

采用不同隔震形式的双层地铁地下车站结构 地震反应分析

庄海洋, 李 晟, 王 伟, 陈国兴

(南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

摘要: 针对地铁地下车站结构中柱、中板等抗震薄弱构件, 分别研究了车站结构在传统完全约束结构形式下, 在上下层中柱顶部设置弹性滑移支座时, 以及本文提出的在中板边缘及底层中柱设置隔震支座时的地震反应特性, 建立了土-地下结构非线性静动力耦合相互作用的二维有限元分析模型, 对比分析了采用不同隔震形式对车站主体结构静动力反应特性的影响规律。结果表明: 与传统车站结构相比, 在中柱顶部设置弹性滑移支座能有效降低车站中柱处的地震损伤, 具有更好的抗震性能。采用本文提出的中板边缘及底层中柱设置隔震支座, 可以在减小中柱所受地震损伤的同时, 有效地保证结构中板在强地震中不受严重损伤, 从而提高车站的整体抗震性能。

关键词: 隔震支座; 抗震性能; 地铁地下车站结构; 地震损伤; 数值模拟

中图分类号: TU352.12; TU311.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)02-0379-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.02.009

引 言

在强地震荷载作用下, 建筑结构往往受到严重损伤。近年来的屡次震灾给世人敲响了警钟。地下结构的地震变形明显区别于地上结构, 其抗震安全性能也应该受到重视。在强地震作用下, 地铁地下车站结构的中柱由于抗震性能水平的不足, 高轴压比情况下缺乏侧向变形能力^[1], 在地震荷载作用下往往发生垮塌。随着城市地铁线路的不断完善, 车站结构也日趋复杂, 因此两层三跨框架式地铁地下车站结构越来越多地被采用。板作为建筑结构的一部分, 为人类提供了活动的平台^[2], 地震过程中坍塌会直接对人类生命财产造成威胁。地铁车站结构作为“交通强国”战略的重点工程, 其中板与中柱搭接了人类活动的直接平台, 承担着重要的客流运输任务, 如果发生地震破坏势必会造成巨大的社会影响和经济损失, 因此对其抗震性能水平和地震破坏机理的研究, 现已成为“韧性城市”领域的热点及难点课题。

在以往的研究及试验中, 人们普遍认为中柱倒塌是导致中板破坏的直接原因, 在地震波作用下, 强大的水平荷载使中柱达到抗剪极限并逐渐产生屈服破坏, 柱体的竖向承载能力得到极大削弱并在持续加荷下发生整体压弯变形, 中板在中柱发生压弯破

坏后屈服, 随之发生整个地铁车站的垮塌^[3]。已有一部分学者开展了地铁地下车站结构中柱采用针对性保护措施的相关研究, 结果表明在车站结构内部设置隔震支座^[4-5], 可以降低地铁地下车站结构中柱的侧向变形和地震损伤程度。还毅等^[6]通过分析大开地铁车站结构动力响应情况, 初步分析了隔震支座减小结构整体的变形与损伤破坏的机理。Ma 等^[7]提出结构的破坏是由于中柱延展性差造成的, 并确定了支座滑动轴承系数的推荐范围。Zhuang 等^[8]通过定义中柱与纵梁间接触面对 (master-slaver-surface) 的方法初步模拟了弹性滑移支座的相对滑移, 并指出采用隔震支座将增大车站的板与侧墙连接部位的震时损伤面积。然而目前对于地下结构关于板的抗震依旧停留在传统的“以刚克刚”的方式, 即通过增加板配筋, 采用较高型号的混凝土来加强中板的抗震性能情况。但由于强地震作用下地铁地下车站结构的变形与破坏明显受到周围场地土体的约束与影响, 国内外学者对大型复杂地铁地下车站结构的中板和中柱保护方法的研究仍有待进一步开展、深入。

鉴于此, 本研究根据两层地铁地下车站结构的地震损伤特性, 以提升地铁地下车站结构破坏最为严重的中柱及中板的抗震性能为出发点, 提出了一种在底层中柱及板端设置弹性滑移隔震支座“以柔克刚”的地下结构形式; 基于大型商用有限元软件

ABAQUS,建立了土-地下结构非线性静动力耦合相互作用的二维整体时域有限元分析模型,系统地对比研究了不同基岩输入地震动作用下车站结构在传统结构形式下,在上下层中柱顶部设置弹性滑移支座时,以及本文提出的在中板边缘及底层中柱设置隔震支座时车站的侧向变形、地震损伤和动内力反应等结构地震反应特性,验证了本文提出的隔震形式能够有效保护车站中柱及中板,进而提高车站的整体抗震性能。

1 数值模型与方法

1.1 地铁地下车站结构概况

本研究选用南京某实际场地两层三跨地铁车站,横断面结构特征和具体尺寸如图1所示。车站结构整体高度为12.49 m,横断面宽度为21.2 m;结构上层侧墙为0.7 m,下层侧墙厚度0.8 m;顶板、中板和底板的厚度分别为0.7,0.35和0.8 m。原型车站每跨间距9.12 m,结构中柱直径0.8 m。车站主体结构与中柱均采用C30混凝土,结构钢筋均选用HPB235。地连墙采用叠合墙的形式与主体结构相

连,假定两者间不会发生相对滑移与分离。

1.2 弹性滑移支座与设置

本研究采用的弹性滑移支座结构由滑板、不锈钢板、叠层橡胶及上下连接板组成,主体结构为钢制。不锈钢板与滑板之间的接触面是支座的核心部位,在初始荷载的作用下,滑动面存在着初始屈服剪力作用。受到地震荷载作用时,接触面将因为不足以承受水平向荷载而发生相对滑移。叠层橡胶起着调节刚度的作用。已有研究表明,在不使用润滑剂时弹性滑移支座滑动面的动摩擦系数一般在0.1左右,使用润滑剂后可降至0.01,且滑动速度、环境温度等对摩擦系数均有一定程度的影响^[9-10]。

1.3 土与钢筋混凝土材料的动力本构模型

本研究中土体本构部分采用由庄海洋等^[11]基于塑性力学原理建立的软土非线性记忆型嵌套本构模型。该模型的可靠性已通过室内动三轴试验验证,并成功用于过江大直径管廊盾构隧道抗震性能研究、深厚软弱场地地震效应分析等多个研究项目。场地各层土体的基本物理力学参数见文献[8]。

混凝土材料的本构模型部分,采用由Lee等^[12]与Lubliner等^[13]改进得到的黏塑型损伤模型,该本构模型采用了两个不同的损伤变量描述混凝土破坏时的刚度衰减规律。通过观察混凝土的损伤因子变化趋势,可以对结构震时的受压及受拉损伤情况进行评估。中板两侧的橡胶垫块部分,本文采用了超弹性本构Mooney-Rivlin进行模拟。Mooney-Rivlin本构为工程实践中最常使用的橡胶本构之一,通过定义三个关键参数,其在应变范围内能够较好地模拟其受力特性,根据相关研究^[14],对于弹性滑移支座,其 C_{10} , C_{01} 及 D_1 分别取0.16 MPa,0.04 MPa及 0.002 (MPa)^{-1} 。此外,钢筋材料选取线弹性本构进行离散,采用“Embedded region”的方式嵌入到地连墙及车站主体结构之中,钢筋的弹性模量为210 GPa。计算过程中忽略钢筋与主体结构间的相对滑移。材料的本构模型参数详见文献[15]。

1.4 有限元分析模型

为了合理反映土体与车站结构之间、弹性滑移支座内部的动力接触特性,在不同介质间定义了不同的主从接触面。车站结构与土体之间的切向接触通过定义“Penalty”函数进行模拟,即当剪应力 F_s 大于接触面间的最大摩擦力 $f_{\max}$ 时,两者将发生切向滑动;接触面的法向接触为“Hard”接触,即当地震作用下两者出现拉力 F_p 时,对应区域将立即发生分离。根据相关研究^[16],混凝土与土体各接触面间的

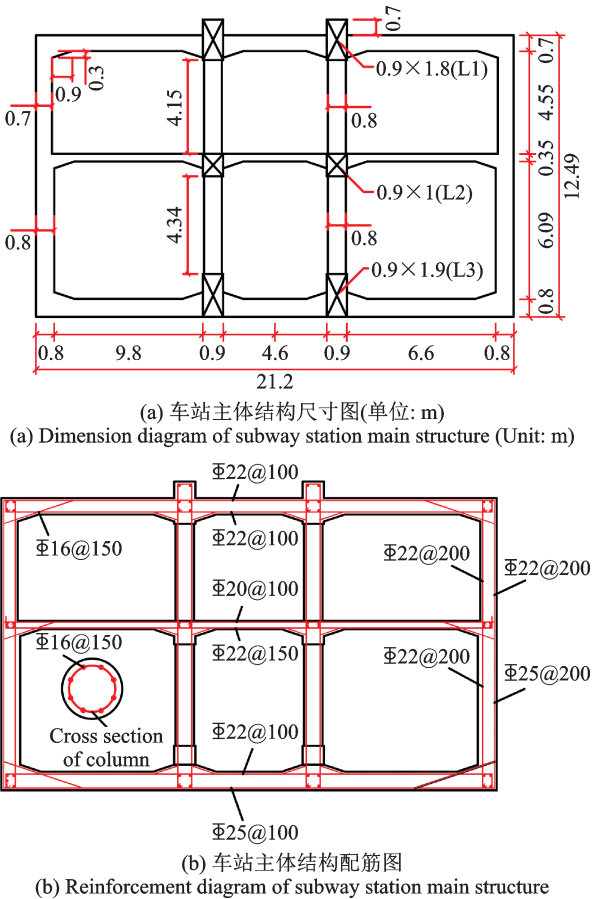


图1 地铁车站结构尺寸及配筋示意图
Fig.1 Dimension and reinforcement diagram of subway station structure

摩擦系数,在有限元计算过程中均取0.4。如图2所示,在Condition 1中,对于采用传统连接的地铁地下车站结构,柱子顶端与结构纵梁之间均采用绑定的约束形式进行模拟,即假定柱端与纵梁之间将不会发生分离和滑动现象。Condition 2为采用两层柱顶隔震的车站结构,为了模拟弹性滑移支座受力时的相对滑动,把单个弹性滑移支座分为上下两部分,将其分别进行建模,并将其顶底面分别与纵梁、中柱顶部绑定,通过在弹性滑移支座的上下两部分交界面处定义接触面对(master-slaver-surface),使得支座在震时能发生相对摩擦及滑动。根据已有的研究,弹性滑移支座滑动面摩擦系数取为0.025^[17]。在Condition 3中,为便于两侧钢板滑移支座的设置,在车站主体结构侧墙与中板连接处改为牛腿,从而为中板提供一个平台,使中板可以通过弹性滑移隔震支座搭设在牛腿上。中板两端设置的板式滑移支座体系与柱顶支座略有不同,中板底部及牛腿顶部加设了5 cm厚的钢板,并在中板端部与侧墙连接处设置了20 cm厚的叠合橡胶。上下钢板交界处定义了接触面对(master-slaver-surface),使上下钢板之间能发生相对滑动。滑动面摩擦系数同样取为0.025。橡胶垫块的左右两侧分别于中板、侧墙绑定连接,由

于其具有较为优越的延展性,使得在地震荷载作用下中板能发生左右滑移。在车站有限元模型中,对侧墙牛腿部位配筋按照相关规范进行了加密处理。

基于商用有限元软件ABAQUS建立的地铁地下车站结构整体有限元分析模型如图2所示。为了兼顾模型计算的精确与高效,土体网格采用四结点双线性平面应变单元(CPE4),土体单元网格的尺寸在1~2 m之间变化,从而使得土体单元的网格尺寸小于体系最小波长的1/6~1/8^[18],满足数值模型的计算精度要求。车站主体结构采用四结点平面减缩积分应变单元(CPE4R),单元网格的尺寸约为0.2 m。橡胶垫块采用四结点杂化单元(CPE4H),因垫块体积较小,单元网格尺寸划分约为0.1 m,并在横向上予以加密。钢筋采用梁单元(B21)进行等效,单元网格的尺寸约为0.2 m。为考虑土体的初始静应力状态对体系的影响,本研究采用Zhuang等^[11]建立的土-地下结构非线性静动力耦合作用有限元分析方法。根据楼梦麟等^[19]的研究,地基侧向截取对模型动力反应有一定的不利影响。这种影响在 $B/b \geq 5$ 时可以忽略,其中 b 是地铁结构模型的宽度, B 是整个体系基础土体的总宽度。因此,本研究中模型场地的宽度、厚度分别取为200 m,80 m。

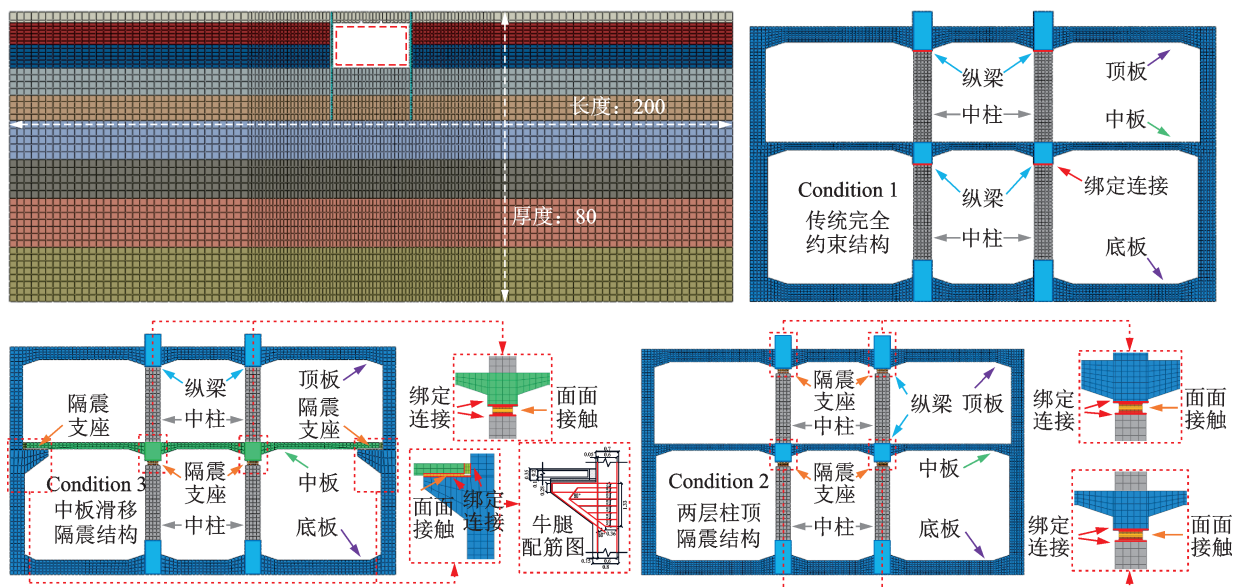


图2 土-地下结构动力相互作用体系有限元模型(单位:m)

Fig. 2 Finite element model for soil-subway station dynamic interaction system (Unit: m)

1.5 输入地震动的选取

本研究输入四条地震波的信息及加速度反应谱见文献[20]。根据已有研究表明^[21],通过计算峰值加速度(PGA)与峰值速度(PGV)的比值可计算出地震动频率,进而评价其对地下结构动力反应的影响。据此可计算出Kobe波及El-Centro波属于中频

振动波;卧龙波属于高频振动波;什邡八角波则属于低频振动波。本文所选输入地震动分别具有高、中、低频的振动特征,四条基岩输入地震动的加速度峰值(PBA)分别调整为0.3g和0.5g。从理论上讲,就地下结构的地震反应而言,应从基岩表面或假设的基岩表面输入地震动,本文中选择的四条地震波可近似视为近场基岩波,适合作为基岩地震动(Peak

Bedrock Acceleration)来考虑土体与地下结构之间的动力相互作用。

2 车站结构整体抗震性能分析

2.1 车站结构层间位移角

表1给出了不同计算工况下车站结构的层间位移角幅值。就不同的隔震支座设置形式而言,在基岩输入地震动 $PBA=0.3g$ 中震状态下,在两层柱顶均设置隔震支座的结构,其层间位移角略小于中板滑移式隔震结构;当受到 $PBA=0.5g$ 大震荷载作用时,与两层柱顶隔震体系相比,使用中板滑移式隔震体系并不会过多加大结构的层间位移角。原因是该隔震形式在中板两端设置了超弹性的橡胶垫层,中板通过叠层橡胶与侧墙相连,中板底端滑动支座发

挥着摩擦的作用,超弹性橡胶材料在吸收能量的同时,也能对中板及侧墙起到一定的限位功能,从而弥补了单一隔震技术的不足,更好地保护车站主体结构。

就不同的输入地震动而言,车站结构的地震反应具有明显的差异,输入具有低频振动特征的什邡八角波时车站结构的层间位移角明显大于输入具有中、高频振动特征的Kobe波、卧龙波的层间位移角。究其原因应为本工程场地特征周期较长,场地软土特征较为明显,输入具有低频振动特征的什邡八角波时场地地震反应最为强烈,进而导致地下车站结构周围侧向地基的顶底间相对侧移量较大。

2.2 车站结构地震损伤

为进一步分析不同结构形式地铁地下车站结构的抗震性能,图3和4分别给出了采用传统完全约束结构、两层柱顶隔震结构和中板滑移式隔震结构时,输入峰值加速度 $PBA=0.3g$ (中震)和 $PBA=0.5g$ (大震)Kobe波的工况下,地铁车站结构的地震破坏情况(当混凝土材料发生完全受拉开裂破坏时,云图中DAMAGET的数值将接近于1)。

由图3可知,输入峰值加速度 $PBA=0.3g$ 工况下,采用传统连接方式的车站主体结构在顶底板与侧墙连接处、中板处及两层中柱处均出现明显的地震受拉损伤,尤其是在顶底层中柱与纵梁交界处,柱体损伤区域明显。出现这种情况的原因是在二维模型建模时依据原型车站每跨的间距,将原型的中柱折减成了一堵墙,混凝土的弹性模量及各项参数也随之进行了折减,因此车站结构的中柱位置与主体结构其他部位存在明显的强弱关系。在地震作用下中柱端部受到了强烈的弯剪作用,中柱混凝土受损破裂的同时,其水平与竖向承载能力急剧降低,最终引起中板的坍塌与整个地下结构的破坏。

与中柱完全约束的结构相比,在两层柱顶设置隔震支座的结构中板左右两端的损伤面积区域略微加大,顶、底板损伤也呈现轻微加重趋势,但顶、底层中柱的损伤显著减小,且中板中间跨的损伤也明显

表1 输入不同地震波时最大层间位移角
Tab. 1 Maximum interlayer displacement angle for input of different seismic waves

输入地震波	位置	输入地震动大小 (PBA)/g	位移角/%		
			Condition 1 传统完全约束	Condition 2 两层柱顶隔震	Condition 3 中板滑移隔震
Kobe波	上层	0.3	4.04	4.84	6.56
		0.5	4.04	5.73	5.83
	下层	0.3	4.82	4.67	6.85
		0.5	4.31	6.39	5.83
El-Centro波	上层	0.3	3.03	4.89	5.25
		0.5	8.65	13.52	13.61
	下层	0.3	3.37	5.54	5.32
		0.5	9.67	15.33	13.71
卧龙波	上层	0.3	1.78	2.55	2.69
		0.5	2.95	4.48	4.01
	下层	0.3	1.83	2.26	2.62
		0.5	3.13	3.89	3.94
什邡八角波	上层	0.3	2.47	3.95	5.76
		0.5	6.14	10.62	11.97
	下层	0.3	2.52	4.24	5.43
		0.5	6.44	11.07	11.73

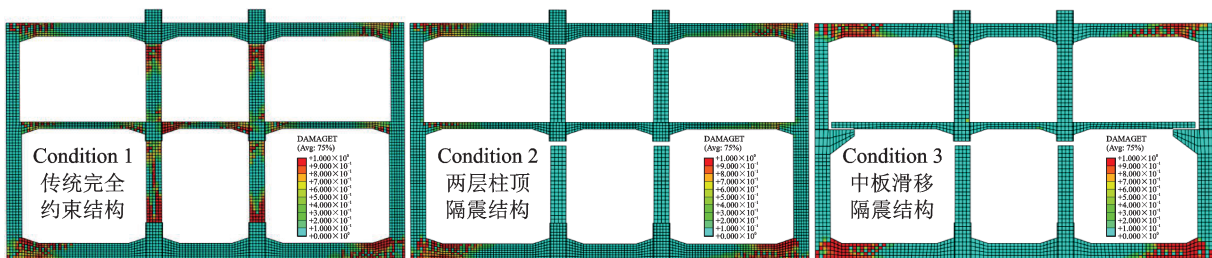
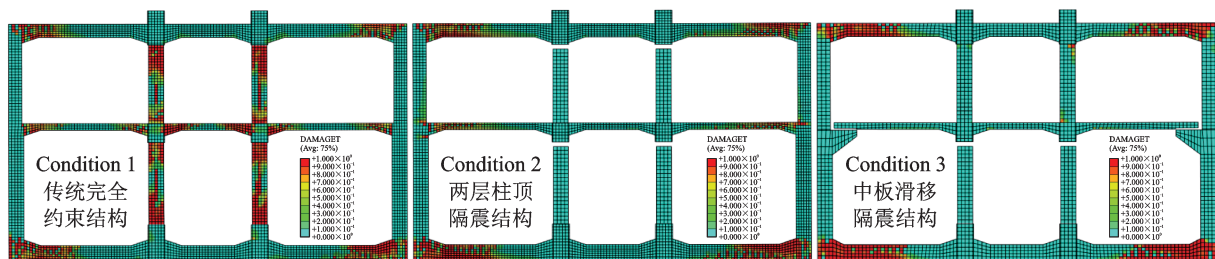


图3 Kobe波作用下车站结构地震受拉损伤云图($PBA=0.3g$)
Fig. 3 Cloud image of seismic tension damages of underground structure under the Kobe wave ($PBA=0.3g$)

图4 Kobe波作用下车站结构地震受拉损伤云图($PBA=0.5g$)Fig. 4 Cloud image of seismic tension damages of underground structure under the Kobe wave ($PBA=0.5g$)

小于传统完全约束结构,表明设置滑移隔震支座的地下结构在地震中具有更高的抗震性能。采用中板滑移式隔震体系的车站结构顶板两端损伤略有增大,侧墙底部倒角处出现贯穿截面的损伤;与传统完全约束结构相比,中板滑移式车站的顶层中柱受拉损伤明显减小,底层中柱顶部及底部未出现明显的地震受拉损伤,车站中板处也未见明显损伤,主要原因是中板两侧滑移支座的设置改变了车站的受力方式,中板处混凝土不再与侧墙直接连接,地震时中板将在荷载的作用下发生相对滑移,且中板两侧的叠合橡胶材质柔软,一定程度上也起到了保护中板的作用。值得注意的是上层中柱柱顶也出现较轻程度损伤,这应是中板与结构主体的连接全部依附于柱顶而造成的,中板板端设置弹性滑移隔震支座结构的侧墙牛腿部位,在大震时可能由于截面突变出现了较为严重的贯穿截面的破坏,应进行相关加强设计。

输入峰值加速度 $PBA=0.5g$ 工况下,三种结构在顶底板与侧墙连接处的地震受拉损伤程度明显加重,地震损伤完全贯穿整个截面且形成大范围的损伤横贯连通区域;采用传统完全约束的车站主体结构顶、底层中柱出现全截面贯穿地震受拉破坏,顶底板两端处也出现了严重的地震受拉损伤,且结构中板与纵梁连接处也出现了较明显的受拉损伤;在两层中柱顶部设置滑移隔震支座的结构,在顶底层柱体端部的损伤明显小于传统结构,中板与纵梁上下连接处的损伤也略有减轻,但在中板两端的损伤区域有所增大,尤其在与侧墙连接处,破坏范围出现了较为明显的延伸;与之前两类结构相比,采用中板滑移式隔震体系的车站结构顶层中柱处仅出现轻微的地震受拉损伤,底层中柱未出现明显损伤,且中板与纵梁、侧墙连接处也得到了较好的保护,然而顶底板损伤有一定程度的延伸。

通过上述分析表明:当地铁地下车站结构中柱处设置弹性滑移支座时,车站结构中柱和中板中间跨的地震损伤明显减轻,而顶底板及中板两端的地震损伤将会略微加重。与两层柱顶隔震结构相比,中板滑移式隔震体系在明显减小顶、底层中柱损伤

的同时,有效提高了车站结构中板的安全系数。考虑到地铁地下车站结构中柱及中板破坏是混凝土结构坍塌的主要诱因,因此在地铁车站中板端部及底层中柱处设置滑移隔震支座,整体上可以提高地铁车站结构的整体抗震性能。

2.3 车站结构关键结点的内力情况

为进一步探究滑移隔震支座的设置对地下车站结构地震反应的影响,这里给出了地铁地下车站主体结构及中柱顶底端关键结点处的内力情况,并将三种结构所得内力时程进行对比。通过在结构的关键截面定义 Reference Point 参考点,可以了解到结构地震时的内力变化情况。由于本文建立的是二维模型,因此车站结构的实际内力情况为平面内力计算值乘以每跨的间距。

2.3.1 主体结构弯矩变化情况

在静力荷载工况下,对车站结构与周围土体分别施加了自重,并在土体顶面施加了顶部超载,从而模拟正常使用阶段地面荷载对地下车站结构的影响。为进一步探究不同隔震体系的设置对地下车站结构地震反应的影响,定义了各隔震体系的隔震效率计算公式:

$$\eta_{is} = \frac{|M_{tr} - M_{is}|}{|M_{tr}|} \times 100\% \quad (1)$$

式中 η_{is} 代表体系的隔震效率; M_{tr} 代表传统车站结构的弯矩幅值; M_{is} 代表隔震车站结构的弯矩幅值。

隔震效率 η_{is} 越大,说明基岩波通过隔震体系传递的振动越小,隔震效果也越好;如果 $\eta_{is}=0$,则表明干扰全部被传递,该体系没有起到隔震效果。由此可得车站结构中柱各点的隔震效率如表2所示。

在传统车站结构中,顶板倒角处的弯矩值明显小于底板倒角处。滑移隔震支座的使用改变了车站的整体受力情况,与传统结构相比,设置隔震支座的地下结构顶底板倒角处的弯矩略有增大,侧墙处的弯矩幅值也有略微提升,这是因为采用弹性滑移支座后大大削弱了车站结构柱子与主体结构之间的连接强度,降低了结构中柱参与整体结构抗侧

表 2 Kobe 波作用下不同峰值加速度时主体结构的隔震效率

Tab. 2 The isolation efficiency of main structure under different peak accelerations of Kobe wave

位置	计算工况	$M_{it}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	两层柱顶隔震结构		中板滑移隔震结构	
			$M_{iso}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$\eta_{is}/\%$	$M_{iss}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$\eta_{is}/\%$
侧墙上部倒角处	静力荷载	315.58	328.31	-4.03	315.77	-0.06
侧墙下部倒角处		588.30	668.02	-13.55	683.08	-16.11
顶板倒角处		496.87	512.36	-3.12	505.09	-1.65
底板倒角处		659.43	724.96	-9.94	743.24	-12.71
侧墙上部倒角处	$PBA=0.3g$	1337.32	1590.21	-18.91	1698.14	-26.98
侧墙下部倒角处		3555.08	4062.63	-14.28	4170.25	-17.30
顶板倒角处		2701.91	3059.2	-13.22	3140.91	-16.25
底板倒角处		4316.28	5032.8	-16.60	5346.85	-23.88
侧墙上部倒角处	$PBA=0.5g$	2015.18	2419.52	-20.06	2509.26	-24.52
侧墙下部倒角处		4297.92	5156.85	-19.98	5233.94	-21.78
顶板倒角处		3506.16	4079.4	-16.35	4283.93	-22.18
底板倒角处		4802.27	5715.05	-19.01	5826.6	-21.33

移的能力,同时使得车站结构侧墙受中柱的约束也大大降低,从而使得顶、底板在荷载作用下更容易产生弯曲变形。在地震荷载作用下,由于受力体系发生了改变,几种不同结构的弯矩幅值差距被进一步放大。与两层柱顶隔震车站相比,采用中板滑移的隔震形式的车站结构在底板及侧墙下部倒角处的弯矩幅值略有增大,但总体增大的幅度有限,这是因为弹性滑移支座具有一定的自稳定性,滑动面之间存在着摩擦作用;同时本研究选用的地铁车站为南京地区某实际车站结构,在施工时侧墙两侧设置了地下连续墙,叠合墙的采用在一定程度上也加强了结构的抗侧移刚度。考虑到车站内部结构、功能的正常使用,建议在工程施工中加强对采用隔震支座车站结构底部位置的配筋,以进一步提升结构的整体抗震性能。

2.3.2 结构中柱弯矩变化情况

由于地铁车站标准断面为左右对称的结构,因此在静力作用下中柱的弯矩很小。表 3 给出了 Kobe 波作用下中柱的隔震效率情况。从整体上看,隔

震体系的采用明显减小了结构中柱处的弯矩幅值。由于弹性滑移支座是一种水平刚度较小而竖向刚度较大的结构构件,可承受大的水平变形,在地震荷载作用下能较好地保护中柱。因此在两层柱顶隔震的结构体系中,结构中柱的动弯矩峰值较传统结构时的计算结果明显减小,该位置的混凝土也得到了较好的保护,隔震效率最高可达 64.83%。与两层柱顶隔震结构相比,中板滑移式隔震体系底层中柱弯矩减小幅度明显,而顶层弯矩减小有限,这是由中板滑移式车站的结构特性所决定的。在该体系中,中板与结构主体的连接全部依附于柱顶,形成一个“钟摆式”的滑移体系,负责承担受力的顶层中柱不可避免地出现一定的损伤。在底层中柱方面,由于该工况中同时打开了中板与侧墙、中柱与纵梁间的连接,下层中柱顶部的弯矩峰值有显著的减小,受到牵拉作用影响,中柱底部的应力集中情况也得到减轻,因而在保护中板的同时,结构底层中柱仍具有 60% 左右的隔震效率。中柱弯矩变化情况与混凝土损伤情况完全对应。

表 3 Kobe 波作用下不同峰值加速度时中柱的隔震效率

Tab. 3 The isolation efficiency of middle columns under different peak accelerations of Kobe wave

计算工况	位置	$M_{tr}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	两层柱顶隔震结构		中板滑移隔震结构		
			$M_{iso}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$\eta_{is}/\%$	$M_{iss}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$\eta_{is}/\%$	
$PBA=0.3g$	上层	中柱顶部	1146.83	572.61	50.07	1019.37	11.11
		中柱底部	1394.62	571.95	58.99	1277.28	8.41
	下层	中柱顶部	1265.73	622.95	50.78	607.76	51.98
		中柱底部	2253.97	792.75	64.83	809.25	64.10
$PBA=0.5g$	上层	中柱顶部	1286.39	706.37	45.09	1111.88	13.57
		中柱底部	1768.76	742.42	58.03	1563.73	11.59
	下层	中柱顶部	1449.84	691.46	52.31	722.47	50.17
		中柱底部	2236.08	966.14	56.79	959.84	57.07

根据上述分析结果,建议在强震作用下优先采用隔震结构来提高地下结构的整体抗震性能,考虑到地铁车站结构的中板直接搭接了人类活动的平台,基于结构安全系数要求较高的条件下优先采用中板滑移式隔震体系。

2.3.3 中柱轴力反应时程

图5给出了Kobe波输入峰值加速度 $PBA=0.3g$ 及 $0.5g$ 工况下,地铁地下车站主体结构中柱

顶端关键结点处的动力反应时程曲线。由图5可知,在传统完全约束结构中,当峰值加速度从 $0.3g$ 增大到 $0.5g$ 时,中柱所受的轴力迅速增加。隔震支座的使用改变了车站的框架式结构体系,中柱不再与主体结构浇筑到一起,而是与支座搭接,形成了一个柔性的隔震体系,因此采用隔震支座的車站结构受到的轴力值略大于传统结构。

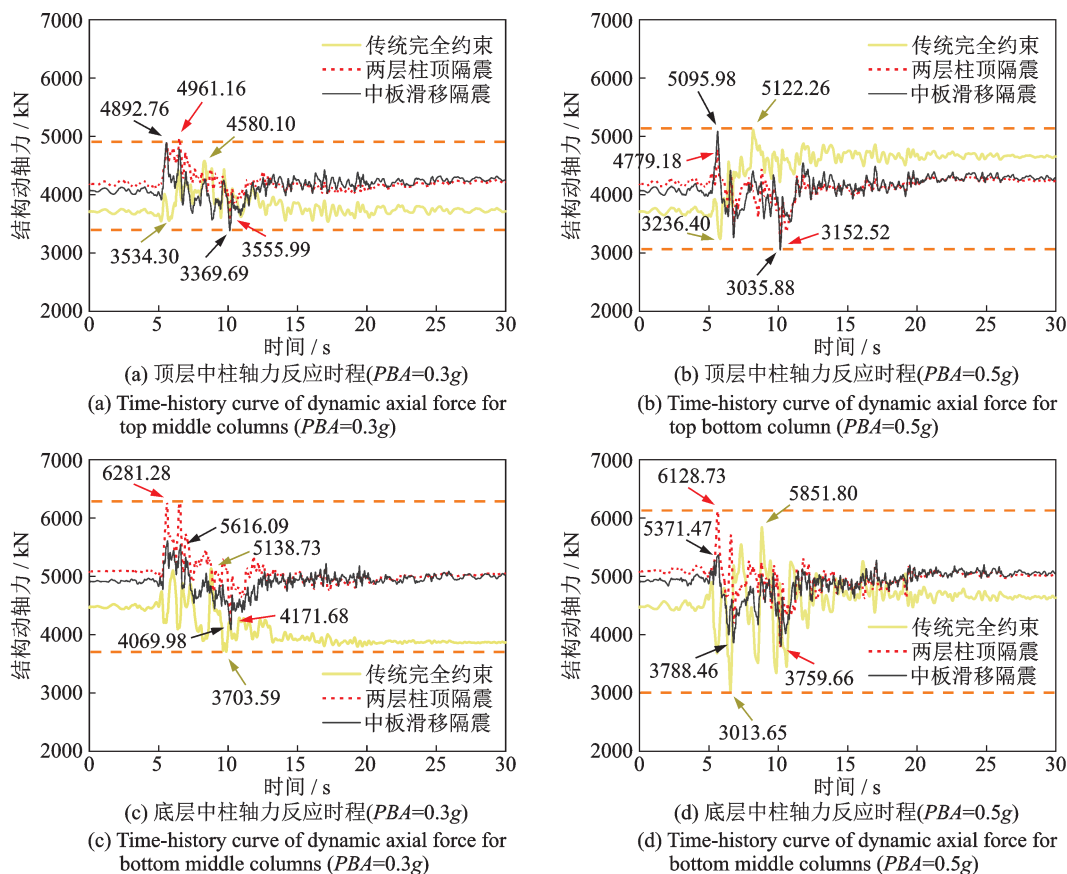


图5 Kobe波作用下中柱轴力反应时程曲线

Fig. 5 Time-history curve of dynamic axial force for middle columns under the Kobe wave

随着地震荷载的增大,两种隔震体系逐渐开始发挥作用,使得隔震车站结构中柱处轴力变化幅度不大,始终保持在一定范围内上下波动,这表明弹性滑移支座具有较好的适用性,在大震荷载作用下能有效保护中柱不受损伤。与两层柱顶隔震结构相比,中板滑移体系的上层中柱轴力值变化不大,下层轴力值显著减小,尤其是在峰值加速度 $PBA=0.5g$ 时,下层中柱的轴力值明显小于两层柱顶隔震结构,从而延长了下层中柱的使用寿命,提高了车站结构的整体抗震水平。

2.4 板端叠合橡胶变形情况

为了反映中板滑移式隔震体系的侧向变形自恢复能力,本文提取了中板端部橡胶垫层的应力反应

时程。从图6中可以看出,在 $PBA=0.3g$ 的Kobe波、什邡八角波作用下,叠合橡胶与侧墙接触面处的应力围绕240 kPa,130 kPa上下波动,其他工况也出现了类似的现象。这表明橡胶垫层具有较好的弹性、扯断强度及延展性,在外力作用存在一定的回滞性。在地震荷载的作用下,叠合橡胶-中板隔震体系拥有较好的变形协调性,使得结构中板具有较好的震后自复位能力。与图3中混凝土损伤对比分析可知,中板滑移式隔震体系打开了中板与侧墙间的刚性约束,在地震荷载的作用下,超弹性的橡胶材料将会发生相对变形,从而减少了板端所受内力,最终减轻了中板两侧混凝土的损伤。

若依据《建筑隔震橡胶支座 JG 118—2000》^[22]规范可知,支座体系中橡胶的极限压应力不应小于

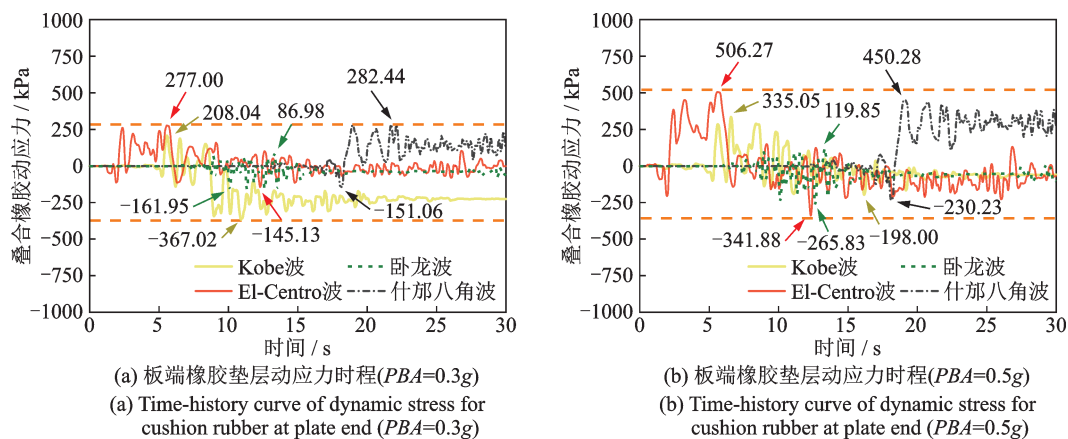


图6 板端橡胶垫层应力反应时程曲线

Fig. 6 Time-history curve of dynamic stress for cushion rubber at plate end

90 MPa, 极限拉应力不应小于 1.5 MPa。由图 6 可知, 在地震作用下, 橡胶垫层的拉、压应力均小于 0.6 MPa, 叠合橡胶尚未到达材料的屈服强度, 仅发生轻微的弹性变形, 橡胶构件并未发生塑性破坏, 中板滑移式体系仍具有较高的安全系数。

3 结论

针对地下结构的中柱、中板是其抗震的薄弱环节, 本研究提出在中板端部及底层中柱设置隔震支座体系, 建立了土-地下车站结构的非线性动力相互作用的有限元分析模型。同时, 为了说明部分传统绑定车站结构与柱顶隔震结构整体抗震性能存在的差异, 分别建立了三种不同的整体时域分析模型, 考虑不同输入地震动特性和不同峰值加速度, 研究了中板滑移式地铁地下车站结构的整体抗震性能, 具体结论如下:

(1) 在中板端部及底层中柱设置隔震支座的结构与仅在两层柱顶设置弹性滑移隔震支座的结构均能有效降低车站结构中柱的地震损伤, 但相对来说, 尽管在中板板端设置弹性滑移隔震支座降低了结构的抗侧移刚度, 但对结构的中板和中柱均起到了较好的保护作用, 混凝土的地震损伤范围更小, 程度也较轻, 因此对抗震性能的提高更为有效。

(2) 就中板两端叠合橡胶的变形情况而言, 随着地震荷载的逐步加大, 车站结构中板两侧的叠合橡胶仍处于材料弹塑性范围内。在地震荷载作用下, 橡胶垫层的拉、压应力均小于 0.6 MPa, 尚未到达橡胶材料的屈服强度, 使得结构中板具有较好的震后自复位能力。

(3) 值得注意的是, 中板板端设置弹性滑移隔震支座的结构由于整个中板依靠上层中柱与结构相

连, 因此在地震过程中上层柱顶难免会产生较大的内力。本文计算峰值加速度为 0.5g 地震动时, 上层柱顶仅出现轻微受拉损伤, 但仍应对该部位进行抗震加强设计。

(4) 对于传统结构, 相对层间位移角是衡量结构抗震性能的重要因素, 而在隔震结构中, 由于采用了新的结构形式, 尽管相对层间位移角较大, 但结构的整体损伤却明显降低。通过对体系隔震效率 η_{is} 的计算可知, 在采用隔震体系后车站中柱处的内力幅值得到显著减小, 对结构抗震性能明显有利, 因此对于隔震结构的抗震性能评估方面需要采用新的方法。

参考文献:

- [1] 杜修力, 李洋, 许成顺, 等. 1995 年日本阪神地震大开地铁车站震害原因及成灾机理分析研究进展[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 223-236.
DU Xiuli, LI Yang, XU Chengshun, et al. Review on damage causes and disaster mechanism of Daikai subway station in the 1995 Osaka-Kobe Earthquake [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 223-236.
- [2] 许成顺, 张梓鸿, 李洋, 等. 板柱变形能力对地铁车站结构地震破坏反应影响研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(4): 26-35.
XU Chengshun, ZHANG Zihong, LI Yang, et al. Influences of deformation capacity of structure roof and middle columns on earthquake damage responses of subway station structure [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(4): 26-35.
- [3] UENISHI K, SAKURAI S. Characteristic of the vertical seismic waves associated with the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan earthquake estimated from the failure of the Daikai Underground Station [J]. Earth-

- quake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29(6): 813-821.
- [4] XU Zigang, DU Xiuli, XU Chengshun, et al. Numerical analyses of seismic performance of underground and aboveground structures with friction pendulum bearings[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 130: 105967.
- [5] CHEN Zhiyi, CHEN Wei, BIAN Guoqiang. Seismic performance upgrading for underground structures by introducing shear panel dampers[J]. Advance in Structure Engineering, 2014, 17(9): 1343-1357.
- [6] 还毅, 方秦, 柳锦春, 等. 提高地铁车站结构抗震能力的理论及数值分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 252-257.
- HUAN Yi, FANG Qin, LIU Jinchun, et al. Theoretical and numerical investigations on enhancement of aseismic capability of metro stations[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(3): 252-257.
- [7] MA Chao, LU Dechun, DU Xiuli. Seismic performance upgrading for underground structures by introducing sliding isolation bearings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 74: 1-9.
- [8] ZHUANG Haiyang, ZHAO Chang, CHEN Su, et al. Seismic performance of underground subway station with sliding between column and longitudinal beam[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 102: 103439.
- [9] 程华群, 刘伟庆, 王曙光. 弹性滑移支座在高层隔震建筑中的应用研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2007, 29(3): 48-53.
- CHENG Huaqun, LIU Weiqing, WANG Shuguang. Application study on elastic sliding bearings in isolated high-rise building[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007, 29(3): 48-53.
- [10] 荣强, 盛严, 程文灏. 滑移隔震支座的试验研究及力学模型[J]. 工程力学, 2010, 27(12): 40-45.
- RONG Qiang, SHENG Yan, CHENG Wenrang. Experimental investigation and mechanical model of sliding isolation bearings[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(12): 40-45.
- [11] 庄海洋, 陈国兴, 朱定华. 土体动力粘塑性记忆型嵌套面本构模型及其验证[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1267-1272.
- Zhuang Haiyang, Chen Guoxing, Zhu Dinghua. Dynamic visco-plastic memorial nested yield surface model of soil and its verification[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1267-1272.
- [12] LEE J H, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.
- [13] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 299-326.
- [14] 兰祖瑶. 铅芯橡胶隔震支座的静、动力性能对比研究[D]. 广州: 广州大学, 2016.
- LAN Zuyao. Comparative study on the static and dynamic performances of lead rubber seismic isolation bearings[J]. Guangzhou: Guangzhou University, 2016.
- [15] 王建宁, 窦远明, 庄海洋, 等. 土-地下连续墙-复杂异跨地铁车站结构动力相互作用分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1235-1243.
- WANG Jianning, DOU Yuanming, ZHUANG Haiyang, et al. Seismic responses of dynamic interaction system of soil-diaphragm wall-complicated unequal-span subway station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1235-1243.
- [16] Zhuang H Y, Yang J, Chen S, et al. Statistical numerical method for determining seismic performance and fragility of shallow-buried underground structure[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 116: 104090.
- [17] 王璐, 王曙光, 欧谨, 等. 弹性滑移支座力学性能的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(1): 77-82.
- WANG Lu, WANG Shuguang, OU Jin, et al. Experimental study on mechanical behavior of an elastic sliding bearing[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(1): 77-82.
- [18] KUHLMAYER R L, LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 99(5): 421-427.
- [19] 楼梦麟, 王文剑, 朱彤. 土-结构体系振动台模型试验中土层边界影响问题[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(4): 30-36.
- LOU Menglin, WANG Wenjian, ZHU Tong. Soil lateral boundary effect in shaking table model test of soil-structure system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2000, 20(4): 30-36.
- [20] 杨靖, 云龙, 庄海洋, 等. 三层三跨框架式地铁地下车站结构抗震性能水平研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 2240-2248.
- YANG Jing, YUN Long, ZHUANG Haiyang, et al. Seismic performance levels of frame-type subway underground station with three layers and three spans[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(12): 2240-2248.
- [21] TSO W K, ZHU T J, HEIDEBRECHT A C. Engineering implication of ground motion A/V ratio[J]. Soil

- Dynamics and Earthquake Engineering, 1992, 11(3): 133-144.
- [22] 中华人民共和国建设部. 建筑隔震橡胶支座: JG 118—2000[S]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2000.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. Rubber isolation bearings for buildings: JG 118—2000[S]. Beijing: China Academy of Building Research, 2000.

Comparative analysis on seismic performance of two-story subway underground station structures with different isolating systems

ZHUANG Hai-yang, LI Sheng, WANG Wei, CHEN Guo-xing

(Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: In view of the weak seismic components of subway underground station structure, the seismic response characteristics of the traditional station structure, the station structure with the elastic sliding bearing setting at the top of the middle columns on the top and ground floor, and the proposed station structure with the elastic sliding bearing setting at the edge of the middle plate and the middle columns on the ground floor are studied. A 2D global time-domain finite element analysis model is built for the nonlinear statically and dynamically coupled soil-main structure interaction. The influence rules of the interlayer displacement, angle, seismic damage and dynamic force response of the main structure of the station are compared and analyzed when different isolating systems are adopted. The results show that, compared with the traditional station structure, the station structure with the elastic sliding bearing setting at the top of the middle columns suffers less damage in earthquake and has better seismic performance. The station structure with the elastic sliding bearing setting at the edge of the middle plate and the middle columns on the ground floor proposed in this paper can ensure that the middle columns of the station structure are not severely damaged and can be replaced quickly after the earthquake, which can improve the overall seismic performance of the subway station structure and the rapid recovery ability of the structural function after the earthquake.

Key words: isolation bearing; seismic performance; subway underground station structure; earthquake damage; numerical modelling

作者简介: 庄海洋(1978—),男,博士,教授,博士生导师。电话:13584050564;E-mail:zhuang7802@163.com。