**** **T/CECS xxxxx-xxxx**

中国工程建设标准化协会标准

**活动断层作用荷载标准**

**Load standard for active fault action**

中国计划出版社

**中国工程建设标准化协会标准**

活动断层作用荷载标准

Load standard for active fault action

**T/CECS xxxxx-xxxx**

主编单位：同济大学 江汉大学

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：202 x年x月x日

中国计划出版社

**202x 北 京**

**前 言**

根据住房和城乡建设部《中国工程建设标准化协会文件》(建标协字〔2024〕15号)要求，规范编制组经广泛调查研究，认真总结工程实践经验，参考有关国际标准和国内标准，在广泛征求意见的基础上，编制本标准。

本标准主要内容包括：1.总则；2.术语和符号；3.基本规定；4.蠕滑、粘滑断层作用；5.强震断层作用。

本标准的主要特点是：1) 本标准编制了隧道结构穿越活动断层时的断层设防和断层作用设计参数的确定依据。2) 给出了断层作用设防位移与位移分档和设防等级之间的对应关系，提出了隧道结构断层作用设防类别划分的具体规定和要求。3) 规定了穿越活动断层的隧道结构应达到的性态要求。4) 界定了蠕滑断层、粘滑断层和强震断层作用之间关系，给出了考虑断层蠕滑和粘滑作用的设计参数确定方法。5) 给出了考虑强震断层作用下穿越活动断层隧道结构的设计地震动确定方法。

本标准由中国工程建设标准化协会归口管理，由同济大学和江汉大学负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈给江汉大学（地址：湖北省武汉市经济技术开发区三角湖路8号，邮编：430056）。

**主编单位：**同济大学，江汉大学

**参编单位：**北京交通大学，西南交通大学，中国地质科学院，中国国家铁路集团有限公司，中铁第一勘察设计院集团有限公司，中铁第二勘察设计院集团有限公司……

**主要起草人：**朱合华 徐龙军

**主要审查人：**

目 次

[1 总 则 （1）](#_Toc194937650)

[2 术语和符号 （2）](#_Toc194937651)

[2.1 术语 （2）](#_Toc194937652)

[2.2 符号 （3）](#_Toc194937653)

[3 基本规定 （5）](#_Toc194937654)

[3.1 断层设防要求 （5）](#_Toc194937655)

[3.2 工程性态要求 （5）](#_Toc194937656)

[3.3 断层参数要求 （6）](#_Toc194937657)

[4 蠕滑、粘滑断层作用 （7）](#_Toc194937658)

[4.1 一般规定 （7）](#_Toc194937659)

[4.2 断层作用设计参数 （7）](#_Toc194937660)

[4.3 断层作用时程 （7）](#_Toc194937661)

[5 强震断层作用 （8）](#_Toc194937662)

[5.1 一般规定 （8）](#_Toc194937663)

[5.2 设计地震动参数 （8）](#_Toc194937664)

[5.3 设计地震动时程 （9）](#_Toc194937665)

[附录A 震级-地震地表破裂参数的经验关系 （11）](#_Toc194937666)

[附录B 滑冲效应的等效速度脉冲函数 （12）](#_Toc194937667)

[用词说明 （14）](#_Toc194937668)

[引用标准名录 （15）](#_Toc194937669)

附：[条文说明 （16）](#_Toc194937670)

**Contents**

[1 General provisions （1）](#_Toc194937650)

[2 Terms and symbols （2）](#_Toc194937651)

[2.1 Terms （2）](#_Toc194937652)

[2.2 Symbols （3）](#_Toc194937653)

[3 Basic requirements （5）](#_Toc194937654)

[3.1 Fault fortification requirements （5）](#_Toc194937655)

[3.2 Performance-based requirements （5）](#_Toc194937656)

[3.3 Fault parameter requirements （6）](#_Toc194937657)

[4 Creep and stick-slip fault action （7）](#_Toc194937658)

[4.1 General requirements （7）](#_Toc194937659)

[4.2 Design parameters of fault action （7）](#_Toc194937660)

[4.3 Time history of fault action （7）](#_Toc194937661)

[5 Strong earthquake-fault action （8）](#_Toc194937662)

[5.1 General requirements （8）](#_Toc194937663)

[5.2 Design parameters of ground motion （8）](#_Toc194937664)

[5.3 Design ground motion time history （9）](#_Toc194937665)

[Appendix A Empirical relationships between magnitude and surface rupture parameters （11）](#_Toc194937666)

[Appendix B Equivalent velocity pulse functions of fling-step effect （12）](#_Toc194937667)

[Explanation of wording （14）](#_Toc194937668)

[List of quoted standards （15）](#_Toc194937669)

[Addition: Explanation of provisions （16）](#_Toc194937670)

1 总 则

**1.0.1** 活动断层作用是一种特殊的地质环境荷载。当隧道结构穿越活动断层时，断层活动的潜在危害是工程设计必须考虑的内容。为了在工程荷载设计中贯彻执行国家、行业的技术经济政策，做到安全、经济、适用，保证穿越活动断层隧道结构的工程质量，提升工程系统的韧性水平，制定本标准。

按本标准进行活动断层作用设计参数确定的隧道结构，其基本的抗断层作用（或断层适应性）设防目标是：当遭受蠕滑、粘滑断层作用时，隧道主体结构可经维护后正常运营；当遭受强震断层作用时，隧道结构可能发生损坏，但经过修理后可恢复使用。

**1.0.2** 本标准适用于穿越活动断层隧道结构的断层作用设防和参数设计。

**1.0.3** 穿越活动断层的隧道结构应当进行活动断层设防和参数设计。

**1.0.4** 活动断层设防采用的断层参数应按现行国家标准《活动断层探测》GB/T 36072的规定执行并确定，已进行工程场址断层活动性评价的，应按审批结果执行。

**1.0.5** 隧道结构进行活动断层设防和参数设计，应符合本标准要求；除此之外，应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

**2.1.1** 断层 fault

岩层或岩体顺破裂面发生明显位移的构造。

**2.1.2** 活动断层 active fault

距今12万年以来有过活动的断层，包括晚更新世断层和全新世断层。

2.1.3 震源断层 seismogenic fault

由于断层活动而产生地震的断层，或称发震断层。震源断层错动在地表的表现为地表破裂带，由地震断层、地震鼓包、地震裂缝、地震沟槽等组成。

2.1.4 地震断层 seismic fault

由地震引起的地表和浅层土岩结构的破裂和错动构造，又称为地表断层（surface fault），是穿、跨断层土木工程结构和设施的危险源。

**2.1.5** 地震地表破裂带 earthquake surface rupture zone

震源断层错动在地表产生的破裂和变形的总称，由地震断层、地震陡坎、地震鼓包、地震裂缝、地震凹陷、地震沟槽等组成。

2.1.6 断层面 fault plane

岩块、岩层或地层断开成两部分并存在滑动的破裂面。断层面的空间位置由其走向、倾向和倾角确定。

**2.1.7** 断层破碎带 fault fracture zone

由断层和裂隙密集带所造成的岩石强烈破碎的地段。破裂带的宽度有达数百米甚至上公里，长度可达数百公里。规模较大的破裂带又称为宽大断裂带。

2.1.8 断层走向 fault strike

断层面与水平面或地面交线的延伸方向。

2.1.9断层倾向 fault dip

断层面的法线在水平面上投影所指的方位。

2.1.10 断层倾角 fault dip angle

由水平面向下旋转到断层面的角度。

2.1.11 断层迹线 fault trace

断层面与地面的交线，即断层在地面的出露线。

2.1.12断层蠕滑 fault creep

一种沿既有断层破裂面相对均匀缓慢运动的断层活动方式，表现为应变能的连续释放而不积累。具有蠕滑活动特征的断层称为蠕滑断层。

2.1.13断层粘滑 fault stick-slip

活动断层两盘闭锁、应力与应变积累到突然释放，产生相对位移错动的过程。

**2.1.14** 活动断层作用 active fault action

断层活动对工程结构产生的作用，主要是断层错动的影响，包含作用在穿越断层结构上的拉力、压力、剪力和弯矩等。

2.1.15 强震断层作用 strong earthquak-fault action

断层错动伴随强烈震动对工程结构产生的作用，主要是强震动-活动断层错动的耦合影响，包含在穿越断层结构上引起的外加约束和变形，包括拉力、压力、剪力、扭转，以及产生的正应力、剪应力、应变等。

**2.1.16** 同震最大位移 coseismic maximum displacement

一次地震引起的地震断层两盘块体的最大相对错动量。

**2.1.17** 残余位移 residual displacement

由断层活动引起地表破裂的残余构造位移。

2.1.18 穿断层结构 structure crossing fault

在空间上穿越活动断层（断裂带）的土木工程结构和基础设施。主要包括：隧道、油气管线、电力线路等地下结构和设施。

2.1.19活动断层作用设计参数 design parameters for active fault action

穿断层结构考虑断层作用设计用的断层位错量、断层错动速率、错动位移时程曲线。

**2.1.20** 活动断层探测 surveying and prospecting of active fault

利用地质与地球物理方法综合确定活动断层位置和产状，获取晚第四纪活动性质、幅度、时代、滑动速率及大地震复发间隔等参数的技术过程。

**2.1.21** 活动断层地震危险性评价 earthquake risk assessment on active fault

判断活动断层未来一定时间段内发生中强以上地震的段落（位置）、最大可能地震和发震危险性的过程。

**2.1.22** 断层作用设防位移 anti-fault fortification displacement

以地表残余位移为指标对不同断层活动强度进行分档，并确定对应的设防位移。

2.2 符号

**2.2.1** 地震和断层错动

*F*——断层作用的设防等级；

*M*——地震震级；

*MD*——地表破裂最大位错量；

*AD*——地表破裂平均位错量；

*SRL*——地表破裂长度。

**2.2.2** 速度脉冲

*V*P——速度脉冲幅值；

*D*site——残余位移幅值；

*T*P——速度脉冲周期；

*Tv*——速度脉冲持时；

*ω*P——速度脉冲的圆频率；

*φ*——速度脉冲相位。

**2.2.3** 计算系数

*Γ*a——场地地震动峰值加速度调整系数;

*Γ*r——场地地震动残余位移调整系数;

*Γ*u——场地地震动峰值位移调整系数;

*Γ*m——场地地震动峰值位移较残余位移的增大系数。

3 基本规定

3.1 断层设防要求

3.1.1 穿越活动断层的隧道结构应进行断层作用设防。

**3.1.2** 进行断层作用设防的隧道结构应根据其承担功能的重要性划分为甲类、乙类、和丙类三个设防类别。

**3.1.3** 断层设防类别的划分应符合下列规定：

**1** 甲类设防：使用上特殊的隧道结构，涉及国家公共安全，和断层活动时可能发生严重次生灾害等特别重大灾害后果的隧道结构，需要进行甲类设防。

**2** 乙类设防：使用功能不能中断或需尽快恢复的隧道结构；

**3** 丙类设防：除甲类、乙类设防以外按标准要求进行断层作用设防的隧道结构。

**3.1.4** 断层作用设防位移与位移分档和设防等级之间的对应关系应符合表3.1.4的规定。

**表3.1.4 断层作用设防位移与位移分档和设防等级之间的对应关系**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 设防位移（m） | <0.9 | [0.9,1.4) | [1.4,1.9) | [1.9,2.8) | [2.8,3.8) | ≥3.8 |
| 位移分档（m） | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
| 设防等级 | *F*1 | *F*2 | | *F*3 | | *F*4 |

**3.1.5** 各类隧道结构在断层作用下的设防标准，应符合下列要求：

**1** 甲类设防：断层抵抗（或适应性）措施应按工程场址断层作用设防等级提高一级的要求确定；断层作用应按地震工作主管部门批准的建设工程的断层设防要求确定，且不应低于工程场址断层设防要求；

**2** 乙类设防：断层抵抗（或适应性）措施应按工程场址断层作用设防等级提高一级的要求确定；断层作用应按现行国家标准《活断层探测》GB/T 36072规定的要求确定，若已进行专门的工程场址活动断层地震安全性评价的隧道结构，按评价结果确定，但不应低于按国家标准《活断层探测》GB/T 36072确定的断层作用。

**3** 丙类设防：断层抵抗（或适应性）措施应按工程场址断层作用设防等级确定；断层作用应按现行国家标准《活断层探测》GB/T 36072规定的要求确定。

3.2 工程性态要求

**3.2.1** 穿越活动断层隧道结构的性态要求应分为四个等级：

**1** 性态I：断层活动对结构基本无影响；工程结构或设施不破坏或轻微破坏，应能保持其正常使用功能；不应因结构的变形影响其正常功能和运行安全；结构仍处于弹性工作阶段。

**2** 性态II：断层活动可能致结构破坏，结构经修理，短期内应能恢复其正常使用功能；结构局部进入弹塑性工作阶段。

**3** 性态III：断层活动后结构可能产生较大破坏，但不应出现局部甚至整体坍塌，结构经维修恢复，能够维持其使用功能；结构处于弹塑性工作阶段。

**4** 性态IV：断层活动后产生严重破坏，出现坍塌，结构局部须经大修、重建和新的断层形态的适应性调整，方可恢复使用功能。

**3.2.2** 隧道结构的断层作用设防目标应按表3.2.2确定。

**表3.2.2 活动断层作用设防目标**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 设防类别 | 设防水准 | | | |
| *F*1 | *F*2 | *F*3 | *F*4 |
| 甲类 | I | I | II | III |
| 乙类 | I | II | III | IV |
| 丙类 | II | III | IV | — |

**3.2.3** 穿越活动断层的隧道结构在施工阶段可不考虑强震断层作用的影响。

3.3 断层参数要求

**3.3.1** 活动断层作用设计参数的取值应结合断层工况确定；设计参数包括设防等级、设防位移、同震最大位移、断层倾角、破碎带宽度等。

**3.3.2** 断层的设防等级应根据设防位移对应的位移分档确定，活动断层设防等级与设计位移取值的对应关系应符合表3.1.4的规定。

**3.3.3** 隧道穿越活动断层的设防应符合下列规定：

**1** 当隧道通过抗震设防烈度不超过8度（0.3g）地区的活动断层，且隧底至基岩的土层厚度大于或等于60m时，或隧道通过抗震设防烈度超过8度（0.3g）的地区的活动断层，且隧底至基岩的土层厚度大于或等于90m时，可不考虑潜在断层错动作用的影响。

**2** 对不符合本条第1款规定的穿越活动断层隧道结构，其设防位移的取值应按下列方法分别确定：

**1)** 蠕滑、粘滑活动断层作用按确定的最大地表位移量确定断层作用设计

参数；

**2)** 强震断层作用设计残余位移的确定应考虑与同震最大位移的关系；

**3)** 强震断层作用设计参数的确定须同时考虑地震作用和断层作用的影响，

分别确定设计地震加速度和设计残余位移；

**4)** 当考虑断层活动对隧道结构产生的动力影响时，须对设计地震动的卓

越周期进行调整。

4 蠕滑、粘滑断层作用

4.1 一般规定

**4.1.1** 活动断层作用应区分蠕滑断层、粘滑断层和强震断层活动。

**4.1.2** 蠕滑、粘滑断层作用设防和设计参数确定，应符合下列规定：

**1** 断层盘一般需区分主动和被动盘。设计参数可以是两组分别位于主、被动盘的运动数据，也可以用一组断层盘间相对运动数据表征，当采用盘间相对运动时，尚应给出被动盘采用的设计参数。

**2** 断层作用可以根据不同的工况和需要确定采用一维、二维或三维作用输入。

**4.1.3** 蠕滑、粘滑断层作用设计参数用于隧道结构断层作用的第一阶段设计：穿断层部位的位错变形验算。

4.2 断层作用设计参数

**4.****2.1** 蠕滑、粘滑断层作用采用的设计参数应包括断层位错量和断层错动速率。

**4.2.2** 蠕滑断层作用对应的设计位错量可由工程场址断层活动性评价给定的断层年滑动量与结构工程设计使用年限的乘积来确定。而在不同地震强度水平下的粘滑断层作用设计位错量可由工程场址断层活动性评价直接给定。

**4.2.3** 蠕滑、粘滑作用的断层位错量随深度的增加相较地表相应增大。在基岩面的断层位错量可取地表的1.5倍，基岩至地表按深度线性内插，基岩内部不考虑变化。

4.3 断层作用时程

**4.3.1** 蠕滑断层作用时程的确定应符合以下规定：

**1** 被动盘静止，以主动盘运动实现断层盘间相对运移。

**2** 断层运移沿断层破裂面做直线运动。

**3** 以位移控制输入为主，控制错动速率不超过1mm/s加载至设计位错量。

**4.3.2** 粘滑断层作用时程的确定应符合以下规定：

**1** 被动盘静止，以主动盘运动实现断层盘间相对运移。

**2** 断层运移一方面沿断层破裂面做平行直线运动，另一方面在垂直断层面方向做直线运动以反映粘滑过程的挤压状态，垂直与平行断层面方向的位移比不大于1/10。

**3** 以等比例位移控制输入为主，控制错动速率不应高于1mm/s。

5 强震断层作用

5.1 一般规定

**5.1.1** 穿越活动断层隧道结构的设计地震动强度不应小于相应水准的一般工程场址的设计地震动。

**5.1.2** 穿越活动断层隧道结构的抗震设防烈度及相应设计地震参数中的设计峰值加速度可根据我国地震动参数区划图确定或经专门的工程场地地震安全性评价确定。

**5.1.3** 在强震断层耦合作用下，穿越活动断层的工程结构的设计地震参数中的设计残余位移可根据震级—地震地表破裂参数的经验关系，按本标准附录A表确定或经工程场址断层活动性评价确定。

**5.1.4** 地震安全性评价和断层活动性评价除应符合本章规定外，还应符合现行国家标准《工程场地地震安全性评价》GB 17741和《活断层探测》GB/T 36072的相关规定。

**5.1.5** 强震断层耦合作用设计地震动，除了符合本标准4.1.2条的规定外，还应符合下列规定：

**1** 设计地震动可以根据不同的工况和需要采用加速度输入、位移输入或混合输入的方式。

**2** 设计地震动中须考虑近断层效应的影响，包括破裂方向性效应、滑冲效应、上下盘效应等。

**5.1.6** 强震断层作用设计参数用于隧道结构抗断层作用的第二阶段设计：隧道结构可恢复韧性评估。

5.2 设计地震动参数

**5.2.1** 在强震断层耦合作用下抗震、抗断层错断设计采用的设计地震动参数应包括地表和基岩面水平向峰值加速度、竖向峰值加速度、水平向残余位移、竖向残余位移，以及峰值加速度和残余位移沿深度的分布等。

**5.2.2** 穿越活动断层的甲、乙类隧道结构在强震断层耦合作用下采用的设计地震动参数，应采用经审定的工程场地地震安全评价和断层活动性评价结果或经专门研究论证的结果与本节规定的参数中的较大值。穿越活动断层的丙类隧道结构采用的地震动参数，应采用地震动参数区划和震级—地震地表破裂参数的经验关系的结果与本节规定的地震动参数中的较大值。

**5.2.3** 工程场址地表水平向设计地震动参数的取值应符合下列规定：

**1** 地表水平向峰值加速度应按现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB18306中规定的地震动加速度分区按表5.2.3取值并乘以场地地震动峰值加速度调整系数*Γ*a。*Γ*a应按不小于现行国家标准《城市轨道交通结构抗震设计规范》GB50909的相关规定取值。

**表5.2.3 II类场地地表水平向设计基本地震加速度值*a*max II**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 地震动峰值加速度分区（g） | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.30 | 0.40 |
| 多遇地震 | 0.03 | 0.05 | 0.08 | 0.10 | 0.15 | 0.20 |
| 基本地震 | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.30 | 0.40 |
| 罕遇地震 | 0.12 | 0.22 | 0.31 | 0.40 | 0.51 | 0.62 |
| 极罕遇地震 | 0.15 | 0.30 | 0.45 | 0.58 | 0.87 | 1.08 |

**2** 穿越活动断层的隧道结构应计入近场效应对设计地震动参数中峰值加速度的影响，乘以增大系数1.25~1.5。

**3** 使用反应位移法I进行计算时，地表水平向残余位移应按表3.1.4的相关规定取值。乘以场地地震动残余位移调整系数*Γ*r。*Γ*r应按不小于现行国家标准《城市轨道交通结构抗震设计规范》GB50909的中对场地地震动峰值位移调整系数*Γ*u的相关规定取值。

**4** 强震断层耦合作用地表峰值位移值应由残余位移乘以增大系数*Γ*m得到，*Γ*m宜取1.1~1.5。

**5.2.4** 当考虑竖向作用时，地表竖向设计地震动取值应符合下列规定：

**1** 地表竖向峰值加速度应按不小于现行国家标准《城市轨道交通结构抗震设计规范》GB50909的相关规定取值。

**2** 地表竖向残余位移应根据活动断层危险性评价结果取值。

**5.2.5** 地震动参数沿深度的变化应符合下列规定：

**1** 峰值加速度随深度的增加较地表相应减小。基岩处峰值加速度可取地表的1/2，基岩上部不同深度处可按插值法确定。

**2** 强震断层耦合作用残余位移值随深度的增加比地表相应增大。基岩处残余位移可取地表的1.5倍，基岩上部不同深度处可按插值法确定，基岩内部不考虑变化。

**3** 强震断层耦合作用峰值位移随深度的变化同残余位移。

5.3 设计地震动时程

**5.3.1** 强震断层作用的荷载施加模式应符合以下规定：

**1**若采用“同震同错”的荷载施加模式，设计地震动加速度时程可调整与工程场址地震背景和场地条件相近的残余位移型近断层强震记录得出,或采用叠加等效速度脉冲（单周期正弦波）等方式人工生成，等效速度脉冲函数可在附录B中参考选用。

2若采用“先错后震”的荷载施加模式，其中断层错动作用应符合第4章中有关粘滑断层作用的规定，而强震动作用的设计地震动加速度时程可调整与工程场址地震背景和场地条件相近的近断层强震记录得出，或采用其它方式模拟生成。

5.3.2 强震断层作用的设计地震动时程确定应符合以下规定：

1 一般应通过断层盘各输入一组设计地震动时程进行表达。

2 当以活动断层盘间相对运移时程表达时，须给出被动盘设计地震动时程。

3 没有活动断层盘间相对运移时程时，可采用近断层地震动时程替代。

4 断层被动盘设计地震动加速度时程可人工合成，考虑场地影响时，其加速度反应谱曲线与场地设计地震动加速度反应谱曲线误差应小于10%。

5 断层主动盘设计地震动加速度时程宜在被动盘设计地震动上叠加包含单向残余位移的脉冲确定，当需要考虑断层运动的回弹时，应符合5.2.3条的规定。

5.3.3 当采用时程分析法进行隧道结构动力分析时，用于时程分析的实际强震记录和人工模拟时程曲线的总数量不应少于3组，其中实际强震记录不应少于总数的2/3。当设计地震动时程少于7组时，宜取时程法计算结果和反应位移法计算结果中的较大值；当设计地震动时程为7组及以上时，可采用计算结果的平均值。

附录A 震级-地震地表破裂参数的经验关系

**表A 震级-地震地表破裂参数的经验关系**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 经验关系式 | 断层类型 | 地震事件数 | 系数 | | *R* | σ | *M*w 范围 |
| 训练\测试 | *a* | *b* |
| log(*MD*)=*a*\**M*w+*b* | 走滑 | 63\7 | 0.87 | -5.83 | 0.89 | 0.28 | 5.5-7.9 |
| 倾滑 | 44\5 | 0.86 | -5.60 | 0.72 | 0.46 | 5.6-7.9 |
| 斜滑 | 31\4 | 0.71 | -4.58 | 0.71 | 0.37 | 5.7-7.9 |
| 全部 | 138\16 | 0.82 | -5.40 | 0.79 | 0.39 | 5.5-7.9 |
| log(*AD*)=*a*\**M*w+*b* | 走滑 | 42\5 | 0.80 | -5.62 | 0.87 | 0.26 | 5.5-7.9 |
| 倾滑 | 30\4 | 0.79 | -5.40 | 0.79 | 0.35 | 5.93-7.9 |
| 斜滑 | 19\3 | 0.45 | -3.11 | 0.63 | 0.30 | 5.7-7.84 |
| 全部 | 92\11 | 0.70 | -4.84 | 0.80 | 0.31 | 5.5-7.9 |
| log(*SRL*)=*a*\**M*w+*b* | 走滑 | 64\8 | 0.72 | -3.34 | 0.86 | 0.28 | 5.5-7.9 |
| 倾滑 | 47\6 | 0.56 | -2.39 | 0.78 | 0.25 | 5.6-7.9 |
| 斜滑 | 34\4 | 0.74 | -3.63 | 0.90 | 0.20 | 5.7-7.9 |
| 全部 | 146\17 | 0.68 | -3.15 | 0.83 | 0.27 | 5.5-7.9 |
| *AD*/*MD*=*a* | 走滑 | 46 | 0.48 | - | - | - | 5.5-7.9 |
| 倾滑 | 34 | 0.46 | - | - | - | 5.93-7.9 |
| 斜滑 | 22 | 0.38 | - | - | - | 5.7-7.84 |
| 全部 | 102 | 0.46 | - | - | - | 5.5-7.9 |

注：表中*M*W为矩震级；*MD*为最大位错量(m)；A*D*为平均位错量(m)；*SRL*为地表破裂长度(km)；

A*D/MD*为平均位错量与最大位错量的比值；

附录B 滑冲效应的等效速度脉冲函数

**表B 滑冲效应的等效速度脉冲函数**

|  |  |
| --- | --- |
| 等效速度脉冲的数学表达式 | 参考文献 |
|  | Makris等, 2000 |
|  | Abrahamson, 2002；  Kamai等, 2014 |
|  | Xie等, 2005 |
|  | Makris和Chang, 2015 |

注：表中*V*P代表速度脉冲幅值；*T*P为脉冲周期；*ω*P为脉冲的圆频率，且*ω*P=2*π*/*T*P；*φ*为相位角，其值由脉冲结束时的地面位移为零确定；*D*site为残余位移幅值，*D*site=*V*P*T*P/2；；*t*1为滑冲效应开始的时间；*A*为加速度脉冲幅值，*A*=*ω*P*V*p/2；*Tv*为脉冲持时，*Tv*=2*T*P；

参考文献

[1] Makris N, Chang S P. 2000. Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 29(1): 85-107.

[2] Abrahamson N A. 2002. Velocity pulses in near-fault ground motions[C]// Proceedings of the UC Berkeley—CUREE Symposium in Honor of Ray Clough and Joseph Penzien: Berkeley, California. 2002: 40-41.

[3] Xie L, Xu L and Adrian RM. 2005. Representation of Near-Fault Pulse-Type Ground Motions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 4(2): 191–199.

[4] Makris N, Chang S P. 2015. Effect of viscous, viscoelastic and friction damping on the response of seismic isolated structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 29(1):85-107.

[5] Kamai R, Abrahamson N, Graves R. 2014. Adding fling effects to processed ground‐motion time histories[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 104(4): 1914-1929.

**用词说明**

为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

**引用标准名录**

本标准引用下列标准。其中，注日期的，仅该日期对应的版本适用于本标准；不注日期的，其最新版适用于本标准。

《活动断层探测》GB/T 36072

《工程场地地震安全性评价》GB 17741

《中国地震动参数区划图》GB18306

《城市轨道交通结构抗震设计规范》GB50909

《建筑工程抗震设防分类标准》GB 50223

《地下结构抗震设计标准》GB/T 51336

《油气输送管道线路工程抗震技术规范》GB/T 50470

《建筑抗震设计规范》GB 50011

中国工程建设标准化协会标准

活动断层作用荷载标准

**T/CECS xxxxx-xxxx**

条文说明

目 次

[1 总 则 （18）](#_Toc194955625)

[3 基本规定 （19）](#_Toc194955626)

[3.1 断层设防要求 （19）](#_Toc194955627)

[3.2 工程性态要求 （19）](#_Toc194955628)

[3.3 断层参数要求 （20）](#_Toc194955629)

[4 蠕滑、粘滑断层作用 （22）](#_Toc194955630)

[4.1 一般规定 （22）](#_Toc194955631)

[4.2 断层作用设计参数 （22）](#_Toc194955632)

[4.3 断层作用时程 （23）](#_Toc194955633)

[5 强震断层耦合作用 （24）](#_Toc194955634)

[5.1 一般规定 （24）](#_Toc194955635)

[5.2 设计地震动参数 （24）](#_Toc194955636)

[5.3 设计地震动加速度时程 （25）](#_Toc194955637)

**1 总则**

**1.0.1** 制订本标准，首先是为了使隧道结构经活动断层设防和设计后，能够尽可能地减轻断层活动造成的经济损失，其次是为了提高隧道结构系统的整体韧性水平，另外，也是为了规范穿越活动断层隧道结构的工程设防和参数设计。

本标准对于隧道结构抗断层作用（或断层适应性）设计采取“两水准设防两阶段设计”方法。按断层危险性水平将活动断层作用的设防水准划分为：蠕滑粘滑和强震位错。并且采用两阶段设计实现上述两个水准的设防目标：第一阶段设计是位错变形验算，取第一水准下蠕滑、粘滑断层位错量计算穿越活动断层隧道结构响应，结合抗位错性能指标进行穿断层部位的位错变形验算。以此检验断层位错适应性措施与有限变形结构体系，来满足第一水准下当遭受蠕滑、粘滑断层作用时，隧道主体结构可经维护后正常运营的设防目标。第二阶段设计是隧道结构可恢复韧性评估，取第二水准强震断层作用下的设计地震动来计算穿越活动断层隧道结构响应，通过提升结构破坏恢复能力的方法和措施，来满足第二水准下当遭受强震断层作用时，隧道结构可能发生损坏，但经过修理后可恢复使用的设防目标。

**1.0.2** 工程结构、尤其是建筑结构抗震相关的地震作用标准体系已经建立，但活动断层设防标准与断层作用工程设计参数标准尚属空白，本标准的制订主要是为了满足进行活动断层设防的隧道结构的断层作用参数设计需要。

**1.0.3** 隧道结构穿越活动断层时，通过设防和设计，使其具备一定的抵抗错断的能力或提高其断层位错适应性水平，这对保障隧道结构的基本功能，社会和城市以及生命财产安全都是非常重要的。

**1.0.4** 本标准建立了断层位错量设防分级水平，抗断层错断设防采用的活动断层参数仍应按现行国家标准《活动断层探测》GB/T 36072执行并确定，已进行工程场址断层活动性评价的，应按审批结果执行。

3 基本规定

3.1 断层设防要求

3.1.1 本条强调穿越活动断层的隧道结构和设施应坚持“安全第一，预防为主”的设防原则和要求。

**3.1.2~3.1.3** 本条参照现行国家标准《建筑工程抗震设防分类标准》GB 50223和《地下结构抗震设计标准》GB/T 51336按工程结构承担功能的重要性，对穿越活动断层隧道结构和设施的断层作用设防类别进行划分。

**3.1.4** 本条主要参照现行国家标准《城市轨道交通结构抗震设计标准》GB 50909中抗震设防地震动峰值加速度与抗震设防地震动分档和抗震设防烈度之间的对应关系，提出隧道结构和设施的断层作用设防位移、位移分档和位移设防等级的对应关系。将断层作用设防分为4级，从小到大依次为*F*1、*F*2、*F*3和*F*4级，其中*F*2和*F*3又各分为两档。

**3.1.5** 本条主要参照现行国家标准《建筑工程抗震设防分类标准》GB 50223制定，提高抵抗断层活动（或适应性）措施，着眼于把财力、物力用在增加隧道结构薄弱部位的抵抗断层位错能力上，或使隧道结构具备适应断层位错变形的能力上，是提升隧道结构韧性有效的方法，只提高断层位错量，则隧道结构的各构件均全面增加材料，会使投资增加，效果未必有效。

3.2 工程性态要求

**3.2.1** 本条主要参照现行国家标准《地下结构抗震设计标准》GB/T 51336和《城市轨道交通结构抗震设计标准》GB 50909中的有关抗震性态要求制定。本条规定的穿越活动断层隧道结构和设施应达到的四个性态要求，在断层抵抗（或适应性）设计时，应根据不同的设防位移水准，并结合其重要程度，选取不同的性态要求，作为断层作用设防目标。穿断层工程在不同性态要求下的工作性能及破损程度分述为：

性态要求I：工程结构或设施处于正常使用状态，从结构分析角度，可视为线弹性体系。在预期的断层位错量和地震动作用下，结构一般不受损坏。

性态要求II：结构整体上处于弹性工作状态，在预期的断层位错量和地震动作用下，仅有具备的轻微损伤且应保证可快速修复后能正常使用。

性态要求III：结构进入弹塑性工作阶段，在预期的断层位错量和地震动作用下，结构发生一定的非弹性变形，但应控制在可修复的范围内。

性态要求IV：结构进入弹塑性工作阶段，在预期的断层位错量和地震动作用下，结构可发生较大塑性变形，但不应倒塌。

**3.2.2**本条主要参照现行国家标准《地下结构抗震设计标准》GB/T 51336和《城市轨道交通结构抗震设计标准》GB 50909中关于结构抗震设防目标的规定，从经济和实际出发，认为穿断层隧道结构在活动断层作用下不发生破坏的概率几乎为零，在断层作用性能要求方面，基本设想是在不同概率的断层活动（断层位错量）作用下，容许隧道结构破坏程度不同。乙类隧道结构在遭受预期的断层作用下其破损程度能维持在可控可修范围内，甲类隧道结构由于其重要性尚应考虑更高类别的设防和设计要求。

**3.2.3** 基础设施建设过程一般延续时间较长，甚至达10年以上，从地震发生的概率看，尤其从强震发生的概率来看，一般不考虑建设期间发生强烈地震情况下断层活动的可能性，但发生断层蠕滑活动的可能性是存在的，尚应根据实际断层活动性水平参照3.2.1和3.2.2的规定进行结构的强度和变形验算，以保证结构满足对性态要求I的规定。

3.3 断层参数要求

**3.3.1** 与地震动参数相比，断层设计参数的明显特点在于断层对结构的作用源于土岩层的破裂和相对运动和位移，除了受断层类型影响外，破裂状态和位移相关的断层参数主要还包括残余位移、最大位移、断层倾角以及断层破裂带的宽度等值。

**3.3.2** 表3.1.4列出了断层设防位移与位移分档及断层设防等级的对应关系，这一关系参考了现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306、《城市轨道交通结构抗震设计标准》GB 50909中抗震设防地震动峰值加速度与抗震设防地震动分档和抗震设防烈度之间的对应关系的规定。需要注意的是断层设防等级*F*2和*F*3时分别对应两档设防位移分档。

**3.3.3** 本条规定了隧道穿越活动断层的设防位移要求。

1本款主要参照现行国家标准《油气输送管道线路工程抗震技术规范》GB/T 50470第4.1.3条款中关于穿越或并行活动断层管道的设防位移的规定，给出了隧道结构可不考虑潜在断层错动作用影响的具体条件。

2本款规定了设防位移的确定应当考虑的因素。蠕滑和粘滑断层的设防位移量一般按年滑移量与跨断层结构的设计基准期的乘积考虑。

强震断层残余位移的确定不仅需要考虑设计基准期内的最大错动量，还须考虑其与同震最大位移的关系，需要同时确定残余位移和最大位移量。根据谢礼立院士团队最新的研究结果“1999年台湾集集*M*W7.6地震跨断层场地相对运动.地震学报，2023，45：1-13”，残余位移约是最大位移的80%，该数量关系可作为位移参数的参考依据。

强震断层耦合作用加速度设计参数的确定，可参照现行国家标准《地下结构抗震设计标准》GB/T 51336和《中国地震动参数区划图》GB 18306的相关条文制定。

当需要考虑断层地震动卓越周期对结构的影响时，可以通过把地震动时程进行调整得到需要的结果，但时程的调整往往又会影响到位移幅值，这需要适当的幅值和周期之间的协调方法，应当明确。

4  蠕滑、粘滑断层作用

4.1 一般规定

**4.1.1** 断层的分类依据不同，结果也不同。当考虑断层相对运动的方位关系时，可将断层分为走滑断层、正断层和逆断层；当按断层力学性质分类时可将断层分为压性、张性和扭性断层。本标准关于蠕滑、粘滑和强震断层作用的分类主要考虑了断层的生成机理，也即从能量积累和地震孕育的过程来定义的。

地震工程领域，关于蠕滑的认识基本一致，即随着能量的积累，断层盘之间发生缓慢的位错，能量也不断得到释放，结果是断层面附近应力场不明显，但断层存在较明显的位移场变化。目前，对粘滑的理解仍然不尽相同，有认为，粘滑断层就是指地震时的断层运移过程，如若这样理解，那么粘滑作用就可以等同于强震断层作用。事实上，断层的粘滑应划分为两个阶段，一个是发震前能量的积累过程，一个是地震时能量的突然释放过程，前阶段断层盘之间因挤压和摩擦的存在，会在断层面附近产生强大的应力场，但却几乎观测不到明显位移的存在，地震时，伴随剧烈的震动，积累的能量得到突然释放，断层盘之间亦产生明显位移。因此，从工程角度看，粘滑的前、后两阶段都会对穿越活动断层的隧道结构产生不可忽略的影响。

为了将粘滑的前后两个阶段进行区分，本标准将有关蠕滑、粘滑（这里仅指粘滑断层发震前的能量积累阶段）作用的条文放在本章，将发震过程（这里指粘滑断层发震时的能量释放阶段）中的强震断层作用单独列第五章进行条文规定，也是为了突显强震断层耦合作用的重要性。

**4.1.2** 本条对蠕滑、粘滑断层作用设计荷载做了一般性的规定：

1 根据断层盘间相对运动的特点，通常将活动性强(错动量大)的一盘视为主动盘，另一盘为被动盘。区分主动和被动盘后便于简化断层错动作用的设计荷载。

2 事实上，断层两盘往往不是完全顺断层面倾斜错动或顺走向错动，而是斜交走向错动，于是断层经常兼具倾向错动（正或逆错动）和平移错动。因此，应当根据地质断层构造和工程结构体系的复杂程度去选择合适维度的输入荷载。

4.1.3 蠕滑、粘滑断层作用的设计参数用于隧道结构断层作用的第一阶段设计：穿断层部位的位错变形验算，通过计算穿越活动断层隧道结构响应并结合抗位错性能指标，以此检验断层位错适应性措施与有限变形结构体系，从而满足第一水准的设防目标。

4.2 断层作用设计参数

**4.2.2** 蠕滑错动过程持续而缓慢，其对工程结构的作用相当于拟静力加载过程，可以由断层年滑动量（或称断层滑动速率）与结构工程设计使用年限的乘积来确定。而粘滑错动则较难用年滑动量表达，一般表现为测量中的地应力变化，为了考虑粘滑作用的影响，可以参考蠕滑滑动量的确定方法，根据工程场址断层活动性评价直接给定。

**4.2.3** 地表下断层位错量随深度逐渐增加是公认的，但取值各国没有明确的规定。Well和Coppersmith (1994)研究指出：断层深度处的平均位错量约为地表平均位错量的1.32倍，地表破裂长度约为断层深度处破裂长度的0.75倍。综合考虑断层错动程度的影响因素众多以及上述研究统计样本量偏少的情况，本条偏于保守的规定：不考虑断层位错量在基岩内部变化的前提下，基岩面的断层位错量可取地表的1.5倍，基岩至地表可按深度线性内插。

4.3 断层作用时程

**4.3.1~4.3.2** 对蠕滑、粘滑断层错动作用时程提出了要求。以被动盘静止，主动盘相对运动的错动模式可以简化设计荷载，便于穿越活动断层的隧道结构的抗错断分析。根据蠕滑、粘滑错动的特点，对断层错动速率分别进行了限制。

5 强震断层耦合作用

5.1 一般规定

**5.1.5** 本条对强震断层耦合作用设计地震动做了一般性规定：

1 已有研究表明，在针对穿、跨越活动断层工程结构的地震响应分析中，采用位移输入方式加载残余位移型近断层地震动可以体现断层粘滑错动所导致的残余位移对于工程结构的影响，能够真实反映出结构构件具有的残余变形和内力。而在采用加速度输入方式则无法考虑上述残余位移的影响。故在区分主动盘和被动盘的基础上，若以被动盘输入近断层地震动（不含残余位移），主动盘输入含残余位移型近断层地震动来简化荷载模式时，应根据上述不同输入方式的特点来具体确定。

2 鉴于近断层地震动的特殊性和对结构的重要影响，设计地震动中须考虑近断层效应的影响。破裂传播的方向性效应和断层错动的滑冲效应会引起低频速度脉冲，而速度脉冲对结构具有特殊的破坏作用。另外，在断层倾向错动的情况下，断层迹线两侧同等距离上，存在断层上盘地震动幅值明显高于下盘，衰减速率更慢，强震分布区域更大的现象，即上下盘效应。工程结构在穿、跨越含倾向错动的活动断层时，在多点激励的输入模式中应适当予以考虑。

**5.1.6** 强震断层作用的设计参数用于隧道结构抗断层作用的第二阶段设计：隧道结构可恢复韧性评估，通过提升结构破坏恢复能力的方法和措施来满足第二水准的设计要求。

5.2 设计地震动参数

**5.2.1** 传统抗震设计仅以峰值加速度及其对应超越概率作为确定地震荷载水准的量化参数，不适用于强震断层耦合作用水准。将峰值加速度和残余位移均纳入设计地震动参数中，可以更为全面综合的表征强震断层作用的典型特征。另外，场地竖向地震动峰值加速度与水平向的比值与地震环境有关，近断层处比值可达到或超过1.0，并且在倾滑和斜滑断层错动作用下还会导致竖向残余位移的产生。故在设计地震动参数确定时，也应该将竖向地震动参数纳入其中。而峰值加速度和残余位移沿深度的分布是为穿越活动断层地下结构的抗震和抗错断设计需求所提供。

**5.2.2** 为了安全起见，限制了不同设防等级下隧道结构对应的设计地震动参数的取值依据。

**5.2.3~5.2.4** 本条参照现行国家标准《地下结构抗震设计标准》GB/T 51336对工程场址地表水平向、竖向设计地震动参数的取值进行规定。另外，一般建设工程的设计地震动参数直接根据《中国地震动参数区划图》GB18306确定即可。但区划图规定的地震动峰值加速度、特征周期等参数是基于开阔、平坦的一般场地（通常为II类场地）给出的，没有进一步考虑离断层很近区域的局部放大效应（即近场效应）。鉴于上述情况，为了确保穿越活动断层隧道结构的地震安全，需要根据建设工程的具体情况，考虑上述因素的影响对区划图参数进行调整，方可用于工程设计。本节5.2.3条中第2款对近场效应影响的原则和最低调整要求进行了规定，其改自《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010第3.10.3条。本节5.2.3条中第4点是参照谢礼立院士团队最新的研究结果“1999年台湾集集*M*W7.6地震跨断层场地相对运动. 地震学报，2023，45：1-13”中给出了残余位移约为地表峰值位移的80%，确定的增大系数取值范围。

**5.2.5** 与第4.2.3条中针对地表以下断层位错量随深度变化的规定一致。

5.3 设计地震动加速度时程

**5.3.1** 本条规定了强震断层作用的荷载施加模式的要求。

目前国内外研究多以被动盘固定，主动盘施加拟静力位移的方式来模拟断层错动，试验结果表明，穿越活断层隧道结构的破坏集中在断层错动面，在断层剪切作用下该范围内隧道结构呈现出倾斜和网状裂缝，而在上下盘区域内隧道破坏主要表现为环向裂缝和倾斜裂缝。然而，这类研究仅考虑了断层的拟静力错动作用，对实际穿越活动断层隧道结构的震害而言，强震和断层错动往往是同时发生的，即“同震同错”。目前有研究采用“先错后震”的荷载施加方式来分析断层错动及地震动的耦合作用对隧道结构造成的影响。与仅施加拟静力错动变形相比，“先错后震”的荷载施加模式下隧道结构的破坏程度更加严重。这是由于断层错动变形引起的初始断裂在后续地震动作用下会加剧隧道结构损坏。而“同震同错”荷载施加模式则更为符合强震动-断层错动的耦合作用。随着诸如多台面振动台阵，地震断层模拟实验装置等试验平台的研发和应用，以“同震同错”的荷载施加模式将被广泛地纳入针对强震断层作用下穿越活动断层隧道结构的精细化地震响应分析。

1若采用“同震同错”的荷载施加模式，以相似地震环境和场地条件下的实测残余位移型强震加速度时程作为初始时程进行调整得出。第二种是以参数化为单周期正弦波的等效速度脉冲函数代替实际近断层加速度记录中的低频分量来构造残余位移型强震加速度时程或直接通过宽频带地震动模拟方法生成。

2若采用“先错后震” 的荷载施加模式，则断层的错动作用应符合第4章4节中有关粘滑断层作用的规定，而强震动作用的设计地震动加速度时程可调整与工程场址地震背景和场地条件相近的近断层强震记录得出，或采用其它方式模拟生成。

**5.3.2** 本条规定与第4.3.1、4.3.2条中针对蠕滑、粘滑断层作用时程的基本规定相类似。区别在于考虑强震断层耦合作用时，主、被动盘上的设计荷载均应采用地震动时程进行表达。以被动盘相对静止，主动盘发生相对错动的运动模式来简化设计荷载时，被动盘设计地震动可采用近断层地震动时程（不含残余位移）来表达以体现强震动作用，而主动盘上则采用在被动盘设计地震动上叠加包含单向残余位移的速度脉冲来确定，可在体现强震动作用的同时，也表达主、被动盘间的相对错动。若考虑断层盘间相对运动存在的“瞬变—回弹—稳定”，则主动盘上的地震动时程对应的峰值位移和残余位移的比值应该符合5.2.3条的规定。

**5.3.3** 由于地震是随机过程，一组地震动加速度时程并不具备代表性，故应该使用多组地震动加速度时程。并且鉴于在结构地震反应时程分析时，多组地震动输入的结构反应结果有较大的差异，本节规定输入地震动样本数及选用要求。用于时程分析的实际强震记录和人工模拟时程曲线的总数量不应少于3组，其中实际强震记录不应少于总数的2/3。当地震动的样本数量较少时，如3条，计算结果具有较大的随机性，因此选取其中的大值进行设计。当地震动的样本数较多时，如大于7条，计算结果具有较好的统计特征，因此可以取平均值进行抗震设计。