УДК 624.1

Е.А.КАРАСЕВ, *начальник учебно-компьютерного центра, e-mail: karasev@spmi.ru*
Санкт-Петербургский горный институт (технический университет)

E.A.KARASEV, *head of studying-computer center, e-mail: karasev@spmi.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СБОРНЫХ ОБДЕЛОК ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

Приведены анализ подходов к моделированию сборной обделки транспортных тоннелей, основные достоинства и недостатки существующих методов. Предложен обобщенный метод детального анализа напряженного состояния сборных обделок на основе решения задач механики сплошной среды в объемной постановке методом конечных элементов с учетом контактного взаимодействия между ее отдельными элементами.

Ключевые слова: тоннель, обделка, взаимосвязь, контакт, объемная модель.

SPECIFIC BEHAVIOUR OF PREFABRICATED TUNNEL LININGS

Analysis of different methods to model prefabricated tunnel lining is done. The description of main advantages and disadvantages of existing method is given. Method of detailing stress state prediction of prefabricated lining based on 3d finite elements method with complicated interaction between lining segment and soil is proposed.

Key words: tunnel, lining, interaction, contact, 3d model.

При расчете обделки транспортных тоннелей возникают следующие проблемы: последовательность строительства тоннеля и установки временной крепи и постоянной обделки; строительство в сложных инженерно-геологических условиях; реалистичное поведение окружающего массива; рассмотрение сложных гидравлических процессов, происходящих в массиве; характер поведения обделки; расчет на кратковременное и длительное воздействие; строительство нескольких параллельных тоннелей и др.

Хотя каждый из этих вопросов достаточно важный и требует особого внимания, рассмотрим моделирование сборной обделки с учетом ее конструктивных особенностей.

Существует несколько основных подходов к моделированию обделки тоннеля (рис.1) [1, 3].

Наиболее общим методом является моделирование обделки сплошными конечными элементами в двухмерной постановке, что в свою очередь позволяет использовать для описания работы обделки самые различные модели материалов (бетон, железобетон, чугун, сталь) без значительных упрощений. Основной недостаток данного подхода заключается в необходимости отслеживать и поддерживать соответствующее качество конечно-элементной сетки. Обделка тоннеля по сравнению с его диаметром имеет достаточно небольшие геометрические размеры, для того, чтобы обеспечить соответствующее качество элементов, необходимо разбивать сетку на большое количество элементов или использовать один из методов адаптивного перестроения сетки в процессе решения задачи. При этом двухмерная постановка накладывает еще одно ограничение – невозможность рас-

сматривать обделку, геометрия которой изменяется в продольном направлении, без значительных допущений, (тюбинговая крепь с продольными и поперечными ребрами жесткости). Необходимо учесть взаимодействие между соседними сегментами (кольцами) обделки в продольном направлении.

Альтернативой сплошным элементам в двухмерной постановке является использование балочных элементов, что позволяет не беспокоиться о качестве сетки, отвечающей за работку обделки. Поэтому их использование для моделирования обделки вполне обосновано и позволяет более гибко подходить к формированию конечно-элементной сетки самого массива. Еще одно преимущество балочных элементов по сравнению со сплошными элементами – получение усилий в таких типах элементов (продольные усилия, перерезывающие силы, изгибающие моменты), что значительно упрощает анализ результатов моделирования. С другой стороны, значения усилий можно получить и для сплошных элементов, проведя ряд математических операций над полученными результатами напряжений по заданному сечению. Для стержневых элементов могут быть реализованы некоторые модели материалов, которые позволяют определять трещинообразование и разрушение обделки.

Другой важный вопрос, который необходимо рассматривать при моделировании сборной обделки, – связь между различными сегментами [2]. Это накладывает дополнительные требования к конечно-элементной модели. Одним из самых простых способов является рассмотрение каждого сегмента как независимой друг от друга конечно-элементной сетки (рис.2). При этом необходимо оставить некоторое расстояние между ними. Крайние узлы сетки каждого из сегментов обделки могут быть связаны конечными элементами со специальной формулировкой граничных условий. Например, смежные узлы сегментов могут быть связаны таким образом, чтобы смещения этих узлов были одинаковыми, в то время как степень свободы, отвечающая за вращения, не была бы зафиксирована. Данный подход позволяет передавать только осевые и перерезывающие силы, в то время как изгибающий момент данный специальный элемент не передает от крайнего узла одного сегмента к крайнему узлу другого сегмента. В некоторой степени подход является упрощением работы реальной конструкции, так как на практике некоторая часть изгибающего момента от одного сегмента к другому все же передается. Схожий подход может быть использован и для моделирования обделки сплошными элементами, где серединные узлы, расположенные на торце каждого из сегмента, будет связаны друг с другом и передавать только осевую нагрузку.

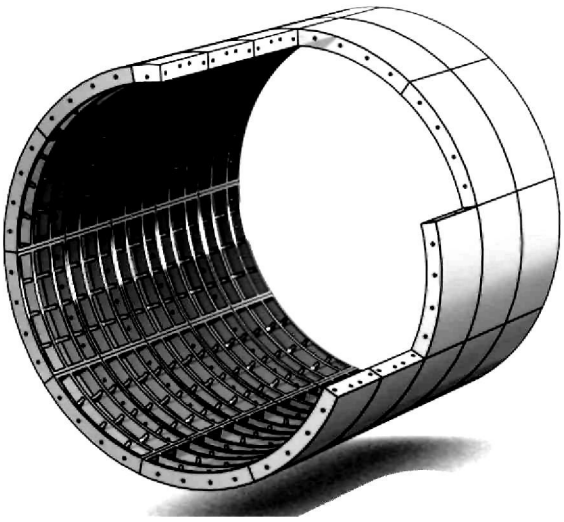


Рис.1. Конструкция сборной блочной обделки, выполненной в чугуне

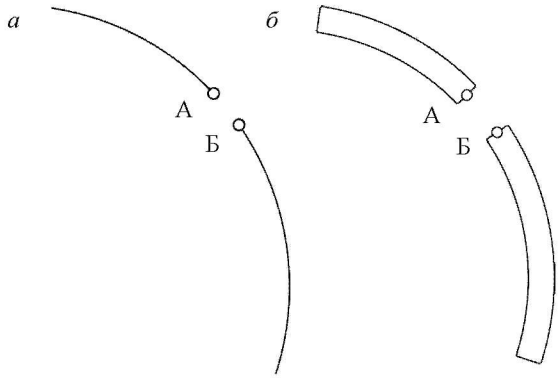


Рис.2. Моделирования связи между сегментами сборной обделки: *а* – стержневые элементы; *б* – сплошные элементы

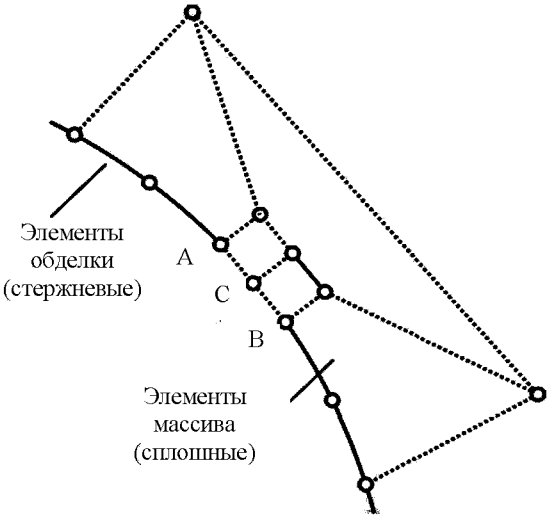


Рис.3. Моделирование связи между отдельными сегментами с помощью специального элемента (узлы A, C, B)

Недостатком такого подхода является то, что если окружающий массив не рассматривается как упругий, что чаще всего и происходит при решении задач геомеханики, то смежные элементы, принадлежащие массиву, при разрушении теряют несущую способность, а так как минимум один из них (или более) расположен на участке, где нет элемента обделки, он лишается поддержки от них в радиальном направлении и будет выдавлен между сегментами обделки. Это приведет к численной нестабильности решения и не позволит промоделировать весь рассматриваемый процесс до конца. Такая проблема возникает при моделировании обделки балочными и сплошными элементами. Существует ряд подходов решения описанной проблемы, но в данной статье они не приводятся. Альтернативным подходом для моделирования связи между отдельными сегментами обделки является применение специального элемента (рис.3), который позволит воспринимать усилие от массива в радиальном направлении, но при этом для самого элемента должна быть разработана специальная модель материала, которая при достижения некоторого предельного значения напряжения на контакте между сегментами перестанет передавать изгибающий момент от одного к другому.

Хотя приведенная проблема с некоторым допущением может быть решена в двухмерной постановке, для более общего описания работы обделки (учет геометрических особенностей, реальной взаимосвязи между сегментами, несимметричного расположения элементов обделки вдоль продольной оси тоннеля) необходимо использовать другой подход.

Наиболее полно работу обделки можно описать с помощью объемных конечных элементов. Данный подход позволяет учесть геометрические особенности обделки, а также особенности взаимосвязи между отдельными сегментами сборной обделки или изменение ее формы в продольном направлении (обделка «скошенная восьмерка» или «клиновидная»).

Последовательность задания модели взаимодействия обделки с массивом следующая: 1) построение геометрической модели массива и кольца (нескольких колец массива); 2) задание свойств материалов обделки и массива; в данном случае модель материала обделки может быть сколь угодно сложной, с учетом нелинейно упругой работы материала, пластического течения, как с изотропным, так и кинематическим упрочнением, трещинообразованием, разупрочнением, разрушением и т.д.; 3) по готовой геометрической модели построение конечно-элементной модели с заданием присущих физико-механических свойств; 4) задание граничных условий; 5) задание контактного взаимодействия.

Последний пункт рассмотрим подробнее. Так как объемная конечная элементная модель позволяет без значительных упрощений представить все геометрические особенности элемента обделки и всего кольца обделки, нет необходимости упрощенно подходить к взаимодействию между отдельными элементами. Контактное взаимодействие между отдельными секциями позволяет полностью передавать всевозможные усилия, в частности изгибающий момент, при этом значение этих усилий не определяется заранее, а задается в процессе решения, что говорит о более строгом решении задачи. При наличии поперечных и

продольных связей между отдельными элементами (болтовые соединения в тюбинговой крепи) появляется возможность в явном виде учесть эти конструктивные элементы. И хотя в общем случае их наличие не всегда значительно сказывается на работе всей обделки, данный подход позволяет оценить напряженное состояние непосредственно в болтовых соединениях. Характер передачи усилий от одного элемента другому зависит от площади контакта между ними, что в свою очередь ведет к перераспределению усилий в элементах обделки. Даже применение специальных элементов не позволяет произвести такой расчет без значительных допущений.

Основной недостаток данного метода – значительная по сравнению с двухмерной постановкой размерность задачи, что в конечном итоге приводит к увеличению времени расчета. Это накладывает ограничения на размер решаемой задачи и область применения метода. На данный момент, с учетом современного развития вычислительной техники и численных методов анализа, существует достаточно ограниченный круг задач, которые можно решать таким методом в начальной постановке. Существует ряд подходов, которые позволяют значительно уменьшить размерность задач на начальном этапе решения (например, метод SubModeling). Последовательность действия следующая: на начальном этапе конечно-элементная сетка модели рассматривается с низкой степенью дискретизации. На основе полученного решения, когда все геомеханичские процессы в массиве реализовались, на локальном участке модели повышается степень дискретизации конечно-элементной сетки и расчет повторяется. Такой подход позволяет провести детальную оценку напряженного состояния обделки.

Таким образом, для детального анализа напряженно-деформированного состояния необходимо рассматривать обделку в объемной постановке, с заданием характерных для ее реального поведения моделей материала, а взаимодействие между отдельными сегментами сборной обделки осуществляется с помощью контактного взаимодействия, с возможностью элементов входить в контакт и разрывать контакт, если зазор между элементами стал больше допустимого. Это позволит повысить точность решения, найти слабые участки в обделке, провести комплексный прочностной анализ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *David M. Potts, Lidija Zdravcovic.* Finite element analysis in geotechnical Engineering. Application. Thomas Telford. 2001. 427 p.

2. *Babendererde S.* Design and Construction of Linings for Urban Tunnels // Advances in Tunnelling Technology and Subsurface Use, Elsevier Science Limited. 1984. Vol.4. № 4. P.151-161.

3. ITA WG Research. Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining // Tunnelling and Underground Space Technology. 2000. Vol.15. № 3. P.303-331.

REFERENCES

1. *David M. Potts, Lidija Zdravcovic.* Finite element analysis in geotechnical Engineering. Application. Thomas Telford. 2001. 427 p.

2. *Babendererde S.* Design and Construction of Linings for Urban Tunnels // Advances in Tunnelling Technology and Subsurface Use, Elsevier Science Limited. 1984. Vol.4. № 4. P.151-161.

3. ITA WG Research. Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining // Tunnelling and Underground Space Technology. 2000. Vol.15. № 3. P.303-331.