

基于大三轴试验的丘陵山区填方路基填料剪切特性研究

马川义¹, 田明震², 张圣涛¹, 刘亚珍², 李超³, 杨波³

¹山东高速集团有限公司, 山东 济南

²山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

³山东高速潍坊发展有限公司, 山东 潍坊

收稿日期: 2026年8月16日; 录用日期: 2026年9月8日; 发布日期: 2026年9月18日

摘要

我国丘陵山区公路路基因地形复杂, 路基滑坡、沉降变形等灾害频发, 严重威胁公路安全运营。但进行边坡稳定性分析时, 经常由于填料粒径大、力学性质不易获取而影响计算结果。因此, 为了解决该问题, 针对丘陵山区常见的风化砂、含砾黏土以及角砾三类填料, 考虑围压与含水率的影响, 通过粗粒土大三轴剪切试验, 揭示了各自的剪切力学特性。结果表明: 承受加载时含砾黏土三轴试样产生明显的塑性破坏特征; 相同含水率条件下, 风化砂的黏聚力随含水率先增后减、内摩擦角单调递减, 存在最优含水率区间; 含砾黏土的黏聚力单调递减、内摩擦角先增后减, 试样峰值强度随围压升高呈线性递增。并由此给出了不同填料抗剪强度与含水率的相关关系。研究成果为丘陵山区公路路基稳定性分析及灾害防控提供试验支撑。

关键词

大三轴试验, 丘陵山区, 填方路基, 常见填料, 剪切特性

Study on the Shear Characteristics of Fill Materials in Hilly and Mountainous Areas Based on Large Triaxial Test

Chuanyi Ma¹, Mingzhen Tian², Shengtao Zhang¹, Yazhen Liu², Chao Li³, Bo Yang³

¹Shandong Expressway Group Co., Ltd., Jinan Shandong

²School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

³Shandong Expressway Weifang Development Co., Ltd., Weifang Shandong

Received: August 16, 2026; accepted: September 8, 2026; published: September 18, 2026

文章引用: 马川义, 田明震, 张圣涛, 刘亚珍, 李超, 杨波. 基于大三轴试验的丘陵山区填方路基填料剪切特性研究[J]. 土木工程, 2026, 15(9): 90-100. DOI: 10.12677/hjce.2026.159226

Abstract

The genetic terrain of highways in hilly and mountainous areas of China is complex, and disasters such as roadbed landslides and settlement deformations occur frequently, seriously threatening the safe operation of highways. However, when conducting slope stability analysis, the calculation results are often affected due to the large particle size of the filling material and the difficulty in obtaining its mechanical properties. Therefore, in order to solve this problem, considering the influence of confining pressure and moisture content, the shear mechanical properties of weathered sand, gravel clay, and angular gravel commonly used in hilly and mountainous areas were revealed through large triaxial shear tests on coarse-grained soil. The results indicate that triaxial specimens of gravel clay exhibit significant plastic failure characteristics under loading; Under the same moisture content conditions, the cohesion of weathered sand increases first and then decreases with moisture content, and the internal friction angle decreases monotonically, indicating the existence of an optimal moisture content range; The cohesion of gravelly clay decreases monotonically, and the internal friction angle first increases and then decreases. The peak strength of the sample increases linearly with the increase in confining pressure. Thus, the correlation between the shear strength and the moisture content of different fillers was given. The research results provide experimental support for the stability analysis and disaster prevention of highway subgrades in hilly and mountainous areas.

Keywords

Large Triaxial Test, Hilly and Mountainous Areas, Fill the Roadbed, Common Fillers, Shear Characteristics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国丘陵山区公路建设近年来快速发展,但受复杂地形地质条件及极端降雨气候影响[1],路基滑坡[2]、沉降变形[3]等灾害频发,严重威胁公路运营安全。路基填料的剪切力学特性是决定路基稳定性与抗滑能力的核心因素[4],丘陵山区填料多为岩石经物理化学风化形成的宽粒组产物,其颗粒组成、孔隙结构及水理性质差异显著,力学响应规律复杂,严重影响路基填料选型与质量控制。

丘陵山区公路路基工程中常用的填料是一种由土和石混合而成的岩土工程材料,这种混合物具有高度的不匀质性、非连续性、环境依赖性,粒径级配变化较大。Jalili 等[5]采用大型直剪试验对不同因素与土石混合料力学性质之间的关系进行研究,得到了各因素对土石混合料的剪切特性和变形机理等方面的影响规律。薛亚东等[6]利用室内大型直剪试验,研究水与土石混合体力学性能之间的关系,发现土石混合体应力-切向位移关系曲线表现可分为三个阶段,揭示了含石量和含水率与土石混合体抗剪强度之间的关系。Liu L 等[7]利用大型直剪试验研究不同粗颗粒含量的滑坡堆积体试样的剪切试验结果,分析了不同的剪切试验现象与粗颗粒含量的关系,认为土石混合体莫尔破坏包络线的截距应称为“等效黏聚力”。张宇辉等[8]采用大型直剪试验揭示了土石混填体抗剪强度随含石量(50%~80%)呈非线性增长规律,并通过强度折减有限元法验证了含石量梯度分布对边坡稳定性的提升作用。

路基在长期服役过程中持续遭受水、温度及荷载的影响,产生必然的物理及化学风化与分解,表现

为从角砾到风化砂再到黏土的风化过程。但目前的研究缺乏该方面的演化分析，难以反映丘陵山区路基的真实服役行为。为此，文章以丘陵山区风化过程中形成的风化砂、含砾黏土及角砾三类填料为研究对象，通过大三轴剪切试验，考虑围压与含水率的耦合影响，揭示三类填料的剪切破坏特征、剪切强度参数演化规律及内在作用机理，明确不同填料的强度控制因素，推荐抗剪强度值及与含水率的关系，服务工程设计与灾害防控。

2. 试验方案

2.1. 填料特性

山区填料在物理风化与化学风化的长期耦合作用下，形成了从角砾到黏土的宽粒组风化产物。因此本研究选取风化过程中具有代表性的三类产物风化砂、含砾黏土及角砾作为研究对象，通过颗粒筛分试验、击实试验与界限含水率试验，测定其基本物理力学参数。

(1) 颗粒筛分试验

试验所用填料如图 1 所示，其中含砾黏土的角砾质量分数为 10%。对烘干至恒重的填料试样进行颗粒筛分试验，确定各土样的颗粒级配特征及粒组质量分数。

通过筛分试验得到不同粒径土颗粒质量并绘制各土样颗粒级配曲线见图 2。



Figure 1. Soil samples with different fillers
图 1. 不同填料土样

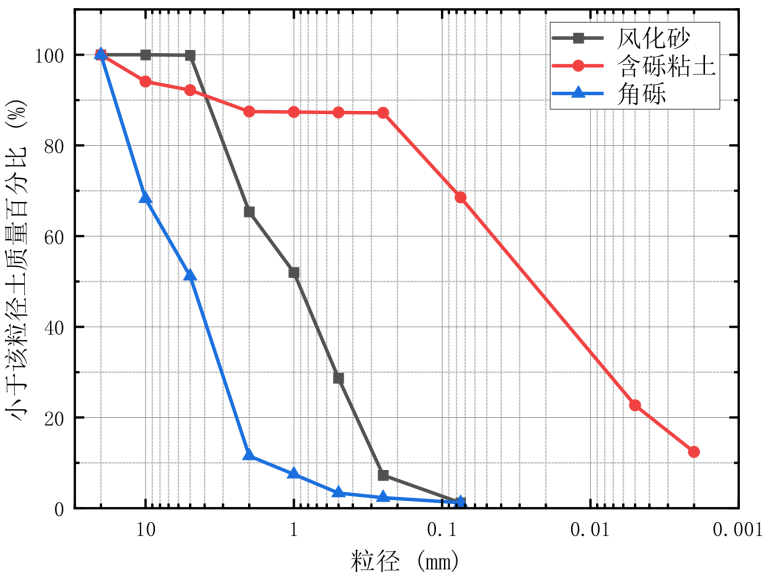


Figure 2. Particle size distribution curves of different soil samples
图 2. 不同土样颗粒级配曲线

由图 2 可知, 风化砂填料不均匀系数为 5.56, 曲率系数为 0.66, 含砾黏土填料不均匀系数为 2.07, 曲率系数为 0.71, 角砾填料不均匀系数为 4.67, 曲率系数为 0.86, 此三类填料均判定为级配不良。

(2) 击实试验

选用多功能电动击实仪, 利用内径 10 cm, 高 12.7 cm 小型击实桶开展击实试验并绘制干密度 - 含水率曲线见图 3。

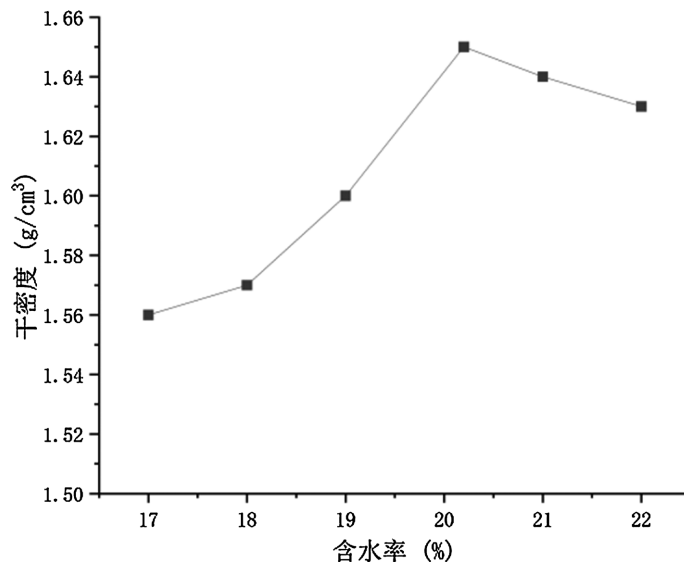


Figure 3. Compaction curve of gravel clay
图 3. 含砾黏土击实曲线

通过拟合计算可得含砾黏土最大干密度 ρ_{dmax} 为 1.65 g/cm³, 最优含水率 ω 为 20.2%。为保证结论准确度, 取多次试验结果取平均得到本研究所用角砾最大干密度 ρ_{dmax} 为 1.76 g/cm³。

2.2. 试验步骤

研究选用如图 4 所示的 DJSZ-100D 大型三轴试验机, 试样为直径 200 mm、高 400 mm 的圆柱形试件。

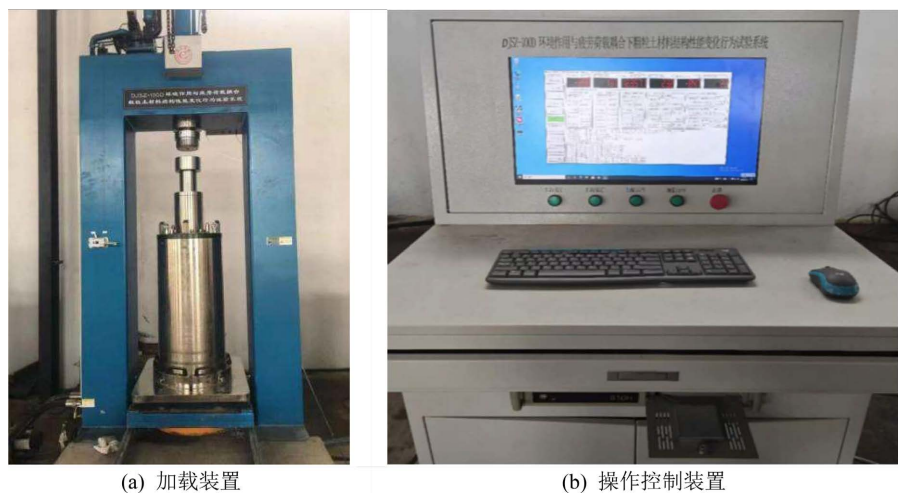


Figure 4. Triaxial testing instrument
图 4. 大三轴试验仪器

试验制样采用分层压实法控制填料密实度，试样分层压实，保证各层压实度 $K = 96\%$ 。因路基填料处于非饱和状态，故三轴试验采用了不固结不排水剪切(UU)方法，步骤如下：

- (1) 计算所需含水率需要干料质量与用水质量，均匀拌合后焖料 24 h。
- (2) 固定乳胶膜底部于底座，套入对开套筒，膜口外翻箍于套筒顶端，排尽膜与套筒内壁间气泡。
- (3) 分层填入填料并夯实，量测控制各层填筑高度。
- (4) 填筑完成后箍紧膜口，抽真空至孔隙压力达 50 kPa 后关闭，维持试样成形。
- (5) 将试样置入压力室注水，缓慢施加围压；待围压接近孔隙压力时打开排水阀释放孔隙压力，围压稳定后施加轴向荷载。
- (6) 大三轴试验采用应变控制加载，剪切速率取 2 mm/min，以出现峰值偏应力或轴向应变达 20%为破坏标准，实时采集轴向荷载、位移及体积变化数据。
- (7) 试验结束后排水、拆卸压力室，观察并记录试样破坏形态，清理后进行下一组试验。

2.3. 试验工况

如表 1 所示，三轴试验针对三类不同填料，考虑围压及含水率影响，开展不固结不排水剪切试验，共计 24 组试验，用于揭示三类填料的剪切特性及抗剪强度变化规律。

Table 1. Triaxial test scheme table

表 1. 三轴试验方案表

填料种类	含水率/%	围压/kPa	填料种类	含水率/%	围压/kPa
含砾黏土	10	200	风化砂	8	200
		300			300
		400			400
含砾黏土	20.2	200	风化砂	饱和	200
		300			300
		400			400
含砾黏土	饱和状态	200	角砾	0	200
		300			300
		400			400
风化砂	0	200	角砾	饱和	200
		300			300
		400			400

3. 试验结果

3.1. 应力 - 应变曲线

图 5 为不同填料在含水率变化条件下的应力 - 应变曲线，其中，图 5(a)，图 5(b)为压实角砾的剪切应力 - 应变曲线，图 5(c)~(e)为压实风化砂在不同含水率下的剪切应力 - 应变曲线，图 5(f)~(h)为含砾黏土的剪切应力 - 应变曲线。总体对比，角砾与风化砂相类似，试样的应力随应变增加而增加，应力达到峰值后，随应变增加逐渐降低，出现应变软化；而含砾黏土整体呈现应变硬化特征。

结合图 5 试验结果进一步分析可知，不同含水率条件下的土体试样，其峰值偏应力均与围压呈

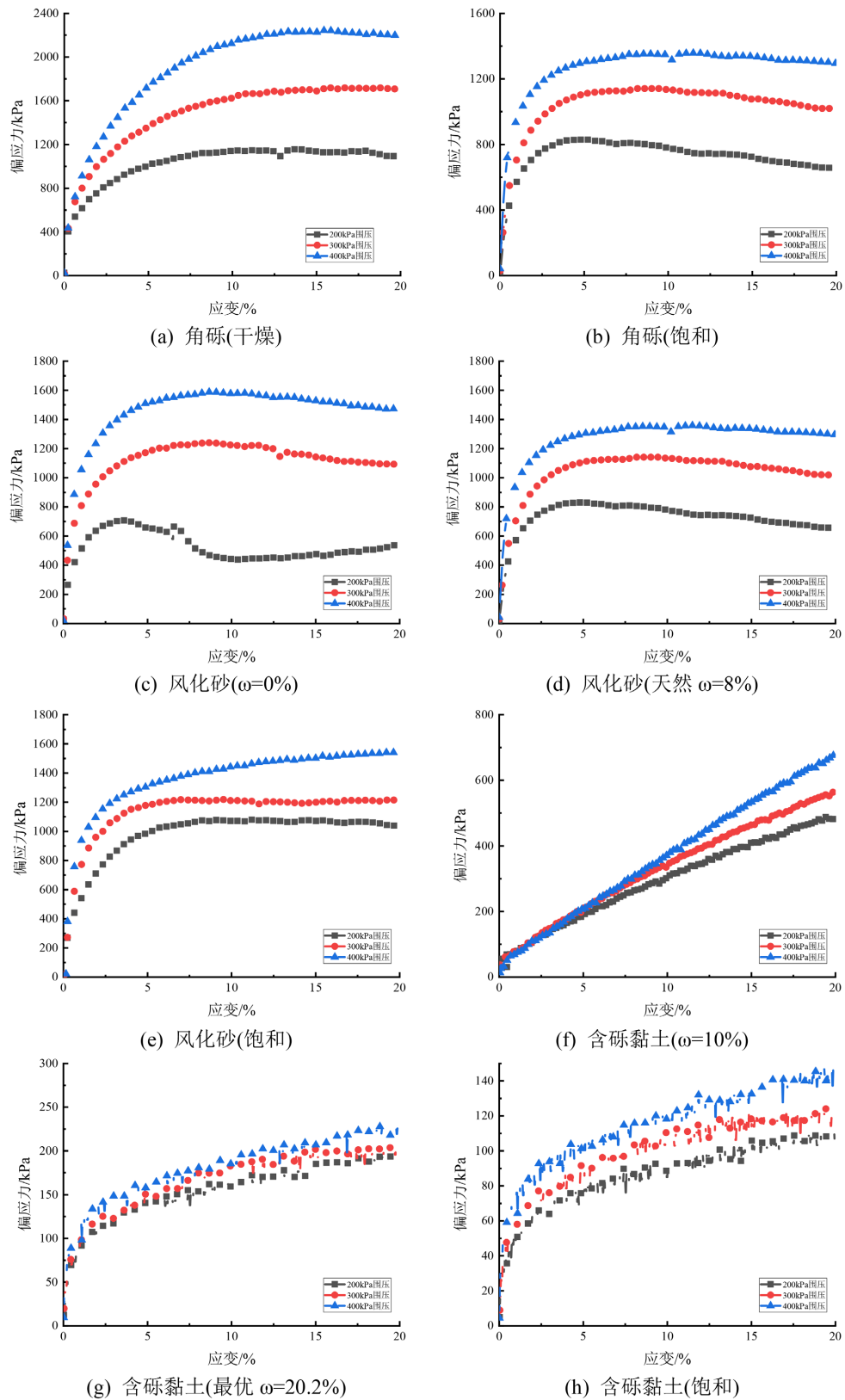


Figure 5. Comparison of stress-strain curves for different moisture contents of fillers

图 5. 各填料不同含水率应力 - 应变曲线对比图

正相关关系,随围压等级升高持续增大。同时,各含水率试样的偏应力-轴向应变曲线演化规律基本一致,整体可划分为三个典型变形阶段,具体特征如下:

(1) 线弹性变形阶段。在荷载施加初期,试样的力学响应符合广义胡克定律,偏应力与轴向应变呈现良好的线性增长关系。该阶段试样所受剪切荷载未突破自身结构强度极限,土体内部颗粒结构稳定、无明显塑性损伤,仅发生可逆的弹性变形,整体力学特性稳定。

(2) 塑性屈服阶段。当加载应力达到试样屈服临界值后,土体进入塑性屈服状态,开始产生不可恢复的塑性变形。此阶段偏应力的增长速率显著放缓,随着轴向应变持续发展,试样内部塑性变形区域不断扩展、损伤逐步累积,土体的整体刚度和抗剪强度持续衰减,力学性能呈现明显弱化特征。

(3) 应变硬化或软化阶段。随着剪切变形进一步发展,试样相继表现出应变硬化或应变软化两种差异化力学特征。其中,应变硬化表现为剪应力随剪应变的持续增大而稳步提升,最终趋于峰值极值或稳定恒定状态;应变软化则呈现阶段性变化特征,加载初期剪应力随剪应变增加快速上升,达到峰值偏应力后,伴随剪应变的继续发展,土体结构发生破坏,剪应力逐步衰减下降。

3.2. 不同含水率试样剪切峰值强度与围压的关系

图 6 给出了不同含水率填料的峰值强度-围压关系曲线。由试验结果可见,各类填料峰值强度均随围压升高而增大,这是由于围压可增加填料内部接触应力,优化颗粒间应力传递路径,增强颗粒间咬合作用,增强结构稳定性。而含水率的影响较为复杂,其中角砾峰值强度与含水率无关,风化砂填料饱和砂土峰值强度最低,其次为最优含水率,干燥状态最高;但当含水率高于最优含水率时,干燥状态最高,其次为饱和状态,最低为最优含水率状态。而对于含砾黏土,低含水率状态的峰值强度最高,其次为最优含水率,最低为饱和状态。

不同填料峰值强度对含水率的响应规律存在显著差异,其本质源于各类填料骨架结构、细粒含量及水-土作用机制的不同。(1) 其中角砾填料以粗大刚性颗粒骨架为主,细粒组分含量低,颗粒间强度主要由颗粒咬合与接触面摩擦效应提供,含水率变化难以改变其骨架接触状态与结构稳定性,因此峰值强度基本不受含水率影响。(2) 风化砂的强度特征受毛细黏聚力、颗粒水膜润滑效应及孔隙水压力共同调控,在含水率低于最优含水率时,饱和试样颗粒间润滑作用较弱、结构密实度优势显著,峰值强度最高,最优含水率试样次之,干燥试样因缺乏毛细黏结作用强度最低;而当含水率高于最优含水率时,土体内部自由水增多,颗粒间润滑作用加剧且孔隙水压力显著抬升,有效应力降低,其中最优含水率试样压实结构最致密,浸水后孔隙水压力劣化效果最明显,从而表现为干燥试样强度最高、饱和试样次之、最优含水率试样强度最低的变化规律。(3) 对于含砾黏土,其力学性能由黏土基质主导,水敏性较强,低含水率条件下土体基质吸力大、黏土颗粒胶结强度高、结构整体性好,峰值强度最优;随含水率增至最优含水率,基质吸力逐步消散,胶结作用小幅弱化,强度有所下降;饱和状态下黏土颗粒充分吸水膨胀,颗粒间结合水膜显著增厚,基质吸力基本完全丧失,同时孔隙水压力大幅削弱土体有效抗剪能力,最终导致饱和条件下峰值强度最低。

3.3. 抗剪强度指标

根据各含水率工况下试样的强度包络线,计算各个试样的抗剪强度指标黏聚力 c 和内摩擦角 φ ,并将抗剪强度指标列入表 2 中,黏聚力 c 和内摩擦角 φ 随不同含水率工况的变化分别绘入图 7~9 中。

由表 2 可知,总体分析,随着风化程度的增加,填料黏聚力显著提高,而内摩擦角则急剧降低。

由图 7 可知,角砾土的黏聚力与内摩擦角随含水率变化均不显著,其抗剪强度参数对含水率的敏感性远低于风化砂与含砾黏土。分析原因为,角砾土以大粒径岩石碎块为主要组成,抗剪强度主要源自

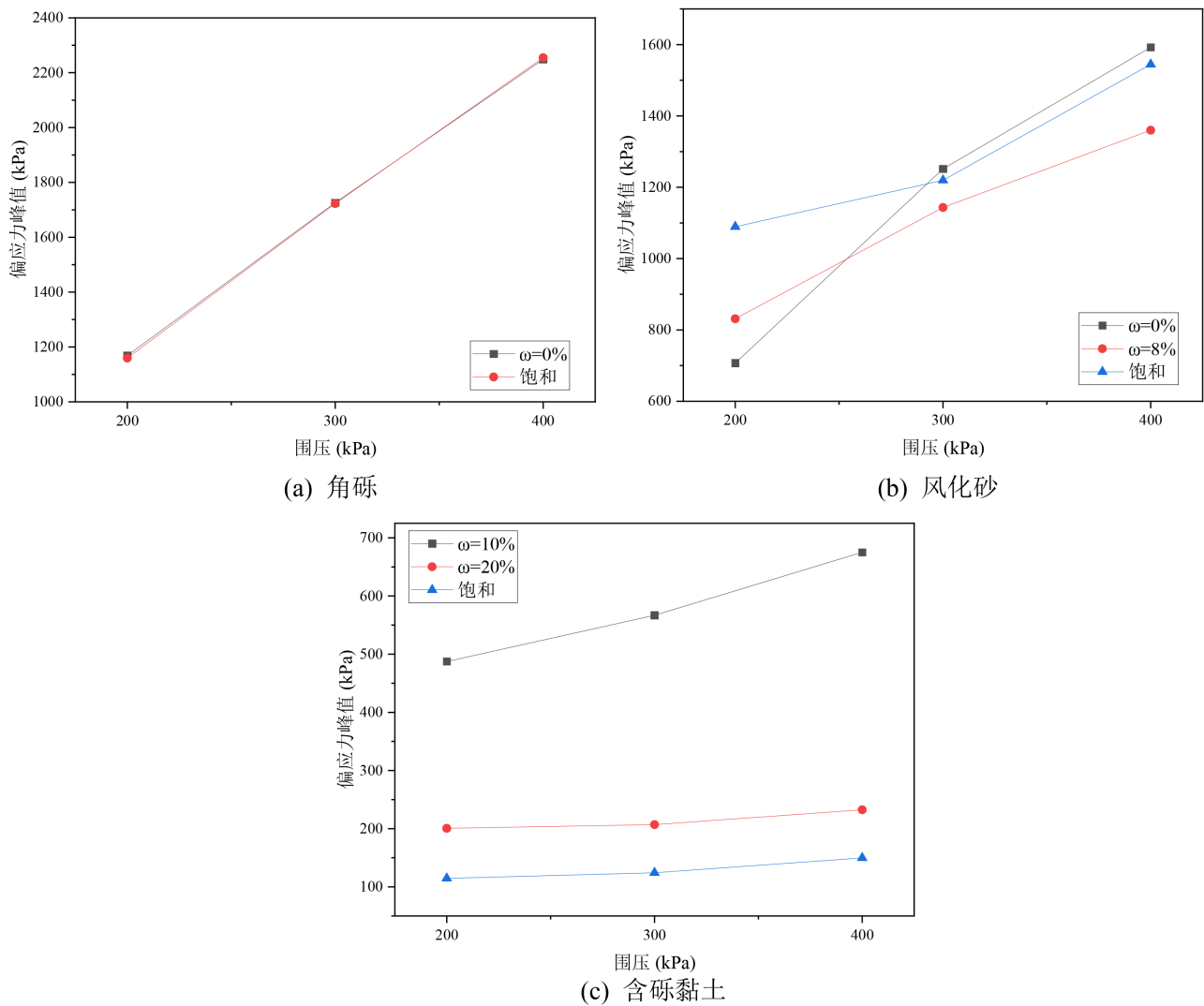


Figure 6. Peak failure strength of various fillers under different confining pressures

图 6. 各填料不同围压下的峰值破坏强度

Table 2. Shear strength indicators for different moisture contents of various fillers

表 2. 各填料不同含水率抗剪强度指标

填料种类	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
角砾(完全干燥)	16.42	44.93
角砾(饱和状态)	14.71	44.61
风化砂(完全干燥)	1.68	40.09
风化砂(含水率 8%)	13.91	33.54
风化砂(饱和状态)	13.19	32.38
含砾黏土(含水率 10%)	95.47	13.2
含砾黏土(含水率 20.2%)	65.28	15.58
含砾黏土(饱和状态)	30.09	3.66

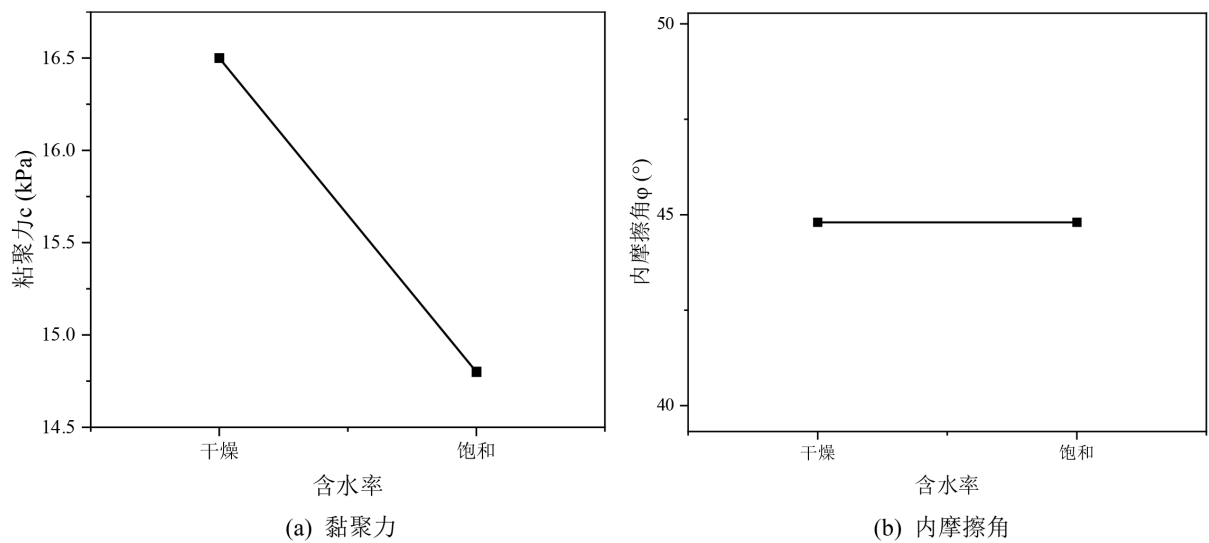


Figure 7. Trend of shear parameters of breccia fillers with moisture content

图 7. 角砾填料抗剪参数随含水率变化趋势图

颗粒间接触力，含水率对其影响相对较小；角砾颗粒堆积后易形成较大的粒间孔隙，孔隙水分散，难以形成连续的毛细水桥，因而含水率变化对黏聚力与内摩擦角的调控作用较弱。

由图 8 可知，风化砂填料的黏聚力随含水率增加呈先增大后减小的非线性变化规律，而内摩擦角则随含水率增加呈单调递减趋势。分析原因为：在低含水率阶段，孔隙水以薄膜水和毛细水桥形式存在于颗粒接触点处，毛细吸力产生的表面张力将相邻颗粒拉拢黏结，且此时颗粒表面水膜较薄，颗粒间的直接接触与摩擦嵌锁作用未受到显著削弱，故黏聚力随含水率增加而增大，内摩擦角维持在较高水平；随含水率增加，毛细水桥发育至最优状态，黏聚力达到峰值，但颗粒表面水膜逐渐增厚，润滑效应开始显现并逐步占据主导，颗粒间摩擦阻力下降，内摩擦角随之显著降低；当含水率进一步升高至较高水平时，连续水膜完全包裹颗粒表面，毛细吸力大幅减弱乃至消失，颗粒间吸引力显著下降。

由图 9 可知，含砾黏土的黏聚力随含水率增加单调递减，内摩擦角随含水率增加先增大后减小。

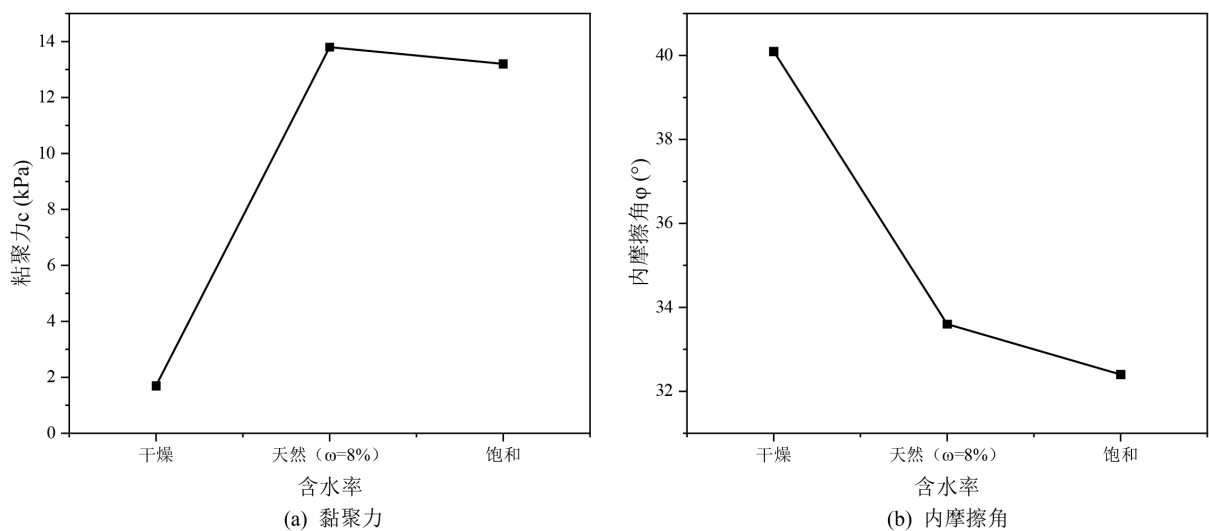


Figure 8. Trend of shear parameters of weathered sand fillers with moisture content

图 8. 风化砂填料抗剪参数随含水率变化趋势图

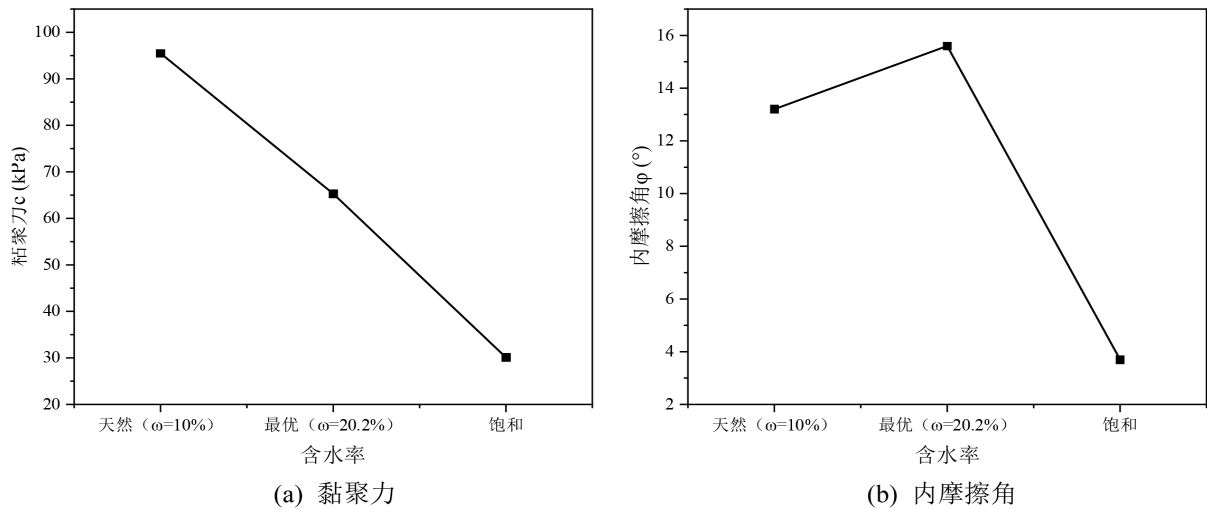


Figure 9. Trend of shear parameters of sandy clay filling with moisture content variation
图 9. 含砂黏土填料抗剪参数随含水率变化趋势图

分析原因为, 黏聚力源自细颗粒间的胶结作用, 粗颗粒对黏聚力的贡献相对有限; 含水率较低时, 毛细吸力显著增强了颗粒间的黏结作用, 同时土体处于较干状态, 粗颗粒与黏土颗粒间接触力较强, 二者共同作用使黏聚力维持在较高水平; 随含水率增加, 颗粒表面水膜逐渐增厚, 颗粒间力随之下降; 当含水率持续升高时, 水膜逐渐包裹黏土颗粒表面, 颗粒间的直接接触被阻断, 有效接触应力大幅衰减, 致使黏聚力呈持续下降态势。内摩擦角则主要受控于粗颗粒间机械咬合、细颗粒表面摩擦性能及孔隙水润滑减阻作用三者的共同影响: 低含水率条件下, 薄膜水在黏土颗粒间诱发附加吸附与黏滞效应, 提升了粗细颗粒界面的黏结强度, 抑制了颗粒相对错动协同促使内摩擦角增大; 随含水率进一步增大, 水膜厚度增加使颗粒间润滑作用逐渐凸显, 粗细颗粒界面摩擦阻力大幅降低, 同时土体强度软化造成粗颗粒间咬合作用逐步失效, 进而导致内摩擦角衰减。

4. 结论

为研究丘陵山区公路路基常用填料的剪切力学特性, 本文针对三类常见填料, 开展了粗粒土大三轴试验, 根据试验结果, 可得到如下结论:

- (1) 三类填料的剪切应力 - 应变曲线呈现出线弹性变化阶段、塑性屈服阶段及应变硬化或软化阶段。其中, 角砾与风化砂相类似, 试样偏应力达到峰值后, 呈现典型的应变软化特征; 而含砾黏土则呈现应变硬化特征。
- (2) 文章针对三种填料峰值强度的影响因素进行研究, 得到结论: 各类填料峰值强度均随围压升高而增大, 围压通过提高颗粒接触应力、优化应力传递及强化颗粒咬合, 提升土体结构稳定性; 颗粒粒径越小, 其受含水率影响越显著。
- (3) 风化砂角砾黏聚力与内摩擦角对含水率变化均不敏感; 风化砂的黏聚力随含水率先增后减、内摩擦角单调递减, 存在最优含水率区间; 含砾黏土的黏聚力单调递减、内摩擦角先增后减。
- (4) 文章开展了山区填方路基填料特性研究, 为路基稳定性分析及灾害防控提供试验支撑。然而, 受限于试验条件与研究周期, 未考虑循环荷载的影响, 在后续的研究中将增加相关试验。

参考文献

- [1] 戴建玲, 雷明堂, 蒋小珍, 等. 长江经济带岩溶塌陷分布、成因及其对工程建设的影响[J]. 中国地质, 2024, 51(1):

- 184-202.
- [2] 费建波, 陈润波, 谌越, 等. 降雨诱发广东某公路路基滑坡成因分析[J/OL]. 岩土工程技术: 1-8. <https://www.cnndoi.org/Resolution/Handler?doi=10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0404>, 2026-08-14.
 - [3] 郑德平, 黄志明, 王洪卫, 等. 含水率对非饱和伊犁黄土强度特性的影响[J/OL]. 路基工程: 1-6. <https://www.cnndoi.org/Resolution/Handler?doi=10.13379/j.issn.1003-8825.202504071>, 2026-08-14.
 - [4] 任思雨. 西南山区软弱土 CFG 桩复合地基的抗剪承载性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2025.
 - [5] Jalili, J., Jafari, M.K., Shafiee, A., *et al.* (2012) An Investigation on Effect of Inclusions on Heterogeneity of Stress, Excess Pore Pressure and Strain Distribution in Composite Soils. *International Journal of Civil Engineering*, **10**, 124-138.
 - [6] 薛亚东, 岳磊, 李硕标. 含水率对土石混合体力学特性影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(1): 21-29.
 - [7] Liu, L., Mao, X., Xiao, Y., Wu, Q., Tang, K. and Liu, F. (2019) Effect of Rock Particle Content on the Mechanical Behavior of a Soil-Rock Mixture (SRM) via Large-Scale Direct Shear Test. *Advances in Civil Engineering*, **2019**, Article ID: 6452657. <https://doi.org/10.1155/2019/6452657>
 - [8] 张宇辉, 张献民, 程国勇. 土石混合介质中石料间隙土压实度剪切波速评价研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 909-915.