文章编号:2097-096X(2022)04-0287-08

基于点面接触的三维结构地震接触模拟

钟 红,郭胜山,涂 劲,李德玉,王海波
(中国水利水电科学研究院 工程抗震研究中心,北京 100048)

摘要: 工程结构包括拱坝、岩质边坡等在强地震作用下可能沿结构面、节理面等产生滑移,对接触面的模拟关乎结构抗震安全评价的可靠性。本文针对结构在地震作用下接触面产生较大滑移的情况,提出采用点面接触模型和动接触力模型进行模拟。推导了适于点面接触的动接触力模型公式;采用主从接触算法,通过全局搜索缩小搜索范围,在局部搜索层次基于内外算法确定接触点对,避免经典点面算法中存在的盲区问题,提高搜索判断的精度和效率。采用经典楔形体稳定问题对本文模型进行了验证,通过施加地震激励研究其动力稳定性,并将点面接触和点点接触的计算结果进行比较,发现前者获得的结构响应大于后者,且其差异随着地震加速度幅值的增大而增大。进一步将该模型应用于拱坝的地震响应分析,结果表明对于相对较小的地震,两种接触模型计算结果基本一致;但对于超强地震,横缝发生较大相对位移,点点接触模型的计算结果偏小,对应力值的低估更为明显。总的来说,对于结构在强地震作用下产生较大滑移的情况,采用点面接触模型可更好地反映实际情况。

关键词: 接触模拟;地震;点面接触;动接触力模型;楔形体稳定;拱坝;横缝
中图分类号: TV312 **文献标识码:** A **doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.20210143

1 研究背景

接触问题是土木水利工程中的重要非线性问题。工程地基中存在大量的节理、裂隙和断层等不连续面,在外荷载尤其是地震作用下可能产生相对滑移和错动[1-3]。混凝土拱坝中设置有横缝,强震时可能张开从而引起应力重分布,拱向应力释放而梁向应力增加[4-9]。对工程结构-地基系统在地震荷载作用下可能出现的接触问题进行准确的模拟,影响到结构抗震安全评价的可靠性,直接关系其抗震安全。

在基于有限元方法的接触问题模拟中,接触体经有限元剖分后,其表面被离散化为多边形边界单元集,接触体之间的接触相互作用转化为离散的分片光滑的表面接触单元作用,产生接触作用的点对即为接触点对。对于工程结构在地震作用下的接触分析,由于接触体之间可能出现大滑移、大转动,使得在问题解决之前无法预知其局部接触状态,如何有效、准确地搜索出每一时刻的接触点对成为接触问题求解的关键。在结构产生大滑移的情况下,初始构型发生变化,接触点对位置相应发生变化,小变形接触算法中常用的点点接触(Node-to-Node, NTN)模型是不成立的[5-9]。主从算法采用点面接触(Node-to-Segment, NTS)方式进行搜索,由于能实时捕捉接触位置,在大变形接触搜索中被普遍采用,而且被认为是比较有效的搜索算法之一[10-12]。

本论文将点面接触模型引入基于动接触力法的接触模拟分析,实现了对三维结构地震大滑移接触的模拟,并与点点接触模型进行了比较研究。

2 接触搜索

接触搜索的任务是找出系统中的测试对,然后针对每个测试对确定其接触状态,包括接触、贯入、脱开。对于接触和贯入的情况,测试对已经转变为实际的接触对,还要找出接触点及贯入量。

收稿日期:2021-06-16;网络首发时间:2022-01-14
网络首发地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20220114.1000.002.html
基金项目:国家自然科学基金项目(51979292)
作者简介:钟红(1981-),博士,教授级高级工程师,主要从事工程结构抗震研究。E-mail:zhonghong@iwhr.com

上述寻找测试对的过程，称为全局搜索；确定测试对的接触状态以及计算接触点和贯入量的过程，称为局部搜索。全局搜索算法的关键是计算效率，局部搜索算法的关键是计算精度。

全局搜索算法目前使用较普遍的全局搜索算法主要包括主从算法、单曲面算法、级域算法、位码算法等。点面配对的主从接触算法中，将主片上的节点被定义为主节点(master node)，从面上的节点被定义为从节点(slave node)。对于每一个从节点，搜索出与之对应在主片上的接触点，从而形成接触点对。为了提高接触搜索的计算效率，在进行接触搜索细判之前常常要对表面单元进行粗判，排除一部分不可能发生接触的表面单元。

对于拱坝横缝、地基内部结构面、坝基交界面等接触面的地震滑移模拟，接触形态相对明确，滑移量相对较小，全局搜索依据有限元拓扑结构开展。在结构地震响应计算开始前，根据结构初始拓扑结构，针对每一对接触面上的从节点，在主接触面上寻找与之对应或者距离最近的节点，记为O节点(见图1)。对于主从面上节点位置重合的情况，这一过程可简化，直接选取坐标相同的对应节点即可。进而将与O点共单元且位于接触面上的节点$A \sim H$所包围的区域(红色线包围的Layer1区域)作为该从节点的可能接触范围。如预判滑移量过大可能超出此范围，则可将该范围外推一层单元，并将绿色虚线包围的Layer2区域作为可能的接触范围。

局部搜索的目的是从全局搜索给定的接触测试对中确定真实发生的接触(从节点，主接触片)对，并计算相应的间隙函数值。为避免经典点面算法存在的盲区问题以及提高搜索效率，本文采用内外算法[13]，以从节点的外法线方向作为从节点对主接触片的投影方向(同时也是接触力施加方向)。从节点外法线方向定义为与该节点相连的接触片法线方向的平均值，如图2所示。

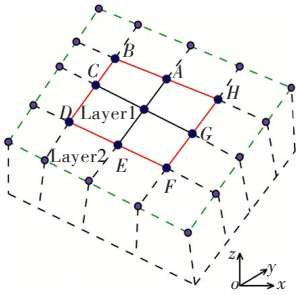


图1　全局搜索示意图

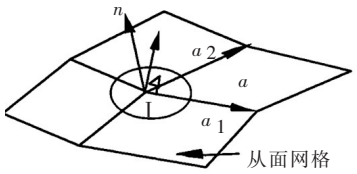


图2　从点的外法线方向[13]

$$\boldsymbol{n} = \frac{\sum_a \boldsymbol{n}_a}{\left|\sum_a \boldsymbol{n}_a\right|} = \boldsymbol{a}_1 \times \boldsymbol{a}_2 \tag{1}$$

其中$\boldsymbol{n}_a$为单元a在图中所示面上的外法线方向，由两个方向矢量$\boldsymbol{a}_1$和$\boldsymbol{a}_2$作叉积得到。

从节点相对于主接触片一条边的内或外状态，通过从节点与该边构成的三角形在主接触片上的投影来确定，如图3所示。

$$\Delta_a = \boldsymbol{n} \cdot \left(\boldsymbol{r}_{ab} \times \boldsymbol{r}_{ad}\right) \tag{2}$$

其中$\boldsymbol{r}_{ab}$和$\boldsymbol{r}_{ad}$是三角形的两条边的方向矢量。

若$\Delta_a \leqslant 0$，则从节点处于边内部。如果从节点处于主接触片所有边的内部或者外部，则从节点位于该主接触片内部，否则位于主接触片外部。

如果从节点位于主接触片内部，则利用下式计算从节点对主接触片的贯入量

$$g = \boldsymbol{n} \cdot \left(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}^{\mathrm{s}}\right) \tag{3}$$

式中$\boldsymbol{x}$为投影点，$\boldsymbol{x}^{\mathrm{s}}$为从节点位置向量。

内外算法的优势在于，接触点可以唯一确定，避免了从节点对主接触片的多重接触，并且接触点计算不需要迭代。因此，该算法具有很好的健壮性与较高的计算效率。由于内外算法假定接触点

处主从面的法向共轴(但方向相反)，当从节点位于两个低阶单元的交界线上时，尤其是当网格不够精细时，内外算法给出的接触方向可能会与实际存在较大偏差。

接触点确定后，通过如下步骤求解其坐标。在主接触片上建立二维直角坐标系(图4)，主点$\bar{\boldsymbol{x}}^1$的坐标通过求解从节点x^2在面$ABCD$上的投影获得，其与节点坐标存在如下插值关系：

$$\bar{\boldsymbol{x}}^1 = \sum_I N_I\left(\bar{\xi}^1,\ \bar{\xi}^2\right)\boldsymbol{x}_I^1 \tag{4}$$

其中插值函数

$$N_I = \frac{1}{4}\left(1 - \xi_I^1\bar{\xi}^1\right)\left(1 - \xi_I^2\bar{\xi}^2\right) \tag{5}$$

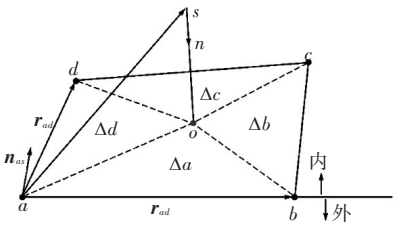


图3　从节点的内外状态检查

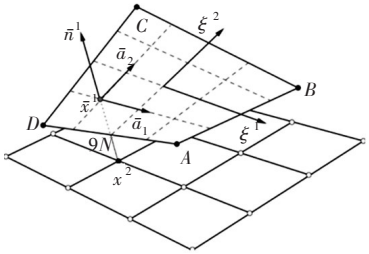


图4　点面接触示意图[11]

其中ξ_I^1和ξ_I^2分别为主接触片节点的局部坐标，$\boldsymbol{x}_I^1$为主接触片节点在平面上的整体坐标。

从节点x^2与主接触片之间的距离即与主点$\bar{\boldsymbol{x}}^1$之间的距离(贯入量)，可将式(3)重新写为

$$g_N = \bar{\boldsymbol{n}}^1 \cdot \left[\boldsymbol{x}^2 - \bar{\boldsymbol{x}}^1\left(\bar{\xi}^1,\ \bar{\xi}^2\right)\right] \tag{6}$$

局部坐标$\bar{\xi}^1$和$\bar{\xi}^2$为未知量，可通过求解整体坐标与局部坐标之间的关系式(式4)求出。因其中的$N_I\left(\bar{\xi}^1,\ \bar{\xi}^2\right)$为关于$\bar{\xi}^1$和$\bar{\xi}^2$的二次函数，故方程的最终形式如下：

$$\begin{cases} A_1\bar{\xi}^1\bar{\xi}^2 + B_1\bar{\xi}^1 + C_1\bar{\xi}^2 + D_1 = 0 \\ A_2\bar{\xi}^1\bar{\xi}^2 + B_2\bar{\xi}^1 + C_2\bar{\xi}^2 + D_2 = 0 \end{cases} \tag{7}$$

其中，A_i、B_i、C_i和D_i为系数。该式采用迭代法或解析法求解均可。

3　基于点面接触的动接触力模型

对结构动力方程采用中心差分和单边差分进行空间离散后，可写成如下形式

$$\boldsymbol{AU} = \boldsymbol{F} \tag{8}$$

其中$\boldsymbol{A}$为等效刚度矩阵，$\boldsymbol{U}$为位移向量，F为等效荷载向量。

考虑接触力的贡献后，该式变为：

$$\boldsymbol{AU} = \boldsymbol{F} - \boldsymbol{B}\lambda \tag{9}$$

其中B为接触约束矩阵，λ表示接触力向量。

接触面约束方程为：

$$\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u} = \gamma \tag{10}$$

其中γ为位移约束条件向量。

由式(9)、式(10)以及整体坐标系与局部坐标系的转换关系得缝面接触力与位移的关系：

$$\boldsymbol{C}\lambda^l = \Delta\boldsymbol{u} \tag{11}$$

其中

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{TB}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{BT}^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

$$\Delta\boldsymbol{u} = \boldsymbol{TB}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{F} - \gamma^l \tag{13}$$

其中$\boldsymbol{T}$为坐标转换矩阵，式中上标l代表局部坐标系。

缝面相对位移为主点与从节点在局部坐标系下的位移之差，前者需通过所在单元节点位移插值获得，故

$$\gamma_i^l = \boldsymbol{u}_{1i}^l - \boldsymbol{u}_{2i}^l = \sum_I \boldsymbol{N}_I \boldsymbol{u}_{Ii}^l - \boldsymbol{u}_{2i}^l \tag{14}$$

写成矩阵形式

$$\gamma^l = \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{U}^l \tag{15}$$

其中

$$\gamma^l = \begin{pmatrix} \gamma_x^l \\ \gamma_y^l \\ \gamma_z^l \end{pmatrix} \tag{16}$$

$$\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} N_A & & & N_B & & & N_C & & & N_D & & & -1 & & \\ & N_A & & & N_B & & & N_C & & & N_D & & & -1 & \\ & & N_A & & & N_B & & & N_C & & & N_D & & & -1 \end{bmatrix} \tag{17}$$

$$\boldsymbol{U}^l = \begin{pmatrix} u_{Ax}^l & u_{Ay}^l & u_{Az}^l & u_{Bx}^l & u_{By}^l & u_{Bz}^l & u_{Cx}^l & u_{Cy}^l & u_{Cz}^l & u_{Dx}^l & u_{Dy}^l & u_{Dz}^l & u_{2x}^l & u_{2y}^l & u_{2z}^l \end{pmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{18}$$

式中N为各节点的位移插值形函数，u为各节点的位移，下标A、B、C、D代表图4中的各主接触片上的节点，下标2代表以x^2标示的从节点。

将相关矩阵代入，式(11)可写为：

$$\left(\frac{N_A^2}{m_A} + \frac{N_B^2}{m_B} + \frac{N_C^2}{m_C} + \frac{N_D^2}{m_D} + \frac{1}{m_2}\right)\begin{pmatrix} \lambda_x^l \\ \lambda_y^l \\ \lambda_z^l \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & t_3 \\ t_4 & t_5 & t_6 \\ t_7 & t_8 & t_9 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dfrac{N_A F_{Ax}}{m_A} + \dfrac{N_B F_{Bx}}{m_B} + \dfrac{N_C F_{Cx}}{m_C} + \dfrac{N_D F_{Dx}}{m_D} - \dfrac{F_{2x}}{m_2} \\ \dfrac{N_A F_{Ay}}{m_A} + \dfrac{N_B F_{By}}{m_B} + \dfrac{N_C F_{Cy}}{m_C} + \dfrac{N_D F_{Dy}}{m_D} - \dfrac{F_{2y}}{m_2} \\ \dfrac{N_A F_{Az}}{m_A} + \dfrac{N_B F_{Bz}}{m_B} + \dfrac{N_C F_{Cz}}{m_C} + \dfrac{N_D F_{Dz}}{m_D} - \dfrac{F_{2z}}{m_2} \end{bmatrix} - \begin{pmatrix} \gamma_x^l \\ \gamma_y^l \\ \gamma_z^l \end{pmatrix} \tag{19}$$

其中m_A、m_B、m_C、m_D和m_2分别是节点A、B、C、D和节点x^2的质量，t为坐标转换矩阵的分量，F为节点力，其第一个下标表示所在节点，第二个下标表示力的方向。求解式(19)，并结合接触条件即可求出接触力。

基于以上理论，自主开发了包含接触模块的结构动力响应分析程序。

4 楔形体动力稳定模拟

将本文算法应用于边坡的滑动模拟。E. T. Hoek和J. W. Bray的楔形体稳定问题[14]典型算例中，楔形体边坡面$CDEF$的倾角为65°，倾向为185°，坡顶面$ABCD$的倾角为12°，倾向为195°。边坡被斜面abc和斜面adc交切，楔形体$abcd$表面的产状和摩擦参数见表1。平面abc和adc交线ac的垂直高度H=39.624 m。岩体重度γ=2.563×10^3 kg/m^3。楔形体及有限元模型见图5和图6。有限元模型中地基的模拟范围为从楔形体往外边界延伸80 ~ 100 m。

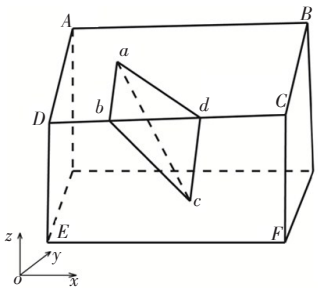


图5 Hoek楔形体示意图

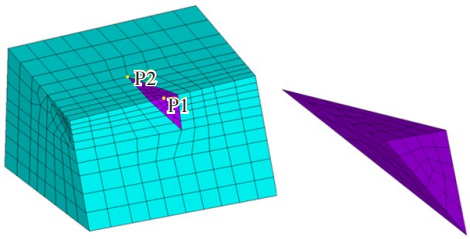


图6 有限元模型

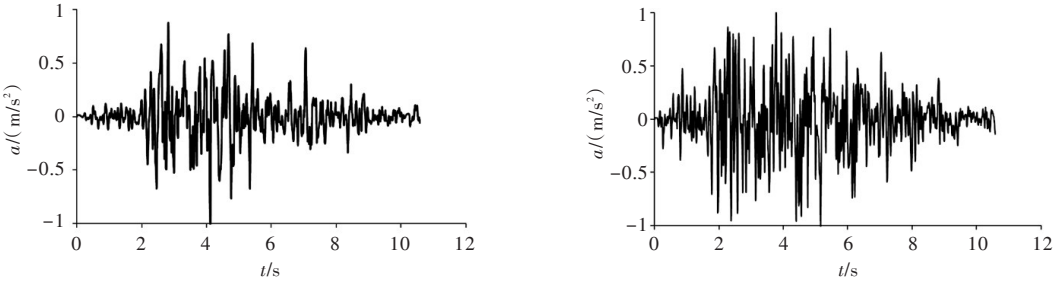
先考虑楔形体承受自重的情况。基于强度折减法计算其安全系数，当减小滑面内摩擦角及黏聚力时，楔形体失效下滑，安全系数为1.60。文献[15]中采用DDA和有限元法计算的安全系数分别为1.66和1.68，本文结果与之一致。

表1　楔形体各表面的产状和摩擦参数

面	倾角/(°)	倾向/(°)	走向/(°)	摩擦角/(°)	黏聚力/Pa
边坡坡面*CDEF*	65	185	95	/	/
边坡顶面*ABCD*	12	195	105	/	/
斜面*abc*	45	105	15	20	24000
斜面*adc*	70	235	145	30	48000

地震工况中，输入Koyna地震加速度时程，其中水平向分量沿y轴输入，竖直向分量沿z轴输入。图7中给出了归一化的地震加速度时程，考虑了加速度幅值为0.2 g、0.5 g、0.8 g、1.0 g和1.5 g等五种情况。

图8—图10给出了楔形体在加速度幅值为1.0 g的地震动激励下的破坏模式以及滑移量、位移时程，并将采用点面接触模型(NTS)的结果与点点接触模型(NTN)的结果进行比较。两种接触模型得到了相同的破坏模式，楔形体沿两个结构面相交的棱线滑动(图8)。楔形体约在2.4 s后开始滑动，地震激励结束时楔形体保持稳定，根据点点接触模型计算得到的P1点三向残余位移分别是5.6 cm、−11.3 cm和−8.2 cm，相应地根据点面接触模型的计算结果为7.2 cm、−14.3 cm和−10.2 cm，比前者分别增大27.1%、26.3%和24.7%(图9)。



(a)水平向　　(b)竖直向

图7　Koyna地震加速度时程(归一化)

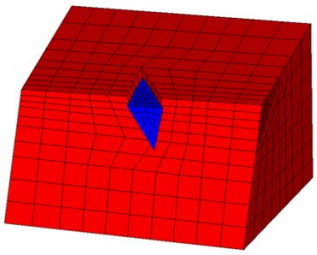


图8　楔形体破坏模式

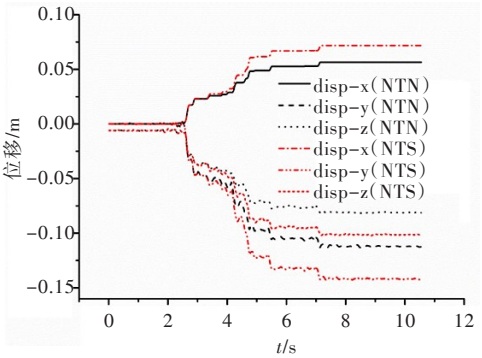


图9　地震激励下楔形体*A*点位移时程(1.0 g)

以*P*2位置两点沿两结构面相交棱线方向的位移之差作为楔形体的滑移量。从图10可看出，随着地震动的增强，2.4 s后楔形体产生明显的滑动，之后滑移量出现数次阶跃式增大，最终保持稳定。由点点接触模型和点面接触模型计算得到的残余滑移量分别为14.7 cm和18.6 cm，后者比前者大26.5%。

图11比较了不同加速度幅值的地震动输入时的滑移量值。当加速度幅值在0.5 g及以下时，楔形体没有明显滑动。随着地震加速度幅值的增大，用两种接触模型计算得到的滑移量都增大，且点面接触模型算得的滑移量大于点点接触的滑移量，且二者差别随着加速度幅值的增大而增大。这是由于点面接触模型中，每一时刻都根据变形后的坐标重新判断接触关系，可更真实地反映接触状态。

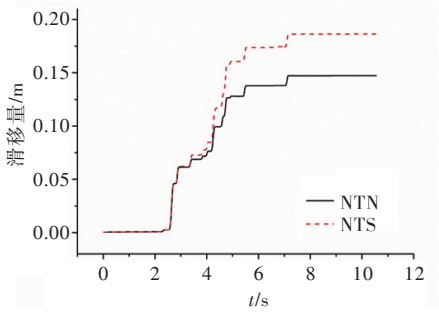


图 10　地震激励下楔形体 B 点滑移量时程(1.0 g)

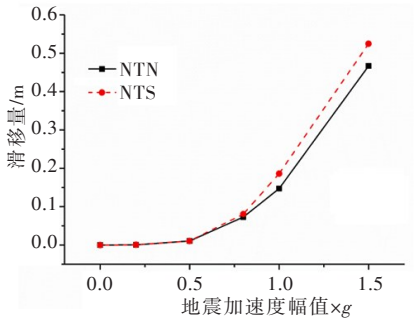


图 11　不同地震加速度幅值时的滑移量

5　考虑横缝开合效应的拱坝地震响应分析

以某拱坝为例，研究了在拱坝地震响应分析中采用点面接触模型的效果，并与点点接触模型进行了对比。大岗山拱坝高 210 m，地基模拟范围为 2 倍坝高，采用无质量地基模型模拟。拱坝-地基系统的有限元模型如图 12 所示。大坝共设置 28 条横缝，从左向右依次编号 1 ~ 28。混凝土的弹性模量、泊松比和密度分别为 24 GPa、0.17 和 2400 kg/m^3，横缝的摩擦系数取 0.8，黏聚力取 0 MPa。基岩的弹性模量、泊松比和密度分别为 24.5 GPa、0.25 和 2000 kg/m^3。设计地震加速度为 0.5575 g，考虑了 1 倍、2 倍、3 倍设计地震输入的情况，地震动时程沿三向输入。

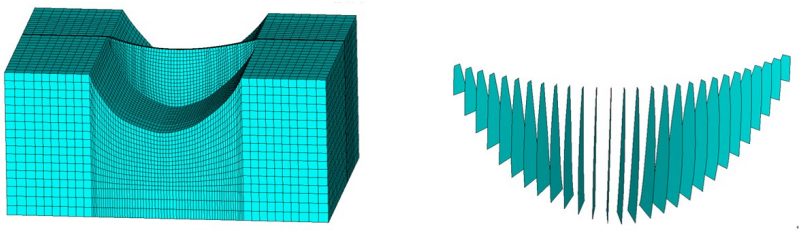
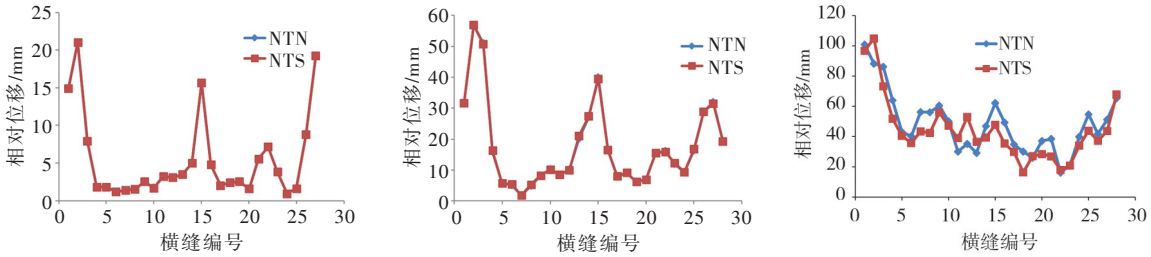


图 12　拱坝-地基有限元模型和横缝位置

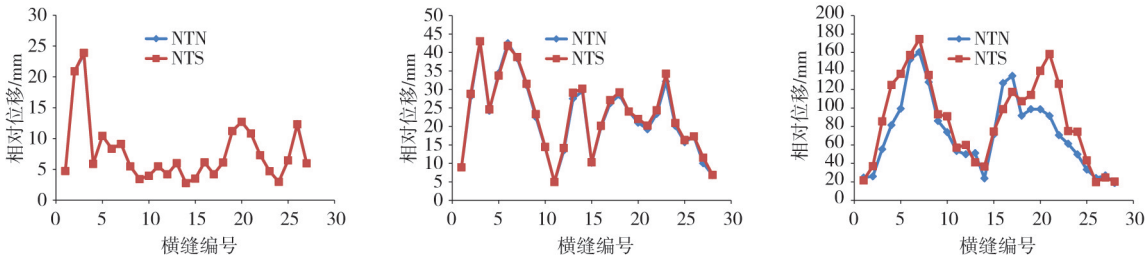
图 13 给出了所有横缝在整个时程中的最大开度。1 倍和 2 倍设计地震加速度输入时，可看出各条横缝的开度并不均匀，边缝和中缝的开度较大。采用点点接触模型(NTN)和点面接触模型(NTS)计算的结果基本相同。3 倍设计地震加速度输入时，各缝开度显著增大，但各缝开度趋于均匀。最大开度出现在左岸坝肩附近，且点面接触模型计算结果比点点接触模型的结果大 4.0%。对于中缝，点点接触模型的开度更大。由于横缝的接触非线性，随着地震加速度的增大，各缝开度增长幅度超过地震动增长的幅度。1 倍、2 倍、3 倍设计地震动输入时，采用点点接触模型计算的最大开度分别是 21.1 mm、56.9 mm、100.9 mm，而采用点面接触模型计算的最大开度分别是 21.0 mm、56.9 mm、104.9 mm。



(a)1 倍设计地震动输入　(b)2 倍设计地震动输入　(c)3 倍设计地震动输入

图 13　横缝最大开度

图 14 给出了所有横缝在整个时程中的最大切向滑移量。1 倍和 2 倍设计地震加速度输入时，采用点点接触模型(NTN)和点面接触模型(NTS)计算的结果基本相同。3 倍设计地震动输入时，左右两侧坝体的横缝滑移量大体上呈对称分布，最大滑移量出现在两侧的四分之一拱圈处。采用点面接触模

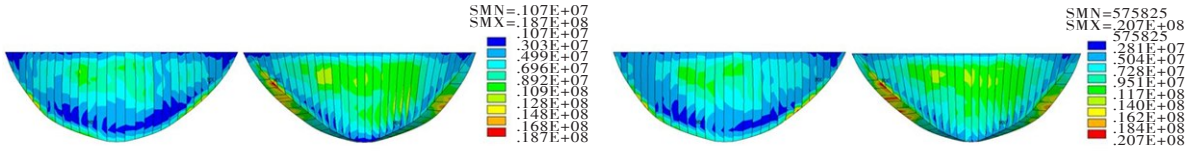


(a)1倍设计地震动输入　(b)2倍设计地震动输入　(c)3倍设计地震动输入

图14　横缝最大切向滑移

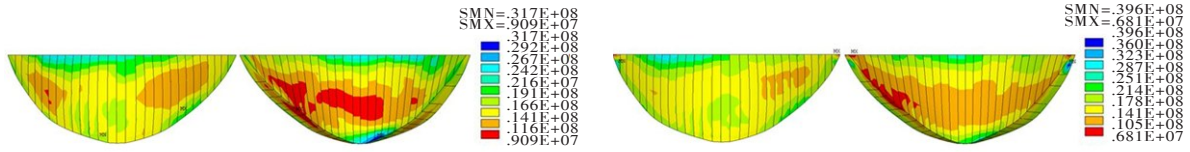
型算得的滑移量比点点接触模型大8.8%。

上下游坝面对最大主拉应力云图和最大主压应力分布云图分别见图15和图16。对于最大主拉应力，两种接触模型得到的应力分布趋势一致，最大值出现的位置相同。点面接触模型和点点接触模型算得的最大应力分别为20.7 MPa和18.7 MPa，前者高出10.7%。对于最大主压应力，两种接触模型算得的应力分布趋势基本一致，最大值出现位置有所差异。点面接触模型的最大值(−39.6 MPa，负号代表受压，下同)出现在左岸坝肩，点点接触模型的应力最大值(−31.7 MPa)靠近下游面底部，且前者比后者高出24.9%。



(a)NTN　(b)NTS

图15　3倍设计地震动输入时最大主拉应力分布(单位:Pa)



(a)NTN　(b)NTS

图16　3倍设计地震动输入时最大主压应力分布(单位:Pa)

6　结论

针对工程结构在地震作用下产生大滑移如边坡滑动、拱坝横缝张合等接触模拟问题，提出了基于点面算法和动接触力模型的接触算法，相对于点点算法能更真实地反映接触位置并且适用于接触面网格不一致的情况。推导了适于点面接触的动接触力模型公式；采用主从接触算法，通过全局搜索和局部搜索确定接触点对，其中局部搜索中采用内外算法可避免盲区问题、提高搜索效率。

通过楔形体稳定问题对该模型进行了验证，并通过对楔形体进行地震动输入研究了其地震稳定问题，比较了采用点点接触和点面接触的计算结果。研究表明，地震加速度幅值较小时，两种接触模型结果一致，随着加速度幅值的增大，结构响应增大，两种接触模型的计算结果差异也随之增大，地震加速度幅值为1.0 g时残余滑移量差别可达25%左右。

将该模型应用于某拱坝的地震响应分析，模拟了28条横缝，并考虑了1倍、2倍和3倍设计地震动输入的情况。研究表明对于1倍和2倍设计地震动输入的情况，点面接触和点点接触模型计算结果基本一致。对于3倍设计地震动输入的情况，两种接触模型得到的横缝开度、切向滑移量以及最大应力分布趋势大体一致，但点面接触模型算的最大横缝开度、最大切向滑移量、最大主拉应力、最大主压应力均大于点点接触模型的计算结果，增大幅度分别为4.0%、8.8%、10.7%和24.9%。可以看出，对于相对较小的地震，点点接触模型即具有足够的精度，对于超强地震，点点接触模型的计算结果偏小，尤其对应力值的低估更为明显。

参 考 文 献：

[1] 张楚汉 . 论岩石混凝土离散-接触-断裂分析[J] . 岩石力学与工程学报，2008，27(2)：217-235 .

[2] 尹晓楠，张国新 . DDA 用于重力坝深层抗滑稳定的接触刚度取值[J] . 中国水利水电科学研究院学报，2012，10(4)：294-300 .

[3] 林兴超，凌永玉，汪小刚，等 . 典型结构面分布型式节理岩体室内直剪试验研究[J] . 中国水利水电科学研究院学报，2021，19(1)：45-54 .

[4] 陈厚群 . 高混凝土坝抗震设计面临的挑战[J] . 水电与抽水蓄能，2017，3(2)：1-13 .

[5] LØKKE A，CHOPRA A . Direct finite element method for nonlinear earthquake analysis of 3-dimensional semi-unbounded dam-water foundation rock systems[J] . Earthq Eng Struct Dyn . ，2018，47(5)：1309-1328 .

[6] 牛智勇，胡志强，林皋 . 考虑法向初始抗拉强度和切向抗剪强度变化的拱坝横缝模型研究[J] . 水电与抽水蓄能，2017，3(3)：71-77 .

[7] 赵兰浩，李同春，牛志伟 . 有横缝高拱坝非线性地震响应动接触模型[J] . 水力发电学报，2007，26(4)：91-95 .

[8] 涂劲，陈厚群，杜修力 . 高拱坝非线性地震反应分析中横缝模拟方案研究[J] . 水力发电学报，2001(2)：18-25 .

[9] 李晓娜，陈怡乐，李同春，等 . 考虑横缝、裂缝接触非线性的高拱坝抗震分析[J] . 应用力学学报，2021，38(2)：856-860 .

[10] 李南生，沙德松，周晶 . 一类基于点-面模式的低阶单元接触搜索方法[J] . 力学季刊，2000，21(1)：139-144 .

[11] WRIGGERS P . Computational Contact Mechanics[M] . Springer，2006 .

[12] 李广凯，刘传东，肖仁军，等 . 多体接触问题面面接触算法研究[J] . 水利学报，2020，51(5)：597-605 .

[13] WANG SHENGPING，NAKAM EIIJI . The inside-outside contact search algorithm for finite element analysis[J] . International Journal for Numerical Methods in Engineering，1997(40)：3665-3685 .

[14] HOEK E T，BRAY J W . Rock Slope Engineering[M] . London：Spon Press，1981 .

[15] 张国新，李海枫，黄涛 . 三维不连续变形分析理论及其在岩质边坡工程中的应用[J] . 岩石力学与工程学报，2010，29(10)：2116-2126 .

Seismic contact modeling of three-dimensional structures based on the node-to-segment contact technique

ZHONG Hong，GUO Shengshan，TU Jin，LI Deyu，WANG Haibo

(*China Institute of Water Resources and Hydropower Research*，*Beijing* 100048，*China*)

Abstract：For engineering structures such as arch dams and rock slopes，sliding may take place along the joint surfaces and cracks due to strong earthquake shocks，and thus the contact modeling of the surfaces is important to the seismic safety evaluation of the structures. For the case of large sliding along the contact faces，a procedure based on the node-to-segment (NTS) contact technique and dynamic contact force model is presented. The dynamic contact force model is reformulated to couple with the NTS technique. Based on the master-slave technique，global searching is used to reduce the searching effort，and the inside-outside technique is employed for local searching to determine the contact pairs，by which the dead zone problem typical in classic NTS algorithm can be avoided，therefore improving the accuracy and efficiency. The presented procedure is verified by the stability analysis of a wedge. By introducing seismic excitation，the dynamic stability of the wedge is investigated，and the results are compared with those of the node-to-node (NTN) technique. It's found that the response of the wedge by using the NTS technique is greater than that of the NTN technique，and this difference increases as the amplitude of acceleration time history increases. This model is also applied to the seismic analysis of an arch dam. It's found that for a relatively small earthquake，both of the contact models lead to consistent results. For a very strong earthquake，however，when significant displacement of the contraction joints occur，the response obtained by the NTN model is smaller，which is especially true for the stress response. So for the cases with significant sliding of contact faces，the NTS contact technique is preferable as it can reflect the real situation better.

Keywords：contact modeling；earthquake；node-to-segment contact；dynamic contact force model；wedge stability；arch dam；contraction joint

（责任编辑：祁 伟）