УДК 624.15: 624. 131:551 + 471

**Р.Э.ДАШКО, А.В.ВОЛКОВА**
*Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)*

# ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОРЕННЫХ ГЛИН САНКТ-ПЕТЕРБУРГА КАК ТРЕЩИНОВАТО-БЛОЧНОЙ СРЕДЫ

Рассмотрены особенности строения массива коренных глин Санкт-Петербурга как трещиновато-блочной среды. Проанализирован генезис формирования трещин за счет тектонических и нетектонических факторов, отмечается зональность строения толщи глин по глубине разреза, которая определяется размером блока и диапазоном изменения влажности и плотности. Приведены закономерности изменения параметров сопротивления сдвигу и модуля общей деформации глин по глубине, а также влияние масштабного эффекта на те же параметры механических свойств.

The peculiarities of bed clays massive structure in Saint-Petersburg as the block-fissure medium are considered. The genesis of fissures' formation in the bedclay massive due to tectonic and no tectonic factors is analyzed. The zone structure of bedclays massive according to the profile depth that depends on block size and range of moisture and density variation is noted. The regularities of bed clays shear strength parameters changes and its deformation module according to the depth as well as impact of scale effect are represented.

В пределах Санкт-Петербургского региона наиболее широким распространением среди дочетвертичных пород пользуются глины верхнего венда и нижнекембрийские синие глины лонтовасского горизонта. В верхнекотлинских глинах проходит большая часть перегонных тоннелей метрополитена, а также проводится строительство глубоких канализационных коллекторов. Кроме того, верхнекотлинские глины венда могут служить несущим горизонтом для свай различного типа. В западной части Санкт-Петербурга, в пределах о.Котлин, эти глины используются как основание для сооружений различного назначения. В пределах южной части Большого Санкт-Петербурга отложения венда перекрыты толщей нижнекембрийских синих глин, которые рассматриваются как объект многоцелевой инженерной деятельности в следующих случаях:

- в качестве естественного основания сооружений и основания для свайных фундаментов;
- как среда размещения (в перспективе) тоннелей метрополитена;
- как геологическая формация для захоронения опасных промышленных (в том числе и радиоактивных) отходов;
- как среда для автодорожных тоннелей.

Традиционный подход к инженерно-геологической оценке верхнекотлинских глин венда и нижнекембрийских синих глин базируется на предположении, что эти образования являются квазиоднородными по составу и свойствам как по глубине, так и по площади. Подобный подход к строительной оценке коренных глин обычно приводит к некорректным выводам о возможной стабильности условий функционирования подземных и наземных сооружений. Особо опасная ситуация складывается при размещении в толще этих глин глубоких канализационных коллекторов, поскольку возможные утечки из них могут привести к негативным изменениям состояния и свойств этих глин и создадут реальную опасность разрушения обделки тоннелей, а также осадок дневной поверхности за счет трансформации напряженно-деформированного со-

стояния глин и вышележащей толщи четвертичных относительно слабых отложений.

Известно, что Санкт-Петербург расположен в области сопряжения двух крупных структур – Балтийского щита и Русской плиты, что предопределило особенности проявления тектонического фактора. В пределах города зафиксировано четыре системы тектонических разломов, по которым происходило формирование палеодолин в коренных породах осадочного чехла, – в верхнекотлинских глинах венда, а в южной части города – в нижнекембрийских синих глинах. Глубина вреза ряда палеодолин достигает 120 м, а площадь составляет более 30 % площади города. Такие разломы определяют блоковое строение территории города, а также наличие трещиноватости в коренных породах венда и нижнего кембрия. Интенсивность трещиноватости пород возрастает в зонах, примыкающих к разломам.

Тектоническая и литогенетическая трещиноватость создает блочное строение толщи глин. Размер блока зависит от положения разреза по отношению к разлому, а также наличия и характера слоистости пород. Кроме того, в верхней части толщи глин отмечается нетектоническая трещиноватость, которая фиксируется приблизительно до глубины 40 м в верхнекотлинских глинах, а в нижнекембрийских глинах – до 15-20 м.

Нетектоническая трещиноватость формировалась за счет процессов палеовыветривания, поскольку эти глины около 70 млн лет назад были выведены на дневную поверхность в пределах Санкт-Петербургского региона. В ледниковый период описываемые породы испытали несколько циклов нагрузки-загрузки, при этом давление от ледникового покрова достигло 25 МПа. В этот период шло формирование трещин упругого отпора (при снятии нагрузки), морозобойного растрескивания и морозного выветривания, а также за счет явлений гляциотектоники. Зарубежные исследования показали, что имеются три системы гляциотектонических трещин, одна из которых простирается по направлению движения ледника, а две другие – перпендикулярны ей.

В бортах погребенных долин, прорезающих глины венда и кембрия, особенно отчетливо должны быть выражены трещины, расположенные параллельно бортам долины*.

В ледниковый период стадии прогрессивного и регрессивного литогенеза сменяли друг друга. В настоящее время рассматриваемые глины в пределах Санкт-Петербурга находятся на стадии развития регрессивного литогенеза и дополнительной гидратации, что повлекло за собой увеличение ее влажности в верхней части разреза.

Максимальная зона разуплотнения, где отмечается наибольший разброс значений влажности, в глинах венда составляет 50 м, и до 25 м в нижнекембрийских глинах (табл.1). Минимальные значения влажности верхнекотлинских глин обычно характерны для пород с низким содержанием глинистой фракции, а также окварцованных разностей. Разуплотнение и набухание описываемых пород на значительной глубине может быть объяснено наличием интенсивной трещиноватости, определяющей повышенную природную проницаемость толщи.

Наибольшие значения влажности для синих глин отмечаются в пределах первых десяти метров. Ниже этой глубины влажность пород постепенно уменьшается, с глубины 17-20 м изменяется в узком пределе – 15-18 % (табл.1). Интенсивность трещиноватости также убывает по глубине с одновременным возрастанием размеров блоков. Соответственно, толща верхнекотлинских и нижнекембрийских глин не может рассматриваться как однородная и монотонная. Учитывая особенности формирования этих глин, а также их свойства, необходимо анализировать рассматриваемые толщи как зонально-построенные**.

---

* *Дашко Р.Э.* Инженерно-геологические особенности коренных глин Санкт-Петербурга как среды для размещения подземных сооружений. Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий / Р.Э.Дашко, А.А.Еремеева // Материалы Международного симпозиума. Екатеринбург: АКВА-ПРЕСС, 2001. С.675-681.

** Там же.

*Таблица 1*

**Изменение степени трещиноватости и влажности верхнекотлинских и синих глин по глубине**

| Выделяемые зоны | Номер слоя | Глубина от кровли глин, м | Размер блоков, м | Диапазон изменения влажности, % |
|---|---|---|---|---|
| *Верхнекотлинские глины венда* | | | | |
| Переменной влажности и плотности | 1 | 0-20 | 0,10-0,50 | 12-23 |
| | 2 | 20-40 | 0,50-0,70 | 10-20 |
| Квазипостоянной влажности и плотности | 3 | 40-60 | 0,70-1,0 | 10-19 |
| | 4 | 60-75 | 1,2 | 10-17 |
| | 5 | > 75 | > 1,2 | 9-15 |
| *Нижнекембрийские синие глины* | | | | |
| Переменной влажности и плотности | 1 | 0-3 | 0,08-0,25 | 23-28*; 25-32** |
| | 2 | 3-10 | 0,25-0,40 | 21-25; 22-29 |
| | 3 | 10-20 | 0,38-0,60 | 17-21; 19-26 |
| Квазипостоянной влажности и плотности | 4 | 20-30 | 0,40-0,85 | 16-20; 18-24 |
| | 5 | 30-40 | 0,60-0,90 | 16-19; 17-23 |
| | 6 | > 40 | 1,0-1,40 | 15-18; 17-23 |

* Варьирование значения параметра вне зон тектонических разломов.

** В зонах тектонических разломов

Наличие трещиноватости в толще глин существенно сказывается на ее водопроницаемости, прочности и деформационной способности, что следует учитывать в процессе проектирования, строительства и эксплуатации зданий, сооружений и подземных выработок, а также при захоронении отходов*.

Исследование прочности и деформационной способности этих глин показали, что при лабораторных экспериментах большое влияние на результаты имеет аппаратура, используемая для определения прочности. Массовые определения прочности образцов нижнекембрийских глин в одноплоскостных срезных приборах (без возможности бокового расширения пород) и в стабилометрах (в условиях трехосного сжатия с ограниченным развитием боковых деформаций) продемонстрировали явное снижение сцепления и угла внутреннего трения при возможности бокового расширения (табл.2).

Для коренных глин характерна высокая степень чувствительности к всестороннему давлению. При значениях всесторонних давлений, отвечающих природным, большая часть образцов верхнекотлинских глин I зоны проявляют себя как квазипластичные разности (табл.3).

Значительный разброс показателей влажности, степени микротрещиноватости, сохранности структурных связей в наиболее разуплотненной I зоне предопределяет существенное варьирование показателей прочности и характера разрушения образцов в условиях трехосного сжатия.

Большой разброс результатов испытаний может быть объяснен наличием микро- и макротрещин в образцах пород и степенью их окварцованности.

Оценка прочности трещиноватого массива глин выполнена с помощью коэффициента структурного ослабления пород. Для уплотненных глинистых отложений это значение изменяется от 0,3 до 0,7. Более низкие значения обычно используются для определения прочности сильно трещиноватого массива, состоящего из блоков более жестких пород.

Определенные закономерности имеют также деформационные способности синих глин по глубине. Если в верхней зоне основное влияние на механические свойства глин оказывают их трещиноватость и влажность, то в нижней зоне, где породы характеризуются относительным постоянством физического состояния, решающее значение в оценке прочности приобретает микро- и макротрещиноватость (табл.4).

Разрушение образцов, отобранных из верхней зоны синих глин вне зон тектонических разломов, имеет хрупкопластический характер разрушения, а из зон тектонических узлов – только пластический, в отдельных случаях наблюдается разрушение образцов по уже существующим микротрещинам.

Как следует из анализа данных табл.3, наибольшее влияние на значение модуля общей деформации оказывает трещиноватость.

* См. *Дашко Р.Э. ...*

*Таблица 2*

**Изменение показателей свойств нижнекембрийских синих глин по глубине**

| Номер зоны | Глубина от поверхности, м | Влажность, % | Плотность, т/м³ | Размер блока, м | Прочность образца | | | | Относительная деформация разрушения образцов в стабилометре, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | При трехосных испытаниях | | В сдвижных приборах | | |
| | | | | | Сцепление, МПа | Угол внутреннего трения, град. | Сцепление, МПа | Угол внутреннего трения, град. | |
| I | 0-2,0 | 21,4-27,0 | 1,96-2,05 | 0,15-0,20 | 0,035-0,050 | 0 | 0,055-0,075 | 0-3 | 6,2 |
| II | 3,0-8,0 | 20,0-23,0 | 2,08-2,19 | 0,20-0,30 | 0,075-0,117 | 0-2 | 0,11-0,145 | 6-8 | 5,7 |
| III | 8,0-17,0 | 16,0-21,0 | 2,10-2,22 | 0,30-0,45 | 0,220-0,340 | 6-8 | 0,34-0,40 | 6-8 | 5,7 |
| IV | 17,0-26,0 | 15,5-18,0 | 2,15-2,28 | 0,50-0,60 | 0,40-0,52 | 6-8 | 0,48-0,55 | 6-9 | 5,2 |
| V | 26,0-40,0 | 15,5-18,0 | 2,14-2,22 | 0,60-0,70 | 0,57-0,68 | 8-10 | 0,60-0,68 | 8-12 | 4,6 |
| VI | Ниже 40,0 | 15,0-18,0 | 2,12-2,22 | 1,0-1,20 | 0,70-0,82 | 8-10 | 0,75-0,85 | 8-12 | 3,0 |

*Таблица 3*

**Параметры сопротивления сдвигу верхнекотлинских глин в различных зонах по глубине с учетом интенсивности их трещиноватости**

| Зона по глубине | Глубина зон, м | Параметры сопротивления сдвигу | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | в блоке (по результатам трехосных испытаний) | | в массиве | |
| | | *C*, МПа | φ, град | *C*, МПа | φ, град |
| I | 0-10,0 | 0,18 / 0,09 | 5 / 2 | 0,13 / 0,05 | 5 / 2 |
| | 10,0-20,0 | 0,86* 0,3** / 0,45 0,05 | 3* 24** / 18 | 0,43* 0,12** / 0,22 0,02 | 3* 24** / 18 |
| | 20,0-30,0 | 1,4 / 0,82 | 22 / 11 | 0,60 / 0,33 | 22 / 11 |
| | 30,0-40,0 | 2,04 / 1,10 | 23 / 18 | 0,82 / 0,56 | 23 / 18 |
| II | 40,0-60,0 | 2,80 / 1,9 | 23 / 19 | 1,12 / 0,62 | 23 / 19 |

*Примечание.* В числителе приведены значения *C* и φ для пород вне зон, а в знаменателе – в зонах тектонических разломов. * Квазипластичные разности. ** Непластичные разности с различными параметрами *C* и φ.

*Таблица 4*

**Сравнительная характеристика прочности и деформационной способности синих глин (по результатам трехосных испытаний)**

| Положение точек отбора образцов | Глубина от кровли глин, м | Модуль общей деформации, $E_0$, МПа |
|---|---|---|
| Вне зон тектонических нарушений | 0,0-3,0 | 15-20 |
| | 3,0-8,0 | 19-24 |
| | 8,0-17,0 | 20-25 |
| В зоне тектонических нарушений | 0,0-3,0 | 1,5-2,2 |
| | 3,0-5,0 | 3,0-6,6 |
| | 5,0-8,0 | 6,2-10,5 |

*Примечание.* Площадь образцов $f = 25 \div 26$ см².

В синих глинах отчетливо прослеживается влияние масштабного эффекта, о чем свидетельствуют результаты испытаний образцов различного размера (объема) при одинаковом отношении их высоты к диаметру при глубине отбора образцов 3-10 м:

| Площадь образца, см² | 20-26,5 | 40-48 | 98 |
|---|---|---|---|
| Прочность на одноосное сжатие, МПа | 0,70-0,92 | 0,24-0,50 | 0,105-0,140 |
| | 0,81/6* | 0,34/7 | 0,12/5 |
| $E_0$, МПа | 14-20 | 8-10 | 3-6 |
| | 16/6 | 8,5/7 | 4/5 |

* Среднее значение показателя / число определений.

Наиболее интенсивно проявляется масштабный эффект в образцах глин, отобранных из зон тектонических нарушений.

Следует также отметить, что при испытании образцов площадью около 100 см$^2$, значения параметров прочности и деформационной способности глин весьма близки к тем же показателям, которые были получены методом обратных расчетов при анализе аварийных ситуаций – разрушении зданий, построенных на синих глинах.

Обработка данных по исследованию масштабного эффекта дает возможность аппроксимировать эти результаты в виде экспоненциальной зависимости:

$$R = R_{max} \exp [K(F_{min} / F - 1)],$$

где $R$ – прочность образца на одноосное сжатие с площадью поперечного сечения $F$; $R_{max}$ – максимальная прочность образцов на одноосное сжатие; при минимальной площади исследуемых образцов – $F_{min}$; $K$ – эмпирический коэффициент; в данном случае близок к единице (0,98).

Таким образом, согласно результатам эксперимента, следует пересмотреть принципиальные подходы к оценке указанных глинистых пород, существующих в настоящее время в практике геомеханических, геотехнических и геоэкологических исследований при проведении расчетов устойчивости наземных и подземных сооружений, а также при трактовке проницаемости массива глин при складировании отходов.