УДК 622.83

Е.М.ВОЛОХОВ, *канд. техн. наук, доцент, volohov@spmi.ru*
Д.А.ПОТЕМКИН, *канд. техн. наук, доцент, potyomkin@list.ru*
Санкт-Петербугский государственный горный институт (технический университет)

E.M.VOLOHOV, *PhD in eng. sc., associate professor, volohov@spmi.ru*
D.A.POTEMKIN, *PhD in eng. sc., associate professor, potyomkin@list.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ГОРОДСКИХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ПОДРАБАТЫВАЕМЫЙ МАССИВ

Излагаются основные особенности геомеханических процессов, происходящих в массиве горных пород при проходке тоннелей и выработок подземных сооружений. Приведены принципы организации математического моделирования процессов сдвижений и деформаций горных пород для оценки вредного влияния подземного строительства на здания и сооружения. Изложены основные недостатки известных подходов к моделированию геомеханических процессов, даны рекомендации по решению ключевых задач расчета сдвижений в породном массиве. Представлены основные результаты применения комплексного подхода к прогнозной оценке сдвижений и деформаций при обеспечении строительства городских подземных сооружений в Санкт-Петербурге.

Ключевые слова: сдвижения земной поверхности, деформации, моделирование, подземное строительство.

MATHEMATICAL MODELLING OF GEOMECHANICAL PROCESSES AT THE ESTIMATION OF INFLUENCE OF BUILDING UNDERGROUND CONSTRUCTIONS IN CITIES ON THE UNDERMINED ROCK MASS

In work the basic features geomechanical processes of rocks occurring in a file are stated at tunneling and developments of underground constructions. Principles of the organisation mathematical modelling of processes displacement and deformations of rocks for an estimation of harmful influence of underground building on buildings and constructions are resulted. The basic lacks of known approaches to modelling of geomechanical processes are stated, recommendations about the decision of key problems of calculation displacement in a pedigree file are made. The basic results of application of the complex approach to a look-ahead estimation displacement and deformations at maintenance of building of city underground constructions in St.-Petersburg are presented.

Key words: displacements of a terrestrial surface, deformations, modelling, underground building.

Анализ мировых тенденций, связанных с ростом и развитием мегаполисов, показывает, что сложившаяся к настоящему времени транспортная инфраструктура в них не способна решать свою основную задачу. Единственным приемлемым вариантом решения данных проблем является освоение подземного пространства крупных городов, особенно в их центральных районах.

Вопросам обеспечения освоения подземного пространства крупных городов посвящено много работ и лишь небольшая часть из

них вопросам оценки вредного влияния подземного строительства на существующие здания и сооружения. Актуальным проблемам оценки влияния подземного строительства всегда уделялось повышенное внимание в научных исследованиях, проводившихся на кафедрах факультета освоения подземного пространства СПГГИ с момента его образования в середине 90-х годов.

Существенные отличия геомеханических процессов, протекающих в массиве при проходке подземных транспортных выработок, в сравнении с выработками, используемыми для выемки полезных ископаемых, определяют методологию расчетов сдвижений и деформаций.

К главным горно-технологическим факторам, определяющим особенности указанных процессов, можно отнести:

- небольшую глубину выработок (даже для так называемых выработок глубокого заложения);
- большие поперечные сечения выработок;
- возведение мощной крепи, рассчитанной на долговременную эксплуатацию выработок;
- применение временных крепей (на участках с породными обнажениями) и специальных способов для поддержания пород перед сооружением основной крепи.

Обобщая данные натурных измерений сдвижений, можно отметить, что даже небольшие глубины и внушительные значения поперечных сечений тоннелей не приводят к серьезным (с точки зрения горного производства) деформациям на земной поверхности. Подработанные породы в большинстве случаев деформируются плавно, без образований трещин, провалов, величины вертикальных и горизонтальных сдвижений часто не превышают первых сантиметров.

Говоря об особенностях влияния подземных горных работ на здания и сооружения мегаполисов, следует отметить, что низкие значения сдвижений и деформаций, проявляющиеся на поверхности, могут представлять опасность, особенно для уникальных исторически ценных объектов. Кроме того, для районов с плотной исторической застройкой необходимо производить прогнозную оценку сдвижений, так как именно здесь требуется осваивать подземное пространство, в том числе и потому, что не всегда возможно разместить современные наземные транспортные сооружения, не нарушив целостность исторических архитектурных ансамблей.

Актуальность рассмотрения вопросов прогнозной оценки вредного влияния подземного строительства определяется практически полным отсутствием нормативной базы для данных оценок и разрозненностью многочисленных методических подходов к решению задач предрасчета сдвижений и деформаций. Среди нормативных источников можно упомянуть лишь два документа, касающиеся методологии прогнозных расчетов сдвижений [3, 4].

Многие из разработанных к настоящему времени методик предрасчета характеризуются весьма низкими показателями достоверности количественной оценки уровней деформаций.

Наиболее предпочтительным вариантом решения указанных проблем следует признать применение математического моделирования геомеханических процессов всего подрабатываемого массива, с выявлением качественных характеристик деформационных процессов и обоснованием инженерных методов прогнозного расчета сдвижений и деформаций, предназначенных для их количественной оценки в различных горно-геологических условиях строительства подземных сооружений в мегаполисах.

В основу такого моделирования может быть положена методология механики сплошной среды. Конечно, горные породы, особенно подверженные техногенному воздействию, можно заменить сплошной средой лишь с некоторой долей условности. Однако погрешности от такой идеализации невелики, к тому же при определенной постановке схемы расчета их можно свести к минимуму. Применение мощных крепей и временного подкрепления обнажений при строительстве подземных сооружений способствует сдерживанию развития процесса перехода пород в запредельное состояние около контура выработок. Породы вокруг

выработки в основном деформируются плавно, без разрывов сплошности вплоть до земной поверхности.

Существенным моментом подобного моделирования является ориентация на достоверность отражения деформационных процессов в массиве без подробного рассмотрения механизмов работы крепи подземного сооружения. Последняя задача относится к области механики подземных сооружений, где методы механики сплошной среды (МСС) нашли широкое распространение и являются основой для инженерных методов расчета крепей [2].

В математическом моделировании геомеханических процессов следует выделить два основных направления реализации так называемых математических экспериментов. Первое опирается на аналитические решения типовых задач МСС, второе основано на применении численных методов, таких как метод конечных элементов (МКЭ) и метод граничных элементов.

Аналитические методы для моделирования сдвижений и деформаций не получили широкого распространения в практике расчетов, хотя именно они позволили акад. С.Г.Авершину еще в 40-е годы сформулировать ряд основополагающих закономерностей процессов сдвижений горных пород [1]. Несмотря на некоторую ограниченность возможностей (главным образом по возможностям учета всех геомеханических факторов), аналитические методы все же обладают рядом существенных преимуществ:

• позволяют получить зависимости, связывающие сдвижения (каковые возможно замерить в натуре) с параметрами в массиве, измерение которых осложнено или невозможно по техническим причинам (например, зависимость сдвижений на поверхности от сдвижений щелыги свода тоннеля);

• на их основе можно решать обратные задачи оценки физико-механических параметров породного массива по данным натурных измерений сдвижений;

• с их помощью легко построить инженерные методы прогнозного расчета сдвижений и деформаций.

Численные методы в настоящее время получили широкое распространение в основном в областях, смежных с геомеханикой сдвижений и деформаций. Наиболее распространенный метод численного моделирования – метод конечных элементов. Основные достоинства метода состоят в следующем:

• хорошо подходит для задач с неоднородными средами, такими как массивы горных пород;

• подходит для решения задач как в плоской, так и в пространственной постановках, что особенно важно для расчета сдвижений и деформаций в зоне массива около забоя выработки;

• позволяет достаточно просто организовать постадийный расчет с возможностью оценки влияния каждой стадии строительства сооружения.

К сожалению, оба подхода имеют и недостатки. Общей проблемой здесь является корректное задание исходных параметров среды (физико-механических свойств пород), которые полностью определяют количественную составляющую моделирования сдвижений.

Главным недостатком аналитического подхода является известная упрощенность теоретических расчетных схем МСС и невозможность учета ряда существенных особенностей процессов, характерных для геомеханических задач, связанных с анализом сдвижений.

Основными недостатками численного моделирования на основе МКЭ, помимо минусов самого метода (ограниченность применения, приближенность решения, конечность области расчета и др.), являются необходимость построения и расчета большого количества сложных моделей (при выявлении закономерностей для инженерных методик) и неудобства, возникающие при обобщении многочисленных и часто неоднородных данных.

Натурные измерения сдвижений и деформаций, традиционно применяемые для построения прогнозных методик, достаточ-

но хорошо проработаны, широко распространены и опробованы. Их результаты, обладая максимальной достоверностью (для данных условий), могут при определенных условиях позволить существенно дополнить математические модели.

Известный феноменологический принцип, используемый для построения математических моделей на основе установленных «внешних» закономерностей без раскрытия внутреннего механизма явлений, можно применять и в упомянутых аналитических задачах, если какой либо «геомеханический феномен» достоверно установлен из опыта проходки выработок.

Важнейшим принципом, определяющим перспективы получения достоверных инженерных методов оценки сдвижений и деформаций, следует признать организацию проведения комплексных исследований с одновременным использованием всех указанных выше методов по каждому типу подземных сооружений и типу горно-геологических условий.

Применение комплексного подхода к изучению процессов возникновения и развития деформационных процессов в породном массиве и на земной поверхности, включающего использование аналитических решений, численного моделирования, натурных и лабораторных данных, а также феноменологических гипотез и моделей, позволило:

• объяснить проявление эффекта несимметричности распределения вертикальных и горизонтальных сдвижений на контуре тоннеля и в породном массиве при гидростатическом поле природных напряжений и предложить аналитическую схему расчета сдвижений с учетом этого эффекта для анизотропных (трансверсально-изотропных) глин;

• обосновать учет в аналитических расчетах эффекта вертикальной несимметричности распределения сдвижений в массиве относительно горизонтальной оси тоннеля на основе специального интегрирования распределения деформаций из классических симметричных решений МСС;

• объяснить природу геомеханических процессов и построить аналитическую схему расчета сдвижений с учетом эффекта нарастания оседаний над уже закрепленным участком тоннеля даже для плоских постановок задач;

• оценить влияние временного и постоянного крепления выработки на развитие деформаций в подрабатываемом массиве и обосновать методы учета его учета в расчетах сдвижений и деформаций;

• разработать методы оценки свойств массива горных пород по данным натурных наблюдений на основе аналитических решений, которые позволяют обеспечивать достоверность математического моделирования;

• построить методику корректировки прогноза сдвижений на основе мониторинговых измерений деформаций контура выработок с помощью зависимостей из аналитических решений;

• обосновать достоверные инженерные методы прогнозных расчетов сдвижений и деформаций земной поверхности при строительстве одиночных подземных сооружений;

• предложить принципы моделирования сдвижений и деформаций при строительстве сложных многокомпонентных подземных сооружений, обеспечивающие корректную оценку величин возможных оседаний земной поверхности;

• предложить варианты мер защиты объектов на земной поверхности, основанные на организации воздействия на массив с целью изменения свойств его участков рядом с сооружаемой выработкой.

Выводы

Построение достоверных прогнозных методов расчета сдвижений в породном массиве при строительстве подземных сооружений, а также инженерных методов прогнозной оценки сдвижений и деформаций на земной поверхности должно опираться на применение подходов, синтезирующих аналитические, численные и натур-

ные методы, где ключевое место в определении входных данных для моделирования отводится обратным аналитическим задачам и эмпирическим данным по сдвижениям.

Достоверная прогнозная оценка деформационного воздействия на здания и сооружения позволит грамотно построить мониторинговые исследования на земной поверхности и в горных выработках, которые в свою очередь помогут скорректировать ранее сделанные оценки, например на основе прямой аналитической связи значений сдвижений на контуре выработки и на земной поверхности.

Рассмотрение физического механизма геомеханических процессов в массиве может позволить разработать методы снижения вредного воздействия от горных работ и обосновать их параметры. Наиболее актуальными подходами к решению задач в этой сфере следует признать разработку весьма перспективных и пока плохо проработанных методов воздействия на массив.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Авершин С.Г.* Сдвижение горных пород при подземных разработках. М.: Углетехиздат, 1947.

2. *Булычев Н.С.* Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1982.

3. Инструкция по наблюдениям за сдвижениями земной поверхности и расположенных на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооружений. РД 07-166-97. М., 1998.

4. Пособие по проектированию мероприятий для защиты эксплуатируемых зданий и сооружений от влияния горнопроходческих работ при строительстве метрополитена. Л.: Стройиздат, 1973.

REFERENCES

1. *Avershin S.G.* Subsidence of rocks at underground minings. Moscow: Ugletehizdat. 1947.

2. *Bulychyov N.S.* Mechanics of underground constructions. Moscow: Nedra, 1982.

3. The instruction on supervision for displacement a terrestrial surface and located on it objects at building in Moscow underground constructions. RD 07-166-97. Moscow, 1998.

4. The grant on designing of actions for protection of maintained buildings and constructions against influence горнопроходческих works at underground building. Leningrad: Stroyizdat, 1973.