

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220292

延迟效应对水泥改良粉细砂工程特性的影响分析

陈 伟¹, 黄志军¹, 赵尔升²

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州铁道设计院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 针对戈壁地区水泥改良粉细砂作为工程材料碾压结束检测后压实系数难以达标的问题, 综合分析后发现现场施工及检测未考虑水泥改良粉细砂的时效性, 通过设计不同延迟时间下水泥改良粉细砂的击实试验及无侧限抗压试验, 分析延迟时间对水泥改良粉细砂击实特性及强度特性的影响。同时考虑季冻区路基经受冻融循环后强度变化, 设计在延迟时间影响下水泥改良粉细砂的冻融循环试验。结果表明, 随着延迟时间的增大, 水泥改良粉细砂的最大干密度先增大后减小, 最优含水率先增大后趋于平缓再增大; 饱和 7 d 无侧限抗压强度和冻融循环后强度均随延迟时间的增大逐渐减小; 掺和料内部水泥水化形成的结构在经历碾压成型后已受到破坏, 降低了水泥效力。

关键词: 粉细砂; 强度; 延迟时间; 冻融循环; 试验研究

中图分类号: TU521.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0177-05

1 引言

粉细砂作为广泛存在于我国西部地区的特殊工程材料, 具有颗粒松散, 几乎没有粘聚力的特性, 其最大的问题是难以压实, 不能满足工程要求。要降低工程造价, 加快施工进度, 需就地取材, 对此类填料加以改良。目前对路基填料的改良主要有物理改良和化学改良两种。其中, 物理改良是通过向粉细砂这类粗颗粒中掺入细颗粒, 从而改变掺和料的颗粒级配, 使粗颗粒孔隙中填充细颗粒, 同时掺入一定的细颗粒来提高整个掺和料的粘聚力, 进而提高填料的压实性; 化学改良是通过掺入化学改良剂, 如水泥、石灰及其他高分子材料, 化学改良剂水化后的产物对粉细砂颗粒有包裹作用, 填充颗粒间的孔隙, 使整个掺和料具有更高的整体性, 同时凝结硬化后对整个填料的强度有较大的提高。对粉细砂类填料的工程应用, 国内已进行了很多研究, 如王海林^[1]以敦煌市境内某公路粉细砂为例, 通过一系列试验, 结合路堤边坡稳定性, 分析了该地区粉细砂填料的工程性质及施工关键技术; 张保卫^[2]通过室内试验总结了水泥改良粉细砂的基本物理力学性质, 同时分析了耐久性; 闫登峰等^[3]研究了水泥改良土延

迟时间对改良土的影响。国外尝试将水泥基陶瓷垃圾等掺入粉细砂来固化粉细砂, 并分析了无侧限抗压强度及 CBR 等参数, 以达到工程需求^[4,5]。已有研究主要集中在水泥改良粉细砂的基本路用性能方面, 体现在水泥掺量、压实系数、养护龄期这三个因素对压实特性及强度的影响, 而关于延迟时间对水泥改良粉细砂击实特性、强度特性及冻融循环后的力学特性的影响研究很少。水泥改良土的击实延迟时间是指实验室自加入水泥至整个击实试验完成所需的时间; 无侧限抗压强度延迟时间是指自水泥加入至整个试件成型所用的时间, 对应到施工则为自水泥掺入至碾压结束所用的时间。为此, 本文在既有研究的基础上, 通过设计室内试验分析延迟时间对水泥改良粉细砂最大干密度、最优含水率、饱和 7 d 无侧限抗压强度的影响, 同时通过试验数据进一步分析延迟效应对具体施工的影响, 最后通过冻融循环试验, 分析延迟时间对水泥改良粉细砂强度的影响, 研究结果对水泥改良土控制现场施工及检测时间节点、降低工程造价、提高整体强度有重要意义。

2 试验概况

试验所用粉细砂为甘肃省酒泉市境内实际工

收稿日期: 2022-02-19, **修回日期:** 2022-03-28

基金项目: 甘肃省自然基金项目(148RJZA042)

作者简介: 陈伟(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程, E-mail: 1289578350@qq.com

通讯作者: 黄志军(1971-), 男, 博士、副教授, 研究方向为岩土工程, E-mail: 543768854@qq.com

程典型粉细砂,筛析法得到的代表土样的颗粒大小分布曲线见图1。由图1可知,小于0.075、2 mm的试样占试样总质量的百分数分别为2.84%、88%,土样不均匀系数 C_u 为4.55,曲率系数 C_c 为1.33。试验所用水泥为325#矿渣硅酸盐水泥。图2为4%水泥掺量下改良填料的干密度与含水率曲线。由图2可知,其最优含水率为9.9%,对应的最大干密度为1.972 g/cm³。

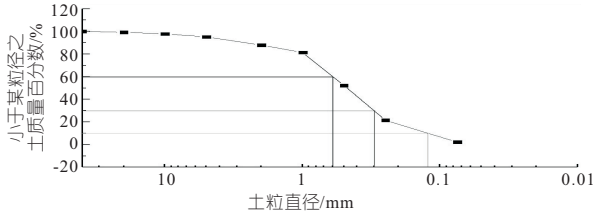


图1 颗粒大小分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve

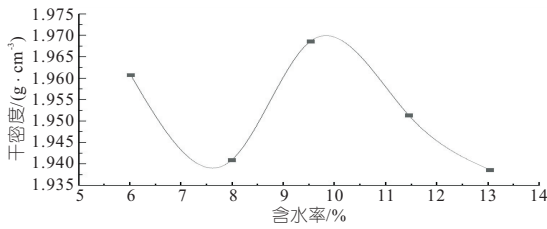


图2 干密度与含水率曲线

Fig. 2 Dry density and moisture content curve

2.1 击实试验

击实试验的原理为在一定的击实功与击实次数下得到土体的干密度与含水率的关系,土体最大干密度对应的含水率称之为最优含水率,通过室内试验确定填料的最优含水率,现场施工则控制填料的实际含水率在最优含水率附近,这样压实效果最佳。击实过程主要是克服粉细砂颗粒之间的摩擦力,使颗粒得到重新排列,相互填充挤密,进而形成密实的整体,此时干密度得到一个极值。慢慢增加含水率后,粉细砂颗粒表面会产生具有一定胶连作用的结合水膜,水膜有一定的抗剪性;且粉细砂的细颗粒间通过毛细作用产生吸力,从而增大了粉细砂的粘聚力;同时粉细砂中含有的石英等矿物,增大了颗粒间的摩擦力。这些因素均影响了粉细砂层的击实效果,导致粉细砂的干密度下降。当粉细砂的含水率继续增大,水膜的胶连作用减弱,而水膜的润滑作用增加,使粉细砂颗粒的摩擦力减小,同时毛细作用随含水率的增加而减小,因此粉细砂颗粒间的排列重组变得更容易,此时在较大的含水率时,得到另一个干密度极值。

在击实过程中,水将沿着粉细砂颗粒的空隙移动,将颗粒间的空气逐渐排出,颗粒间空隙得到

了填充,密实度增加,从而在最佳含水率时达到最大干密度。粉细砂的干密度达到最大干密度后,继续增大含水率,会使颗粒间的粘结力和内摩擦阻力减小,颗粒空隙间水的体积不断增加;由于水的体积不能被压缩,因此粉细砂的干密度值会逐渐减小。依据《铁路工程土工试验规程》^[6],选用Z1重型击实。由图2可知,粉细砂的击实曲线呈倒“S”型,这与文献^[3]相一致。

室内击实试验与现场碾压试验一一对应。试验现场碾压试验段采用厂拌,拌和站将填料搅拌均匀好后运输到现场,现场进行网格划分、填料摊铺、整平及碾压,碾压结束后检测压实系数。由于现场施工具有一定的时效性,所以分析延迟时间在现场碾压中的影响对实际施工有很大意义。

2.2 无侧限抗压强度试验

试验制备4%水泥掺量、0.93压实度、7 d养护龄期的试件,试件尺寸为50 mm×50 mm(直径×高),试件制备利用下式计算:

$$m_{sg} = \rho_{dg} V(1 + 0.01w_{sg})K \quad (1)$$

式中, m_{sg} 为应取浸润混合料的数量,g; ρ_{dg} 为化学改良土试件的干密度,g/cm³; V 为试模的容积,cm³; w_{sg} 为浸润混合料的含水率,%; K 为压实系数。

试件均为一次成型,成型后在20±2℃、95%的相对湿度下养生。试件强度计算公式为:

$$\sigma = F_N/A \quad (2)$$

式中, F_N 为试件破坏时的轴向压力,N; A 为试件截面积,m²。

2.3 冻融循环试验

2.3.1 冻结方式的选择

冻结方式按冻结方向可分为单向冻结和三向冻结,单向冻结是指温度梯度单一,水分迁移只能按单一的温度梯度进行,冻结后会出现水分相对集中的区域;而三向冻结其温度梯度非单一,冻结方向由土样四周边界逐渐指向中心,水分迁移后的集中程度没有单向冻结明显^[7]。按是否有外界水分的补充,可分为开放系统、封闭系统两种情况。因为开放系统中存在水分的流失与补给,所以无法准确衡量冻胀量。同时,冻结速率也是影响冻融过程的一个重要因素。冻结速率影响水分的迁移速率,冻结速率越快,水分迁移越小,因为在快速冻结中,水分往来不及迁移,多以自由水的形式“原地”冻结;而冻结速率越慢,水分在迁移过程中慢慢达到冻结点而被冻结,当然,这也取决于温度梯度。

本文试验主要模拟路基基床在封闭环境中的

冻胀过程,为保证在冻融过程中避免外界水汽的补充,所以在试样制备结束后以保鲜膜包覆,隔绝外界水汽,使整个冻融过程处于一个封闭过程中。

2.3.2 试验步骤

步骤 1 依照无侧限抗压强度试件制备过程制备试件,为保证试验的准确性,每组单因素变量工况制备试件 3 个,制备完成后称重量,量高度。然后包覆保鲜膜同等养护。

步骤 2 设定试件的压实系数为 0.93,养护龄期为 7 d,将制备好的试件放到标准养护室养护,养护结束后再次称重量、量高度。设置冻结温度为 -25 ℃,融化温度为 30 ℃。然后放入制冷仓在 -25 ℃ 环境下冻结 12 h,考虑到试件处于保鲜膜包覆的封闭环境,融化过程在标准养护室设置温度 30 ℃ 融化 12 h,此为一个冻融循环过程。在融化结束后将试件置于路强仪进行抗压试验,读取其无侧限抗压强度。试验所用路强仪为浙江华南仪器设备有限公司 MQS 型路面材料强度试验仪。

步骤 3 试验数据采集及处理。为便于绘图,对掺量和冻融循环次数做了简单的简写,如 C4D5 表示水泥掺量为 4%(质量比),冻融循环次数为 5 次,“C”指水泥掺量,“D”指冻融循环次数。

3 试验结果与分析

3.1 不同延迟时间下的击实特性

图 3 为不同延迟时间下水泥改良粉细砂参数。由图 3 可知,随延迟时间的增大,最大干密度

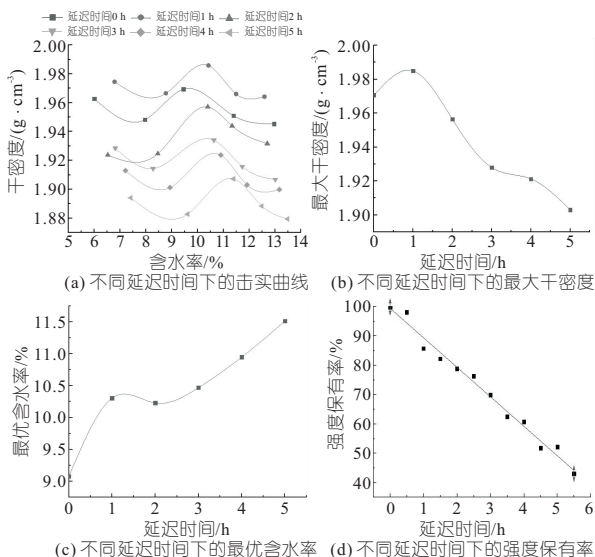


图 3 不同延迟时间下水泥改良粉细砂参数

Fig. 3 Parameters of cement modified fine sand under different delay times

先增大后减小,在延迟时间为 1 h 时达到最大值;不同延迟时间下最优含水率呈先增大后趋于平缓再增大的趋势;随延迟时间的增大,试样的饱和 7 d 无侧限抗压强度逐渐减小,即强度保有率(强度保有率是指以 0 h 延迟下试件的饱和 7 d 无侧限抗压强度为基准,不同延迟时间下强度值与 0 h 延迟下强度的比值)逐渐降低,水泥改良粉细砂的强度保有率与延迟时间之间具有良好的线性拟合关系(线性拟合相关系数为 $R^2=0.983$)。

化学改良土现场施工前,应在室内击实试验中做好各延迟时间下的击实曲线,然后依据实际工程,预估自填料掺拌至碾压结束所需的时间,以此设计现场试验段试验。如表 1,结合图 3(a),实际工程以室内 0 h 延迟下的最优含水率掺拌填料,然后经历运输—摊铺—整平等过程最终碾压结束,若此过程经历的时间为 2 h,实际上等碾压结束后此含水率对应的最大干密度已有所降低,由 1.972 g/cm³ 变为 1.949 g/cm³。同时,碾压结束后压实系数的检测以现场实测干密度与 0 h 延迟时间下的室内干密度做比值也不合理,这样已减小了压实系数。应以室内 2 h 延迟时间下的最优含水率掺拌填料然后碾压,以现场实测干密度值与室内 2 h 延迟时间下的最大干密度做比值,这样才合理。

表 1 不同延迟时间下最优含水率对应干密度

Tab. 1 Dry density corresponding to the most water content under different delay times

延迟时间/h	干密度 / (g · cm ⁻³)	含水率 / %	延迟时间/h	干密度 / (g · cm ⁻³)	含水率 / %
0	1.972	9.9	3	1.931	9.9
1	1.982	9.9	4	1.918	9.9
2	1.949	9.9	5	1.887	9.9

3.2 不同延迟时间下的冻融循环后强度

图 4 为延迟时间影响下不同组别水泥改良粉细砂强度变化。图 5 为不同冻融循环次数下延迟时间对强度的影响。由图 4、5 可知,改良土的延

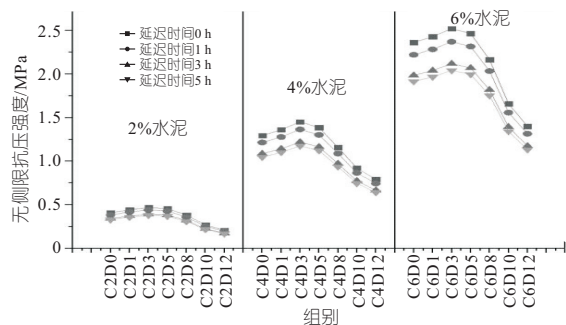


图 4 不同延迟时间冻融循环后强度

Fig. 4 Strength after freeze-thaw cycle with different delay times

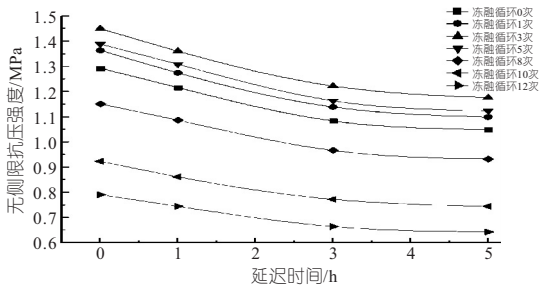


图5 冻融循环与延迟时间之间的关系

Fig. 5 Relationship between freeze-thaw cycle and delay time

延迟时间对其强度有一定影响,总体上看,随延迟时间的增大强度逐渐减小。以4%水泥、0.93压实系数、7 d龄期冻融循环3次的试件为例,延迟时间为0、1、3、5 h的强度分别为1.452、1.365、1.220、1.176 MPa。延迟1 h强度较延迟0 h降低5.99%,延迟3 h强度较延迟1 h降低10.62%,延迟5 h强度较延迟3 h降低3.74%,延迟1~3 h强度降幅较大。冻融循环对水泥改良粉细砂强度的影响,则是随着冻融循环次数的增大,呈先增大后减小的趋势,水泥掺量越高,这种趋势越明显。

不同的延迟时间引起的水泥改良粉细砂在经历冻融循环后的强度变化较明显,但大多耐久性研究往往忽略了这一重要因素。室内研究中,同一组试样,若样本数据过大,一组试样有6个以上,前两个试样与后两个试样之间的成型时间往往已产生较大的延迟,以至于这组样本的偏差系数必然很大,最终造成试验误差。现场施工同样存在这样的问题,如图5,0次冻融循环下的试件其无侧限抗压强度随延迟时间的变化为在3 h内减小速率较快,而后减小速率减慢。以室内不考虑延迟时间的无侧限抗压强度指导施工时的水泥掺量,由于施工现场填料拌和、运输、摊铺、碾压等过程往往需要大量的时间,改良土已经历一定的延迟时间,其冻融循环后的强度必然会受影响。

4 水泥改良土加固机理分析

水泥与粉细砂拌和后,水泥中的成分与粉细砂中的水分发生强烈的化学反应,水泥在土体空隙中形成水泥水化的骨架,以此来约束土粒^[7]。

(1)离子交换和颗粒间的作用。经水泥水化后的胶体中, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 中的 Ca^{2+} 和 $(\text{OH})^-$ 与土体中的 Na^+ 和 K^+ 交换吸附,使粉细砂颗粒形成较大的砂颗粒团,而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 具有较强的吸附活性,使砂颗粒团进一步相互结合,从而形成水泥

土链条状稳定的结构。

(2)碳酸化作用。水泥水化后产生游离的 H_2CO_3 ,同时空气中的 CO_2 与水生成 H_2CO_3 , H_2CO_3 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成 CaCO_3 ,这个过程中砂颗粒固结起到了粗粒化的作用,进而提高了土体的强度。

(3)硬凝反应。随着水泥水化,改良土中析出大量的 Ca^{2+} 与 SiO_2 和 Al_2O_3 产生化学反应,生成一系列不溶于水的稳定结晶矿物,如 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$ 系列水化物、 $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 系列水化物等。改良粉细砂填料与水泥拌和后,主要在砂颗粒表面附着,因为单个砂颗粒粒径比水泥颗粒的粒径大的多,水泥包裹在砂颗粒表面,随着水泥水化反应的进行,砂颗粒之间将逐渐胶结在一起,从而使粉细砂颗粒胶结成整体,硬化后产生较高的强度。

(4)延迟时间对水泥水化产物的影响。随着延迟时间的增大,水泥水化形成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 及部分结晶矿物质使粉细砂颗粒逐渐胶结成整体,进而形成稳定的链条状结构。细颗粒(水泥)的掺入不仅提高了水泥改良粉细砂的粘聚力,同时使松散的粉细砂间生成一定的“连接”,提高了其整体性。此时掺和料内部已形成一定的结构,对掺和料进行击实试验或无侧限抗压强度的试件制作,实际上对已产生的有效连接形成了破坏,使掺和料进行了重新排列组合。待重组后掺和料内一部分水泥已完成了水化反应,相当于一部分水泥已“失效”。同时,在实际碾压过程中若不考虑延迟时间的影响,则碾压结束检测压实系数时难以达到标准,压实系数已有所降低;延迟时间与冻融循环后试件的强度整体呈负相关,对于路基后期的耐久性也有很大的影响。

5 结论

a. 随延迟时间的增大,水泥改良粉细砂的最大干密度先增大后减小,最优含水率先增大后趋于平缓再增大,饱和7 d无侧限抗压强度逐渐减小;冻融循环后,延迟时间前3 h内强度减幅较大,之后减幅变小。

b. 室内研究与现场施工要“一一对应”,即现场填料的碾压也要考虑延迟时间的影响。现场实际施工的最优含水率应预估一定的延迟时间,以此延迟时间下的最优含水率掺拌填料;现场实测干密度应与室内同等延迟时间下的干密度进行对比,以此得出压实度。

c. 随延迟时间的增大,掺和料内部形成了水泥水化产生的水化物,使其形成了一定的链条状结构,此时对掺合料在进行击实试验或无侧限抗压强度试件的制作,则对已产生的有效连接产生了破坏,降低了水泥的效力。

参考文献:

[1] 王海林.戈壁地区高速公路风积砂路堤稳定性分析[J].公路,2020,65(5):61-65.

[2] 张保卫.干湿循环过程中粉细砂改良土路基填料试验研究[J].铁道建筑,2019,59(2):54-56.

[3] 闫登峰,王兰.水泥改良细砂类土延迟时间对强度和

干密度的影响[J].铁道建筑技术,2012(1):60-62.

[4] LOPEZ-QUEROL S,ARIAS-TRUJILLO J,GM-ELIPE M, et al. Improvement of the bearing capacity of confined and unconfined cement-stabilized aeolian sand[J]. Construction and building materials,2017, 153:374-384.

[5] AIBAN S A. A study of sand stabilization in Eastern Saudi Arabia[J]. Engineering geology, 1994, 38 (1-2):65-79.

[6] 中华人民共和国铁道部.铁路工程土工试验规程:TB 10102-2010[S].北京:中国铁道出版社,2011.

[7] 付兵先.高速列车作用下水泥改良粉土路基的动力特性研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2009.

Influence of Delay Effect on Engineering Characteristics of Cement Improved Silty Fine Sand

CHEN Wei¹,HUANG Zhi-jun¹,ZHAO Er-sheng²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Railway Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: In view of the problem that the compaction coefficient of cement improved silty fine sand road in Gobi area is difficult to meet the standard after the completion of rolling inspection as an engineering material, after comprehensive analysis, it is found that the timeliness of cement improved silty fine sand is not considered in on-site construction and inspection. Through the design of compaction test and unconfined compression test of cement improved silty fine sand under different delay time, the influence of delay time on the compaction characteristics and strength characteristics of cement modified silty fine sand was analyzed. Considering the strength change of Subgrade in seasonally frozen area after freeze-thaw cycle, the freeze-thaw cycle test of cement modified silty fine sand under the influence of delay time was designed. The results show that with the increase of delay time, the maximum dry density of cement modified silty fine sand first increases and then decreases, and the optimal water content first increases, then tends to be flat and then increases; The saturated 7 d unconfined compressive strength and the strength after freeze-thaw cycle decreased gradually with the increase of delay time; The structure formed by cement hydration inside admixture has been destroyed after being rolled and formed, reducing the cement effectiveness.

Key words: silty fine sand; strength; delay time; freeze thaw cycle; experimental study

~~~~~  
(上接第 194 页)

### Application of Hydraulic Fracturing In-situ Stress Test Method in Qinling Tunnel

LEI Long

(Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co. Ltd., Shaanxi Province, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** Geostress field plays an important role in the stability of tunnel surrounding rock. Based on the in-situ stress results and geological conditions in the cracked area of the secondary lining concrete of the Qinling water conveyance tunnel from Hanjiang-to-Weihe, three-dimensional hydraulic fracturing method was used to analyze the in-situ stress of the surrounding rock in Qinling tunnel. The results show that the maximum principal stress on the cross section of the horizontal hole is 16.3-37.9 MPa and the minimum principal stress on the cross section is 2.4-9.1 MPa in the horizontal drilling depth range of 9.2-26.6 m. In the vertical drilling depth range of 3.8-20.7 m, the maximum horizontal principal stress is mainly 21.5-30.5 MPa, the azimuth average is N57°E, and the minimum horizontal principal stress is mainly 12.7-16.5 MPa. The maximum and minimum and the spatial maximum principal stress are 24.3 MPa, 14.4 MPa and 24.6 MPa respectively, which are nearly horizontal distribution. The stress field of surrounding rock at the test site of tunnel rock mass is mainly horizontal stress and the rock mass stress is classified as "high in-situ stress".

**Key words:** water conveyance tunnel; geostress test; hydraulic fracturing method; plastic deformation