

地震作用下深水桥墩流固耦合数值模拟方法研究^{*}

郭庆康, 乔玉博, 薛浩

(武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063)

摘要:以一深水圆形高墩为研究对象,运用有限元数值分析程序,分别基于势流体理论和粘性流体 Navier Stokes(N-S)方程建立地震动加速度、位移输入方式下三维流固耦合分析模型,通过对比不同流固耦合模拟方法下地震响应变化情况及不同地震动输入方式下地震响应拟合情况,验证势流体数值方法的有效性,并得到不同流固耦合模拟方法相适应的地震动输入方式。结果表明,采用势流体理论建立流固耦合模型,加速度与位移输入方式下的地震响应拟合较好;采用粘性流体 N-S 方程建立流固耦合模型,位移输入方式下地震响应变化规律更符合实际情况,而加速度输入方式下的结果变化呈现不同的规律;相比采用基于粘性流体 N-S 方程建立的模型,采用基于势流体理论建立的分析模型的计算结果更保守,更有利于深水高墩桥梁的抗震设计。

关键词:桥梁;深水高墩;地震响应;流固耦合;势流体;粘性流体

中图分类号:U445.55

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2018)06-0108-05

深水桥梁跨越江河湖海及水库,其淹没在深水中的桥墩与周围水体会产生相互作用,即流固耦合作用。对水域的模拟有基于势流体理论的势流体单元和基于粘性流体 N-S 方程的粘性流体单元两种方法。一般来说,若假定流体无旋、无粘、无热传递,且流体边界相对运动很小,则采用势流体单元建立结构-水的耦合分析模型。然而实际工程中的流体不是理想化的势流体,对流体域的模拟常采用基于 N-S 方程的粘性流体单元。目前基于粘性流体 N-S 方程的方法已可实现水下结构的动力响应分析,且得到了试验验证。丁思远通过试验验证了粘性流体对水下圆柱体自振频率的影响;王少波等研究了弹性板与粘性流体间的耦合问题,提出了一种耦合计算的数值方法。但基于粘性流体的 N-S 方程中有 4 个节点未知量,运用该方法进行有限元分析求解较复杂,且固体结构与流体域需分别求解再进行耦合计算,对计算器的速度及存储空间要求很高,计算效率偏低,难以满足大型深水桥梁的流固耦合分析。基于势流体理论的模型相对简单,其求解方程中只有 1 个节点未知量,计算效率高,且其在模拟水下结构模态响应方面的效果得到了试验验证。Goyal A. 等运用势流体理论对实例进行有限元建模,分析验证了动水压力的求解方程;魏凯等基于势流体理论,将水槽试验和数值分析相结合,研究了桥梁群桩基础与周围水体耦合的动力特性变化。目前

对于粘性流体的研究运用较广泛,基于势流体理论的流固耦合问题也有相关研究,但势流体用于地震作用下深水桥梁结构流固耦合动力响应分析是否有效没有相关试验验证。为此,该文针对深水下桥墩结构,分别采用基于势流体理论的势流体单元及基于粘性流体的 N-S 方程模拟桥墩结构与流体域的流固耦合作用,考虑地震动的加速度与位移输入方式,分析耦合系统在不同地震动输入方式下的动力响应,验证势流体数值模拟方法的有效性及地震动输入方式的适用性。

1 流固耦合地震动分析方法

1.1 基于势流体理论的水下结构地震动加载方法

地面运动加载时,基于势流体理论对动力方程进行特殊处理,地震荷载分析时结构响应可表示为:

$$U = U_r + U_g \quad (1)$$

$$U_g = \sum_k u_{gk} d_k \quad (2)$$

式中: U_r 为节点相对于地面运动的相对位移矢量; U_g 为施加给节点的地面位移矢量; u_{gk} 为 k 方向的地面位移; d_k 为节点矢量值,其向量中元素 i 为 k 方向平移时 $d_k(i) = 1$, 否则 $d_k(i) = 0$ 。

因地面运动是已知的,位移增量 ΔU 等于相对位移增量 ΔU_r , 根据流体单元的附加内力可将式(2)更改为:

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378406)

$$U_g = \begin{bmatrix} (K_{UU})_s d_k \\ 0 \end{bmatrix} u_{gk} - \begin{bmatrix} 0 \\ -C_{FU} d_k \end{bmatrix} \dot{u}_{gk} \quad (3)$$

以上分析表明,尽管基于势流体理论的水下结构地震动加载方式为地震动加速度加载,但实际上考虑了地面运动引起的结构刚体运动。

1.2 基于粘性流体 N-S 方程的水下结构地震动加载方法

基于粘性流体的 N-S 方程建立水下结构动力响应模型时,结构与流体分别建模,其中流体采用考虑流体粘性的模型(层流或湍流模型),在流体与结构可能的接触面上设置流固耦合边界,位移协调和力平衡是流固耦合界面需满足的基本条件,位移协调是运动学条件,力平衡是动力学条件。其运动学条件和动力学条件分别为:

$$d_f = d_s; n \cdot \tau_f = n \cdot \tau_s \quad (4)$$

式中: d_f 、 d_s 分别为流体和结构上的节点在耦合接触面处的位移; τ_f 、 τ_s 为对应节点在接触界面上的应力。

在结构与流体的耦合界面上,流体产生的沿墩身的分布力通过积分形成节点上的集中力,再将该集中力施加到结构节点上,完成耦合计算。分布力积分公式如下:

$$F(t) = \int h^d \tau_f \cdot dS \quad (5)$$

式中: h^d 为结构节点的位移。

流固耦合系统的求解向量为:

$$X = (X_f, X_s) \quad (6)$$

式中: X_f 、 X_s 分别为流体单元节点和结构单元节点的求解向量。

流固耦合界面上的方程为:

$$d_s = d_s(X_s), \tau_f = \tau_f(X_f) \quad (7)$$

流固耦合系统的求解方程为:

$$F[X] = \begin{bmatrix} F_f[X_f, d_s(X_s)] \\ F_s[X_s, \tau_f(X_f)] \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

式中: F_s 、 F_f 分别为与 G_s 和 G_f 相应的有限元方程。

一般采用迭代法求解双向耦合问题,将流体方程的解提供给结构方程进行求解,再将结构方程的结果返回给流体方程,不断反复,直到结果收敛。

2 流固耦合分析模型

选取一高 60 m 圆形桥墩进行分析,其横截面半径为 1.5 m,壁厚为 0.9 m,最大淹没深度为 55 m。不考虑桥墩内水的影响,桥墩周围建立足够大的水域范围以满足水体表面波的能量耗散。桥墩材

料特性为:砼密度 2 500 kg/m³,弹性模量 32.5 GPa,泊松比 0.2;水体密度 1 000 kg/m³,动粘性系数 0.001 Pa·s,体积模量 2.2 GPa。借助有限元软件 ADINA 建立桥墩-水域耦合系统三维有限元计算模型,采用八节点三维实体单元对桥墩结构进行离散,不考虑桩-土相互作用。假定桥墩处于弹性阶段,墩底边界条件设为固结,墩顶设为自由端;采用八节点三维流体单元对流体进行离散,假定水体无波动,水体表面设为自由液面,水域四周设为无限远边界,底部为固壁边界。在桥墩与流体的接触界面设置对应的流固耦合界面。

根据流体单元的两种模拟方法及地震动加速度与位移两种输入方式,可建立 4 种地震作用下深水桥梁结构流固耦合数值模型,其边界条件大体相同(见图 1~4)。

模型 1:采用基于势流体的单元模拟结构周围流场、3D Solid 单元模拟桥墩,在水与桥墩接触面上

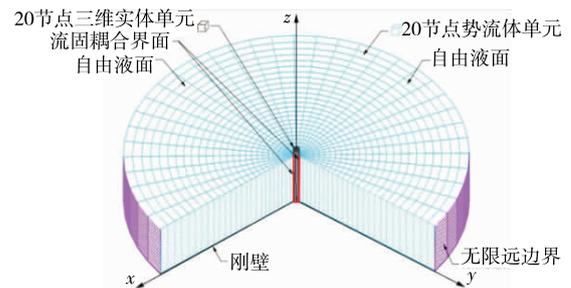


图 1 深水桥墩结构流固耦合数值模型 1

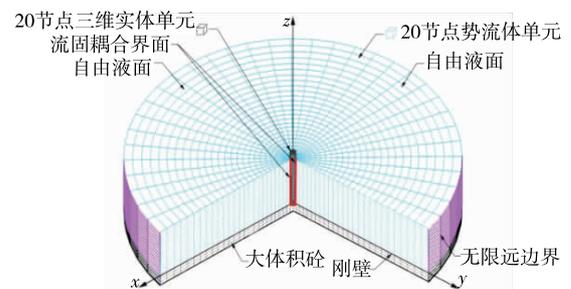


图 2 深水桥墩结构流固耦合数值模型 2

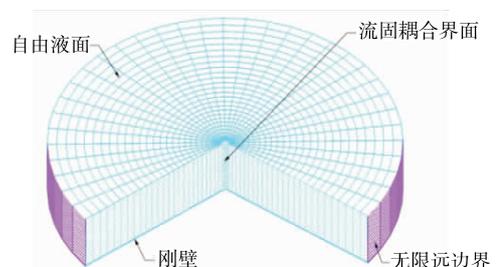


图 3 深水桥墩结构流固耦合数值模型 3

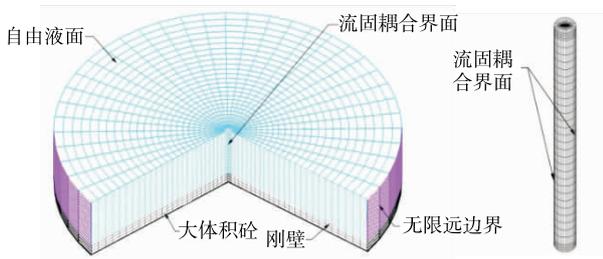


图4 深水桥墩结构流固耦合数值模型4

设置流固耦合界面;地震采用加速度方式加载。

模型2:流体与桥墩模型同模型1,但模型底部设置为一大体积刚体地基用来模拟地基场,在地基场输入实际地震产生的位移时程。

模型3:考虑流体的粘性且结构模型与流场模型分别建立在不同界面里,采用基于粘性流体 N-S 方程的流体单元模拟桥墩周围流场、3D Solid 单元模拟桥墩,分别在结构模型与流场模型可能的耦合界面上建立墩-水流固耦合界面;在结构模型中输入地震荷载,输入方式为地震加速度输入。

模型4:流体与桥墩模型同模型3,但桥墩底部设置为一大体积刚体地基用来模拟地基场,在地基场输入实际地震产生的位移时程。

3 动力响应分析

对4种模型加载地震动加速度时程荷载或地震

动位移时程荷载,计算模型的地震响应。由于模型为对称的圆形桥墩结构,不同方向加载地震动所得地震响应结果一致,只列出纵桥向加载地震动时的桥墩地震响应。为防止偶然性,取 El-Centro 地震波、Northbridge 地震波及 Kobe 地震波的加速度时程和位移时程加载,计算水位设置为 0、15、25、35、45、55 m。通过对比4种模型峰值地震响应随水位的变化及拟合程度得到流固耦合数值方法的有效性和不同流固耦合方法所适宜的加载方式。图5~7为 El-Centro 地震波作用下4种模型的墩顶位移、墩底弯矩、墩底剪力在最大水位处的时程曲线,其他水位及另外2条地震波的时程曲线规律一致;图8~10为3条地震波作用下4种模型墩顶位移、墩底弯矩和剪力峰值响应随水位的变化。

由图5~7可知:采用势流体单元建立的模型,不管是地震动加速度输入还是地震动位移输入,地震响应时程曲线的拟合程度都很好;采用粘性流体建立的模型,地震动加速度输入方式下的响应值小于位移输入方式下的响应值,这是因为粘性流体加速度输入方式没有考虑地震动引起的结构刚体位移;4种模型响应结果的波形基本一致。

由图8可知:1)采用基于势流体单元建立流体域时,无论是采用加速度时程还是位移时程加载,动力响应拟合程度都较好,且地震响应比采用粘性流

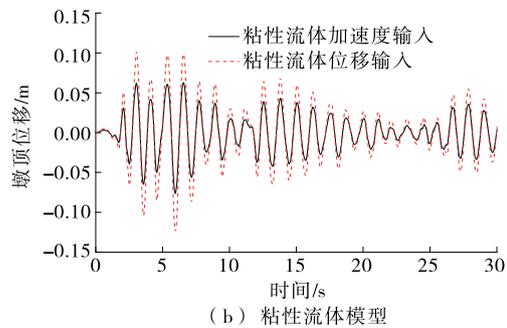
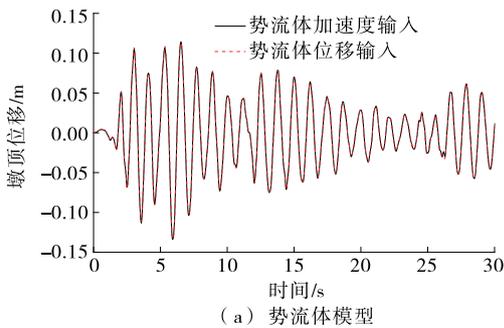


图5 地震作用下墩顶位移时程曲线

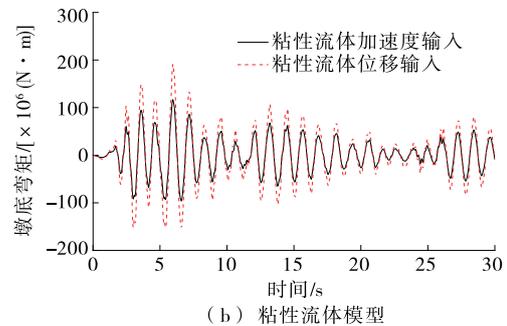
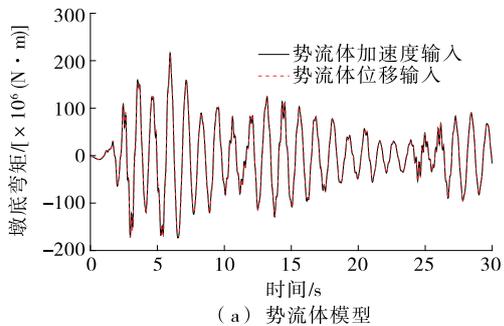


图6 地震作用下墩底弯矩时程曲线

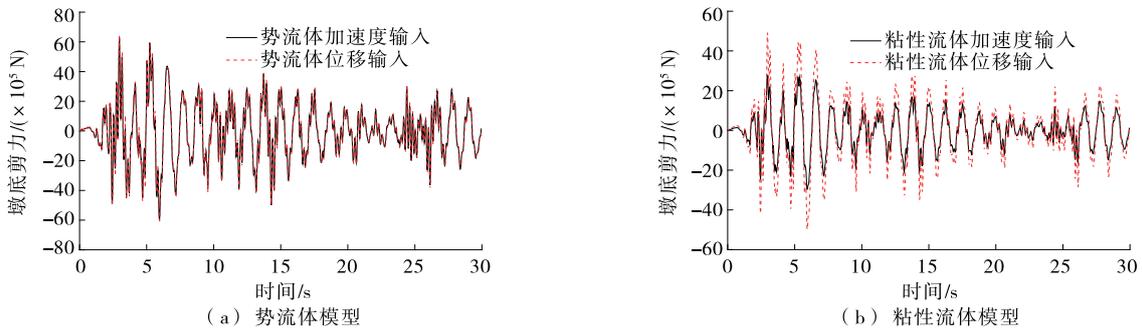


图7 地震作用下墩底剪力时程曲线

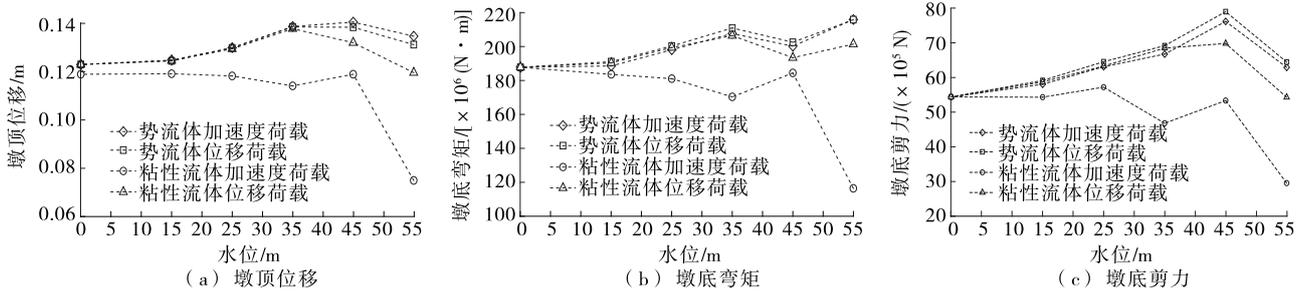


图8 El-Centro地震波作用下桥墩地震响应

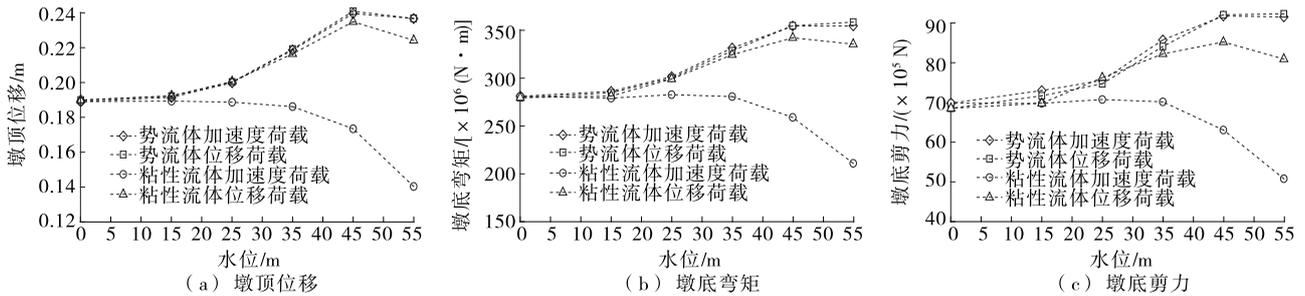


图9 Kobe地震波作用下桥墩地震响应

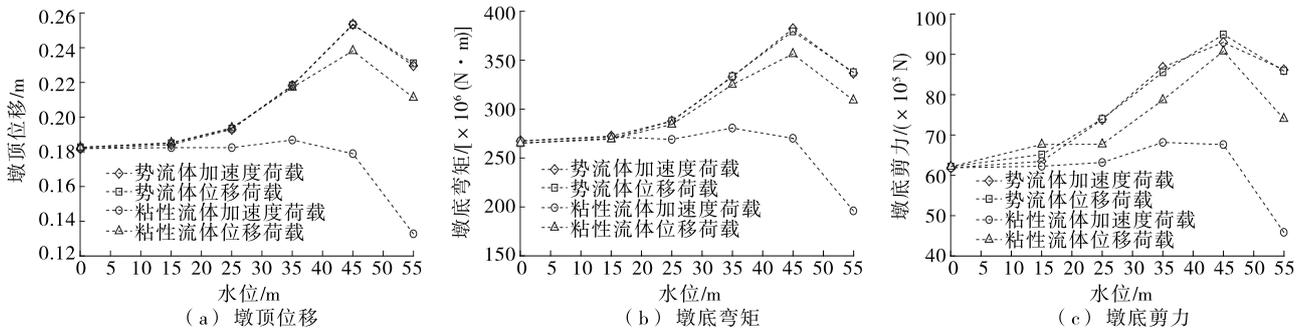


图10 Northridge地震波作用下桥墩地震响应

体单元建立的模型的震响应大,除个别水位外,地震响应整体随水位呈上升趋势。2)采用粘性流体单元建立流体域时,两种加载方式下地震响应拟合效果不理想。采用位移时程加载时,地震响应随水位的变化规律基本与采用势流体单元时的变化规律相同,其地震响应值小于但接近势流体单元模型的响

应值;而采用加速度时程加载时,其地震响应变化规律不同于其他3条曲线,前期响应随着水位变化平缓,但在最大水位处呈大幅下降趋势,地震响应值在4种模型中最小。从图9和图10可得到与图8类似的结果。由此可判断,采用基于势流体单元模拟周围流场时,水-桥墩的流固效应与地震动输入方

式无关,无论是加速度时程输入还是位移时程输入均考虑了地基场的刚体位移,较符合实际地震对深水桥墩结构的影响。采用基于粘性流体 N-S 方程的流体单元模拟周围流场,水-桥墩的流固效应与地震动输入方式有关,采用加速度时程输入时仅考虑了结构在惯性力作用下的变形及由此引起的水-桥墩的流固耦合作用;而采用位移时程输入不仅考虑了结构在惯性力作用下的变形,还包括刚体位移部分,更符合实际地震对水下结构的影响。势流体模型下的地震响应值偏大,是因为没有考虑流体的粘滞性,其较保守的结果对桥梁抗震设计有利,基于势流体理论进行深水桥梁流固耦合抗震设计有效。

4 结论

(1) 采用基于势流体理论建立流场时,深水圆形墩结构的流固耦合效应与地震动输入方式无关,地震响应求解不仅考虑了结构在惯性力作用下的变形,还考虑了结构的刚体位移,地震响应变化符合实际地震对深水桥墩结构的影响。

(2) 采用基于粘性流体 N-S 方程建立流体域时,深水圆形墩结构的流固耦合效应与地震动输入方式有关,位移时程输入方式下的地震响应符合实

际地震对深水结构的影响,而加速度时程输入方式下的结构地震响应只考虑了结构在惯性力作用下的变形及由此引起的流固耦合作用,基于粘性流体 N-S 方程建立流固耦合模型分析地震响应时,采用位移时程输入更合理。

(3) 基于势流理论建立流固耦合模型分析得到的地震响应接近但大于采用粘性流体单元建立的流固耦合模型,基于势流理论的数值模型的计算结果偏保守,更有利于深水桥墩结构抗震设计。

参考文献:

[1] Batchelor G K. An introduction to fluid dynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1967.
 [2] 王少波,刘元杰,梁醒培,等.弹性板在粘性流体中的藕合振动分析[J].机械工程学报,2004,40(7).
 [3] Goyal A, Chopra A K. Earthquake analysis of intake-outlet towers including tower-water-foundation-soil interaction[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1989, 8(3).
 [4] 魏凯,伍勇吉,徐灿,等.桥梁群桩基础-水耦合系统动力特性数值模拟[J].工程力学,2011,28(1).

收稿日期:2018-04-30

(上接第 107 页)

2.2.3 最优合龙方案

5 种合龙方案下,主梁成桥弯矩为方案 4>方案 3>方案 5>方案 1>方案 2,主梁成桥应力相差不大,成桥后合龙段左右节点累计最大挠度差为方案 4>方案 5>方案 3>方案 1>方案 2。该桥施工控制以线形控制为主、应力控制为辅,在应力差距不大的情况下,方案 2 为最优合龙方案。

3 结论

(1) 不同合龙顺序和拆除临时固结的时间对主梁累计挠度的影响大,先合龙中跨与先合龙边跨的累计挠度差最大达 3 倍,虽然该挠度差可通过设置预拱度予以消除,但会增加施工控制难度,且施工过程中存在一些不可控因素。为提高施工控制精度,连续梁桥宜选择先合龙边跨、再合龙中跨的合龙顺序。

(2) 不同合龙顺序对成桥主梁应力影响很小。

(3) 从边跨合龙至中跨的方案中,方案 1 是先解除边墩(2# 墩和 4# 墩)的临时固结,方案 2 则是等到所有跨都合龙后再解除边墩的临时固结,方案

1 下成桥合龙段累计挠度差大于方案 2,说明边墩的临时固结宜在中跨合龙后再解除。

(4) 方案 2 为该桥最优合龙方案。

参考文献:

[1] 向中富.桥梁施工控制技术[M].北京:人民交通出版社,2001.
 [2] 褚奇.预应力混凝土连续梁桥施工仿真分析与标高控制研究[D].武汉:武汉理工大学,2008.
 [3] 董金堂.大跨度连续梁悬臂施工线形监控与合龙顺序优化[J].城市道桥与防洪,2012(3).
 [4] 肖啸.基于不同施工进度下多跨连续梁桥合拢顺序的研究[D].长沙:中南大学,2014.
 [5] 李帅.刚构-连续组合梁桥合龙影响因素分析[D].济南:山东大学,2012.
 [6] 张隆顺.大跨长联连续梁桥合龙方案研究[D].长沙:中南大学,2012.
 [7] 戴公连,王伟民,刘柯.基于变形的铁路混凝土连续梁合龙方案比较[J].桥梁建设,2014,44(4).

收稿日期:2018-06-22