文章编号:1007-9629(2025)02-0168-08

考虑骨架作用的堆石混凝土三维细观建模方法

陈明真,何世钦*,王辉,葛燕锋

(北方工业大学土木工程学院,北京 100144)

摘要:为避免骨料干涉判断的繁琐过程,快速生成不同堆石率的计算模型,基于堆石混凝土的材料组成和结构特点,利用离散元软件PFC3D提出了一种考虑骨架作用的堆石混凝土三维细观模型生成 方法.利用建立的几何模型对考虑及不考虑骨架作用的三维细观模型堆石混凝土进行了单轴压缩试 验.结果表明:堆石混凝土内部骨料相互接触形成的传力骨架可以有效提高堆石混凝土的整体强度; 考虑骨架作用数值模拟得到的堆石混凝土应力-应变曲线、破坏形态与试验结果更为吻合;该模型 能较好地反映骨架作用对堆石混凝土力学特性的影响,为深入研究堆石混凝土损伤演化规律和破坏 机理提供了细观力学角度的模型基础.

关键词:堆石混凝土;骨架作用;三维细观模型;PFC3D;界面过渡区 中图分类号:TU528.36 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.02.010

Three-Dimensional Mesoscopic Modeling Method of Rock-Filled Concrete Considering Skeleton Effect

CHEN Mingzhen, HE Shiqin^{*}, WANG Hui, GE Yanfeng

(School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: To avoid the cumbersome process of aggregate interference judgment and rapidly generate calculation models with different rock-filled rates, a method for generating a three-dimensional mesoscopic model of rock-filled concrete considering the skeletal effect was proposed using discrete element software PFC3D, based on the material composition and structural characteristics of rock-filled concrete. Uniaxial compression tests on rock-filled concrete mesoscopic models, both considering and neglecting the skeleton effect, were conducted using the established geometric models. The results indicate that the force transfer skeleton formed by the mutual contact of aggregates inside rock-filled concrete can effectively enhance the overall strength of the material. The stress-strain curves and failure modes of rock-filled concrete obtained from numerical simulations considering the skeletal effect are more consistent with experimental results. This model can effectively reflect the influence of the skeletal effect on the mechanical properties of rock-filled concrete, providing a meso-mechanical model foundation for in-depth studies on the damage evolution laws and failure mechanisms of rock-filled concrete.

Key words: rock-filled concrete; skeleton effect; three-dimensional mesoscopic model; PFC3D; interfacial transition zone

自 2003年提出并在 2005年实现工程应用以来, 堆石混凝土(RFC)^[1-2]凭借其卓越的性能、低廉的成 本以及简单高效的施工工艺,在大体积混凝土工程 领域中应用愈发广泛^[3-6]。国内外学者对堆石混凝土 开展了大量研究^[7-11],但由于堆石骨料粒径通常较大, 受实验室设备及试件尺寸的限制,导致进行力学性

收稿日期:2024-02-26;修订日期:2024-05-10

第一作者:陈明真(1997—),女,浙江温州人,北方工业大学硕士生.E-mail:cchenmingzhen@163.com 通讯作者:何世钦(1970—),女,山西山阴人,北方工业大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail:heshiqin@ncut.edu.cn

能试验存在较大局限性。数值模拟方法因其独特的 优势,被广泛应用于各种复杂混凝土材料^[12-14]的研究 之中。

关于堆石混凝土力学性能数值模拟,最初采用 的是基于随机骨料构建的二维细观有限元模型15或 利用离散单元法建立的二维细观颗粒离散元模 型[16-17].然而,二维模型与实际堆石混凝土结构存在 差异,难以反映其力学性能.随着计算机技术的不断 革新.目前多采用三维随机骨料模型,然而其在研究 力学性能方面仍存在一些不足之处:(1)建模主要依 赖于纯几何方法,无法准确形成堆石骨料之间相互 接触的堆石骨架^[18].(2)虽然部分学者基于堆石骨架 建立了三维模型,如方秦等^[19]采用凸多面体单元模 拟堆石骨料, Liang等^[20]采用球体单元模拟堆石骨 料,但其后续力学性能的计算模型均是在建立大尺 寸模型后切割出与试验相同尺寸模型进行数值模拟 的.由于切割试件中堆石骨料分布不均匀,导致模拟 结果存在较大离散性.此外,部分研究还忽略了堆石 骨料与自密实混凝土(SCC)之间界面过渡区的影 响,或者直接以黏性单元(cohesive单元)来代替界面 过渡区.

鉴于此,本文基于现有混凝土三维建模方法,将 堆石混凝土假定为堆石骨料、自密实混凝土和实体 界面过渡区组成的三相复合材料.采用离散元软件 PFC3D与有限元软件Abaqus相结合的方式,对考虑 骨架作用的堆石混凝土三维细观模型建模方法进行 探究,并利用所建立的三维细观模型研究了考虑及 不考虑骨架作用的堆石混凝土力学性能.

1 堆石混凝土几何模型建立方法

1.1 单个多面体堆石骨料生成方法

由于大体积堆石骨料大多由呈现凸性的多面体 组成,本文利用有限元软件Abaqus丰富的函数与方 法,并基于方秦等^[21]提出的空间八面体骨料基体法, 按照多面体凸性完成单个多面体骨料点-边-面-体 的生成.生成方法如下.

(1)确定随机骨料半径与位置

在长(L)×宽(W)×高(H)的空间内随机生成 中心坐标为(x,y,z)、半径为r的球体,其中r在[r_1,r_2] 范围内随机生成.各参数的表达式为:

$$r = \operatorname{rand}(r_1, r_2) \tag{1}$$

$$\begin{cases} x = \operatorname{rand}(r, L - r) \\ y = \operatorname{rand}(r, W - r) \end{cases}$$
(2)

$$z = \operatorname{rand}(r, H - r)$$

式中:r₁和r₂为随机骨料半径.

(2)生成基础八面体

在经过球心的任意平行圆上,基于随机角度θ生成4个点,形成基础四边形ABCD.以该四边形组成的平面为中心,将球体分成两部分.各参数的表达式为:

$$\theta = \operatorname{rand}\left(0, \frac{\pi}{2}\right)$$
 (3)

$$\begin{cases} x_i = x + r\cos\theta \\ y_i = y + r\sin\theta \\ z_i = z \end{cases}$$
(4)

式中: x_i, y_i 和 z_i 为四边形 ABCD 4个顶点的空间坐标.

在[0,2 π]范围内随机生成角度 α 和 β ,基于 α 和 β 在球体两侧生成点 E 和 F,与四边形 ABCD 相连生成 基础八面体.各参数的表达式为:

$$\alpha = \operatorname{rand}(0, 2\pi) \tag{5}$$

$$\beta = \operatorname{rand}(0, 2\pi) \tag{6}$$

$$x_j = x + r \sin \alpha \cos \beta$$

$$\begin{cases} y_j = y + r\sin\alpha\sin\beta & (7)\\ z_j = z + r\cos\alpha & \end{cases}$$

式中: x_i, y_i 和 z_i 为点E和F的空间坐标, $j \in [1,2]$.

(3)生成新随机多面体

在基础八面体相对应的球面上随机生成新的顶 点进行延拓,以此生成新随机多面体.为确保所生成 的多面体均为凸多面体,新生成的顶点需要与多面 体的任意面进行凸性判断,即将任意1个面的外法线 方向向量与新顶点及平面任意点连接方向的向量进 行计算.若2个向量的点积值小于0,则说明夹角大于 90°,不符合多面体凸性要求.同时,为避免出现小于 临界值的小边,须将新顶点与原有顶点进行距离判 断.最后,调用WirePolyLine()、getFeatureEdges()和 CoverEdges()函数来完成顶点-边-平面-多面体的 生成.

采用上述方法能够生成大量符合要求的顶点数 随机、面数随机的不规则凸多面体,为后续堆石混凝 土模型提供所需的多面体模板.

1.2 堆石标准骨料库生成方法

利用 PFC3D 软件中的团簇(clump)模拟不规则 堆石骨料.相较重叠离散元颗粒族(ODEC)方法中 较高的颗粒重叠量,本文提出了一种改进方法,即通 过构建具有特定孔隙率的球体(ball)作为 clump 的基 本组成单元,从而有效规避了因颗粒重叠量过大所 引起的计算耗时增加和准确性下降问题.

堆石标准骨料库生成方法如下:将1.1中生成的

随机多面体作为不规则包围盒模板导入PFC3D软件中,其中随机多面体粒径均等比缩小到1;在多面体包围盒中生成指定半径和孔隙率的球体并进行平衡(当球体半径控制得足够小时,球体将充分填充包围盒并且球体之间几乎不会相互重叠),读取所有生成的球体,将其作为 clump模板来模拟随机不规则堆石骨料.导出所有生成的 clump模板,形成堆石标准骨料库,以便后续随机抽取骨料进行模型建立.

堆石骨料的clump模板如图1所示.



图 1 堆石骨料的 clump 模板 Fig. 1 Clump template of rock-filled aggregate

1.3 堆石骨架模型生成方法

1.3.1 考虑骨架作用的堆石骨料生成

利用 PFC3D 软件对随机生成的 clump 施加重 力,可以很好地解决现有堆石混凝土模型堆石骨料 互不接触的问题.通过堆石骨料自重使其自由堆叠, 以形成满足堆石率要求且骨料颗粒之间相互接触的 堆石骨架.考虑骨架作用的堆石骨料生成流程如图 2 所示.生成方法如下. (1)生成墙体模板 在模型域中生成限制颗粒 运动的墙体模板.尺寸为L×W×2H.

(2)生成指定孔隙率的球体集合 对于堆石混凝土来说,由于大粒径堆石骨料数量较少,因此可以通过在指定空间中生成松散的球体集合代替堆石骨料来控制堆石率;在墙体模板内随机生成满足堆石率要求的不同半径且互不接触的球体.

(3)随机选取 clump 模板等体积替换球体 在已 生成的多面体堆石骨料标准库中随机抽取 clump 模 板,导入 PFC3D 软件进行等体积替换.为避免墙体 与生成的 clump 产生自锁现象,可以根据需要将墙体 模板范围适当放大,先消除自锁现象,再进行压缩, 以达到所需模型尺寸.

(4)叠加重力作用 对已替换的不规则 clump 叠 加重力作用,生成骨料-墙体和骨料-骨料相互接触 的堆石骨架.

(5)判断骨料是否均在墙体模板之内 在重力 作用叠加完成后删除L×W×2H墙体,重新生成符 合要求的L×W×H墙体.由于少部分clump模板在 重力叠加完成后可能仍与重新生成的L×W×H墙 体存在自锁现象,因此需要判断clump模板是否均在 墙体之内;若不是,则重复步骤(2)~(5).

(6)导出多面体形状文件 对已生成的堆石骨 料利用 clump export geometry 方法,将不同的 clump 进行多面体几何形状提取,导出文件以便后续导入 有限元软件中,生成界面过渡区(ITZ)与自密实混凝 土(SCC)区域.



Fig. 2 Flow chart of rock-filled aggregate generation considering skeleton effect

相比,其生成时不再叠加重力作用,生成流程如图3 所示.生成方法如下.

^{1.3.2} 不考虑骨架作用的堆石骨料生成 对不考虑骨架作用的堆石混凝土,与上述方法

(1)生成 $L \times W \times H$ 的墙体模板.

(2)生成指定孔隙率的球体集合 在墙体模板 中随机生成满足堆石率要求的不同半径且互不接触 的球体.

(3)随机选取 clump 模板等体积替换球体 在已 生成的多面体骨料库中随机抽取 clump 模板,导入 PFC3D进行等体积替换.

(4) 骨料平衡 将已替换的 clump 进行平衡, 避 免出现骨料堆叠.

(5)判断骨料是否均在墙体之内 若不是,则重 复步骤(2)~(5).

(6)导出多面体形状文件.



图 3 不考虑骨架作用的堆石骨料生成流程图

Fig. 3 Flow chart of rock-filled aggregate generation without considering skeleton effect

与常规的堆石混凝土骨料模型生成方法相比, 使用上述方法不仅考虑了堆石骨料形状多样性,同 时生成了更加符合真实结构的堆石骨架模型,而且 无需进行复杂繁琐的骨料干涉判断,大大节约了模 型生成耗时.所生成的堆石混凝土几何模型堆石率 可超过50%,使建模效率得到有效提高.

1.4 界面过渡区生成方法

在已生成的堆石骨料模型基础上,先将实体多 面体骨料转化为壳体,利用有限元软件Abagus中的 偏移命令将骨料的所有几何面整体向外偏移相应厚 度,生成带有界面过渡区的新壳体.将该新壳体与原 壳体均转化为实体多面体,进行布尔切割运算得到 界面过渡区.目前尚无统一的测量方法可以确定界 面过渡区的厚度,其取值通常集中在10~100 μm.在 数值模拟过程中,利用有限元对界面过渡区进行网 格划分极为困难,当厚度过小时会造成网格畸变,进 而影响数值模拟计算结果的准确性.鉴于网格畸变 和计算难度问题,目前许多学者在进行细观数值模 拟时倾向于适当增加界面过渡区的厚度.由于堆石 骨料粒径比常规混凝土粗骨料大得多,因此本文界 面过渡区厚度均取1mm.与其他界面过渡区生成方 法不同的是,本方法不仅可以将所有骨料生成均一 厚度的界面过渡区,还可以根据需求简单高效地对 不同的堆石骨料设置不同厚度的界面过渡区.

由于堆石混凝土的自身特性,经过重力叠加的 堆石骨料之间相互接触,以此为基础生成的界面过 渡区会存在相互交叉重叠的现象.因此需要对生成 的界面过渡区与原骨料集合体进行布尔切割运算, 利用 Abaqus 软件中的切割几何体命令消除重叠 部分.

1.5 自密实混凝土区生成方法

在 Abaqus 软件中生成与目标尺寸相同的实心 立方体试块.利用布尔切割运算,将生成的堆石骨料 与界面过渡区作为整体来切割立方体试块,环绕堆 石骨架与界面过渡区整体区域,生成封闭的立方体 外壳.该立方体外壳作为自密实混凝土区,将充分包 裹堆石并填充堆石间的空隙.

2 堆石混凝土细观有限元模型

2.1 材料属性

在细观层面,堆石混凝土可以视为由自密实混凝 土、堆石骨料以及两者之间的界面过渡区组成.由于 堆石骨料一般使用大粒径块石(粒径D≥300 mm),其 粒径尺寸要远远大于自密实混凝土中粗骨料的粒径 (D≤20 mm).因此,本文拟忽略自密实混凝土中粗 骨料分布对堆石混凝土的影响,并假定自密实混凝 土为均质各向同性材料.

2.1.1 自密实混凝土

自密实混凝土采用 Abaqus 软件自带的混凝土 塑性损伤模型(CDP)来模拟,其本构模型根据试验 与规范拟合的本构关系得到.

2.1.2 界面过渡区

界面过渡区作为混凝土结构中的薄弱部分,其 密度和强度均比砂浆基体低.但是受其形成过程及 本身结构的影响,现有试验难以准确地测得其真实 强度.在数值模拟中,界面过渡区的强度一般是在相 应基体材料强度上乘以系数50%~90%来进行折减 的.根据谢越韬^[9]的试验,本文将界面过渡区强度取 为自密实混凝土强度的90%,采用CDP进行模拟.

2.1.3 堆石骨料

由于堆石混凝土所用岩石为脆性材料,当堆石 混凝土遭到破坏时,堆石骨料的应变小于其弹性极 限应变.因此,可将堆石视为理想弹性体,数值模拟 时采用与石灰岩块石一样的参数.

2.2 边界条件及加载方式

模拟过程中试件的边界条件需要与试验保持一

致.为防止模型出现应力集中,试件上下表面设置刚 性平面与模型进行耦合.将试件上下表面与刚性平 面之间的摩擦系数设置为0.01,以模拟单轴受力状态.下刚性平面完全固定,上刚性平面通过位移控制 的方式进行加载.

2.3 有限元网格划分

采用 Abaqus 软件自带的 C3D10 二阶四面体单 元对堆石混凝土三维细观模型进行网格划分.在有 限元模型建立过程中,网格的尺寸和数量是数值模 拟计算精度和速度的主要影响因素.与堆石骨料和 自密实混凝土尺寸相比,界面过渡区厚度尺寸过小. 因此对界面过渡区与堆石骨料、自密实混凝土分别 采用不同网格尺寸划分,以便在保证计算精度的同 时,提高计算速度.图4为三相材料网格划分模型.由 于堆石骨料、自密实混凝土和界面过渡区三相材料 是单独生成的,在进行网格划分时可以避免繁琐的 单元属性判断.同时,为进一步提高数值模拟的计算 效率,采用准静态分析法(动力显式法)求解堆石混 凝土的细观力学问题.



图 4 三相材料网格划分模型 Fig. 4 Grid division model of three-phase material

3 骨架作用对堆石混凝土力学性能的 影响

3.1 模型参数

数值模拟参考堆石混凝土单轴受压力学性能试验^[11],利用1.1~1.5提出的建模方法,分别建立考虑骨架作用和不考虑骨架作用的堆石混凝土(尺寸为100mm×100mm×100mm)三维细观模型,并进行单轴压缩试验模拟.其中堆石骨料粒径为30~37mm,堆石率为43%(体积分数),界面过渡区厚度取为1mm.堆石混凝土三维细观模型如图5所示.除了堆石骨料接触方式以外,其余参数均与试验保持一致,即自密实混凝土强度等级取C15,界面过渡区强度取自密实混凝土强度的90%,堆石骨料参考石灰岩块石参数进行取值.堆石混凝土细观组分材料参数

如表1所示.

3.2 模拟结果及分析

3.2.1 破坏形态

Abaqus软件中的损伤云图能较好地反映出模型 受到外部荷载时的破坏过程.图6、7给出了考虑骨架作 用和不考虑骨架作用的堆石混凝土随应力(σ)变化而 呈现的受压损伤破坏过程.其中白色部分为堆石骨料, 蓝色为自密实混凝土,界面过渡区为两者之间的薄层. 图8为部分堆石混凝土单轴压缩试件破坏形态.

由图 6、7 可见:(1) 堆石混凝土试件损伤破坏经 历了 3 个阶段.(2) 在加载初期, 堆石骨料与自密实混 凝土之间的界面过渡区开始出现损伤, 试件表面无 明显变化(图 6(a)和图 7(a)); 随着荷载的继续增加, 损伤开始沿着界面过渡区附近发展, 并逐渐扩展到



(a) Considering skeleton effect



on effect (b) Without considering skeleton effect 图 5 堆石混凝土三维细观模型

Fig. 5 Three-dimensional mesoscopic model of rock-filled concrete

表1 堆石混凝土细观组分材料参数 Table 1 Material parameters of microscopic component of rock-filled concrete

Material	$ ho/({ m kg}{ m \cdot}{ m m}^{-3})$	<i>E</i> /GPa	υ	$f_{\rm c}/{ m MPa}$
Rock-filled aggregate	2 650	50.0	0.21	
SCC	2 400	21.4	0.20	11.3
ITZ	2 000	19.3	0.20	10.2

Note: ρ is the density of material; E is the elastic modulus of material; v is the Poisson's ratio of material; f_c is the compressive strength of material.









(d) σ=8.58 MPa

(b) σ=6.82 MPa
 (c) σ=9.35 MPa
 图 6 考虑骨架作用的堆石混凝土损伤破坏过程
 Fig. 6 Damage and failure process of rock-filled concrete considering skeleton effect



图 7 不考虑骨架作用的堆石混凝土试件损伤破坏过程 Fig. 7 Damage and failure process of rock-filled concrete without considering skeleton effect

堆石骨料之间的自密实混凝土区域,试件表面开始 出现损伤(图6(b)和图7(b));当达到破坏荷载时,界 面过渡区破坏,并在自密实混凝土区域形成竖向损 伤区域,试件开始出现裂纹(图6(c)和图7(c)).(3)在 加载后期,考虑骨架作用的堆石混凝土试件损伤逐 渐扩展,形成多条竖向裂缝,试件丧失承载能力(图6(d)),数值模拟破坏过程与试验结果一致;而不考虑 骨架作用的堆石混凝土试件出现多条斜向裂缝,最 终形成"V"形裂缝(图7(d)),与图8试验破坏结果存 在差异.



图 8 部分堆石混凝土试件损伤破坏形态 Fig. 8 Damage failure form of partial rock-filled concrete

3.2.2 单轴抗压强度

考虑骨架作用的堆石混凝土三维细观模型单轴 抗压强度为9.40 MPa,而不考虑骨架作用的单轴抗 压强度为8.51 MPa.这说明堆石骨料的骨架作用对 堆石混凝土抗压强度有一定的影响,前者堆石骨料 稳定堆积形成良好的传力骨架,有助于提高堆石混 凝土的整体强度.其单轴抗压强度试验值为 8.21 MPa,小于模拟值,这是由于数值模拟计算时将各 相材料均设定为均质材料而未考虑试件本身存在的 缺陷.

3.2.3 应力-应变曲线

堆石混凝土三维细观模型单轴压缩应力-应变 (σ -ε)曲线与试验结果对比如图9所示.由图9可见: (1)考虑骨架作用的堆石混凝土数值模拟结果得到 的峰值应力为9.40 MPa,对应的峰值应变为 959 μm/m;不考虑骨架作用的峰值应力为 8.51 MPa,对应的峰值应变为849 μm/m;试验结果 得到的堆石混凝土峰值应力与峰值应变分别为 8.21 MPa、904 μm/m.(2)在达到峰值应力50%之前,数值模拟 σ-ε关系均接近弹性;随着荷载的增加, σ-ε曲线斜率逐渐减小;当达到峰值应力时,试件开始



Fig. 9 Comparison of simulation results and experimental results

发生破坏,此时曲线开始进入下降段.(3)与不考虑骨架作用的堆石混凝土相比,考虑骨架作用的堆石混凝土相比,考虑骨架作用的堆石混凝土数值模拟曲线下降段较为平缓,体现了堆石骨架的作用,与试验结果吻合较好.

4 结论

(1)利用 PFC3D 软件对随机生成的不规则骨料 施加重力使其自由堆叠,可以有效生成满足堆石率 要求且骨料颗粒之间相互接触的堆石骨架,而且无 需进行复杂繁琐的骨料干涉判断,大大节约了模型 生成耗时.所生成的堆石混凝土几何模型堆石率可 超过50%,使建模效率得到有效提高.

(2)利用 Abaqus 软件自带的偏移命令与布尔切 割运算,可以简单高效地生成界面过渡区与自密实 混凝土区域.

(2)基于 Abaqus 软件对考虑骨架作用和不考虑 骨架作用的三维堆石混凝土分别进行单轴压缩试验 模拟.相比不考虑骨架作用的堆石混凝土三维细观 模型,考虑骨架作用数值模拟得到的堆石混凝土抗 压强度较高,其应力-应变曲线和破坏模式与试验结 果基本一致,说明使用本建模方法的堆石混凝土模 型能较好地反映堆石骨料相互接触形成传力骨架的 作用.

参考文献:

- [1] 金峰,安雪晖,石建军,等.堆石混凝土及堆石混凝土大坝[J]. 水利学报,2005,36(11):78-83.
 JIN Feng, AN Xuehui, SHI Jianjun, et al. Study on rock-fill concrete dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36 (11):78-83. (in Chinese)
- [2] 金峰,安雪晖. 堆石混凝土大坝施工方法:03102674 [P]. 2004-08-18.

JIN Feng, AN Xuehui. Construction method of large rock-filled dam:03102674 [P]. 2004-08-18. (in Chinese)

- [3] 邢彦波.堆石混凝土技术在水库除险加固工程中的应用[J].价 值工程,2013,32(12):113-114.
 XING Yanbo. Application of rock-fill concrete technology in reservoir reinforcement project[J]. Value Engineering, 2013,32 (12):113-114. (in Chinese)
- [4] 宋殿海,刘剑.自密实堆石混凝土在宝泉抽水蓄能电站的应用
 [J].水力发电,2007(9):26-27,88.
 SONG Dianhai, LIU Jian. Application of self-compacted rockfill concrete in Baoquan pumped-storage power station[J]. Water Power, 2007(9):26-27,88. (in Chinese)
- [5] 尹蕾.堆石混凝土的应用现状与发展趋势[J].水利水电技术, 2012,43(7):1-4.

YIN Lei. Application status and development trend of rock-filled

concrete[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012,43(7):1-4. (in Chinese)

- [6] 高俊青. 堆石混凝土施工技术在新疆铁路及公路挡土墙工程中的应用[J]. 混凝土, 2009(2):123-125.
 GAO Junqing. Application of rock-filled concrete technology in railway and highway project of Xinjiang[J]. Concrete, 2009(2): 123-125. (in Chinese)
- [7] 黄绵松,周虎,安雪晖,等. 堆石混凝土综合性能的试验研究[J]. 建筑材料学报,2008,11(2):206-211.
 HUANG Miansong, ZHOU Hu, AN Xuehui, et al. A pilot study on integrated properties of rock-filled concrete[J].2008,11(2): 206-211. (in Chinese)
- [8] 商峰,周虎.基于早龄期超声测试的堆石混凝土工程质量检测
 [J].建筑材料学报,2022,25(2):214-220.
 SHANG Feng, ZHOU Hu. Construction quality assessment of rock filled concrete based on early age ultrasonic wave test[J].
 Journal of Building Materials, 2022, 25(2):214-220. (in Chinese)
- [9] 谢越韬.自密实混凝土填充性能及堆石混凝土界面微观特性研 究[D].北京:清华大学,2014. XIE Yuetao. Experimental study on the filling capacity of SCC

and the microscopic properties of the interfaces in RFC[D]. Beijing:Tsinghua University, 2014. (in Chinese)

- [10] 石建军,张志恒,金峰,等.自密实堆石混凝土力学性能的试验 研究[J].岩石力学与工程学报,2007(增刊1):3231-3236.
 SHI Jianjun, ZHANG Zhiheng, JIN Feng, et al. Experimental research on mechanical behavior of self-compacting rock-fill concrete[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(Suppl 1):3231-3236. (in Chinese)
- [11] 王辉,马嘉均,周虎,等.堆石混凝土单轴受压力学性能[J].清 华大学学报(自然科学版), 2022, 62(2):339-346.
 WANG Hui, MA Jiajun, ZHOU Hu, et al. Mechanical behavior of rock-filled concrete with uniaxial compression[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2022, 62(2): 339-346. (in Chinese)
- [12] 麻海燕,余红发,郭建博,等.全珊瑚海水混凝土静动态力学性能与数值模拟[J].建筑材料学报,2023,26(11):1158-1165.
 MA Haiyan, YU Hongfa, GUO Jianbo, et al. Static and dynamic mechanical properties of coral aggregate seawater concrete and their numerical simulation [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(11):1158-1165. (in Chinese)
- [13] 卿龙邦,杨子美,慕儒,等.定向钢纤维增强水泥基复合材料断裂细观数值模拟[J].建筑材料学报,2023,26(2):111-121.
 QING Longbang, YANG Zimei, MU Ru, et al. Meso-numerical simulation on fracture of aligned steel fiber reinforced cementitious

composites[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(2): 111-121. (in Chinese)

- [14] 胡焱博,高鹏,李景哲,等.非规则再生骨料建模及再生骨料混 凝土数值模拟[J].硅酸盐通报,2024,43(1):276-286,294.
 HU Yanbo, GAO Peng, LI Jingzhe, et al. Modeling of irregular recycled aggregates and numerical simulation of recycled aggregate concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024,43(1):276-286,294. (in Chinese)
- [15] 唐欣薇,石建军,张志恒,等.自密实堆石混凝土力学性能的细观仿真与试验研究[J].水利学报,2009,40(7):844-849,857. TANG Xinwei, SHI Jianjun, ZHANG Zhiheng, et al. Meso-scale simulation and experimental study on self-compacted rock-fill concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(7):844-849,857. (in Chinese)
- [16] 钟文,潘坚文.堆石混凝土抗压强度影响因素细观分析[J].水 力发电学报,2016,35(5):15-22.
 ZHONG Wen, PAN Jianwen. Meso-scale analysis of influence factors on compressive strength of rock-filled concrete using particle-based discrete element method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(5): 15-22. (in Chinese)
- [17] HAN H X, CHEN W, HUANG B, et al. Numerical simulation of the influence of particle shape on the mechanical properties of rockfill materials[J]. Engineering Computations, 2017, 34(7): 2228-2241.
- [18] 袁冬.基于随机骨料投放的堆石混凝土力学性能研究[D].沈 阳:沈阳工业大学,2019.
 YUAN Dong. Mechanical properties of rock-filled concrete based on random aggregate placement [D]. Shenyang : Shenyang University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [19] 方秦,闫鹏,张锦华,等.堆石混凝土三维力学模型建模方法[J]. 建筑材料学报,2017,20(1):55-60.
 FANG Qin, YAN Peng, ZHANG Jinhua, et al. Methodology to develop 3D mechanical model of the rock-filled concrete[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1):55-60. (in Chinese)
- [20] LIANG T, JIN F, HUANG D R, et al. On the elastic modulus of rock-filled concrete[J]. Construction and Building Materials, 2022,340 (Suppl C):127819.
- [21] 方秦,张锦华,还毅,等. 全级配混凝土三维细观模型的建模方 法研究[J]. 工程力学, 2013, 30(1):14-21,30.
 FANG Qin, ZHANG Jinhua, HUAN Yi, et al. The investigation into three-dimensional mesoscale modelling of fully-graded concrete[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1):14-21,30. (in Chinese)