

文章编号 :1001-831X(2004)01-0036-05

盾构法隧道施工中盾构控制滞后效应的研究*

谈小龙¹, 朱 伟¹, 秦建设¹, 杉本光隆²

(1. 河海大学岩土所, 南京 210098; 2. 日本长岗科技大学)

摘 要:盾构机的姿态控制是其在隧道施工作业中的一项重要问题。在分析盾构法隧道施工中盾构机受力情况的基础上,引进盾构机运动力学模型,通过现场资料实测值与计算值对其进行了验证,并应用此模型研究了盾构机行为控制与运动响应之间的滞后效应,得到一些有用的结论,为盾构施工中的姿态控制提供了有意义的依据。

关键词: 盾构法; 姿态控制; 滞后效应; 运动力学模型

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

1 引言

在应用盾构法进行隧道施工时,盾构机姿态控制是施工成败的关键技术,其好坏不但对隧道轴线的控制具有重要的意义,而且对施工中后续工作的顺利进行起着至关重要的作用。施工中盾构机姿态控制主要通过设置区域内千斤顶的作用,同时结合超挖装置及铰接千斤顶的应用得以实现。但是由于盾构施工中姿态控制措施的实现具有一定的滞后效应,也就是说,盾构机推进操作方式的变化与其自身发生线路变化之间存在一个时间上、距离上的滞后,这一现象我们称为盾构滞后效应。为了防止过大偏离的发生必须进行超前操作,就是在到达变线区间之前预先对操作方法进行调整,目前完全凭盾构机驾驶员的经验来提前发出姿态控制指令,具有很大的任意性,这也是目前盾构法隧道施工中盾构机“蛇行”现象^[1]普遍存在的根本原因。本文通过研究盾构施工中的盾构机受力状况,引进运动力学模型,使用运动力学模型研究了施工过程中盾构机运动的滞后效应。

2 盾构运动力学模型^{[2][3]}

2.1 盾构法施工简介

盾构法是通过盾构机前方刀盘切削开挖面土

体,使其进入压力舱,并通过排土器输送至后备车。目前在隧道工程中应用较为普遍的盾构机有两种:土压平衡式盾构机和泥水式盾构机,我国目前土压平衡式盾构机应用较为广泛,两种盾构机的主要区别在于前方刀盘的布置及稳定开挖面的压力舱内泥水介质形成方式不同。

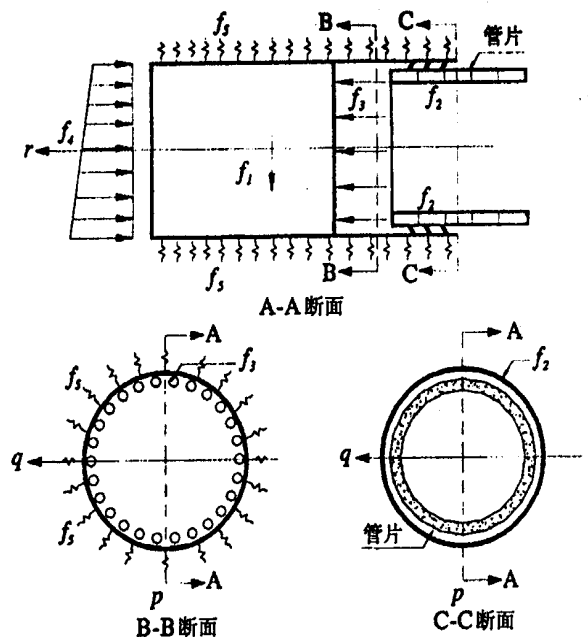


图 1 盾构运动学模型示意图

* 收稿日期:2003-12-29(修改稿)

作者简介:谈小龙(1977-),男,江苏人,硕士,主要从事隧道盾构施工技术研究。

2.2 盾构机受力分析

盾构姿态的控制研究以盾构机作为分析主体,其主要受力荷载状况如下。(见图1)

2.2.1 自重力 f_1

自重力包括盾构机自重,开挖舱内土体自重。

2.2.2 盾尾作用力 f_2

在盾构掘进过程中,管片与盾构之间的作用力通过钢丝刷和密封油脂发挥作用。在正常情况下,通常认为盾尾作用力由盾尾钢丝刷变形作用力和盾尾密封油脂压力这几部分作用力叠加而成。

2.2.3 盾尾千斤顶作用力 f_3

由于在盾构施工中,并非一直是所有的千斤顶共同作用,而且其作用力是通过靴板反作用于管片上施加的,其方向平行于盾构机。

2.2.4 正面土体阻力 f_4

正面土体阻力由两部分组成:刀头前方的土体阻力,主要是垂直于刀盘方向的土压力,刀盘周边的土体阻力,主要是刀头切削土体时受到的反作用力,方向与刀头旋转状态有关,其计算中涉及到刀盘开口率的问题。对于泥水式或土压平衡式盾构机,土体阻力稍有差异,但其原理相似。

2.2.5 盾构机壳周围土体作用力 f_5

盾构机在土体中行进时,不但盾构机外壳与土体之间有相互摩擦力,同时,在纠偏时由于盾构机对土体的挤压作用会受到土体的反力作用。以往的研究表明,盾构盾壳上受到的土压力是盾构掘进控制的主要影响因素。而盾壳上的土压力是随着盾构掘进引起的周围土体的变形而变化的。

2.3 盾构机运动模型的建立及程序的实现

盾构掘进是在三维空间内的运动,因而盾构的运动有六个自由度。即盾构在 x, y, z 方向上的位移变化 x, y, z 以及盾构角度变化即水平方向上盾构偏转角 γ 、垂直方向上的俯仰角 ρ ,以及盾构自身的回转角 r 。

盾构运动力学模型,是基于盾构机受力分析,揭示盾构推进姿态参数即 x, y, z 和 γ, ρ, r 和盾构荷载参数的相互关系。运动力学模型的实现可以通过建立如下式(1)所示的数学方程实现。

$$f(f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, x, y, z, \gamma, \rho, r, t) = 0 \quad (1)$$

上式各参数如 2.2, 2.3 所述, t 为时间变量。

本文计算中采用了日本长岗大学杉本教授开发的计算软件 3DSSPC 进行数值计算,该计算通过输入盾构控制参数,能够预测盾构机在各个时刻的

运动轨迹。

3 运动力学模型适用性的验证^[4]

为了验证计算程序 3DSSPC,本文首先结合深圳地铁一期工程购物公园到香蜜湖区间隧道的一个 800m 曲率半径的曲线段盾构施工实例,对实测值和计算值进行了比较。

盾构机为土压平衡式,切削直径为 6.14m,机身长为 8.52m;刀盘开口率为 30%;千斤顶的配置半径为 2.85m。此曲线段的地质剖面图如图 2 所示。各层土的性质如表 1 所示。盾构埋置于均匀的土层中,即砾质粘性土中。隧道直径为 6m。具体的线路条件如图 3 所示,盾构由购物公园站出发的直线段进入一个 800m 的曲线段。

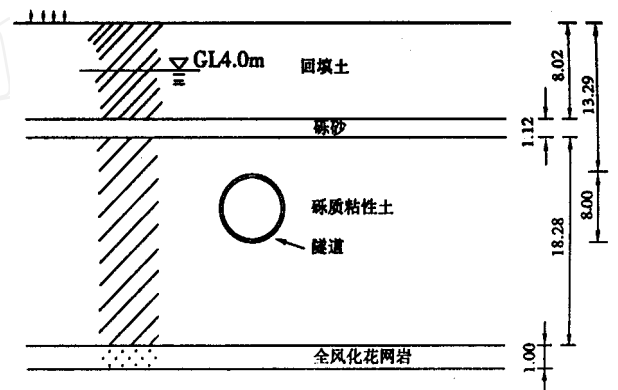


图 2 地质剖面图

主要物理力学参数

表 1

地层	天然容重 (kN/m^3)	浮容重 (kN/m^3)	G_s	C (kPa)	ϕ	N
回填土	18.2	8.2	2.72	23	28	11
砾砂	22.0	12	2.69	20	35	26
砾质粘性土	18.2	8.2	2.69	23.7	26.7	17

运动力学模型计算程序 3DSSPC 所需部分参数中,千斤顶作用力,前方土体阻力通过盾构机自动量测系统提供(千斤顶推力、刀盘扭矩、开挖面支护土压力),盾尾作用力通过测量盾构机尾部坐标与机壳内管片位置计算获得,盾壳周围土压力的计算采用岩土工程中的位移土压力概念,及模型中盾构机受到周围土体作用力与盾构机对土体的挤压情况有关。盾构机在该曲线段的运动姿态(分为刀盘和盾尾两部分)实测值与计算值详见图 4、图 5、图 6、图 7 所示。

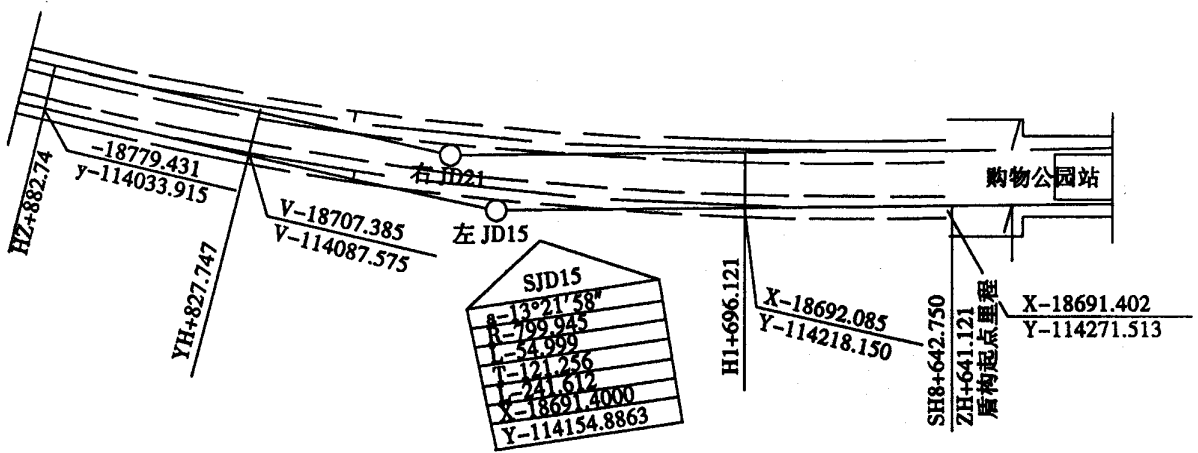


图 3 盾构施工线路图

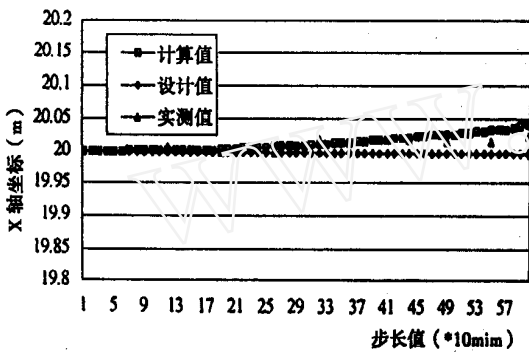


图 4 盾构刀盘垂直方向的运动轨迹

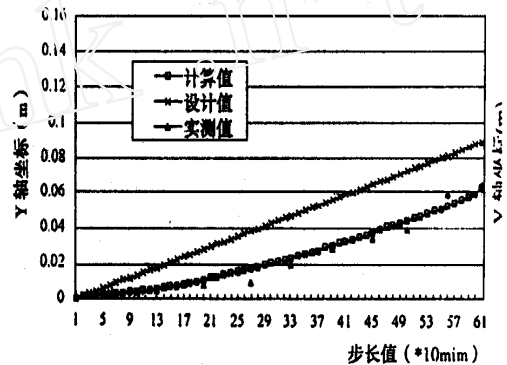


图 6 盾构刀盘在水平方向的运动轨迹

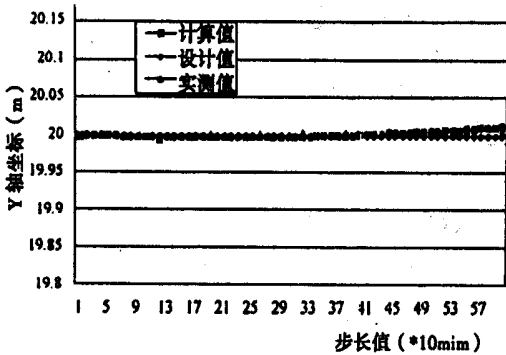


图 5 盾构盾尾垂直方向的运动轨迹

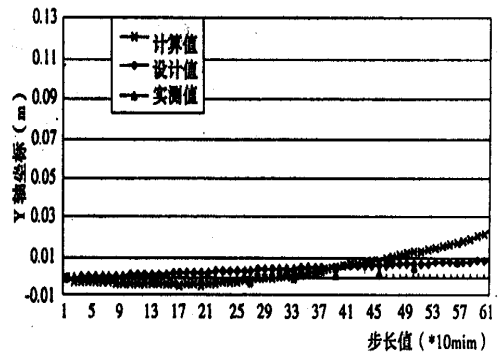


图 7 盾构盾尾在水平方向的运动轨迹

从盾构机刀盘和盾尾在水平面和垂直面运动轨迹看,无论实测数据还是理论计算的结果与设计值之间的偏差都是较小的,说明盾构施工行为是被较好的控制了。另外,从图上看,实测数据与理论计算值是比较接近和吻合,也反映了模拟的有效性以及计算值的合理性。

4 盾构机的操作方法与盾构滞后效应

4.1 盾构滞后效应的概念

在盾构施工过程中,盾构控制参数需要根据实

际情况加以改变,但盾构控制参数改变之后,盾构姿态是如何回应这些控制参数的变化的?是瞬时反映出来的,还是有一个响应时间?如果盾构姿态对于盾构控制的调整有一个响应的过程,同样的盾构控制参数,对于不同的地层条件或不同的控制方法,其响应时间会有什么样的差异?

盾构机的姿态控制是通过千斤顶作用型式的改变、超挖刀的应用、铰接千斤顶的打开等来实现的,其对盾构机运行轨迹的改变是一种间接行为,而盾构机具有一定长度并且周围处于土体之中,周

围土体对其姿态的改变起着阻碍作用,这说明了盾构机姿态的改变对盾构控制的调整有着一个响应的滞后性。

上面的验证计算中也说明了,盾构姿态变化相对于盾构控制参数的改变有一个响应的时间,也就是说盾构控制参数的改变与盾构姿态变化并不是同步的,盾构运动存在滞后效应。

4.2 盾构控制中千斤顶型式的滞后效应研究

千斤顶模式与时间滞后,距离滞后,姿态滞后的关系,在盾构姿态控制中,改变千斤顶的型式是盾构控制操作首选的方法,一般是对全部千斤顶进行分组,在分组的前提下,通过开关不同的千斤顶,对盾构姿态进行控制。

本文计算了某一曲线段上,不同的盾构千斤顶分组型式对盾构姿态的控制效果。盾构先是在直线段上掘进了20m,使用了全部的千斤顶,掘进时间为1100min;从第1100min时刻开始,盾构进入800m的曲线段,需要调整千斤顶的型式。千斤顶分组型式见图8,不同千斤顶分组下盾构机在水平方向的姿态变化情况见图9,盾构机的响应时间见表2。

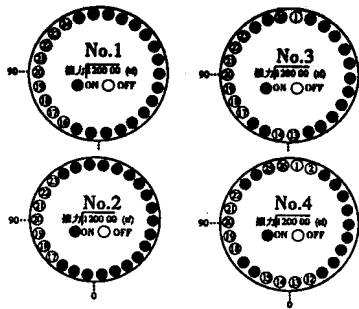


图8 盾构千斤顶分组型式

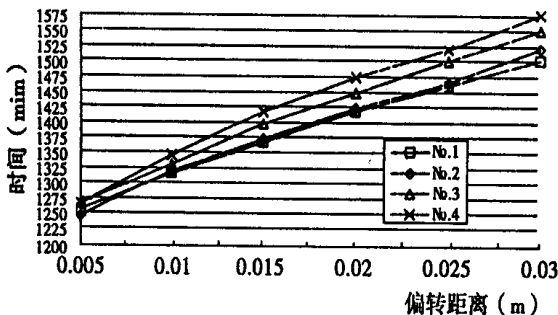


图9 不同千斤顶型式,盾构在y轴上的偏转与时间的关系

表2中可以看出,不同的千斤顶分组型式,盾构运动或者说盾构姿态的变化均有一定的滞后。同时无论从时间上还是距离上看,对于不同的千斤顶型式,滞后的时间和距离均有一定的差异。这四

种千斤顶型式中,盾构在y轴方向上的偏离值是刚开始时(第1100min~第1250min)是比较接近的;从第1250min时刻开始,出现了稍大的偏离。四种千斤顶的转弯幅度各不相同,其幅度大小依次为No.1 > No.2 > No.3 > No.4。

不同盾构千斤顶型式的滞后效应 表2

NO.	调整时刻 (min)	响应时刻 (min)	滞后时间 (min)	掘进距离 (m)	千斤顶使用情况
1	1000	1120	120	4.08	关闭 16~24号千斤顶
2	1000	1140	140	4.76	关闭 17~23, 1, 26, 13, 14号千斤顶
3	1000	1140	140	4.76	关闭 16~22, 1, 2, 25, 26, 12~15号千斤顶
4	1000	1150	150	5.116	关闭 17~23号千斤顶

在使用千斤顶控制盾构机姿态施工中,盾构速度通常保持不变,其姿态改变的主要原因是由于千斤顶的作用使盾构机产生了力矩。如上图所示,盾构在y轴向的偏离和千斤顶力矩 M_{sp} (不同的千斤顶分组,其产生的力矩也不相同)关系密切,y轴向的偏离值与千斤顶力矩 M_{sp} 大小是密切相关的,由计算知, $M_{sp1} > M_{sp2} > M_{sp3} > M_{sp4}$ 。

4.3 围岩性质与盾构滞后效应

引起盾构控制滞后效应的一个重要原因是由于周围土体对盾构机的姿态变化阻碍作用,所以不同的围岩介质对盾构机的姿态改变约束不同,从而也对控制滞后效应有着很大的影响。本节分析了不同围岩介质下盾构机控制滞后效应情况。

四种不同的地层条件 表3

土性	C (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	N	k_{hv} (kN/m ³)
SZ 砾质粘性土	20	40	20	25	20000
N 粉土	9	29.1	17.4	18	10000
SH 粘性土	10	20	18	15	10000
BJ 粉质粘土	10	33.6	19	25	20000

选择的围岩条件和参数取值见表3。相同的盾构操作条件,围岩条件与时间滞后,距离滞后的效应关系见表4。

相同的控制条件,在不同的围岩条件下,盾构运动所表现出来的滞后效应也不同。N值越小,无论刀头还是盾尾,出现偏离的时间较短,偏离的距

高也越短。反之,亦然。N 是反映土层强度的一个指标,也就是说 N 值越大,相应地土的强度也越高;在较硬的土层中,盾构运动的滞后效应的灵敏

度也越小。在较软的土层中,盾构滞后效应的灵敏度也越高。这一点结合表 2 和表 4,不难看出。

盾构滞后效应

表 4

土质	掘进速度	刀头出现偏离的时间、掘进距离		盾尾出现偏离时间、掘进距离	
SZ 砾质粘性土	0.034m/min	150min	5.4m	330min	11.88m
N 粉土	0.034m/min	140min	4.81m	310min	11.56m
SH 软粘土	0.034m/min	130min	4.76m	300min	11.1m
BI 粉质粘土	0.034m/min	150min	5.4m	330min	11.88m

5 结论

(1) 滞后效应的重要性:鉴于目前国内盾构施工中存在的盾构机运动控制问题,尤其是曲线段上盾构机的轴线控制,不是很理想,而轴线控制又是盾构施工的一项关键技术,研究盾构滞后效应有助于这一问题的解决。对盾构机滞后效应进行分析,就可以避免“尝试性”施工,可以对盾构机运动进行事先控制,以达到良好的控制效果。

(2) 影响滞后效应的因素:影响盾构运动滞后的主要因素分为两类:一是围岩条件;二是控制方法。不同的盾构操作方法,得到的盾构滞后效应也是不同的。文中对四种不同千斤顶分组型式,在相同的围岩条件下,盾构运动的滞后效应进行了分析。从结果看,千斤顶分组型式对盾构运动滞后效应的影响是明显的。文中对四种不同的围岩条件,

在相同的控制操作下,其盾构运动滞后效应进行了分析。围岩的 N 值是反映土的强度的一个综合性指标。从结果看,N 值越小,盾构表现出来的运动滞后效应的灵敏度也越高,反之,亦然。

(3) 滞后效应的克服与消除:盾构掘进施工中,姿态控制的滞后效应是不可能完全避免的,在地层条件一定的情况下,合理的千斤顶布置形式能够显著减少滞后效应。同时,为了纠偏等原因而使用的超挖技术,在一定程度上也类似于改变了地层条件,增加了滞后效应的灵敏度。

滞后效应受到盾构控制方式和围岩的影响,在实际施工时,需要根据盾构所处的实际的地质条件和线路条件,考虑到盾构运动的滞后效应,来选取合适的盾构控制方式和控制时间,以达到事前控制,取得更好的盾构线路控制成果。

参考文献:

- [1] 日本土木学会编,朱伟,译. 隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001,pp.38~41.
- [2] Aphichat Sramoon, Mitsutaka Sugimoto. Theoretical Model of Shield Behavior during Excavation, I:Theory, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineer[J]. 2002,2,pp:138~154.
- [3] M. Sugimoto, N. Toshiho, A. Sramoon. Study on Shield Behavior by 3D Shield Simulator[M]. 2sTokyo, 1999, pp:417~422.
- [4] 谈小龙. 盾构隧道施工行为控制的研究[D]. 南京:河海大学硕士学位论文,2002.

jection of ground geology , investigation with instrument in tunnel and prediction with record of working faces. Some satisfactory results were gained which play active role in ensuring the safety and working schedule of the work.

[**Key words**] tunnel ; fault ; geological disaster ; forecast

A Study on Hysteresis Effect of Shield Control in Construction of Shield Tunnel TAN Xiao-long et al

[**Abstract**] It is an important task to control the position of shield mechanism during tunneling. Based on analysis of loading state of shield machine during shield tunneling , with introducing the mechanical model of movement of the shield machine , which is verified by in-site measurement and calculation , the hysteresis effect of behavior control of shield machine to the action response is studied , some useful conclusions have been drawn , which offer meaningful basis for position control during shield tunneling.

[**Key words**] shield tunneling ; position control ; hysteresis effect ; mechanical model of motion

Anti-floating Design in Underground Engineering YUAN Zhen-ru

[**Abstract**] In case of underground construction in area of high ground water level , there is often anti-floating problem during the work. According to the characteristics of underground engineering , the suitability of some common anti-floating measures is analyzed. The principle for choosing the anti-floating measures is expounded. The procedure and method for anti-floating design in underground engineering are suggested.

[**Key words**] underground engineering ; anti-floating measure ; design

Analysis on Deformation of Foundation Pit Enclosure and Settlement of Neighboring Building in Case of Top Down Technology YUAN Ju-yuan et al

[**Abstract**] Based on analysis of deformation of enclosure and settlement of neighboring building during construction of deep foundation pit of Xinye Building , Shanghai , it is found that the supporting system of floor of foundation pit with top-down technology has the ability against deformation. After formation of floor in underground first story , the settlement of the neighboring building tends to be stable , which can meet the requirement on deformation of foundation pit during excavation in soft soil region. It is found that a great part of settlement of neighboring building was formed during trench cutting for the underground continuous wall , so it is necessary to have isolation measure before trenching of underground continuous wall , such as deep mixing pile. In addition , the influence of neighboring building 's foundation on its settlement as well as the deformation of enclosure caused by partial overloading during construction is discussed. [**Key words**] deep foundation pit ; top-down technology ; isolation measure ; settlement control ; analysis of measured data

Project Evaluation and Construction Technology for Viaduct Under Existed Railway ... DING Chun-lin et al

[**Abstract**] The mentioned viaduct is situated at K18 + 326.7 of Zegan Railway , where the bearing capacity of the ground is quite poor , the beam for construction work is hard to keep stable , in addition , there will be transverse displacement of both side openings during construction , making the advancement of medium opening difficult. A new project was suggested , and the bearing capacity of the ground under side cabin , the settlement of bottom plate and maximum difference of settlement during train loading as well as the strength of the side cabin were calculated , using analytical method and numerical FEM , some suggestions for reference were given for construction of this viaduct.

[**Key words**] viaduct ; construction technology ; bearing capacity of the ground ; settlement ; structural strength

Monitoring and Prediction of Permeability Pressure of Rock of Sewage Tunnel across Yangtze River in Chongqing WU Xiang-chao et al

[**Abstract**] Based on the monitoring data for permeability pressure of the rock during reconnaissance , the variation of permeability pressure near bottom and top of the tunnel across the river in period of 100 years is predicted by correlation analysis , the result can serve as guidance for design and construction of the project.