

文章编号:1001-831X(2003)01-0028-05

盾构隧道管片设计参数的灵敏度分析*

胡如军, 朱 伟, 季亚平

(河海大学岩土工程研究所, 江苏南京 210098)

摘 要: 在我国目前的工程实际应用中, 盾构隧道的设计多采用将管片考虑为均匀刚度的环来进行结构计算。由于国内目前尚无统一的盾构隧道设计规范, 无论在荷载条件还是结构模型的取值中均存在一定的随意性。针对这一现状, 本文对设计中的关键参数进行了灵敏度分析, 明确了围岩条件、结构条件对设计计算结果的影响, 提出了设计取值的一些原则。

关键词: 盾构隧道; 衬砌管片; 设计参数; 灵敏度分析

中图分类号: U451+.4

文献标识码: A

1 引言

盾构隧道技术在我国应用越来越多, 尤其是近几年城市地铁的大规模修建更为这一技术提供了应用空间^[1]。在盾构技术广泛使用的同时, 人们越来越重视盾构隧道的设计问题。因为盾构隧道的衬砌管片是盾构施工的最终产物, 也是保证隧道百年使用寿命的永久结构物。另一方面, 管片的造价一般占总工程费用的 30%~40%, 是除盾构机以外的最大造价组成部分。因此, 如何安全、经济地进行盾构隧道的管片设计就成为一个重要的问题。

目前, 我国尚无统一的盾构隧道设计规范, 各设计单位依据已有的经验进行类比性设计, 很难达到最为理想的安全、经济效果。在设计计算中, 较为广泛采用的是刚度均匀圆环结构模型, 同时也考虑由于接头引起的刚度降低和环向螺栓传递弯矩的递增。但荷载系统的多样性, 而且参数取值也无明确的方法可以遵循。我国除上海以外, 其他地区的盾构隧道施工历史较短, 尚无定型的实测资料和系统的经验可以参照, 加上各地区之间的地质条件差异很大, 使得设计取值变得相当困难。

鉴于盾构隧道管片设计的这一现状, 本文进行了设计参数的灵敏度分析。目的在于明确设计中的结构参数、荷载参数会对计算结果产生怎样的影

响, 同时提出一些设计取值的原则。

2 设计计算方法

2.1 结构模型和荷载系统

本文的设计计算方法是目前国内较为常用的方法, 假设管片环是弯曲刚度均匀的环(如图 1), 考虑管片接头部分的弯曲刚度下降和错缝拼接效应的方法(以下遵循日本的用语称为修正惯用法)。对带有螺栓接头的管片环引入了弯曲刚度有效率

这一概念, 其意义是将接头部分弯曲刚度的下降评价为环整体的弯曲刚度的下降, 将管片环的刚度考虑为 EI (弯曲刚度的有效率 η)。这一方法还考虑到错缝拼装的接头部分的弯矩分配, 在从具有 EI 型均匀弯曲刚度的环推算出来的截面内力中, 对弯矩进行增减分配, 设 $(1 + \eta)M$ 为管片主截面的设计弯矩 (η : 弯矩的提高率, $\eta \leq 1$), $(1 - \eta)M$ 为接头处的设计弯矩。如图 2 所示, 错缝拼装的管片环在受力时, 环向接头会将弯矩 M_2 传递于相邻管片上的, 此时弯矩的提高率 η 就是 M_2 与具有 EI 弯曲刚度均匀环上产生的弯矩 M 的比值 (M_2/M)。

盾构管片设计时的基本荷载系统^[2]一般考虑如图 3, 主要包括垂直土压力、水压力、自重、上覆荷载和地基抗力。当然, 设计时还要根据隧道的使

* 收稿日期: 2002-06-28

作者简介: 胡如军(1978-), 男, 湖北人, 硕士, 主要从事盾构隧道衬砌研究。

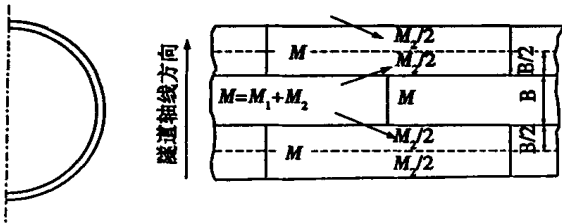


图1 结构模型

图2 接头处弯矩的分配

用目的、施工条件及周围环境来考虑内部荷载、施工荷载、地震的影响^[3]等。由于基本荷载是设计中的最主要内容,也就成为本研究的主要对象。

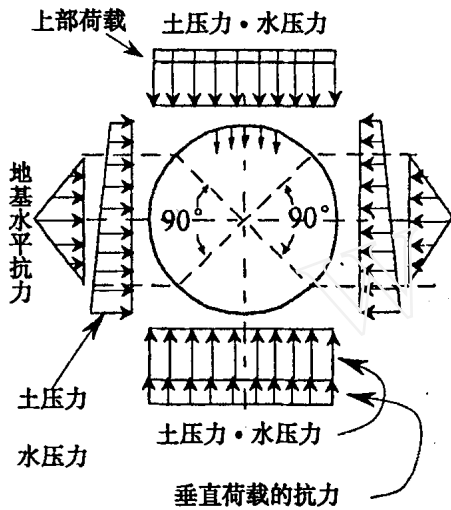


图3 管片设计的荷载系统

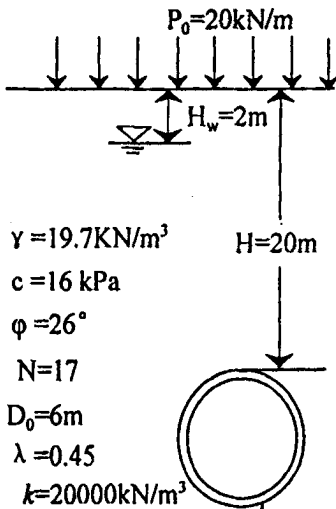


图4 设计计算的围岩基本条件

2.2 结构计算方法^[4]

使用结构力学的方法对每一个单独荷载所产生的内力和变形进行推导,最后使用叠加法求解出最终的管片内力和变形,内力计算公式可参照文献^[2]解说表 2.17。

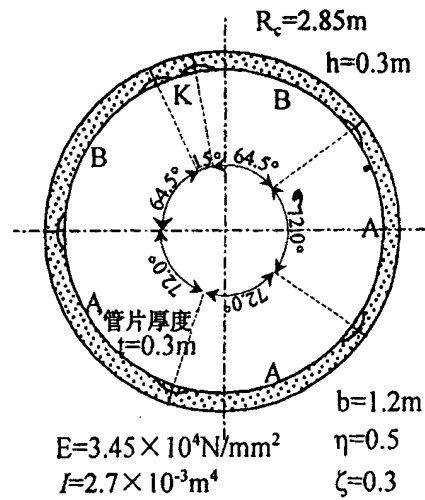


图5 管片环的结构示意图

本研究的设计计算使用了自编程序,计算结果的准确性已与一些文献^[5]上的算例进行比较并取得了一致。

3 基本设计计算条件

为了明确设计取值参数对计算结果的影响,本研究以深圳地铁盾构隧道的围岩条件和衬砌管片条件作为基本计算雏形(CASE-0),在此计算条件的基础上对各种参数的影响进行讨论。

根据深圳地铁一期2A标段盾构工程益田~香蜜湖区间地质勘察结果进行整理,选取了具有代表性的计算剖面,如图4所示。此剖面围岩为第四系中更新统残积的砾质粘土地层,图中 P_0 为上覆荷载, H_w 为地下水位, H 为隧道上部埋深,为土的天然重度, c 为土的粘聚力,为土的内摩擦角, N 为标贯击数, D_0 为盾构管片环的外径。另外,侧压力系数, k :地基抗力系数,都是以土的标贯击数为依据,根据文献^[2]的经验值查表而得,土压力的计算均采用土水分算的方法进行。

管片的结构构成如图5所示,管片环内径为5.4m,使用C50钢筋混凝土管片,分块与地铁隧道中的常用方法相同,采用的6块分割,小封顶。管片间连接螺栓和环间连接螺栓均采用M27钢弧形螺栓连接。图中 E 为管片弹性模量, I 为管片环的弯曲惯性矩, b 为管片截面宽度, h 为管片截面高度, R_c 为管片环的计算半径,为管片环刚度折减系数,为管片弯矩分配系数。均将这一区间的实际设计取值作为基本值。

4 灵敏度分析

4.1 灵敏度分析的主要对象参数

盾构隧道结构设计时,一般主要考虑结构内力、结构变形和防水问题,具体问题涉及配筋、管片厚度、接头形式、防水带配置等方面。而影响结构内力、结构变形和防水问题的主要因素可分为围岩方面的因素和结构方面的因素。这些因素中有一些是易于确定的因素,比如管片环的结构参数,大多数是变化范围小,易于确定的。也有一些因素较为难以确定,尤其是围岩的条件,选取什么样的计算剖面,在离散性较大的土工参数中怎样提取设计参数。所以,本研究的灵敏度分析主要是针对这些难以确定的因素,也就是取值变化范围较大的参数,以明确这些参数取值偏大、偏小时对结构计算会发生怎样的影响。

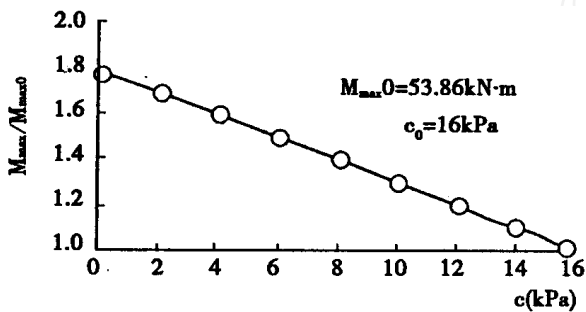


图 6 管片最大弯矩随粘聚力 c 的变化

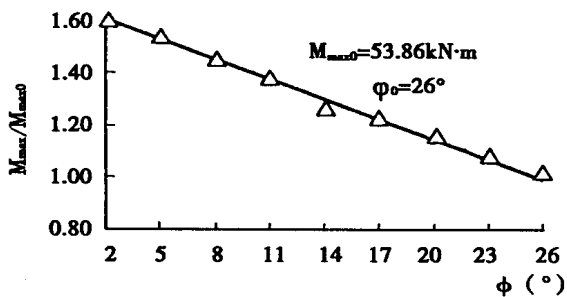


图 7 管片最大弯矩随内摩擦角 ϕ 的变化

4.2 围岩强度参数的灵敏度分析

与其他隧道的设计一样,围岩对盾构隧道衬砌管片设计的影响是相当重要的。为了明确围岩强度参数对设计计算结果的影响程度,以 CASE - 0 为基础,分别对粘聚力 c 、内摩擦角 ϕ 进行了灵敏度分析,计算结果见图 6、图 7。

从计算方法上分析,围岩强度从几个方面影响结构计算的结果。第一,强度的差异反映在垂直土压力的大小上,也就是根据太沙基松弛土压力公式

所计算出的松弛后的换算覆土厚度发生变化,强度降低使松弛范围扩大而使管片环承受的垂直土压力增加。第二,强度的差异也决定了水平土压力的变化。一般计算的水平土压力是根据换算覆土厚度与土压力系数来决定的,强度降低后换算覆土厚度增加,使得水平土压力有所增加。同时,强度的降低会导致水平土压力系数的变化,也会引起一定程度上土压力的增加。由于盾构管片承受的水平土压力的土压力系数还处于依据经验进行确定的阶段,尚无成熟的计算方法,所以本研究在进行计算时考虑在计算强度范围内的变化是有限的,所以采用了定值 0.45。第三,强度的差异也决定了地基抗力的变化,从理论上讲地基抗力系数 k 是随着强度的增加而增加的。在强度降低对荷载系统的影响中,垂直荷载的增加总是大于水平荷载的增加,因为水平土压力系数一般都小于 1.0,而且地基抗力也会减少。

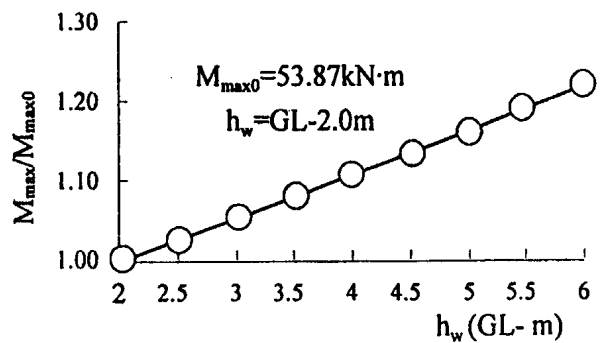


图 8 管片最大弯矩与地下水位的关系

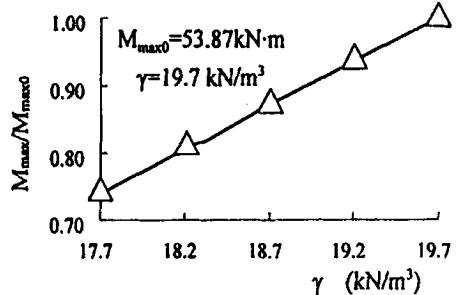


图 9 管片最大弯矩与土体重度的关系

对于计算结果,我们从结构内力、结构变形和防水问题三个方面考虑强度降低对设计的影响。从变形上讲,在本次计算所考虑的强度参数范围内,管片环的直径变形量均可保证在 4.0mm 以内,满足直径变形量 $\leq 2\%$ 的要求。从防水的角度讲,如果采用压缩性防水带,则需要保持一定的轴向压缩力。在计算参数范围内,轴力随着强度的降低而

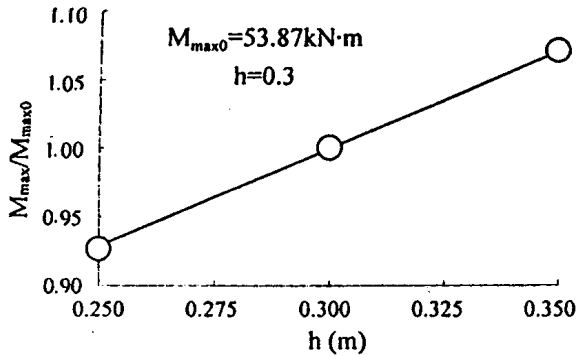


图 10 管片最大弯矩与管片厚度的关系

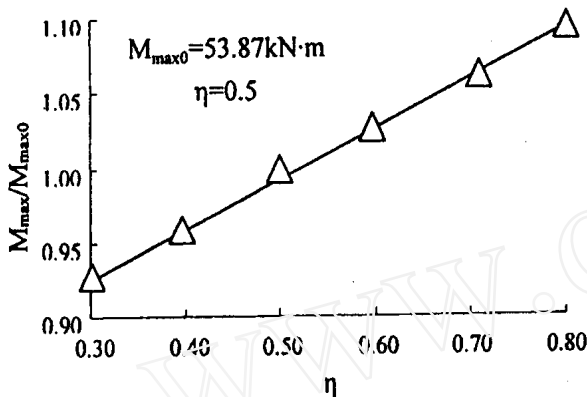


图 11 管片最大弯矩与刚度折减系数的关系

增加,最大增加量为 20%左右,但可以认为这一增加量不是防水设计的决定因素。对结构设计影响最大的是截面内力的变化,尤其是弯矩的变化会直接影响配筋设计等重要环节。在直径 6m 左右,埋深 20m 左右的地铁隧道中,结构设计一般都是一个弯矩卓越问题,相对于轴力和剪力来说,弯矩是设计人员最为关心的计算结果。

把 CASE - 0 计算出的最大弯矩作为 M_{max0} ,与围岩强度降低后的最大弯矩 M_{max} 进行比较。可以看出,无论粘聚力或内摩擦角的降低基本上可以使最大弯矩按直线增加(图 6,图 7)。粘聚力从 16 0 (kPa)就可使弯矩增加 80%,而内摩擦角从 $26^{\circ} 2'$ 就可使弯矩增加 60%。最大弯矩几乎无一例外产生于管片环的顶部。可以认为,弯矩的产生和大小本身是垂直和水平荷载之间的不平衡所造成的。如果垂直荷载和水平荷载的大小完全一样就不会产生弯矩(就象把隧道置于水中时的状况)。而垂直荷载和水平荷载之间的不平衡越大产生的弯矩也会越大。从国内外盾构隧道施工的原理和经验看,管片环上的作用土压力系数一般都在 0.4~0.7 之间,这就决定了围岩越软弱这种不平衡越大的趋势。

4.3 地下水位的灵敏度分析

地下水位的变化主要对荷载系统产生两方面的影响,其一是土压力的变化,地下水位以上按照天然重度、地下水位以下按照浮重度计算。其二是水压力的变化,由于水压力的变化在各个方向上是相同的,原理上只能导致轴力的变化而不对弯矩发生影响。

仍以 CASE - 0 作为基本条件,将地下水位从 CL - 2.0m 逐渐降低,计算由此而对设计结果所产生的影响。将计算结果中的最大弯矩整理为图 8,可以看到弯矩的计算值随着水位的下降而上升。水位下降 4m 所引起的弯矩增加约为 20%左右。反映出水位下降引起垂直土压力增加的结果。而作为水压力减少的直接结果,轴力大约减少了 6%。从这一计算看出,在设计中易被随意处理的地下水位置,仍然可以对管片设计产生一定的影响。

4.4 土体重度的灵敏度分析

考虑到地质勘察资料中土重度也具有一定的离散性,所以对重度的灵敏度也作了分析。考虑其可能变化的范围进行了计算,其结果示于图 9。实际上重度的减少引起荷载系统的变化,最终引起了一定程度弯矩的减少。

4.5 管片厚度的灵敏度分析

管片厚度不同时设计计算的结果会发生怎样的变化呢?鉴于地铁盾构隧道设计中经常遇到的管片厚度确定问题,在此进行了计算分析。管片厚度的影响可以分为两个方面,第一是荷载的变化,管片厚度的增加降低了管片环的变形量,从而减少了地基的抗力。第二是结构计算发生变化,厚度的增加使得管片环的变形量减小和管片环的计算半径 R_c 增大,从而影响弯矩的计算值。

分别对厚度为 0.25, 0.30, 0.35m 的管片环进行计算,得到的结果见图 10。管片厚度的变化对计算弯矩的影响在 10%以内。从中可以看出,管片厚度加大并不会导致弯矩的急剧上升,但是可以获得为配筋提供更宽裕的空间、保证保护层厚度、防腐蚀、减少变形等方面的益处。

4.6 管片刚度折减系数的灵敏度分析

管片刚度折减系数是与接头螺栓的材料及数量相关,但尚无理论上的计算方法。在国外一般根据经验确定,有时也通过整环荷载试验来实测。国内一般难以实施整环荷载试验,大多是参考国外的经验进行设定。

值的变化所带来的影响相似于管片厚度,值的减小会降低管片环的刚度而使弯矩减少,但会增加变形。分别对 0.3~0.8 之间的 μ 值进行了计算,所得到的结果见图 11。 μ 的变化对计算弯矩的影响也在 10% 以内。

5 结 语

(1) 本文对盾构隧道管片设计中的一些主要参数进行了灵敏度分析,根据分析结果可以认为围岩强度参数对设计计算结果的影响最大。如果将深圳地铁砾质粘性土的强度参数的单项 c 降低到 0 或者将 μ 降低到 2°,计算弯矩会增加 60%~80%。

所以在设计时对于强度参数的取值要非常慎重。建议进行工程地质勘察时最好进行标贯试验,因为利用 N 值可以根据日本盾构隧道规范^[2]取得可以参照的经验值。

(2) 以安全设计为第一原则,在设计参数较难确定时,地下水位要取深一点,重度要选取大一点的数值。

(3) 管片环的结构参数似乎对设计计算结果的影响没有围岩那么大,而且相对于围岩来说参数的确定相对容易。只是参数 μ 的确定尚无简单、实用的方法,希望以后能够实施一些整环荷载试验建立这一参数的经验取值范围。

参考文献:

- [1] 朱伟,陈仁俊. 盾构隧道技术问题和施工管理[J]. 岩土工程界,2001 Vol.4, No.12, pp.14~16.
- [2] 朱伟,译. 日本土木学会隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001 pp.38~41.
- [3] 朱伟,高玉峰,钟小春. 盾构隧道抗震设计问题探讨[A]. 第六届全国土动力学学术会议论文集[C]. 2002 pp.510~517.
- [4] 胡如军,朱伟,谈小龙. 盾构隧道管片的设计计算方法[J]. 河海大学学报,Vol.29, Supplement,2001 pp.182~185.
- [5] シールドトンネル新技术研究会编. シールドトンネル新技术[M]. 东京:土木工学社出版,1995 pp.241~245.

《地下空间》征稿启事

1. 征文范围:

国内外地下空间开发利用的新构想、新成果;地下工程和相关岩土工程勘察、规划、设计、施工、监测和管理方面研究论文或工程实例;国外近二年内发表的有关上述方面的译文。

2. 来稿约定和注意事项:

(1) 来稿应是作者尚未公开发表的文章,勿一稿多投。文稿应注意到论点明确,文字简练,公式正确、数据可靠。字数不超过 7000 字。正文中物理量和计量单位应符合国家现行标准。

(2) 文稿题名不超过 20 个字;论文摘要约 150 个字(写明研究目的、方法、结果);关键词 3~5 个;参考文献采用顺序编码(按文中出现先后顺序编号)。文稿首页下方附第一作者简介(包括:姓名、出生年、性别、民族、籍贯、学历、职称、主要工作或研究方向)。若来稿有基金资助背景,请写明何种基金及基金编号,列在第一作者简介下方。

(3) 来稿尽可能用计算机打印在 A4 纸上(最好同时提供软盘),文中图、表应随文出现,插图线条清晰、注字清楚(能制版印刷),表格采用“三线表”格式。

(4) 编辑部收到来稿后,将请同行专家审读,由编辑部集体决定是否录用。作者投稿后,若半年还未收到本刊录用通知,视作退稿处理,非手写稿恕不退回原稿。文稿一经采用酌寄稿酬。

(5) 来稿文责自负,勿涉及国家机密。

(6) 为适应我国信息化建设需要,扩大学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》及“中国期刊网”和“万方数据期刊网”。作者的著作权使用费将与本刊稿酬一次性支付。

《地下空间》编辑部 2003.3

acter of the contact area , the contact area element capable to simulate the cracking and slipping is introduced in this paper and the interaction between prestressed anchor and enclosing piles with the soil body was simulated. A simplified method to simulate the operation process for prestressed anchor is suggested. For the supporting scheme of certain foundation pit by prestressed anchor and enclosing piles , the dynamic construction process of the pit is simulated with Tongji Shuangguang Design and Analysis software for geotechnical and underground engineering. The ground surface displacement , settlement of foundation base of the building nearby , displacement and loading of enclosing piles , axial force of pre-stressed anchor have been obtained. Based on the results obtained , the feasibility of the supporting scheme was analyzed.

[**Key words**] contact area element ; pre-stressed anchor ; supporting scheme ; feasibility

Numerical Analysis on Distribution of Soil Resistance in front of and behind the Pile Group under Horizontal Load ZHOU Chang-chun et al (17)

[**Abstract**] As one of the foundation forms , the pile group foundation composed of vertical piles is widely applied to resist horizontal loads. The characteristic of the distribution of soil resistance in front of and behind the pile group is a component of deformation performance of pile group under horizontal load. At past , its study was performed by theoretical analysis and experiments. In this paper , the spatial 20 nodes FEA was used to analyze the close field soil and piles and the spatial 12 nodes infinite element analysis was used for the far ones. At the interface between the pile and soil , the spatial 16 nodes contact area elements were introduced. Thus , the pile group and soil body was treated by the elasto-plastic analysis through coupling the FEA-contact area element-infinite element. In the analysis , the soil body of close field is simulated with the modified Cambridge Model on the contact surface between the pile and soil and the non-linear analysis for the far field soil body. The results show that this analytical method can illustrate the character of soil resistance distribution in front of and behind the pile group under horizontal load.

[**Key words**] horizontal load ; pile group ; finite element ; infinite element ; contact area element

Calculation of Active Soil Pressure Based on Unloading and Deformation WANG Zhong-wei et al (22)

[**Abstract**] According to the characteristics of foundation pit excavation , by introducing the unloading modulus as expression of the stress history and stress path of the soil and empirical equation representing the variation of measured deformation of deep foundation in the metro , the soil pressure was calculated with considering multiple factors such as deformation and unloading etc. The results were analyzed and compared with the measured values in practice.

[**Key words**] active soil pressure ; unloading ; deformation ; foundation pit

Sensibility Analysis of Design Parameters of Segment for Shield Tunnel HU Ru-jun et al (28)

[**Abstract**] Because of no unified standard and deficiency of experience in segment design and complexity of geological condition , the design parameters of segment are difficult to be determined. A sensibility analysis on such parameters as c , ϕ , h_w , γ , D_0 , h and σ_{vm} with Modified Routine Method was carried out by the authors in this paper and the design parameter selection are presented.

[**Key words**] shield tunnel ; lining segment ; design parameter ; sensibility analysis