

Н. Я. ДЕНИСОВ

## К ТЕОРИИ ДЕФОРМАЦИЙ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 25 X 1947)

Деформации мелкозернистых (глинистых и песчаных) горных пород представляют собой следствие перемещений их структурных элементов. Если этими структурными элементами являются узлы кристаллической решетки слагающих пород минеральных зерен, то возникающие при этом деформации могут относиться к категории как упругих, так и пластических. Эти деформации отображают пространственные изменения, происходящие внутри кристаллических зерен. При обычно применяющихся в строительной практике нагрузках порядка нескольких  $\text{кг/см}^2$  упругие деформации в глинистых породах не могут достигать размеров, представляющих какой-либо практический интерес. Пластические же деформации вообще могут проявляться лишь после того, как породы под влиянием процессов метаморфизма по своим свойствам приблизятся к состоянию сплошного твердого тела (1).

Так как широко распространенные глинистые породы представляют в отличие от обычных твердых тел, не сплошную среду, то в них проявляются особые виды деформаций, не свойственные твердым телам, в применении к которым разрабатывались положения теорий упругости и пластичности. Такими деформациями являются структурные (остаточные) и структурно-упругие (восстановимые) (1), возникающие в результате перемещений друг относительно друга таких структурных элементов пород, как частицы и агрегаты частиц. Эти деформации, особенно структурные, и представляют основное значение в практике строительного использования глинистых пород. При структурных деформациях частицы и агрегаты частиц, находившиеся ранее рядом, необратимо перемещаются друг относительно друга. Эти перемещения возникают после того, как деформирующие напряжения, проявляющиеся под влиянием силы тяжести вышележащих толщ пород или внешней нагрузки, превысят предельное сопротивление сдвигу и вызовут в той или иной мере разрушение структуры.

Предельное сопротивление сдвигу глинистых пород можно условно рассматривать как суммарный эффект, вызываемый:

1. Действием сил молекулярного притяжения, сказывающемся преимущественно в коллоидных пленках, при наименее благоприятных для образования и сохранения структуры условиях. Проявление этих сил приводит к возникновению сцепления, которое мы назовем первичным сцеплением. Его величина зависит от расстояния между частицами, их размеров и состава; она возрастает при уплотнении пород и понижается при их набухании. Это сцепление проявляется в более или менее чистом виде как результат взаимодействия частиц в свежих водных глинистых осадках и пастах и определяет минимально возможное при данной плотности пород значение сопротивления сдвигу. Условное представление о величине первичного сцепления можно получить, проводя опыты со свежеприготовленными пастами той или иной плотности.

2. Влиянием химических, физических и физико-химических процессов, протекающих в глинистых осадках после их отложения и про-

являющихся в упрочнении структуры (цементация, замерзание воды, высушивание, обжиг, сцепление коллоидных частиц при благоприятной их ориентации наименее гидрофильными концами — коагуляционными центрами — при тиксотропном структурообразовании (2), влияние электролитов и т. п.). Эти процессы создают дополнительное сцепление, которое мы назовем сцеплением структурного упрочнения, или, короче, сцеплением упрочнения. При некоторых изменениях условий существования пород размеры сцепления упрочнения могут существенно понижаться. В лессах, например, это понижение происходит при повышении их влажности, в вечно-мерзлых породах — при повышении их температуры, в глинах — при изменении концентрации электролитов во влаге их пор, при разрушении тиксотропных структур и т. д. В результате этого понижения сопротивление сдвигу приближается к минимальной величине, определяемой первичным сцеплением. Величину сцепления упрочнения  $C_y$  можно получить как разность  $C_y = C - C_n$  между полным сцеплением  $C$ , характерным для образца с ненарушенной структурой, и первичным сцеплением  $C_n$ , определенным для свежеприготовленной пасты той же плотности.

О значении структурного упрочнения в формировании глинистых пород можно судить по величине показателя структурного упрочнения  $P$ :  $P = C/C_n$ .

Относительное представление об этом же можно получить по отношению величине сопротивления сжатию образцов глин с ненарушенной структурой и паст той же плотности. Это отношение, вычисленное по литературным данным (3), составляет для чикагской ледниковой глины от 2 до 3,1, для бостонской глины морского происхождения — 7,7 и лаврентьевской глины того же происхождения — 15.

Для условий предельного равновесия в контактах между частицами глинистых пород должно быть характерно следующее соотношение:

$$C = C_n + C_y = T, \quad (1)$$

где  $T$  — деформирующее напряжение в контактах частиц, возникающее под действием давления от собственного веса пород и внешней нагрузки. Структурные деформации глинистых пород в связи с вышеизложенным возникают при условии  $T' > C_n + C_y$ , причем деформации вызываются дополнительным напряжением  $\Delta T = T' - T$ .

В процессе этих деформаций, протекающих в некоторый период времени, после понижения величины  $C_y$  на  $\Delta C_y$ , повышается  $C_n$  за счет сближения частиц на величину  $\Delta C_n$ , и в итоге достигается новое равновесие:

$$C_n + \Delta C_n + C_y - \Delta C_y = T + \Delta T. \quad (2)$$

(1) и (2) дают условие окончания структурных деформаций:  $\Delta C_n - \Delta C_y = \Delta T$ , т. е. структурные деформации заканчиваются в тот момент, когда приращение первичного сцепления будет превышать падение сцепления упрочнения на величину, равную приращению деформирующего напряжения.

Если в процессе уплотнения, протекавшего при  $C_n = T$ , начинает проявляться сцепление упрочнения, то в таком случае  $T < C_n + C_y$  и дальнейшее увеличение давления, испытываемого породой, и деформирующих напряжений на величину  $C_n + C_y - T = \Delta' T$  не может вызвать структурных деформаций. Таким образом, накапливается „запас“ сцепления и формируются недоуплотненные породы. Если же при недоуплотненном состоянии произойдет уменьшение испытываемого породой давления и деформирующих напряжений на величину

$\Delta T$ , то  $T - \Delta T < C_n + C_y$ . Это условие характеризует формирование переуплотненных пород. Если предшествующее уплотнение являлось следствием лишь структурных деформаций, то набухание таких пород невозможно. Если же имели место и структурно-упругие деформации, то после уменьшения сцепления упрочнения на величину  $\Delta C_y$  возникает набухание, обусловленное проявлением расклинивающего давления пленок воды, сопровождающееся понижением первичного сцепления. Условие предельного равновесия будет иметь следующий вид:  $C_n - \Delta C_n + C_y - \Delta C_y = T - \Delta T = P$ , где  $P$  — давление набухания.

Образцы плотных глин, испытывавшие при компрессионных исследованиях влияние значительных давлений, обычно набухают в большей мере, чем не испытывавшие такового. Это связано с тем, что давление снижает влияние  $C_y$ , препятствующее проявлению набухания. Следует подчеркнуть, что рассмотренный процесс набухания не имеет ничего общего с упругими деформациями твердого тела.

При условии  $C_y = 0$ ,  $C_n = T$  и  $C_n + \Delta C_n = T + \Delta T$  будут формироваться породы, находящиеся в состоянии истинного соответствия пористости давлению. Однако для глинистых пород характерно возникновение сцепления упрочнения, и поэтому в процессе природной консолидации должны возникать недоуплотненные породы. Они могут перейти в категорию переуплотненных и находящихся в состоянии истинного соответствия пористости давлению как вследствие уменьшения давления, испытываемого ими на протяжении геологической истории существования, так и вследствие изменений химического, минералогического и механического состава пород (отложение осадков в порах пород, образование гидрофильных минералов, пептизация при выветривании).

Увеличение давления, испытываемого сухим песком, вызывает повышение деформирующих напряжений и соответствующее увеличение обуславливающего сопротивление сдвигу статического трения  $F$ . Следовательно, если для какого-то начального момента было характерно соотношение  $T = F$ , то при увеличении давления:  $T + \Delta T = F + \Delta F$  и  $\Delta T = \Delta F$ . Следовательно, повышение давления не может вызывать перемещения зерен песков.

Таким образом, резкое различие в сжимаемости песков и глин является следствием принципиальных различий в природе предельного сопротивления сдвигу в этих породах. При давлениях, не вызывающих разрушения минеральных зерен, предельное сопротивление сдвигу песков возрастает одновременно с повышением деформирующих напряжений, без перемещения частиц. В глинистых же породах при аналогичных обстоятельствах повышение предельного сопротивления сдвигу может произойти только в результате уплотнения.

При определении сопротивления сдвигу глинистых пород в приборах с одной или двумя плоскостями среза обычно наблюдается некоторое увеличение сопротивления сдвигу при повышении вертикального давления. Это увеличение является следствием не влияния внутреннего трения, а повышения значения сцепления, сопутствующего уплотнению пород.

В связи с изложенным природа вибрационного уплотнения песков может быть представлена следующим образом. При горизонтальном вибрировании возрастают деформирующие напряжения и осуществляется периодическое взвешивание зерен песка и связанное с этим понижение сил трения, благодаря чему осуществляется возможность взаимных перемещений этих зерен. При этих перемещениях весьма существенную роль играет различие в размерах и удельном весе частиц. При вертикальном вибрировании в результате периодического

взвешивания становится возможным подъем частиц, последующее падение которых приводит к наиболее вероятной плотной упаковке.

Деформации глинистых пород в природных условиях протекают в результате преодоления деформирующими напряжениями сцепления, которое может произойти как в пределах того или иного объема пород (как, например, при увлажнении лессов, оттаивании вечно-мерзлых пород, выветривании глин и т. п.), так и по плоскости (скальывание окаменевших пород). Вид деформаций будет зависеть как от характера нарушения сцепления, так и от предшествующей истории консолидации глинистых пород и условий рельефа. В табл. 1 приводится характеристика процессов проявления деформаций в связи с указанными условиями.

Т а б л и ц а 1

Проявление деформаций глинистых пород

| Характер нарушения сцепления и условия рельефа                                    | При объемном нарушении сцепления |                     | При нарушении сплошности по плоскостям |                 |
|---|----------------------------------|---------------------|--|-----------------|
|   | горизонт. площади                | склоны и берега     | горизонт. площади                      | склоны и берега |
| <b>I. Деформации с изменением объема</b>  |                                  |                     |  |                 |
| <b>A. Породы в состоянии кажущегося соответствия пористости давлению:</b>         |                                  |                     |  |                 |
| 1) Недоуплотненные . . . . .  | просадки                         | структурные оползни | не проявляются                         |                 |
| 2) Переуплотненные:   |                                  |                     |  |                 |
| а) в фазе структурных деформаций . . . . .  | не проявляются                   |                     | »                                      | »               |
| б) в фазе структурно-упругих деформаций . . . . .                                 | набухание                        | структурные оползни | »                                      | »               |
| <b>B. Породы в состоянии истинного соответствия пористости давлению . . . . .</b> | не проявляются                   |                     | »                                      |                 |
| <b>II. Деформации без изменения объема</b>  |                                  |                     |  |                 |
| <b>A. Породы в состоянии кажущегося соответствия пористости давлению:</b>         |                                  |                     |  |                 |
| 1) Недоуплотненные . . . . .  | не проявляются                   |                     | выпирание                              | оползни-сдвиги  |
| 2) Переуплотненные:   |                                  |                     |  |                 |
| а) в фазе структурных деформаций . . . . .  | выпирание                        | оползни-потоки      | »                                      | то же           |
| б) в фазе структурно-упругих деформаций . . . . .                                 | не проявляются                   |                     | »                                      | »               |
| <b>B. Породы в состоянии истинного соответствия пористости давлению . . . . .</b> | выпирание                        | оползни-потоки      | »                                      | »               |

Приуроченность таких деформаций, как просадки и оползни, исключительно к глинистым породам обусловлена тем, что в консолидации только этих пород существенную роль играет сцепление упрочнения, влияние которого может снижаться как в природных условиях, так и в результате инженерной деятельности человека (при повышении температуры вечно-мерзлых пород, повышении влажности лессов, выветривании глин).

Московский инженерно-строительный институт  
им. В. В. Куйбышева

Получено  
26 X 1947

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> Н. Я. Денисов, ДАН, 58, № 6 (1947). <sup>2</sup> П. А. Ребиндер, Сб. Вязкость жидкостей и коллоидных растворов, изд. АН СССР, 1941. <sup>3</sup> P. S. Rutledge, Proc. Amer. Soc. of Civil Eng., 68, 9 (1942).