the disintegration of granite residual soil under the combined influence of wetting-drying cycles and acid rain[J].Geomatics,Natural Hazards and Risk,2019,10(1):1912-1927.