

Солодей Иван Иванович*доктор технических наук, профессор
кафедра строительной механики,**Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев*

ORCID: 0000-0001-7638-3085

Затылюк Герман Анатольевич*аспирант,**кафедра строительной механики,**Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев*

ORCID: 0000-0003-0392-2214

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРУНТОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Solodei I.I.*Doctor of Technical Sciences, Professor,**Department of Structural Mechanics,**Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv*

ORCID: 0000-0001-7638-3085

Zatyliuk Gh. A.*Postgraduate student, Department of Structural Mechanics,**Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv*

ORCID: 0000-0003-0392-2214

USING SOIL MODELS IN NUMERICAL SIMULATION OF UNDERGROUND STRUCTURES

Аннотация. Современные тенденции к точному и детальному численному моделированию подземных сооружений на различных стадиях их жизненного цикла требуют для расчета использовать современные грунтовые модели. Выбор и применение грунтовых моделей, используемых при численном моделировании, а также теоретическое обоснование и методики определения их параметров являются достаточно острыми вопросами.

В практике проектирования для проведения геотехнических расчетов очень часто используется простейшая идеально упруго-пластическая грунтовая модель Кулона-Мора, которая имеет ряд недостатков, связанных с довольно грубыми результатами расчета.

Hardening Soil Model – усовершенствованная нелинейная модель грунта, которая является достаточно универсальной и подходит для моделирования широкого диапазона грунтов оснований, однако большое количество входных параметров, определение которых не регламентировано нормативными документами Украины, затрудняет возможность ее использования.

В связи с этим, еще одним вопросом, на который стоит обратить внимание, является создание и исследование методов получения более точных результатов расчета при использовании модели Кулона-Мора и применения модели Hardening Soil при недостаточном количестве входных параметров.

Summary. Current trends towards rigorous and detailed numerical simulation of underground structures at different life cycle stages need to use modern soil models for calculation. The selection and applications of soils models, used in numerical simulation, as well as the theoretical justification and select their parameters are a rather acute problem.

In design practice, for geotechnical calculations, the simplest perfectly elastic-plastic Mohr – Coulomb soil model is often used. The Mohr – Coulomb model suffer from a number of shortcomings associated with inaccurate calculation results.

The Hardening Soil Model is an advanced non-linear soil model that is quite generic and suitable for modeling a wide range of base soils. However, a large number of input parameters the definition of which is not regulated by regulatory documents of Ukraine makes it difficult to use.

Accordingly, the creation and study of methods for achievement of more precise calculation results using the Mohr–Coulomb model and the application of the Hardening Soil model with a deficiency of input parameters is another issue that should be addressed.

Ключевые слова: численное моделирование, грунтовая модель, модель Кулона-Мора, Hardening Soil Model, нелинейное деформирование подземных сооружений.

Keywords: ground pressure, rock pressure, arch collapse, arched effect, underground structure, finite element method.

Постановка проблемы. Современные программные комплексы, которые используют численные методы, в частности метод конечных элементов, в качестве своей теоретической базы

получили широкое применение при расчетном обосновании проектов строительства, эксплуатации и реконструкции.

Необходимость применения численных методов для исследования различных объектов продиктована трудоемкостью, а иногда даже невозможностью выполнения аналитического расчета вследствие сложности конфигурации и конструктивной схемы.

Возможности вычислительной техники и использование МКЭ позволили детализировать расчетные схемы, которые усложнились по сравнению с теми, что использовались ранее. Современные расчетные модели позволяют отразить действительные условия работы зданий и сооружений на различных стадиях их жизненного цикла.

Перельмутер и Кабанцев указывают на необходимость учитывать изменения расчетной схемы в процессе расчета сооружений, напряженно-деформированное состояние которых формируется постадийно при их возведении. На реальных примерах показано, что исследования идеализированных стационарных «завершенных» объектов, которые описаны как мгновенно и полностью созданы, приводит к существенным ошибкам и неточностям в полученных результатах расчета [1].

Фактически расчетная модель наследует напряженно-деформированное состояние при переходе от одной стадии к другой, поэтому задача является нелинейной. Такую нелинейность предложено называть генетической [2].

Особенно важно, для получения корректных результатов, моделировать процесс создания объектов подземного строительства. Поскольку процесс моделирования генетической нелинейности сопровождается удалением и включением элементов в систему («рождения» и «смерти» [1]), можно говорить, что разные области грунтового массива характеризуются различными графиками истории напряжений.

В [3] приведена такая история напряжений при расчете котлована: область под котлованом испытывает постепенную разгрузку на всех стадиях моделирования выполнения работ, а область за пределами ограждения котлована – попеременные разгрузки и нагружения. Кроме того, случай постепенной нагрузки также является характерным.

На рис. 1 изображен график зависимости деформаций от напряжений в грунтах при трехосных испытаниях. (А-В зона постепенной нагрузки, В-С - зона первичной разгрузки и С-D - зона повторного нагружения). На нем можно увидеть характер нелинейного поведения грунтов и то, что деформационные характеристики не являются постоянными величинами. На отрезке А-В с увеличением напряжений в грунте модуль деформации уменьшается, а в зоне «разгрузки повторного нагружения» приобретает большее значение.

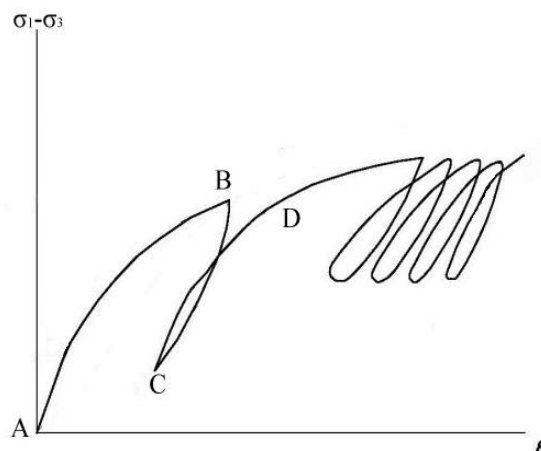


Рисунок 1. График зависимости деформаций от напряжений при испытаниях методом трехосного сжатия.

Кроме того, интересным является, что, изменив вид испытаний на компрессионные мы получим диаметрально противоположную кривую

зависимости деформаций от напряжений. Теперь наоборот прослеживается рост модуля деформации с глубиной (рис. 2).

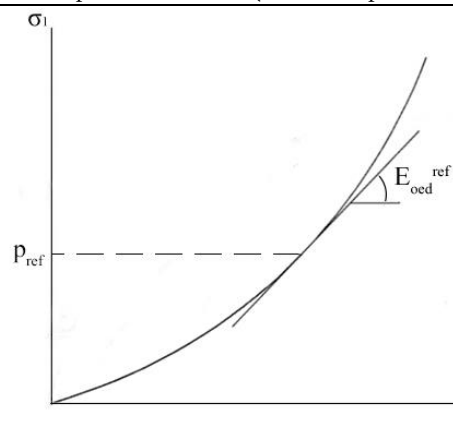


Рисунок 2. График зависимости деформаций от напряжений при испытаниях методом компрессионного сжатия и определение одометрического модуля E_{oed}

Также следует учитывать, что модуль деформации грунта возрастает при увеличении бокового давления (рис. 3).

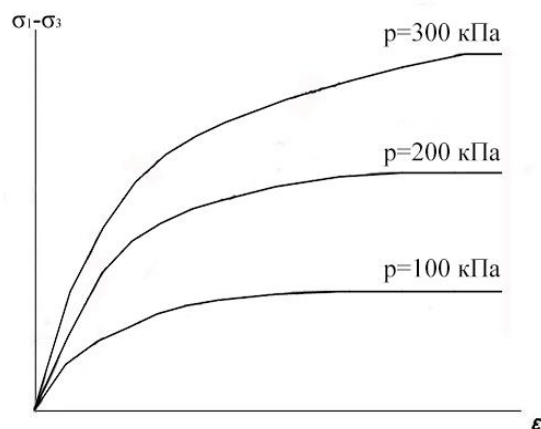


Рисунок 3. Упрочнение грунта при увеличении бокового давления

Анализ последних исследований и публикаций. Вопрос выбора и применения грунтовых моделей, используемых при численном моделировании, а также теоретическое обоснование и методики определения их параметров, является достаточно острым.

Данной тематике посвящены публикации Строковой [4, 5, 6], Тер-Мартirosяна и Мирного [7-9], Шашкина [10], Мельникова [11, 12] и т.д. [13-16]. Вышеупомянутые труды вносят неоценимый вклад в распространение использования современных грунтовых моделей при численном моделировании.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Современные тенденции требуют точного и детального численного моделирования объектов, в том числе и подземных сооружений. Такое моделирование должно в полной мере учитывать следующие особенности: сложный и нелинейный характер нагрузок, что приводит к возникновению в основании областей с разной историей напряжений, а также нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями. Корректное численное моделирование такого нелинейного деформирования подземных сооружений возможно

только с помощью современных грунтовых моделей.

С другой стороны, использование таких моделей на сегодняшний день является проблемным вопросом из-за их слабой распространенности и отличающейся традиции механики грунтов на территории стран постсоветского пространства от западной, большого количества входных параметров, определение которых не регламентировано нормативными документами Украины и недоступность качественной справочной литературы, поскольку большинство написано иностранными языками.

В то же время некоторые статьи, посвященные данной проблематике, имеют неточности, а иногда даже ошибки, связанные с особенностями западной традиции механики грунтов и сложностями перевода.

Цель статьи. Целью этой публикации является ознакомление широкого круга ученых и инженеров с современными моделями грунтов и входными параметрами, которые необходимы для их использования, а также принципами определения этих параметров.

Изложение основного материала. Сейчас при численном моделировании используются различные математические модели грунтов: Кулона-Мора, Hardening Soil Model и ее производные (Hardening Soil Small-strain), Soft Soil и ее производные, Cam-Clay и т.д. Они характеризуются разной степенью сложности и диапазоном использования. Преимущество простых моделей заключается в меньшем количестве входных параметров, а также в простоте уравнений. Однако, результаты моделирования в этом случае могут быть достаточно приближенными и не согласовываться с реальными данными. Сложные, усовершенствованные модели позволяют описать поведение грунтов более точно, но они требуют более широкого набора характеристик, которые необходимо определить экспериментальными методами, с применением специального оборудования, а также достаточной осведомленности и опытности инженера при выборе модели, ее параметров и анализе полученных результатов расчетов.

В практике проектирования для проведения геотехнических расчетов очень часто используется простейшая упруго-пластическая грунтовая модель Кулона-Мора, которая основана на законе Гука и условии прочности Кулона. Эта модель требует определения всего четырех расчетных параметров: модуля общей деформации E , коэффициента Пуассона ν , сцепления c и угла внутреннего трения φ .

Данная модели является билинейной и деформационные характеристики грунта (модуль деформации грунта и коэффициент Пуассона) принимаются постоянными величинами на протяжении всей упругой работы грунта до момента, когда напряжения достигают зоны пластических деформаций. На самом деле, о чем говорилось выше, грунты всегда ведут себя нелинейно, а деформационные характеристики грунтов не являются постоянными величинами и изменяются в зависимости от напряжений в массиве грунта и способа приложения нагрузок.

Учитывая нелинейность реального деформирования грунтов, встает вопрос выбора модуля деформации. На практике он принимается в диапазоне напряжений, в которых, как ожидается, будет «работать» основание. Кроме того, для некоторой унификации в зарубежных программных комплексах используется секущий модуль деформации E_{50} при 50% прочности, который определяют с помощью метода трехосного сжатия.

Правила определения этого модуля не регламентируются нормативными документами Украины (в частности ДСТУ Б В.2.1-4-96 (ГОСТ 12248-96)), однако, можно найти в российском ГОСТ 12248-2010:

$$E_{50} = \frac{(\sigma_1)_{50} - \sigma_{1c}}{(\varepsilon_1)_{50}}, \quad (1)$$

$$(\sigma_1)_{50} = \frac{\sigma_{1f} + \sigma_{1c}}{2}, \quad (2)$$

где σ_{1f} – напряжение при разрушении;

σ_{1c} – напряжение в конце этапа уплотнения;

$(\varepsilon_1)_{50}$ – значение ε_1 при $(\sigma_1)_{50}$.

Следует учитывать, что в результате использования этого модуля при напряжениях в массиве грунта меньших, чем 50% от предельных, модель Кулона-Мора может завышать деформации основания, тогда как при уровне напряжений более 50% от предельных – опасно занижать.

Другим недостатком данной модели является то, что в ней модуль деформации грунта при разгрузке и повторном нагружении E_{ur} равен модулю деформации грунта при первичном нагружении (рис.4 (б)).

На практике это означает, например, что при расчетах котлованов модель Кулона-Мора может дать завышенные нереалистичные величины поднятия дна котлована при моделировании процесса экскавации грунта.

На самом деле, в условиях разгрузки и повторного нагружки, модуль деформации грунтов E_{ur} больше E_{50} в 2 ... 7 раз (рис.4 (в)).



Рисунок 4. Идеально упруго-пластическая Модель Кулона-Мора [3].

а – сравнение билинейной диаграммы модели с графиком реального деформирования грунтов; б – использование единого модуля деформации как при первичном нагружении, так и при разгрузке-повторном нагружении; в – характерное для грунтов увеличение модуля деформации при разгрузке-повторном нагружении.

Другой усовершенствованной нелинейной моделью грунта, которая является достаточно универсальной и подходит для моделирования широкого диапазона грунтов оснований, является упруго-пластическая модель с упрочнением грунта

(Hardening Soil Model). В отличие от модели Кулона-Мора, данная модель использует гиперболическую зависимость деформаций от напряжений (рис.5), что более точно описывает реальное поведение грунтов (рис.1) и учитывает

упрочнение грунта при увеличении уровня напряжений (рис.3), то есть описывается зависимость модулей деформации от напряжений.

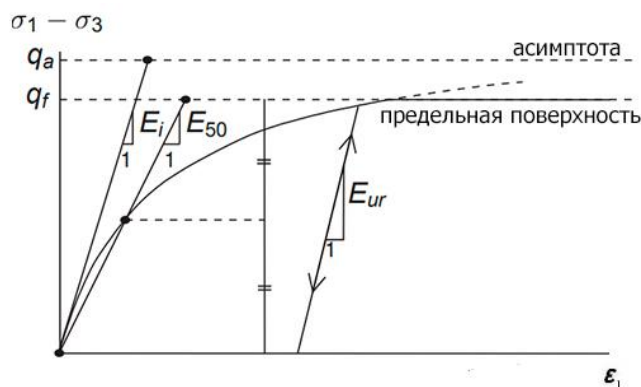


Рисунок 5. Гиперболическая зависимость деформаций от напряжений в модели Hardening Soil

Идеи аппроксимирования кривой «девиатор напряжений-деформации» гиперболической функцией были изложены в [17, 18], которые легли в основу модели Hardening Soil. Вообще данная модель не имеет единого автора, однако окончательно она была сформулирована в работе [19].

Кривая «девиатор напряжений-деформации» в модели описывается функцией:

$$\varepsilon = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{1 - \frac{q}{q_a}}, \quad (3)$$

где ε – деформации;

E_{50} – модуль деформации по секущей при 50% прочности;

q – девиаторные напряжения ($\sigma_1 - \sigma_3$)

q_a – асимптотическое девиаторное напряжения, к которому следует кривая зависимости.

В ПК Plaxis функция несколько видоизмененная [20]:

$$\varepsilon = \frac{1}{E_i} \frac{q}{1 - \frac{q}{q_a}}, \quad (4)$$

E_i – касательный модуль деформации. Из-за сложности лабораторного определения рассчитывается по формуле:

$$E_i = \frac{2E_{50}}{2 - R_f}, \quad (5)$$

где R_f – соотношение предельного расчетного q_f к асимптотическому (действительному предельному) девиаторному напряжению q_a :

$$R_f = \frac{q_f}{q_a}, \quad (6)$$

по умолчанию принимается 0,9.

Поскольку зависимость следует и никогда не достигает асимптотического значения, кривая ограничена предельным девиаторным напряжением q_f , который рассчитывается по закону Кулона:

$$q_f = (c \cdot \operatorname{ctg} \phi + \sigma_3) \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi}, \quad (7)$$

где σ_3 – минимальное главное напряжение (всестороннее давление);

c – удельное сцепление, является входным параметром модели;

ϕ – угол внутреннего трения, является входным параметром модели.

Зависимость деформационных характеристик от уровня напряжений (рис. 3) описывается формулами (перед σ_3 знак "-", поскольку напряжение сжатия в модели принимают отрицательные значения):

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \phi - \sigma_3 \sin \phi}{c \cos \phi + p^{\text{ref}} \sin \phi} \right)^m, \quad (8)$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \phi - \sigma_3 \sin \phi}{c \cos \phi + p^{\text{ref}} \sin \phi} \right)^m, \quad (9)$$

$$E_{oed} = E_{oed}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \phi - \frac{\sigma_3}{K_0^{\text{nc}}} \sin \phi}{c \cos \phi + p^{\text{ref}} \sin \phi} \right)^m, \quad (10)$$

где E_{50} , E_{ur} , E_{oed} – модули деформации, рассчитываются программой при различных значениях напряжений, отличных от p^{ref} ;

p^{ref} – опорное давление, является входным параметром модели;

E_{50}^{ref} , E_{ur}^{ref} , E_{oed}^{ref} – модули деформации, определяемые при всестороннем обжатии p^{ref} , являются входными параметрами модели;

m – показатель, характеризующий степень жесткости грунта, и задает кривизну указанных зависимостей, является входным параметром модели;

K_0^{nc} – коэффициент бокового давления в состоянии покоя, может быть определен в лабораторных или полевых испытаниях, или вычислен по формуле, которая в ПК Plaxis используется для данного коэффициента по умолчанию:

$$K_0^{\text{nc}} = 1 - \sin \phi \quad (11)$$

Очевидно, что в большом количестве входных параметров Hardening Soil Model и заключается сложность использования данной модели. Ведь она требует достоверного получения всех необходимых данных, качество которых должно быть гарантированной. Однако нахождение этих параметров не регламентировано нормативными документами. Поэтому очень важным вопросом является поиск опытного геотехника, который знаком с особенностями Hardening Soil Model, или личном толкованию лицу, которое будет выполнять испытания грунта, какие именно параметры необходимо определить и принцип их определения.

Прежде всего необходимо определить три модуля деформации грунта:

E_{50}^{ref} – секущий модуль деформации, принцип нахождения которого был описан выше. Добавим, что при выполнении трехосных испытаний необходимо задать обжатие грунта равным p^{ref} . Предел прочности используется не действительный, а определенный по формуле (7), поэтому формулы (1, 2) должны быть несколько модифицированы.

E_{ur}^{ref} – модуль деформации при разгрузке и повторном нагружении. Должен определяться из трехосных испытаний при значении обжатия p^{ref} .

E_{oed}^{ref} – одометрический модуль, который определяется с помощью компрессионных испытаний при опорном давлении p^{ref} (рис. 2). Необходим для определения объемной составляющей деформаций, поскольку в модели разделена сдвиговая и объемная составляющие деформаций. В модели используется две функции текучести: для девиаторного нагружения, которая стремится к предельной поверхности Кулона-Мора; для изотропной нагрузки – шатровая поверхность в виде эллипса, которые ограничивают область упругих деформаций и расширяются в процессе пластического деформирования (рис. 6).

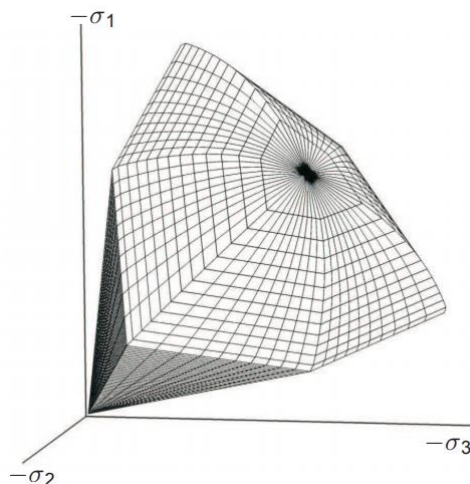


Рисунок 6. Суммарная поверхность текучести в пространстве главных напряжений для модели Hardening Soil [20]

Важным является выбор опорного давления p^{ref} , при котором будут определяться параметры с индексом ref. По умолчанию принимается равным 100 кПа (то есть примерно равным 1 атм, что привело к ошибочному обозначению в некоторых публикациях опорного давления p^{ref} атмосферным давлением), однако, при реальных исследованиях для более точного моделирования следует принимать в зависимости от глубины залегания ИГЭ, как давление на его кровле (минимальное для данного ИГЭ) с помощью эпюры вертикального давления и коэффициента бокового давления.

Важным параметром модели является показатель степени m в формулах (8-10), характеризующий зависимость жесткости грунта от уровня напряжений. В некоторых источниках m ошибочно называется параметром $Ohde$, в честь якобы автора этого параметра – немецкого ученого Оде. В действительности впервые описывать жесткость от бокового давления таким образом предложил Ямбу [21]. Показатель принимает значения от 0 (сжатие грунта происходит по линейному закону) до 1 (наблюдается существенная сжимаемость грунтов). На практике для модели Hardening Soil m принимается в диапазоне 0,5 ... 1, поскольку при значениях меньших 0,5 использования такой сложной модели нецелесообразно. Для определения m можно использовать формулу выведенной из (8-10):

$$m = \log \left(\frac{c \cos \phi + p \sin \phi}{c \cos \phi + p_{ref} \sin \phi} \right) \frac{E}{E^{ref}} \quad (12)$$

То есть, необходимо иметь два модуля деформации при различных значениях всестороннего обжатия p . Поскольку параметр m единый для всех трех формул (8-10), то возникает вопрос использования одного из трех модулей и, соответственно, выбора вида испытаний (трехосное или компрессионное). В [4] m определяется при компрессионных испытаниях, а в [9] более предпочтительными называют испытания трехосного сжатия. На наш взгляд, при выборе вида испытаний следует учитывать характер работы грунта. Если в них преобладают деформации сдвига (преимущественно грунты неглубокого залегания) следует выполнять испытания на трехосное сжатие, если объемные (преимущественно глубокое залегание грунтов) – компрессионные.

В Plaxis по умолчанию используется значение $m = 0,5$ как наименьшее из тех, что целесообразно использовать.

Такие параметры как сцепление c и угол внутреннего трения ϕ известны и определяются стандартными методами, а о коэффициенте бокового давления K_0^{pc} говорилось выше.

Модель может учитывать явление дилатансии по теории Rowe [22]. Поэтому угол дилатансии ψ также является входным параметром

модели, хотя и необязательным. Отсутствие регламентации по его определению в нормативных документах не является критическим для использования модели. При отсутствии опытных данных при значении $\phi > 30^\circ$ может приниматься по приближенной расчетной формуле (хотя в некоторых случаях возможны и отрицательные значения):

$$\psi = \phi - 30^\circ \quad (13)$$

Это основные и важнейшие параметры модели, ряд из которых, без существенного влияния на результаты, могут принимать значения, используемые по умолчанию. Наибольшего внимания следует уделить определению деформационных (E_{50}^{ref} , E_{ur}^{ref} , E_{oed}^{ref} , m) и прочностных (c , ϕ , ψ) характеристик.

Также необходимо упомянуть и о других важных вопросах, которые поднимаются на практике, связанные с отсутствием сложных грунтовых моделей в распространенных программных комплексах, с одной стороны, и сложностью нахождения всех входных параметров модели Hardening Soil, с другой. Этот вопрос поиска методов моделирования с использованием модели Кулона-Мора, которые позволят получить более точные результаты расчета, приближенные к полученным при использовании Hardening Soil Model. А также вопросы оценки возможности использования модели HSM с входными параметрами, полученными для модели КМ.

Так, можно использовать формулы для расчета приближенных значений для E_{ur} , E_{oed} :

$$E_{ur} = 3E_{50}, \quad (14)$$

$$E_{oed} = E_{50}, \quad (15)$$

В статье [14] используется методика увеличения модуля деформации с глубиной, рассчитанного по формуле (8) за счет разбиения ИГЭ на дополнительные слои, а также использование приближенного модуля деформации разгрузки и повторного нагружения E_{ur} , который предварительно рассчитанный по формуле (14) при моделировании экскавации грунта.

Кроме того, возможно использование двух модулей деформации для модели одновременно путем использования пар конечных элементов с различными деформационными характеристиками. Элементы с модулем E_{ur} активируются при моделировании экскавации грунта и повторном нагружении, при первичном же нагружении активируются элементы с модулем E_{50} .

Выводы и предложения. В статье рассмотрены особенности двух наиболее распространенных грунтовых моделей. Идеально упруго-пластическая грунтовая модель Кулона-Мора достаточно проста в использовании но имеет ряд недостатков, связанных с довольно грубыми результатами расчета. Модель Hardening Soil – усовершенствованная нелинейная модель грунта, которая является универсальной и подходит для

моделирования широкого диапазона грунтов оснований, однако большое количество входных параметров, определение которых не регламентировано нормативными документами, затрудняет возможность ее использования.

Кроме того, в статье рассмотрены вопросы создания и исследования методов получения более точных результатов расчета по использованию модели Кулона-Мора и применения модели Hardening Soil при недостаточном количестве входных параметров. По нашему мнению, исследования в этом направлении являются перспективными и требуют дальнейшего изучения.

Список литературы:

1. Перельмутер А. В. Анализ конструкций с изменяющейся расчетной схемой / А. В. Перельмутер, О. В. Кабанцев. – Москва: СКАД Софт, 2015. – 146 с.
2. Перельмутер А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Москва: СКАД СОФТ, 2011. 736 с.
3. Gouw Tjie-Liong. Common Mistakes on the Application of Plaxis 2D in Analyzing Excavation Problems / Tjie-Liong Gouw // International Journal of Applied Engineering Research. – 2014. – № 21. – С. 8291-8311
4. Строкова Л. А. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов / Л. А. Строкова. // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – №1. – С. 69–74.
5. Строкова Л. А. Корректировка параметров упругости упруго-пластической модели путем моделирования лабораторных испытаний / Л. А. Строкова. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2009. – №1. – С. 87-90
6. Строкова Л. А. Определение параметров деформируемости грунтов для упругопластических моделей / Л. А. Строкова. // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – №367. – С. 190-194
7. Тер-Мартirosян А. З. Особенности определения параметров современных моделей грунта в ходе лабораторных испытаний / А. З. Тер-Мартirosян, А. Ю. Мирный, Е. С. Соболев. // Геотехника. – 2016. – № 1. – С. 66-72.
8. Мирный А. Ю. Области применения современных механических моделей грунтов / А. Ю. Мирный, А. З. Тер-Мартirosян. // Геотехника. – 2017. – № 1. – С. 20-26.
9. Мирный А. Ю. Статистический анализ параметров модели HARDENING SOIL для грунтов московского региона / А. Ю. Мирный, К. А. Будюшкина, В. В. Шишкина. // Геотехника. – 2017. – № 4. – С. 58-64.
10. Шашкин А. Г. Критический анализ наиболее распространенных нелинейных моделей работы грунта / А. Г. Шашкин. // Инженерная геология. – 2010. – № 3. – С. 29-37.

11. Мельников Р. В. Компрессионные испытания грунта как способ определения параметров модели Hardening Soil / Р. В. Мельников. // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2014. – № 4. – С. 90-94.
12. Мельников Р. В., Сагитова Р. Х. Калибровка параметров модели Hardening Soil по результатам лабораторных испытаний в программе Soiltest / Р. В. Мельников, Р. Х. Сагитова. // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2016. – № 3. – С. 79-83.
13. Соколова О. В. Подбор параметров грунтовых моделей в программном комплексе Plaxis 2D / О. В. Соколова // Инженерностроительный журнал. – 2014. – № 4 (48) – С. 10-16
14. Голубев А. И., Селецкий А. В. Выбор модели грунта и её параметров в расчётах геотехнических объектов [Электронный ресурс] / А. И. Голубев, А. В. Селецкий // – 2010. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.nipinfor.ru/publications/10063/>.
15. Юдина И. М. К вопросу о выборе расчетной модели для прогнозирования напряженно-деформированного состояния грунтов при устройстве котлованов / И. М. Юдина, А. Н. Климов. // Вестник МГСУ. – 2008. – №2. – С. 145–149.
16. Кудашева М. И. Сравнение модели Мора-Кулона и модели упрочняющегося грунта в программном комплексе Plaxis [Электронный ресурс] / М. И. Кудашева, С. В. Калошина // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии. – 2017. – Режим доступа до ресурсу: <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=9>.
17. Kondner R. L. A hyperbolic stress strain formulation for sands. / R. L. Kondner. // 2nd Pan. Am. ICOSFE Brazil – 1962. – 1 – С. 289-324.
18. Duncan J. M.. Nonlinear analysis of stress and strain in soil. / J. M. Duncan, C. Y. Chang // ASCE J. of the Soil Mech. and Found. Div. – 1970. – 96. – С. 1629-1653.
19. Schanz T. The hardening-soil model: Formulation and verification./ T. Schanz, P. A. Vermeer, P. G. Bonnier. // In R.B.J. Brinkgreve, Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Balkema, Rotterdam. – 1999 – С. 281-290.
20. PLAXIS 3D 2018 – Material Models Manual [Электронный ресурс] // Режим доступа до ресурсу: https://www.plaxis.com/?plaxis_download=3D-3-Material-Models-1.pdf.
21. Janbu N. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. / N. Janbu // Proc. ECSMFE Wiesbaden. – 1963. – 1. – С. 19–25.
22. Rowe P. W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. / P. W. Rowe. // In Proc. Roy. Soc. A., – 1962. – No. 269. – С. 500–527.

Sopov V.P.

*Doctor of Technical Science, Professor of Department of Physical and Chemical Mechanics and Technology of Building Materials and Products
Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture*

Kazimagomedov I.E.

*Candidate of Technical Science,
Associate Professor of the Department of Building Materials
Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture*

Nalivayko T.T.

*assistant of the Department of Engineering Surveying
Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture*

INTENSIFICATION OF THE PROCESS OF REPLACEMENT OF FIBER CONCRETE SURFACES

Сопов В.П.

доктор технічних наук, професор кафедри фізико-хімічної механіки та технології будівельних матеріалів і виробів

Харківський національний університет будівництва та архітектури

Казімагомедов І. Е.

*кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів
Харківський національний університет будівництва та архітектури*

Наливайко Т.Т.

*асистент кафедри інженерної геодезії
Харківський національний університет будівництва та архітектури*

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПРОСОЧЕННЯ ФІБРОБЕТОННИХ ОБЛИЦЮВАЛЬНИХ ВИРОБІВ

Abstract. Improving the durability of fiberglass concrete products is achieved by filling the pore space with hardening fluids by impregnation. The article analyzes the existing methods of impregnation of concrete products. It was revealed that the most effective is the intensive mode of impregnation with excessive evacuation (degassing) of products. For this, a laboratory impregnation unit was used. The intensive mode of impregnation of fiberglass concrete allows additionally synthesizing calcium hydrosilicates in the pore space of the cement stone and on the