УДК 624.131.7

© Р. А. Мангушев, д-р техн. наук, профессор

© Д. В. Пеньков, студент

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: ramangushev@yandex.ru, danokp@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-85-93

© R. A. Mangushev, Dr. Sci. Tech., Professor

© D. V. Penkov, student

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: ramangushev@yandex.ru, danokp@mail.ru

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ГРУНТА (HARDENING SOIL, HARDENING SOIL SMALL И GENERALIZED HARDENING SOIL) С РЕЗУЛЬТАТАМИ МОНИТОРИНГА

COMPARISON OF THE RESULTS OF NUMERICAL CALCULATIONS USING MODERN SOIL MODELS (HARDENING SOIL, HARDENING SOIL SMALL AND GENERALIZED HARDENING SOIL) WITH THE GEOTECHNICAL MONITORING RESULTS

Использование современных грунтовых моделей невозможно без проведения полного спектра лабораторных испытаний, требуемых для определения исходных расчетных параметров грунтов, и их дальнейшей верификации. Корректность проведения этих этапов оказывает существенное влияние на конечный результат численного моделирования. В работе сделан краткий обзор рассматриваемых моделей грунта, приведены результаты их верификации на примере геологии Санкт-Петербурга, а также выполнено сравнение результатов расчетов с использованием верифицированных (Hardening Soil, Hardening Soil Small и Generalized Hardening Soil) и неверифицированной (Hardening Soil) моделей грунта с данными мониторинга здания. В качестве примера описан способ моделирования подъема основания зданий окружающей застройки при использовании на соседней площадке буронабивных свай Fundex.

Ключевые слова: конечно-элементная программа PLAXIS, геотехнический мониторинг, грунтовая модель hardening soil, верификация грунтовой модели, трехосные лабораторные испытания.

The use of modern soil models is impossible without carrying out a full range of laboratory tests required to determine the initial soil parameters and their further verification. The correctness of these aspects has a significant impact on the final result of numerical modeling. This paper gives a brief overview of the investigated soil models, presents the results of their verification using the geology of St. Petersburg, and compares the results of their verification on the example of the geology of St. Petersburg. Furthermore, the calculation results are compared using verified soil models (Hardening Soil, Hardening Soil Small and Generalized Hardening Soil) and unverified soil models (Hardening Soil) with geotechnical monitoring data. As an example, the authors describe a method intended for modeling the upheaval of the base of buildings of the surrounding development when using Fundex bored piles on an adjacent site.

Keywords: FEA software PLAXIS, geotechnical monitoring, hardening soil model, soil model verification, triaxial laboratory tests.

Недоиспользование несущей способности грунтового массива вследствие недостаточно точной ее оценки может приводить к существенному увеличению экономических затрат при строительстве. Для решения этой проблемы разрабатываются и совершенствуются грунтовые модели, которые в сочетании с численными ме-

тодами расчетов позволяют увеличить точность прогноза основных параметров, отслеживаемых при мониторинге, таких как вертикальные и горизонтальные перемещения конструкций зданий окружающей застройки и ограждений котлованов, усилия в элементах ограждающих и распорных конструкций и т. д. [1, 2].

Для составления подобных моделей требуется проведение не только стандартных лабораторных (сдвиговых и компрессионных), но и более специфических (стабилометрических и динамических) испытаний. При этом должны предъявляться жесткие требования к качеству образцов и процедуре проведения лабораторных испытаний. Составленные по их результатам модели грунтов должны быть верифицированы.

В рамках проведенной работы было рассмотрено три вида моделей грунта:

1. Hardening Soil (HS) — упругопластическая модель грунта с механизмом двойного упрочнения (при сдвиге и при сжатии), что позволяет использовать ее при расчетах котлованов, подпорных стен и иных геотехнических объектов, для которых важно корректное описание процессов, происходящих при сдвиге. В модели реализована зависимость модулей деформации (E_{oed} — одометрический (касательный) модуль деформации при первичном нагружении в компрессионном приборе; E_{50} — секущий модуль деформации в приборе трехосного сжатия, соответствующий девиатору напряжений, равному половине от девиатора при разрушении; E_{ur} — модуль деформации при разгрузке) от напряженного состояния, что позволяет более точно описать прирост жесткости грунта с глубиной [3].

Характеристики, необходимые для задания модели грунта HS:

E_{oed}^{ref} , E_{50}^{ref} и E_{ur}^{ref} — E_{oed} , E_{50} и E_{ur} , соответственно, определенные при опорном значении напряжения P_{ref} ;

m — степенной параметр, определяющий зависимость модулей деформации от напряженного состояния;

R_f — коэффициент разрушения;

c' и φ' — прочностные характеристики грунта (удельное сцепление и угол внутреннего трения), определенные в эффективных напряжениях.

2. Hardening Soil Small (HSS) — модель, которая является логическим продолжением HS и позволяет более точно моделировать поведение грунта при малых деформациях. К набору характеристик модели HS добавляются дополнительные параметры (модуль сдвига при сверхмалых деформациях G_0^{ref} и пороговое значение сдвиговой деформации $\gamma_{0,7}$), для определения которых необходимо проведение динамических испыта-

ний грунта. Однако при их отсутствии для предварительной оценки можно воспользоваться корреляционными зависимостями [3–5]:

$$G_0^{ref} = 33 \frac{(2,97 - e)^2}{1 + e} \text{ [МПа]}, \quad (1)$$

где e — коэффициент пористости грунта, и

$$\gamma_{0,7} \approx \frac{1}{9G_0} \times$$

$$\times [2c'(1 + \cos(2\varphi')) - \sigma'_1(1 + K_0)\sin(2\varphi')], \quad (2)$$

где K_0 — коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя; σ'_1 — эффективное вертикальное напряжение.

3. Generalized Hardening Soil (GHS) — это следующая ступень развития моделей класса Hardening Soil. В ней реализована возможность более строгой настройки модели [6]:

- возможность включать один или оба механизма упрочнения в случае решения динамических задач, а также при необходимости оценить влияние одного из этих механизмов на конечный результат;

- возможность выбора закона изменения жесткости от напряженного состояния. В моделях HS и HSS модуль деформации зависит от прочностных характеристик грунта (c' и φ') и от напряжения (σ'_1 или σ'_3) в соответствии с формулой

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{\sigma'_3 + c' \operatorname{ctg} \varphi'}{P_{ref} + c' \operatorname{ctg} \varphi'} \right)^m. \quad (3)$$

В модели GHS вместо выражения (3) может быть использована зависимость от среднего эффективного давления p' и давления переуплотнения p_c , что позволяет добиться, например, более реалистичной картины поднятия дна котлована, а также более корректно описать характер компрессионной кривой:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{(p' + p_c)/2}{P_{ref}} \right)^m. \quad (4)$$

Для сравнения результатов расчета с использованием каждой из приведенных моделей грунта был выбран объект в Санкт-Петербурге, при строительстве которого велся мониторинг перемещений ограждения котлована и зданий окружающей застройки, а также были проведены лабораторные испытания (компрессионные с разгрузкой и стабилометрические

консолидированно-дренированные испытания), необходимые для составления перечисленных выше грунтовых моделей. Отметим, что динамические испытания на данной площадке не проводились, поэтому для моделей HS и GHS использовались корреляционные зависимости (формулы (1) и (2)).

В ходе работы была проведена обработка данных лабораторных испытаний с целью получения значений необходимых параметров, а также проведена верификация составленных моделей в виртуальной лаборатории SoilTest [7].

Результаты верификации одного из инженерно-геологических элементов приведены на рис. 1 и 2. Также на данных графиках приведены кривые, соответствующие модели HS, составленной с использованием таблицы физико-механических характеристик, которая представлена в каждом инженерно-геологическом отчете, и с учетом рекомендаций PLAXIS по составлению модели

грунта HS в случае отсутствия необходимого набора исходных данных.

Все три верифицированные модели достаточно точно описывают поведение образца грунта в стабилометрическом приборе (см. рис. 1). Однако модель HS, составленная по табличным данным, показывает существенное расхождение с результатами лабораторных испытаний, что вполне закономерно. Деформационные характеристики, приведенные в таблицах, не соответствуют тем, что необходимо использовать в моделях семейства HS (E_{oed}^{ref} , E_{50}^{ref} , E_{ur}^{ref}), которые, более того, необходимо определять при значении опорного давления, равного P_{ref} , а прочностные характеристики должны быть определены в эффективных напряжениях. При этом табличные характеристики не являются ошибочными — они просто не подходят для использования в моделях типа HS, так как были определены для других задач.

Рис. 1. Результаты верификации грунтовых моделей в ПК SoilTest по результатам стабилометрических испытаний

Описание компрессионных кривых моделями HS и HSS можно оценить как удовлетворительное, однако модель GHS справляется с этой задачей на достаточно высоком уровне (рис. 2), что можно объяснить возможностью использования альтернативной зависимости модуля деформации от напряженного состояния (формула (4)). Модель HS, составленная по табличным данным, ожидаемо не соответствует лабораторной кривой (причины аналогичны описанным выше).

Стоит отметить, что для толщи сильно и среднетекучих грунтов, залегающих на глубине $-0,700 \dots -5,400$ м от поверхности земли, применялась модель грунта Soft Soil, так как модели класса HS не могут описать компрессионную кривую, соответствующую подобным грунтам. Это связано с внутренними математическими ограничениями модели HS, которые позволяют задавать ее характеристики в достаточно строгом соотношении между собой.

Расчетная схема объекта, выбранного для сравнения результатов расчета в конечно-элементной программе PLAXIS 8-2D с использованием рассматриваемых моделей грунта, представлена на рис. 3. Отличительной чертой данного объекта было бурение свай Fundex после устройства замкнутого контура ограждающих конструкций, что привело к поднятию зданий окружающей застройки [8–10]. Для моделирования данного эффекта использовались два инструмента конечно-элементной программы PLAXIS: недренированный тип поведения грунта (Undrained A) и генерация дополнительных объемных деформаций (функция volume strain) вокруг свай (embedded beam element). Этапы расчета приведены в табл. 1.

Результаты расчетов и их сравнение с данными мониторинга представлены в графическом виде на рис. 4 и 5. Вертикальные перемещения здания окружающей застройки, вычисленные с

Рис. 2. Результаты верификации грунтовых моделей в ПК SoilTest по результатам компрессионных испытаний

Рис. 3. Расчетная схема: а — общая расчетная схема котлована с соседним сооружением; б — детализированный элемент расчетной схемы

использованием моделей HS, HSS и GHS, хорошо согласуются с результатами мониторинга.

Единственное ощутимое различие связано с максимальным значением подъема здания (см. рис. 4). Выделим несколько возможных причин данного отклонения:

1. Двухмерная постановка задачи в программе PLAXIS 8-2D, в рамках которой рассматрива-

ется расчетная схема шириной 1 м, не позволяет учесть всех нюансов реального взаимодействия конструкций и основания.

2. Упрощенное моделирование этапов производства работ: например, в реальности сваи не появляются все разом, из-за чего устройство каждой последующей сваи оказывает влияние на уже существующие. При этом сваи рассматрива-

Таблица 1

Этапы расчета

Стадия расчета	Название	Описание
<i>Initial Phase</i>	Естественное сложение	Грунтовый массив находится в естественном состоянии
<i>Phase 1</i>	Здание окружающей застройки	1. Активируется функция «Ignore undrained behaviour» для получения конечного значения осадки здания после рассеяния избыточного порового давления. 2. Активируется здание окружающей застройки с приложенными к нему нагрузками
<i>Phase 2</i>	Устройство ограждающих конструкций	1. Накопленные на предыдущей фазе перемещения сбрасываются. 2. Активируются элементы ограждения (plate и interface) и нагрузка на бровке котлована
<i>Phase 3</i>	Устройство буронабивных свай Fundex	1. Активируются сваи Fundex. 2. Задаются дополнительные объемные деформации (volume strain) в области вокруг свай, что приводит к генерации избыточного порового давления, за счет роста которого происходит поднятие здания окружающей застройки
<i>Phase 4</i>	Откопка пионерного котлована	Деактивируются кластеры грунта, соответствующие пионерному котловану
<i>Phase 5</i>	Устройство плиты перекрытия 1-го уровня	Активируются элементы, соответствующие плите перекрытия 1-го уровня
<i>Phase 6</i>	Этап I откопки котлована	1. Моделирование водопонижения. 2. Деактивируются кластеры грунта, соответствующие этапу I откопки котлована
<i>Phase 7</i>	Устройство плиты перекрытия 2-го уровня	Активируются элементы, соответствующие плите перекрытия 2-го уровня
<i>Phase 8</i>	Этап II откопки котлована	1. Моделирование водопонижения. 2. Деактивируются кластеры грунта, соответствующие этапу II откопки котлована
<i>Phase 9</i>	Рассеяние избыточного порового давления	Расчет проводится в режиме Consolidation, чтобы рассеять избыточное поровое давление и получить конечное значение осадки здания окружающей застройки

ются не как отдельные стержни, а как пластины, представленные в поперечном сечении. Кроме этого, двумерная постановка задачи не позволяет учесть влияние процесса производства работ на соседних участках.

3. Возможные неточности инженерно-геологической модели. В ходе расчета использовалась скважина, максимально близко расположенная к расчетному разрезу, однако очевидно, что реальная геологическая ситуация на удалении от нее может отличаться, что может приводить к различиям между результатами мониторинга и численным расчетом.

Верифицированные модели HS, HSS и GHS показывают весьма близкие результаты вплоть до последнего этапа откопки котлована. Ожидаемо, что модели HSS и GHS показывают меньшие

конечные значения перемещений, чем модель HS, за счет более точного моделирования работы грунта при малых деформациях. Однако эти результаты будут во многом зависеть от исходных значений G_0^{ref} и $\gamma_{0,7}$, которые следует уточнять при помощи динамических испытаний.

Расчетные вертикальные перемещения здания окружающей застройки, полученные по результатам расчета с использованием модели HS, составленной по табличным данным, по своему характеру весьма схожи с результатами мониторинга, однако различие в абсолютных значениях достигает 2–3 раз. Приведенный анализ наглядно иллюстрирует необходимость верификации составленных грунтовых моделей и степень ее влияния на конечный результат.

Таблица 2

Поднятие дна котлована по разным моделям, мм

Наименование модели	HS	HSS	GHS	HS по табличным данным
Подъем дна котлована, мм	72,1	57,0	44,8	80,0

Горизонтальные перемещения ограждения котлована на этапе I откопки для всех четырех моделей грунта оказались весьма близкими к результатам мониторинга (см. рис. 5), что можно объяснить тем, что пассивное и активное давления, оказывающие решающее влияние на деформации ограждения, по большей части зависят от удельного веса грунта, который во всех четырех моделях был принят одинаковым, и прочностных характеристик, значения которых также были близки (некоторое различие было обусловлено процедурой верификации).

В табл. 2 приведены значения вертикального подъема дна котлована, полученные при использовании каждой из рассматриваемых моделей. Следует отметить, что модель GHS показывает наименьшее значение подъема дна котлована, которое наиболее приближено к реальности, что достигается за счет использования формулы (4) для описания зависимости модуля деформации от напряженного состояния.

Выводы

1. Выбор используемой при расчетах в PLAXIS 8-2D модели грунта может оказать су-

щественное влияние на конечный результат (за счет учета дополнительных параметров), а границы применимости той или иной модели, как правило, лучше всего оцениваются в процессе ее верификации.

2. Для составления новых современных моделей грунта и их последующей верификации требуется наличие полного набора всех необходимых лабораторных испытаний (компрессионные испытания с разгрузкой и стабилметрические по консолидированно-недренированной или консолидированно-дренированной схеме — для HS; динамические испытания — для HSS и GHS). При этом большое внимание следует уделять качеству испытываемых образцов, а также

Рис. 4. Сравнение вертикальных перемещений здания окружающей застройки, полученных в ходе расчета, с данными мониторинга

Рис. 5. Сравнение горизонтальных перемещений ограждения на этапе I откопки котлована, полученных в ходе расчета, с данными мониторинга

отсутствию нарушений в процедуре проведения испытания.

3. Расчетные характеристики грунтов, приведенные в стандартных инженерно-геологических отчетах, далеко не всегда пригодны для их использования в моделях семейства HS, что проиллюстрировано путем сравнения результатов лабораторных исследований с результатами мониторинга (см. рис. 4).

4. Использование правильно верифицированных современных грунтовых моделей (например, HS и ее производных) позволяет более точно спрогнозировать поведение грунтового основания (и, как следствие, ограждающих конструкций и зданий окружающей застройки), принять наиболее оптимальные конструктивные

решения и избежать возможных непредвиденных экономических затрат.

5. В задачах, для которых требуется более точная оценка влияния нового строительства на окружающую застройку, следует прибегнуть к численным решениям по уточненным современным моделям в трехмерной (3D) постановке с последовательным моделированием каждого этапа работ.

Библиографический список

1. Likitlersuang S., Surarak C., Wanatowski D., Oh E., Balasubramaniam A. Finite element analysis of a deep excavation: A case study from the Bangkok MRT // *Soils and Foundations*. 2013. Vol. 53 (5). Pp. 756–773. DOI: 10.1016/J.SANDE.2013.08.013.

2. Law K. H., Othman S. Z., Hashim R., Ismail Z. Determination of soil stiffness parameters at a deep excavation construction site in Kenny Hill Formation // *Measurement*. 2014. Vol. 47. Pp. 645–650. DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT.2013.09.030.

3. Brinkgreve R. B. J., Kumarswamy S., Swolfs W. M. PLAXIS CONNECT Edition V20. Material Models Manual. URL: https://communities.bentley.com/cfs-file/__key/communityserver-wikis-components-files/00-00-00-05-58/PLAXIS2DCE_2D00_V21.00_2D00_03_2D00_Material_2D00_Models.pdf (дата обращения: 22/02.2021).

4. Hardin B. O., Black W. L. Closure on vibration modulus of normally consolidated clay // *Proc. ASCE: Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1969. Vol. 95. No. SM6. Pp. 1531–1537.

5. Obrzud R. F., Truty A. The hardening soil model — a practical guidebook. Revised 21.10.2018. URL: http://www.zsoil.com/zsoil_manual_2018/Rep-HS-model.pdf (дата обращения: 22.02.2021).

6. Laera A., Brinkgreve R. B. J. (eds.). PLAXIS. Site response analysis and liquefaction evaluation. 2015. Pp. 1–42.

7. Brinkgreve R. B. J. Validating geotechnical finite element models // *Computational Geomechanics, COMGEO III — Proceedings of the 3rd International Symposium on Computational Geomechanics*. 2013. Pp. 292–304.

8. Мангушев Р. А., Дьяконов И. П., Кондратьева Л. Н. Границы практического применения свай «Фундекс» в условиях слабых грунтов // *Жилищное строительство*. 2017. № 9. С. 3–8.

9. Дьяконов И. П., Конюшков В. В. Особенности работы набивной закручиваемой сваи «Фундекс» в разнородных грунтах // *Вестник гражданских инженеров*. 2014. № 6 (47). С. 116–120.

10. Мангушев Р. А., Ершов А. В., Осокин А. И. Современные свайные технологии. М.: ACB, 2010. 235 с.

References

1. Likitlersuang S., et al. Finite element analysis of a deep excavation: A case study from the Bangkok MRT.

Soils and Foundations, 2013, vol. 53 (5), pp. 756–773. DOI: 10.1016/J.SANDE.2013.08.013.

2. Law K. H., Othman S. Z., Hashim R., Ismail Z. Determination of soil stiffness parameters at a deep excavation construction site in Kenny Hill Formation. *Measurement*, 2014, vol. 47, pp. 645–650. DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT.2013.09.030.

3. Brinkgreve R. B. J., Kumarswamy S., Swolfs W. M. PLAXIS CONNECT Edition V20. Material Models Manual. Available at: https://communities.bentley.com/cfs-file/__key/communityserver-wikis-components-files/00-00-00-05-58/PLAXIS2DCE_2D00_V21.00_2D00_03_2D00_Material_2D00_Models.pdf (accessed: 22.02.2021).

4. Hardin B. O., Black W. L. Closure on vibration modulus of normally consolidated clay. *Proc. ASCE: Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1969, vol. 95, no. SM6, pp. 1531–1537.

5. Obrzud R. F., Truty A. *The hardening soil model — a practical guidebook*. Revised 21.10.2018. Available at: http://www.zsoil.com/zsoil_manual_2018/Rep-HS-model.pdf (accessed: 22.02.2021).

6. Laera A., Brinkgreve R. B. J. (eds.). PLAXIS. *Site response analysis and liquefaction evaluation*, 2015, pp. 1–42.

7. Brinkgreve R. B. J. Validating geotechnical finite element models. *Computational Geomechanics, COMGEO III — Proceedings of the 3rd International Symposium on Computational Geomechanics*, 2013, pp. 292–304.

8. Mangushev R. A., D'yakonov I. P., Kondrat'eva L. N. *Granitsy prakticheskogo primeneniya svay «Fundeks» v usloviyakh slabyykh gruntov* [The limits of practical application of Fundex piles in conditions of weak soils]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing construction*, 2017, no. 9, pp. 3–8.

9. D'yakonov I. P., Konyushkov V. V. *Osobennosti raboty nabivnoy zavinchivaemoy svai «Fundeks» v raznorodnykh gruntakh* [Features of screw-pile “Fundex” performance in heterogeneous soils]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2014, no. 6 (47), pp. 116–120.

10. Mangushev R. A., Ershov A. V., Osokin A. I. *Sovremennye svaynye tekhnologii* [Modern pile technologies]. Moscow, ASV Publ., 2010, 235 p.