

HARDENING SOIL: ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

А. Д. Меркулова, ГК «Моспроект-3»

В. С. Зубарев, АО «Моспромпроект»

На сегодняшний день выбор грунтовых моделей для расчетов тоннельной обделки метрополитена ограничен. Однако специалисты компании «Моспромпроект», входящей в ведущий российский центр инженерных компетенций «Моспроект-3», решили использовать результаты испытаний под грунтовую модель Hardening Soil со смежных станционных комплексов и провести сравнение с моделью Мора-Кулона при расчетах тоннельной обделки. В настоящее время результаты изысканий под грунтовую модель Hardening Soil в компании «Моспромпроект» используют на всех станционных комплексах с котлованами глубиной более 15 м. Владислав Зубарев, начальник геотехнического отдела компании «Моспромпроект», рассказал о сравнении результатов применения инженерно-геотехнических изысканий под грунтовую модель Hardening Soil. По его расчетам, Hardening Soil дает явные отличия от модели Мора-Кулона в сторону уменьшения армирования тоннельной обделки метрополитена. Опыт инженеров холдинга показывает, что использование новых подходов в расчетах и изысканиях может обеспечить существенную экономию материалов ещё на этапе проектирования.

Вместе с глобальным внедрением BIM-технологий идет усложнение технологии проектирования, и появляются более сложные грунтовые модели в геотехнике, в частности при проектировании объектов метрополитена.

Согласно пункту 4 статьи 16 Федерального Закона № 384-ФЗ «Технического регламента о безопасности зданий и сооружений» [1], расчетные модели строительных конструкций и основания, в том числе расчетные схемы и основные предпосылки расчета, должны отражать действительные условия работы здания или сооружения, отвечающие рассматриваемой расчетной ситуации. При этом нужно учитывать физическую нелинейность.

Физическая нелинейность в работе грунтовой модели – это изменение деформационных свойств грунта при изменении уровня напряжений. Чем глубже он залегает, тем большее напряжение испытывает, тем он жестче и менее деформируем.

Модель грунта, которой геотехники пользовались продолжительное время до появ-

ления в отчетах параметров Hardening Soil (HS), – это модель Мора-Кулона (MC). И она является билинейной, то есть работает линейно с одним параметром деформируемости и имеет критерий прочности, после которого разрушается. Таким образом, ее использование не обеспечивает требований Федерального Закона № 384-ФЗ о нелинейности. Модель Hardening Soil как раз является физически-нелинейной моделью грунта, то есть при различных давлениях она меняет деформационные свойства и подходит требованию Закона.

В соответствии с пунктом 5.6.5.8 свода Правил СП 120.13330.2011 [2], расчеты тоннельных конструкций следует выполнять методами численного моделирования с использованием нелинейных моделей сплошных сред. Деформационные характеристики грунтового массива при использовании нелинейных грунтовых моделей должны определяться на основании натуральных и лабораторных исследований.

Для сравнения результатов по грунтовым моделям HS и MC на примере тестовых за-

дач рассмотрим порядок действий при проектировании тоннеля и сравним полученные результаты, используя результаты испытаний для HS со смежных станционных комплексов. После получения исходных данных, в том числе инженерных изысканий, выполняется расчет железобетонных конструкций обделки и подбор армирования. После анализа результатов инженерно-геологических и инженерно-геотехнических изысканий были выбраны два грунта со схожими физико-механическими свойствами, с одинаковым названием и строением, имеющие один и тот же геологический индекс. Различия этих грунтов связано только со статистической обработкой результатов и расположением площадок строительства, на которых они находятся (табл. 1).

Характеристики для грунтовой модели HS были приняты с двух смежных площадок и интерпретированы для перереза тоннеля. На рис. 1 представлены графики оптимизации с помощью математического моделирования в виртуальной лаборатории Plaxis Soil Test.

Таблица 1

Результаты анализа исходных данных

Геологический индекс	Наименование ИГЭ	Удельный вес грунта, кН/м ³	Коэффициент пористости,	Угол внутреннего трения, град.		Удельное сцепление, кПа		Модуль деформаций, МПа	Коэффициент Пуассона, д.е.
				0,85	0,95	0,85	0,95		
K ₁	39А песок мелкий плотный	20,7	0,51	36	36	8	7	36	0,32
	39Г песок мелкий плотный	20,3	0,56	36	36	7	7	38	0,31

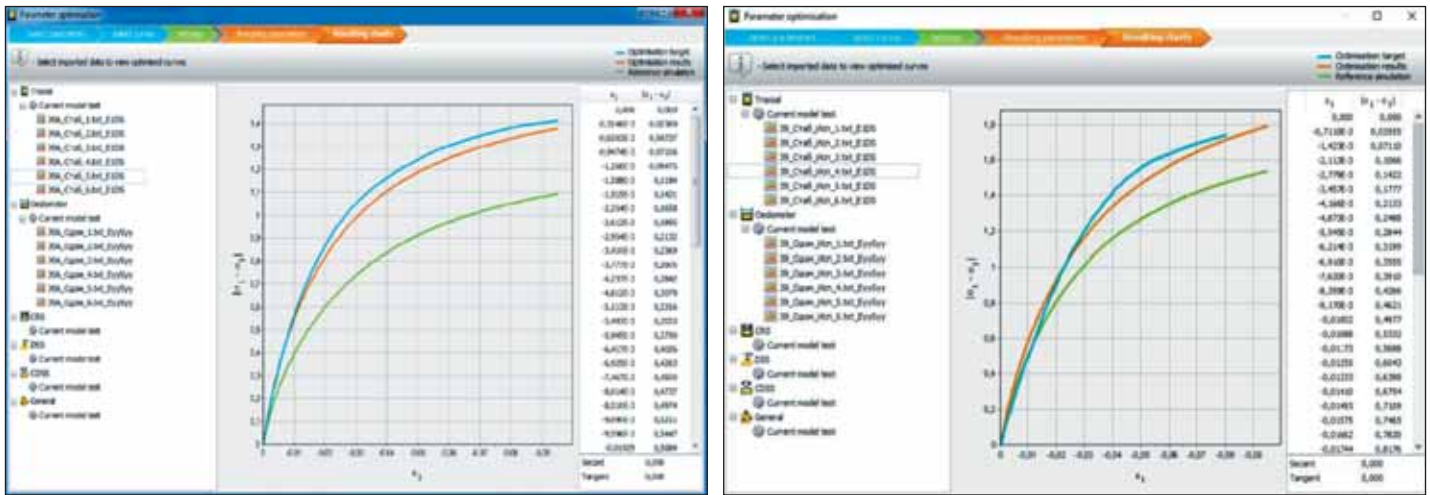


Рис. 1. Оптимизация параметров РГЭ-39А и РГЭ-39Г в виртуальной лаборатории Plaxis Soil test

Лабораторные испытания в стабилометре для грунтовой модели HS были выполнены при боковых давлениях на образец, превышающих природное боковое давление для расчетных грунтовых элементов, вмещающих тоннели, а именно на соответствующих вертикальному давлению или более высоких.

Целями данной работы являлись:

- сравнение результатов расчета внутренних усилий в конструкциях тоннельной обделки при использовании различных грунтовых моделей;
- определение чувствительности результатов расчета от выбора определяющих параметров грунтовых моделей;
- сравнение результатов расчета при изменении условий работы железобетонных конструкций.

Расчеты проводились для двух схожих грунтов, залегающих на двух разных площадках строительства примерно на одной глубине. При моделировании не учитывались внешние нагрузки и грунтовые напластования. Глубина залегания тоннеля выбиралась соответствующей:

- реальной глубине залегания слоя;
- опорному давлению, выбранному для испытания данных грунтов;
- давлению, превышающему давление при испытаниях.

Для чистоты эксперимента в расчетах принимался однородный грунтовый массив. При использовании модели MC учитывалась зона разгрузки под тоннелем.

На рис. 2 представлены графические интерпретации расчетных схем для РГЭ-39А и РГЭ-39Г.

Схемы соответствуют следующим величинам бокового давления грунта:

- для бокового давления равного 250 кПа, что соответствует давлению естественного залегания;
- для давления 500 кПа и 750 кПа для РГЭ-39А и РГЭ-39Г, что соответствует опорному давлению при испытаниях;
- для 750 кПа и 1000 кПа для РГЭ-39А и РГЭ-39Г – превышающее опорное давление при испытаниях.

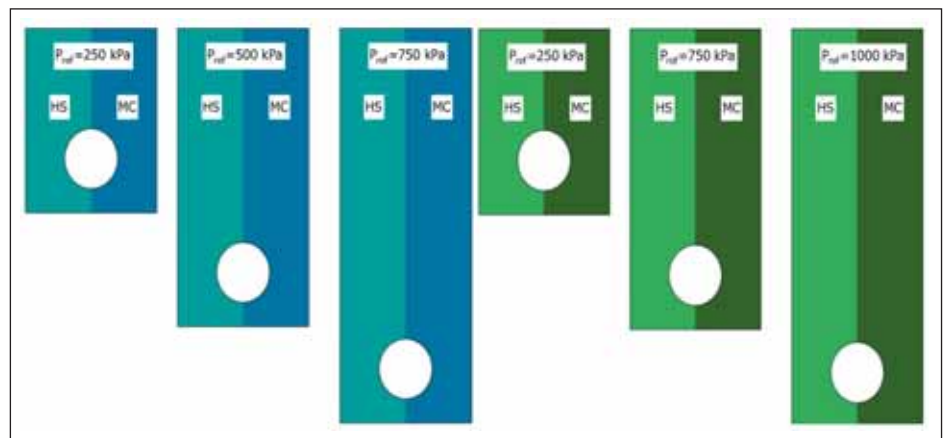


Рис. 2. Расчетные схемы для РГЭ-39А

Расчетные схемы для РГЭ-39Г

Значения максимальных изгибающих моментов для двух грунтовых моделей MC и HS представлены в табл. 2, которая показывает, что на всех трех глубинах в модели HS значения получились меньше, и разница может достигать почти 40 %.

В табл. 3 показаны значения максимальных изгибающих моментов для двух грунтовых моделей MC и HS для РГЭ-39Г. На всех трех глубинах в модели HS значения получились меньше, и разница достигает 33 %.

По результатам выполненных расчетов можно сделать следующие выводы:

- осевое усилие практически не зависит от выбранной модели грунта (разница до 7 %) и возрастает с увеличением глубины;
- максимальный изгибающий момент, полученный в модели HS, всегда ниже по значению, чем в модели MC и возрастает с увеличением глубины;
- характер увеличения изгибающего момента с глубиной в модели HS практически не зависит от выбранного опорного давления;
- для расчетов тоннеля в модели HS при естественном залегании уже свойственна разница получаемых моментов от модели MC порядка 25 %. При заглублении тоннеля соотношение остается таким же.

Таблица 2

Результаты расчетов обделки по моделям MC и HS (РГЭ-39А)

Боковое давление	Усилие	MC	HS	Разница	
250 кПа естественное залегание	M, кН/м	420,9	311,9	109	26%
	N, кН/м	-2273	-2193	80	3,5%
500 кПа соответствует P _{ref}	M, кН/м	765,5	504,2	261,3	34%
	N, кН/м	-3895	-3750	145	3,8%
750 кПа превышает P _{ref}	M, кН/м	1211	741,4	469,6	39%
	N, кН/м	-5876	-5627	249	4,3%

Таблица 3

Результаты расчетов обделки по моделям МС и НS (РГЭ-39Г)

Боковое давление	Усилие	МС	НС	Разница	
250 кПа естественное залегание	M, кНм/м	429,1	420,4	8,7	2%
	N, кН/м	-2143	-2085	58	2,7%
750 кПа соответствует P_{ref}	M, кНм/м	1346	987,9	358,1	27%
	N, кН/м	-5962	-5615	347	5,8%
1000 кПа превышает P_{ref}	M, кНм/м	1843	1246	597	33%
	N, кН/м	-7656	-7434	522	6,6%

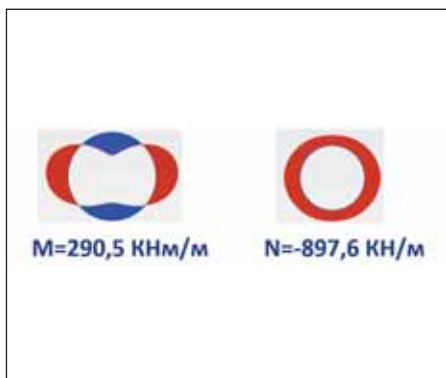


Рис. 3. Результаты расчетов обделки по модели МС

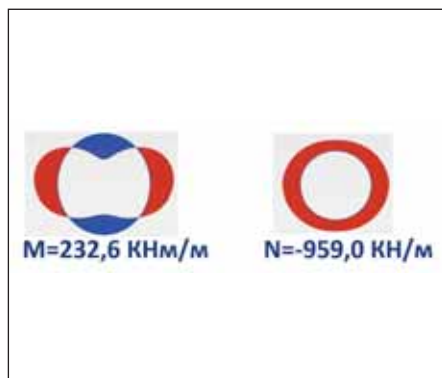


Рис. 4. Результаты расчетов обделки по модели НS

Таблица 4

Сравнение результатов по моделям НS и МС

Параметр	Модель МС	Модель НS	Разница	
Усилия	M = 290,5 кНм/м	M = 232,6 кНм/м	57,9 кНм/м	25%
	N = -897,6 кН/м	N = -959,0 кН/м	61,4 кН/м	6,5%
Армир. на 2 стор.	42 + 42 ст. Ø12	32 + 32 ст. Ø12	10+10 ст. Ø12	32,3%
Вес арм. 1 кол./1000 кол	1,38т/1380 т	1,05 т/1050 т	0,33 т/ 330,0 т	31,4%

Далее сравним результаты по грунтовым моделям НS и МС на примере реального перегонного тоннеля.

На линии вдоль Калужского шоссе в Коммунарку имеются инженерно-геотехнические изыскания, включающее в себя параметры для использования модели НS под станционные комплексы. Геологические условия на станционных комплексах схожи с перегонными. Поэтому для сравнения используем результаты расчетов шестиметровой обделки на перегоне от станции «Улица Новаторов» до станции «Улица Академика Опарина», пользуясь параметрами модели НS со станционных комплексов.

По данным расчетов, полученных по модели МС (рис. 3), результирующие усилия в

обделке тоннеля: слева – изгибающий момент в обделке, справа – осевая сила.

По результатам подбора армирования принимаем, что блоки армируются в две сетки с каждой стороны сечения. Первая сетка из 28 арматурных стержней диаметром 12 мм, вторая – из 14 арматурных стержней диаметром 12 мм. Обделка армируется снаружи и внутри тоннеля одинаково, так как обычно усилия снаружи и внутри схожи по значениям и это проще при изготовлении блоков на заводе. Критическим условием подбора армирования обычно, как и в данном случае, выступает длительная ширина раскрытия трещин. Коэффициент использования здесь составил 0,968.

По данным расчетов, полученных по модели НS (рис. 4), результирующие усилия в обделке тоннеля: опять же, слева – изгибающий момент в обделке, справа – осевая сила. Как видно, значение изгибающего момента упало, а продольной силы возросло, что благоприятно влияет на работу железобетонного сечения. Другими словами, арматуры в конструкции должно стать меньше.

По результатам подбора армирования принимаем, что блоки армируются так же в две сетки с каждой стороны сечения. Первая сетка из 28 арматурных стержней диаметром 12 мм, а вторая – из четырех арматурных стержней диаметром 12 мм, что на десять стержней меньше, чем при использовании модели грунта МС. Критическим условием подбора армирования здесь к тому же является длительная ширина раскрытия трещин. Коэффициент использования составил 0,986. Полученные расчеты представлены в сравнительной табл. 4.

По усилиям разница составила 25 и 6,5 % по моменту и продольной силе соответственно. Армирование на обе стороны сечения отличается на 32,3 % или на десять стержней арматуры диаметром 12 мм с каждой стороны, вес арматуры – на 31,4 %, что составляет 330 кг на одно кольцо, а на 1000 колец – 330 т. Количество колец с таким армированием на перегоне «Улица Новаторов» – «Улица Академика Опарина» составляет порядка 2,5 тысячи штук. То есть на этом перегоне разница составила бы 811,8 т.

На основании выполненных расчетов можно сделать следующие выводы:

- НS позволяет выполнить требования Федерального Закона № 384-ФЗ об учете физической нелинейности;
- НS требует большей квалификации инженеров;
- при проектировании обделки использование НS позволяет снизить армирование от 12 до 32 %;
- чем ближе опорное давление при испытаниях грунта к значению бокового давления, соответствующему природному залеганию грунта, тем больше разница в значениях изгибающего момента между НS и МС, а значит, в армировании блоков обделки.

Ключевые слова

Геотехнические изыскания, физически нелинейная модель грунта, расчет тоннельной обделки.

Список литературы

1. Федеральный Закон № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»
2. СП 120.13330.2011 Метрополитены.

Для связи с авторами

Меркулова Анна Дмитриевна
Зубарев Владислав Сергеевич
vzubarev@mospp.ru

