УДК 539.374

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ КОНТАКТНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ С ШАРОВЫМ СЕГМЕНТОМ

© 2011 А.А. Каменских, Н.А. Труфанов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 07.11.2011

В работе рассмотрено контактное напряженное состояние конструкции опорных частей с шаровым сегментом пролетных строений мостов. Поставлена и реализована трехмерная контактная задача с учетом упругой пластичности одного из материалов конструкции. Выявлено распределение зон контактного взаимодействия, рассмотрен характер распределения нормальных и касательных напряжений на контактных поверхностях конструкции.

Ключевые слова: напряженное состояние, контактное взаимодействие, упругопластичность, трехмерная задача

В настоящее время к мостам в целом, а также к отдельным ответственным элементам: пролетным строениям, опорам и опорным частям, предъявляются высокие требования по прочности, надежности и долговечности. Опорная часть представляет собой элемент пролетного строения моста, передающий нагрузку от пролетного строения на опору в заданном месте и обеспечивающий необходимые перемещения пролетного строения [1]. К основным типам опорных частей мостов относят резино-металлические, тангенциальные, секторные, катковые, стаканные и др. Проекты таких опорных частей типовые, принципиально не изменяющиеся в течение нескольких десятилетий. В течение длительного срока и до последнего времени основными типами опорных частей были стальные опорные части. В настоящее время развитие технологии изготовления позволило создать новые материалы с улучшенными физико-механическими характеристиками, что привело к разработке новых типов опорных частей.

В данной работе рассматриваются опорные части пролетных строений мостов с шаровым сегментом. По своему функциональному назначению такие опорные части подразделяются на 3 типа: неподвижные – исключают горизонтальные возвратно-поступательные перемещения опорного узла, линейно (односторонне) подвижные – обеспечивают горизонтальные перемещения опорного узла в одном направлении, всесторонне подвижные – обеспечивают горизонтальные возвратнопоступательные перемещения опорного узла в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Общим для всех типов конструкции опорных частей с шаровым сегментом (рис. 1) является верхняя плита с шаровым полированным сегментом – 1, нижняя плита со сферическим вырезом – 2 и прослойка из антифрикционного материала (сферическая поверхность скольжения) – 3.



Рис. 1. Схема конструкции опорной части с шаровым сегментом

Настоящая работа направлена на изучение напряженно-деформированного состояния данных частей конструкции и исследование поведения антифрикционного материала сферической поверхности скольжения. Рассматриваются 2 реальные конструкции опорных частей пролетных строений мостов с шаровым сегментом л-250 и л-350, отличающиеся радиусом шарового сегмента и соответственно радиусом сферического выреза - изготовленные ООО «АльфаТех» по проектам и с научнотехническим сопровождением 000 «Ко Люмьер Лтд» (г. Москва).

Математическая постановка. Математическая постановка упругого поведения материала включает в себя уравнения равновесия [2]:

Каменских Анна Александровна, аспирантка. Email: anna_kamenskih@mail.ru

Труфанов Николай Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вычислительная математика и механика». E-mail: nat@pstu.ru

Современные технологии в промышленности, строительстве и на транспорте

$$div\hat{\sigma} = 0, \quad \vec{x} \in V \tag{1}$$

геометрические соотношения

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left(\nabla \vec{u} + \left(\nabla \vec{u} \right)^T \right), \quad \vec{x} \in V$$
(2)

физические соотношения

$$\sigma = \lambda I_1(\hat{\varepsilon})\hat{I} + 2\mu\hat{\varepsilon}, \quad \vec{x} \in V_1 \cup V_2 \tag{3}$$

где λ и μ – параметры Ламе, $I_1(\hat{\epsilon})$ – первый инвариант тензора деформаций, \hat{I} – единичный тензор.

Для описания поведения материала прослойки выбрана деформационная теория пластичности, физические соотношения которой имеют вид [3]:

$$\hat{\sigma} = \frac{2\sigma_u}{3\varepsilon_u} \left(\hat{\varepsilon} - I_1(\hat{\varepsilon}) \hat{I} \right) + 3KI_1(\hat{\varepsilon}) \hat{I}, \quad \vec{x} \in V_3 \quad (4)$$

где $\sigma_u = \sqrt{3I_2(\hat{\sigma})}$ – интенсивность тензора напряжений ($I_2(\hat{\sigma})$ – второй инвариант тензора напряжений), $\varepsilon_u = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{I_2(\hat{\epsilon})}$ – интенсивность тензора деформаций ($I_2(\hat{\epsilon})$ – второй инвариант тензора деформаций), K – объемный модуль упругости, $\sigma_u = \Phi(\varepsilon_u)$ – функциональная зависимость, определяемая кривой деформирования.

Математическая постановка дополняется кинематическими граничными условиями на поверхности S₂

$$u_{y} = 0, \ \vec{x} \in S_{2} \tag{4}$$

и статическими граничными условиями на поверхности S_1

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \vec{n} = \vec{P}, \ \vec{x} \in S_1, \tag{5}$$

остальные наружные поверхности являются свободными

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \vec{n} = 0 \tag{6}$$

Система уравнений (1) – (4) дополняется граничными условиями на поверхности контакта $S_K = S_{K1} \cup S_{K2} \cup S_{K3} \cup S_{K4}$. Рассматриваются следующие типы контактного взаимодействия:

- проскальзывание с трением: для трения покоя

$$\sigma_n < 0, \sigma_{n\alpha} < q\sigma_n, \vec{u}^1 = \vec{u}^2,$$
 (7)

для трения скольжения

$$\sigma_n < 0, \ \sigma_{n\alpha} = q\sigma_n, \ u_n^1 = u_n^2, \ \vec{u}_\tau^1 \neq \vec{u}_\tau^2, \quad (7)$$

где q – коэффициент трения, u_n – нормальные смещения, индекс α =1, 2, (1, 2 – условные номера двух контактирующих поверхностей; – отлипание

$$|u_n^1 - u_n^2| \ge 0$$
, $\sigma_{n\alpha} = \sigma_n = 0$, $\alpha = 1, 2$, (8)

– полное сцепление

$$\vec{u}^1 - \vec{u}^2 = 0, \ \sigma_{n\alpha} = \sigma_n = 0, \ \alpha = 1, 2.$$
 (8)

Идентификация определяющих уравнений. При определении напряженно-деформированного состояния опорных частей с шаровым сегментом одним из главных этапов исследования является изучение поведения материалов антифрикционной прослойки. Для этого были проведены натурные эксперименты на одноосное сжатие, направленные на изучение поведения материалов на основе фторопласта-4 (эксперименты проведены в ИМСС УрО РАН д.ф.-м.н. Адамовым А.А.). Эксперименты проводились на цилиндрических образцах с диаметром 20 мм, высота равна диаметру (рис. 2).



Рис. 2. Схема эксперимента

Образцы изготовлены из материалов: фторопласт-4 – мат. 1, антифрикционный композиционный материал на основе фторопласт-4 со сферическими бронзовыми включениями – мат. 2, и модифицированный фторопласт (фторопласт-4 без наполнителя после облучения) – мат. 3. На основе анализа результатов экспериментов в качестве модели поведения материала была выбрана деформационная теория упругопластичности [3]. Проведена серия численных экспериментов с использованием программного комплекса ANSYS, направленных на проверку работоспособности выбранной модели поведения материала. В рамках численного эксперимента происходит имитация условий натурного эксперимента с использованием деформационной теории упругопластичности, параметры которой определены из натурного эксперимента. Реализована трехмерная контактная задача, включающая в себя уравнения (1), (2) и (4), боковые грани свободны, на контактных поверхностях заданы условия контактного взаимодействия с учетом трения (6)-(9), коэффициент трения q=0,04, нижняя плита пресса неподвижна, к верхней плите прикладывается возрастающее по величине вертикальное перемещение $u_z=\Delta l$ (рис. 2). По результатам численного решения задачи о деформировании образца определялись поля средних по сечению образца z=l/2 напряжений $\langle \sigma_z \rangle$ и деформаций $\langle \varepsilon_z \rangle$ и строились диаграммы деформирования. На рис. 3 представлены результаты сравнения экспериментально полученных диаграмм деформирования и их численного прогнозирования для случаев мат. 1, мат. 2 и мат. 3.

Установлено, что для всех материалов численный расчет с использованием выбранных определяющих соотношений дает хорошее количественное соответствие результатам эксперимента.



Рис. 3. Диаграммы сжатия σ_z – ε_z (-- натурный, - численный эксперименты): a) мат. 1; б) мат. 2; в) мат. 3

Реализация решения и полученные результаты. Реализовано решение трехмерной контактной задачи, описанной в 1, для конструкций опорных частей с шаровым сегментом пролетных строений мостов л-250 и л-350. При помощи программного комплекса ANSYS построены трехмерные конечно-элементные модели с использованием деформационной теоупругопластичности. В конечнории элементной реализации используется элемент в виде 4-х узлового тетраэдра, обладающий линейной аппроксимацией и 3 неизвестными в каждом узле. В прослойке произведено сгущение размера элемента, в нижней и верхней плитах размер элементов градиентно увеличивается. Общее количество элементов и узлов в модели л-250 - 299258 и 56596, л-350 - 675840 и 121792 соответственно. На поверхностях соприкосновения верхней и нижней плит с прослойкой нанесена контактная конечно элементная пара, позволяющая учесть трение.

Изучены особенности напряженнодеформированного состояния конструкций и поведения антифрикционного материала прослойки. На модель наложены статические и кинематические граничные условия, соответствующие реальной максимальной нагрузке при эксплуатации опорной части с шаровым сегментом в пролетных строениях мостов: к верхней плите прикладывается распределенная вертикальная и горизонтальная нагрузка – для л-250 54 МПа и 7 МПа, для л-350 76 МПа и 7 МПа соответственно. Рассматривалось совместное действие вертикальной и горизонтальной нагрузок (нагружение 1) и действие только вертикальной нагрузки (нагружение 2).

Для трех материалов прослойки опорных частей с шаровым сегментом при заданных

нагрузках получены поля интенсивности напряжений, линейных, сдвиговых и объемных деформаций, перемещений в прослойке, характер контактного взаимодействия, контактное давление, характер перемещений в нижней плите.

Зоны контактного взаимодействия между прослойкой и плитами качественно одинаковы для мат. 2 и мат. 3. При совместном действии вертикальной и горизонтальной нагрузок результаты представлены на рис. 4, при действии только вертикальной – рис. 5.

При одновременном действии сдвиговой и вертикальной нагрузки в конструкциях л-250 и л-350 разъединение контактных поверхностей не происходит. В случае л-250 преобладает проскальзывание, имеет место сцепление с наиболее нагруженной стороны (по направлению действия сдвигающей нагрузки). В случае л-350 вертикальная составляющая нагрузки больше, преобладает сцепление на нижней и верхней контактных поверхностях прослойки. При действии только вертикальной нагрузки разъединение контактных поверхностей также не происходит. На основной доле площади поверхности преобладает смыкание.

Результаты решения задачи для прослойки, изготовленной из мат. 1 обладают особенностью: на торцевой поверхности прослойки присутствуют локальные зоны раскрытия контакта (рис. 6). При нагружении 1 в конструкции л-350 присутствует проскальзывание и смыкание контактных поверхностей на верхней и нижней поверхностях прослойки. В остальном, характер статусов контакта значительно не изменился.



Рис. 4. Зоны контакта при нагружении 1 (проскальзывание, сцепление): a),б) – л-250 и в),г) – л-350; a), в) – вид сверху, б), г) – вид снизу на контактные поверхности прослойки



Рис. 5. Зоны контакта при нагружении 2 (проскальзывание, смыкание): a),б) – л-250 и в),г) – л-350; a), в) – вид сверху, б), г) – вид снизу на контактные поверхности прослойки



отлипание, около контактное, проскальзывание, смыкание): a) – вид сверху, б) – вид снизу на контактные поверхности прослойки

В зоне контакта действуют контактные давление (рис. 7) и касательное напряжение (рис. 8). Наибольший интерес представляют данные величины на контактной поверхности прослойки, обладающей большей свободой S_{K1} . Контактные давления и напряжения трения построены по поверхности прослойки S_{K1} в сечениях z=0 и x=0. В случае совместного действия вертикальной и горизонтальной нагрузок контактное давление возрастает по направлению действия сдвигающей нагрузки. На краю прослойки контактное давление для соседних узлов может отличаться на порядки. Данная

ситуация может быть связана с переходом от одной зоны проскальзывания к зоне смыкания. В случае действия только вертикальной нагрузки контактное давление на концах прослойки минимально. Картина распределения контактного давления более ровная. Для конструкции л-250 заметно скачкообразное изменение контактного давления в близи края прослойки. Следует отметить, что контактное давление меньше, по сравнению с другими материалами, и более равномерно распределено у материала 3.



Рис. 7. Контактное давление на S_{K1} :а),б) – л-250 и в),г) – л-350: 1 – мат. 1, нагружение 1; 2 – мат. 1, нагружение 2; 3 – мат. 2, нагружение 1; 4 – мат. 2, нагружение 2; 5 – мат. 3, нагружение 1; 6 – мат. 3, нагружение 2



Рис. 8. Контактное касательное напряжение на *S_{K1}*: a),б) – л-250 и в),г) – л-350: 1 – мат. 1, нагружение 1; 2 – мат. 1, нагружение 2; 3 – мат. 2, нагружение 1; 4 – мат. 2, нагружение 2; 5 – мат. 3, нагружение 1; 6 – мат. 3, нагружение 2

Касательное контактное напряжение на порядки меньше чем контактное давление и дает малый вклад в полное контактное напряжение. В случае совместного действия вертикальной и горизонтальной нагрузки для конструкции л-250 характер распределения контактного напряжения аналогичен контактному давлению, для л-350 возрастает по направлению действия сдвигающей нагрузки при нахождении в зоне проскальзывания, затем снижается до нуля в зоне смыкания и начинает снова возрастать к зоне проскальзывания. В случае действия только вертикальной нагрузки напряжения трения для л-250 минимальны на большей доли поверхности, что связанно с преобладанием зоны смыкания, у л-350 зона смыкания меньше - контактное касательное напряжение возрастает в зонах проскальзывания, снижаясь до нуля в зоне смыкания, на краях прослойки напряжение трения мало. Распределение контактного напряжения трения равномерней у материала 3.

Выводы: на основе численного решения трехмерной контактной задачи упругопластичности изучены картины распределения зон разного типа контактного взаимодействия. Установлены величины и характер распределения контактного давления и контактного касательного напряжения на поверхности контакта. Отмечено, что использование для изготовления прослойки материала 3 (модифицированный фторопласт) обеспечивает более благоприятные условия работы исследуемого узла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1. Богданов, Г.И. Опорные части мостов. Ч. 1: учеб. пособие для студентов вузов / Г.И. Богданов, С.С. Ткаченко, С.А. Шульман. СПб.: Петербургский гос. университет путей сообщения, 2006. 32 с.
- 2. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1979. 560 с.
- Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Учебник для студентов вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. 400 с.

THE NUMERICAL ANALYSIS OF THE CONTACT TENSION OF BASIC PARTS WITH SPHERICAL SEGMENT

© 2011 A.A. Kamenskih, N.A. Trufanov

Perm National Research Polytechnical University

In work the contact tension of the construction of basic parts with spherical segment of flying structures at bridges is considered. The three-dimensional contact problem with the account elastic plasticity of one of constructional materials is put and realized. Distribution of contact interaction zones is revealed, character of distribution the normal and tangents pressure on contact surfaces of a construction is considered.

Key words: tension, contact interaction, elastic plasticity, three-dimensional problem

Anna Kamenskih, Post-graduate Student. Email: anna_kamenskih@mail.ru Nikolay Trufanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Computational Mathematics and Mechanics". E-mail: nat@pstu.ru