О свойствах акустической границы между твердым телом и жидкостью при моделировании упругих волн в геосредах в Comsol Multiphysics

В.В. Набатов*

Горный институт НИТУ «МИСиС». Россия, 119991 Москва, Ленинский просп. д. 4 (Статья поступила 01.07.2017; Подписана в печать 12.09.2017)

В статье описывается специфика моделирования процедур геофизического контроля тоннелей метрополитенов, используемого для поиска полостей в заобделочном пространстве. В частности, модель требует специфической работы с граничными условиями на контакте между твердым телом и флюидом. Полученные результаты моделирования сопоставлены с результатами реальных измерений в тоннелях. Выявлены специфические особенности откликов получаемых при контроле.

РАСS: 43.40.Ph УДК: 550.8 Ключевые слова: обделка, полость, тоннель, контроль, моделирование, граничные условия.

введение

Активизировавшееся в последнее время строительство подземных транспортных сооружений в Москве требует решения большого спектра задач по информационному обеспечению горных работ, многие из которых решаются геофизическими методами. Помимо задач, связанных со строительством, необходимо также решать проблемы поддержания уже действующей транспортной сети. Среди этих задач: поиск полостей в заобделочном пространстве [1-3] для последующего их тампонажа; оценка качества тампонажа [4]; контроль геометрических параметров обделки и ее армирования [5, 6], поиск мест поступления воды в выработки [7]; прогнозирование условий щитовой проходки, которое производится как с поверхности [8], так из забоя [9]. Многие из этих задач решаются с привлечением не только геофизических методов, но и с дополнительной работой в сфере физического и математического моделирования, которые используются для обработки и интерпретации данных [10], разработки новых методов [11], оценки воздействия транспортной структуры на массив пород и застройку [12, 13].

Эта статья посвящена вопросам разработки компьютерной модели, способной описать поведение обделки при применении процедур контроля по выявлению полостей в заобделочном пространстве. Поскольку тоннели довольно часто находятся ниже уровня грунтовых вод, описываемые полости оказываются заполненными водой, что приводит к необходимости учитывать в модели не только поведение твердых тел, но и включать в модель флюиды, а также специфическим образом работать на границе твердой и жидкой фазы.

1. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ

Моделирование методом конечных элементов производилось в системе Comsol Multiphysics в двумерной постановке. Основной целью исследований было модельное воспроизведение процедур геофизического контроля, состоящих в следующем. Контроль производится из выработанного пространства. К обделке в точке обследования прикладывается датчик, рядом с которым наносится серия ударов. Процесс регистрации отклика обделки на ударное воздействие начинается с момента превышения амплитудного порога. При этом производится восстановление предыстории сигнала, которая берется из постоянно обновляемого буфера. Записанная серия реализаций усредняется, после чего по волновым формам производится расчет параметров, указывающих на наличие, либо отсутствие полости за обделкой. В случае, если за обделкой присутствует полость, обделка совершает колебания большой амплитуды с малым затуханием. Отсутствие полости характеризуется малой амплитудой и большим затуханием.

Распространение упругих волн в элементах модели, которые представляют собой твердые тела, описывается следующим уравнением:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + d \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \nabla \cdot g \nabla \mathbf{u} = \mathbf{f},$$

где ρ — плотность среды; **u** — вектор смещений; d — параметр, характеризующий затухание; g — коэффициент, описывающий упругие свойства среды (модуль упругости); **F** — воздействующая сила (F = 0, поскольку возбуждение обделки моделировалось как начальная скорость ударника); ∇ — оператор Гамильтона. Предполагалось, что полости, образовавшиеся за обделкой, заполнены флюидом (газом, либо жидкостью). Для этих типов среды распространение упругих волн описывается уравнением

$$\frac{1}{\rho A^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + d\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho}\nabla p\right) = Q, \qquad (1)$$

где ρ — плотность; c — скорость упругих волн; p — давление флюида; d — коэффициент, характеризующий потери; Q — источник-монополь (Q = 0, поскольку источник упругих волн находится вне области, описываемой выражением (1).

^{*}E-mail: nv4@mail.ru

Для случая, когда на одной и той же границе контактируют твердое тело и флюид, граничные условия прописываются различным образом. Так флюид на твердое тело воздействует как вектор давления, направленный нормально к поверхности в сторону твердого тела. Эту особенность описывает следующее выражение

$$\boldsymbol{\sigma}_{pS} = \mathbf{n}_S p,$$

где σ_{pS} — нормальное давление; \mathbf{n}_S — единичный вектор, направленный по нормали к поверхности в сторону твердого тела; p — давление флюида. Компонентная запись этого выражения:

$$\sigma_{pSx} = p \cdot n_x, \quad \sigma_{pSy} = p \cdot n_y,$$

где σ_{pSx} , σ_{pSy} — компоненты вектора давлений; n_x , n_y — компоненты нормального вектора. Воздействие твердого тела на флюид описывается как ускорение, направленное по нормали к поверхности со стороны твердого тела

$$\mathbf{a}_n = \mathbf{n}_a \cdot \left(-\frac{1}{\rho}\right) \nabla p,$$

где \mathbf{n}_a — единичный вектор, направленный по нормали к поверхности в сторону флюида; ρ — плотность флюида; p — давление флюида; \mathbf{a}_n — ускорение на границе флюида. Компонентная запись:

$$a_n = n_x \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + n_y \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2},$$

где \mathbf{a}_n — ускорение, направленное со стороны твердого тела в сторону жидкости по нормали к поверхности; n_x , n_y — компоненты единичного вектора, направленного по нормали к поверхности; u, v — смещения на границах твердого тела по осям x и y соответственно.

Фрагмент разработанной модели в области, где находится выработка, представлен на рис. 2. Основными элементами модели являются: массив горных пород, конструкции тоннеля, полость на границе массива и тоннеля, ударник. Модель массива пород (1 на рис. 2) была ограничена сверху дневной поверхностью. Тоннель моделировался как бетонная конструкция (собственно обделка тоннеля (2 рис. 2). Такие особенности, как факт сборности конструкции, наличие путевого бетона, заполненность выработанного пространства воздухом были оценены как второстепенные для модели. С целью ее упрощения они не моделировались. Некоторые из этих особенностей позже были внесены в модель, однако к существенному изменению результатов эти изменения не привели.

Во внутреннем пространстве тоннеля располагался ударник (3), моделировавшийся как стальной брусок. Процесс возбуждения обделки создавался в модели с помощью начальных условий (начальная скорость движения ударника 0.1 м/с). Процесс регистрации колебаний обделки получался из модели как скорость смещения точки, находящейся вблизи от ударника на расстоянии 10 см, что соответствовало положению датчика при реальных измерения в тоннелях. Полость за обделкой (4 на рис. 2) располагалась на середине высоты тоннеля.



Рис. 1: Участок модели вблизи тоннеля после разбиения на сеть конечных элементов

Шаг дискретизации по времени подбирался таким образом, чтобы он соответствовал данным, полученным при реальных исследованиях в тоннелях ($\Delta t = 1.04 \cdot 10^{-5}$ с).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2 представлены результаты моделирования — волновые формы откликов обделки на ударное воздействие. Вариант 1 на рис. 2, представляет собой расчет модели без полости за обделкой. Здесь хорошо видны малая амплитуда колебаний (исключая начальный участок сигнала) короткая длительность и высокое затухание. Для случаев волновых форм, соответствующих 2 (воздух в полости) и 3 (вода в полости) просматривается более высокая амплитуда и большая длительность колебаний, означающая малое затухание.

Спектры полученных колебаний были сопоставлены со спектрами колебаний, полученных при реальных исследованиях в тоннелях метрополитена. Соответствие функций было оценено с помощью коэффициента корреляции *R*. В диапазоне частот 0.84–4.2 кГц значения *R* достигают уровня 0.91.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анализируя графики можно заметить различия между вариантами «вода в полости» и «воздух в полости». Случай «воздух в полости» характеризуется выраженной низкочастотной компонентной, присутствие которой легко объяснить поведением обделки как не прижатой грунтом мембраны. Случай «вода в полости» образует отклик с выраженной высокочастотной



Рис. 2: Модельные волновые формы откликов обделки на ударное воздействие: 1 — отсутствие полости, 2 — полость заполнена воздухом, 3 — полость заполнена водой

компонентой. Ее присутствие можно объяснить влиянием стоячей волны, образующейся между границами «обделка-вода» и «вода-грунт».

Это предположение подтверждается близкими значениями длин волн, получаемых из условия образования стоячей волны $\lambda_1 = 2d$, где λ — длина волны в воде, d — глубина полости, и из соотношения $\lambda_2 = c/f$, где c — скорость упругой волны, f — частота спектрального максимума, полученная по результатам спектрального анализа отклика обделки. При d = 0.5 м длина волны $\lambda_1 = 1$ м, а при c = 1500 м/с и f = 1.18 кГц, $\lambda_2 = 1.27$ м. Неполное соответствие λ_1 и λ_2 можно объяснить расхождением исходных натурных и модельных данных. При этом отсутствие описываемых высокочастотных компонент в отклике для модели «воздух в полости» можно объяснить более высоким затуханием волн в воздухе.

- [1] Davis A. G., Lim M. K., Petersen C. G. NDT & E International 2005. **38**. P. 181.
- [2] Cassidy N. J., Eddies R., Dods S. J. Appl. Geophys. 2011.
 74. P. 263.
- [3] Набатов В.В., Вознесенский А.С. Горный журнал. 2015. № 2. С. 15.
- [4] Hai Liu, Xiongyao Xie, Motoyuki Sato. Accurate thickness estimation of a backfill grouting layer behind shield tunnel lining by CMP measurement using GPR. Ground Penetrating Radar (GPR), 2012, 14th International Conference, Shanghai, China.
- [5] Daniels D.J. (Ed.). Ground Penetrating Radar (2nd Edition). IEE. London. 2004. ISBN 0-86341-360-9.
- [6] Набатов В.В., Гайсин Р.М. Горный информационноаналитический бюллетень. 2014, № 12. С. 168.
- [7] Wimsatt A., White J., Leung Ch., Scullion T., Hurlebaus S., Zollinger D., Grasley Z., Nazarian S., Azari H., Yuan D. et al. Mapping Voids, Debonding, Delaminations, Moisture and Other Defects Behind or Within Tunnel Linings. TRB's second Strategic Highway Research Program (SHRP 2) Report S2-R06G-RR-1. 2013. DOI:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное моделирование процедур контроля заобделочного пространства позволило выявить различное поведение акустического отклика обделки на ударное воздействие. Отклики отличаются выраженностью низкочастотных и высокочастотных компонент, что, в частности, указывает на заполненность полости в заобделочном пространстве водой. Предполагаемой причиной появления высокочастотных компонент является образование стоячей волны, распространяющейся в жидкости между границами обделки и массива пород.

10.17226/22609.

- [8] Набатов В.В., Гайсин Р.М., Гораньков И.И. Горный информационно-аналитический бюллетень. Москва. 2011. № 8. С. 202.
- [9] Shucai Li, Bin Liu, Xinji Xu, Lichao Nie, Zhengyu Liu, Jie Song, Huaifeng Sun, Lei Chen, Kerui Fan. Tunnelling and Underground Space Technology. 2017. 63. March. P. 69.
- [10] Chih-Sung Chen, Yih Jeng. Geothermics. 2016. 64. P. 439.
- [11] Che Way Chang, Chen Hua Lin, Hung Sheng Lien. Construction and Building Materials. 2009. 23(2).
 P. 1057.
- [12] Костарев С. А. Анализ вибраций, генерируемых линиями метрополитена, и разработка комплекса мероприятий по их снижению.: дис. . . . докт. техн. на-ук : 01.02.06: защищена М., 2014.
- [13] Gupta S., Degrande G., Lombaert G. J. Sound & Vibration. 2009. **321**, Issues 3–5. P. 786.

On the properties of the acoustic boundary between a solid and a liquid in the modeling of elastic waves in geo-environments in Comsol Multiphysics

V.V. Nabatov

National University of Science and Technology "MISIS". Moscow 119991, Russia E-mail: nv4@mail.ru.

The article describes the specificity of modeling the geophysical monitoring procedures for searching of voids behind subway tunnels lining. In particular, the model requires specific work with boundary conditions on the contact between a solid and a fluid. The obtained simulation results are compared with the results of real measurements in tunnels. The specific features of the lining responses are revealed.

PACS: 43.40.Ph Keywords: Received 01 July 2017.

Сведения об авторе

Набатов Владимир Вячеславович — канд. техн. наук, доцент., доцент;тел.: (499) 230 25 93; e-mail: nv4@mail.ru.