

Е. В. ДЕДОВА

К ВОПРОСУ О ХАРАКТЕРЕ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ В ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ ОТКОСАХ

В статье дается описание и условия возникновения остаточных деформаций грунтов в зависимости от интенсивности землетрясения, геологических и гидрогеологических условий. Приводится классификация остаточных деформаций.

Все главные виды остаточных деформаций грунтов, возникающие вследствие естественных и искусственных землетрясений, например, от мощных взрывов, можно свести к классификации, выделив две главные категории. Первая категория — это деформации, образующиеся на равнинных или всхолмленных, а также гористых участках местности, чаще всего в склонах, сложенных грунтами; они выражаются нарушениями сплошности «мягких» грунтов, их растрескиванием, смещением в склонах и т. д. Вторая категория — это деформации, появляющиеся в искусственных откосах — откосах плотин, насыпей и т. п., образованных насыпными грунтами.

Внутри каждой из этих двух категорий остаточных деформаций сейсмического происхождения можно выделить еще такие генетические группы. В первой категории деформаций обособляются три группы по характеру их проявления.

1) Сейсмогравитационные деформации, представляющие собой разновидность сейсмодеформационных деформаций с преимущественным влиянием силы тяжести: осыпи, оплывины, оползни и обвалы.

2) Сейсмодеформационные деформации с преимущественным влиянием напряжений растяжения или сжатия: трещины, ступенчатые оседания, сдвиги, смятия и надвигания.

3) Сейсмоструктурные деформации — разновидность собственно тектонических деформаций, чаще всего приуроченных к «живым» разрывам, проявляющимся как в вертикальных, так и горизонтальных плоскостях: сбросы, сдвиги, надвиги, смещения в горизонтальной плоскости (например, такие, которые были описаны для Ашхабада Д. Н. Рустановичем [1]).

Во второй категории деформаций можно выделить аналогичные группы:

1) сейсмогравитационные деформации в виде обвалов камней в каменнонабросных плотинах — в низовых откосах; осыпи, оплывины и оползни в низовых откосах земляных плотин;

2) сейсмодеформационные деформации с преимущественным проявлением напряжений растяжения — продольные, реже поперечные и косые трещины по гребню и в откосах земляных плотин, чаще всего низовых и реже верховых;

3) сейсмоструктурные деформации на «живых» разрывах, вызывающие расчленение тела насыпей или плотин из местных материалов,

а иногда перемещение одних их частей по отношению к другим как в горизонтальной, так и вертикальной плоскостях.

В зависимости от крутизны естественных склонов и искусственных откосов, состава образующих их естественных или насыпных грунтов, а также их обводненности те или иные остаточные деформации проявляются в зависимости от интенсивности землетрясений. В откосах плотин вследствие их увлажнения создаются наиболее благоприятные условия для проявления остаточных деформаций.

Наблюдения показывают, что все сильные землетрясения интенсивностью 7—8 баллов и выше сопровождаются появлением различных остаточных деформаций «мягких» грунтов. В насыпных материалах тела плотин, где грунты чаще всего находятся в состоянии водонасыщения, а также в слабо уплотненных грунтах тела насыпей, значительные деформации возникают и при более низкой балльности (начиная с 6 баллов).

Вопрос о возникновении остаточных деформаций в виде трещин чисто сейсмического происхождения в скальных грунтах остается еще недостаточно изученным. По мнению С. В. Пучкова [2] в скальных грунтах землетрясения не проявляются с интенсивностью больше 7 баллов. Он предлагает брать скальные грунты за эталон и по отношению к ним вычислять приращение сейсмической интенсивности для всех других видов грунтов (полускальных, крупнообломочных с упругими характеристиками и «мягких» — песчано-глинистых, лёссовых и др.).

В этом случае сейсмическая интенсивность выразится.

$$I = I_0 + \Delta B,$$

где $I_0 = 7$ (для скалы);

ΔB — приращение сейсмической интенсивности.

По данным наблюдений над последствиями ряда сильных землетрясений (Алмаатинского-верненского 1911 г., Чаткальского 1946 г. и др.), удается обнаружить возникновение волосных трещин в полускальных (типа сланцев) и скальных (граниты, диориты, известняки) грунтах.

В таблице на основании изучения сейсмостатических материалов показано, с какой величины сейсмической интенсивности начинают появляться трещины в грунтах различного состава и обводненности.

В этой таблице не получил отражения характер склона, образованного теми или другими скальными или «мягкими» грунтами. Изучение остаточных деформаций показывает, что немаловажную роль играет положение склона по отношению к направлению выхода сейсмических толчков, но, главным образом, крутизна склона.

Для скальных и полускальных грунтов особенно трудно выявить собственно сейсмогенную микротрещиноватость из-за присутствия, как правило, целой системы нередко очень сложных трещин: напластования, дислокационных, трещин выветривания, отседания склонов и т. д. Для оценки роли грунтовых условий в возможном проявлении остаточных деформаций при землетрясениях можно исходить из типовых грунтовых разрезов, как это сделано в работах С. В. Медведева [3, 4, 5], И. А. Гзелишвили [6], В. В. Попова [7, 8, 9] и др. На фиг. 1. показаны пятнадцать характерных случаев грунтовых условий.

На фиг. 1,1 и 1,3 показаны массивнокристаллические и слоистые скальные грунты, которые могут подвергаться растрескиванию с образованием волосных трещин только при наиболее сильных землетрясениях (см. таблицу). В случае выветрелости и трещиноватости этих грунтов (фиг. 1,2 и 1,4) при сильных землетрясениях чаще всего подвижки происходят по уже существующим трещинам. Так в долине

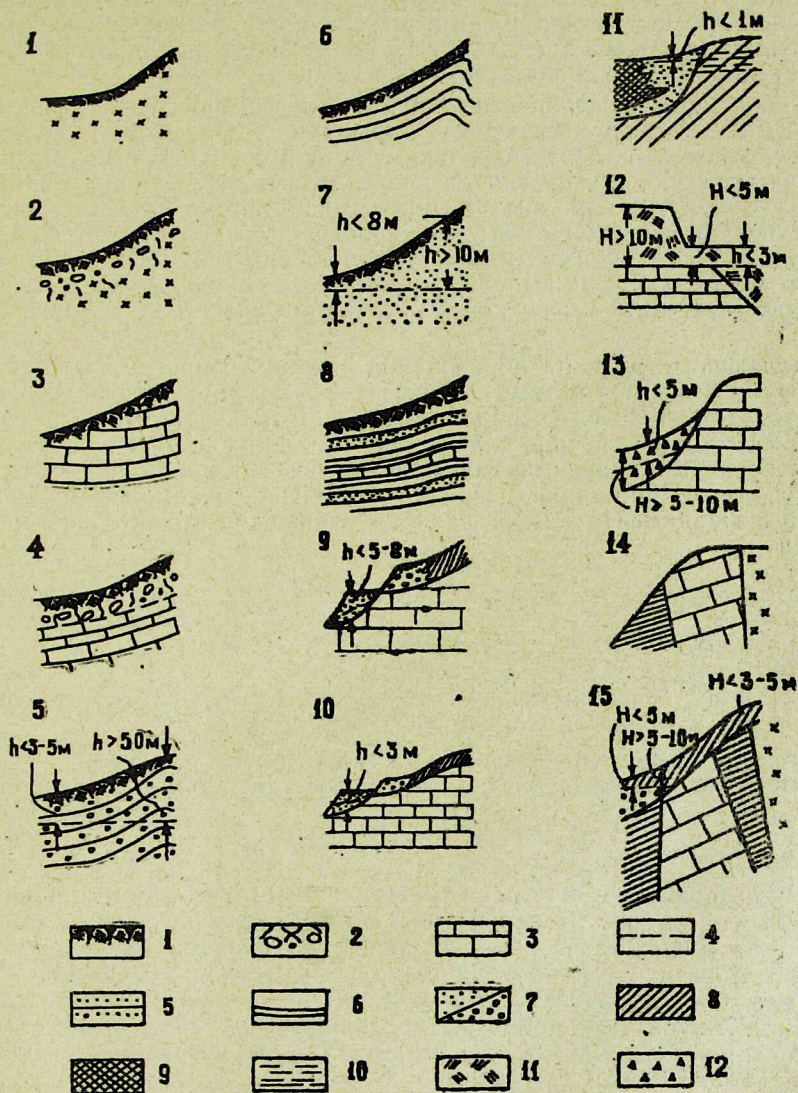
Грунты	Характер остаточных деформаций	Обводненность	Сейсмическая интенсивность, с которой проявляются деформации (в баллах)
Скальные	Волосные трещины в 1—2 мм (не на разломах)	Не влияет	11—12
Полускальные	Волосные трещины в 1—2 мм до заметных в 3—5 мм (не на разломах)	Не влияет	10—11
Крупнообломочные	Незначительные трещины, быстро закрывающиеся	Сухие Обводненные	10—11 10
Песчаные	Незначительные трещины, быстро закрывающиеся	Сухие Обводненные	10 9
Глинистые	Грунтоизвержения	Обводненные	9
	Мелкие трещины в 3—5 мм	Твердой и пластичной консистенции	7—8
	Значительные трещины в 5—10 мм и более	Текучей консистенции	6—7
Лессовые	Мелкие трещины	Сухие Обводненные	7 6
Грунты каменнонабросных плотин	Незначительные трещины	Обводненные	8
Грунты земляных плотин	Значительные трещины	Обводненные	6—7

р. Нарын после землетрясения 1946 г. образовались перемещения по дислокационным трещинам с амплитудой смещения от нескольких сантиметров до 1 — 1,5 м. Эти трещины обнаруживаются по светлой окраске пород на плоскостях трещин в палеозойских известняках.

При наличии в скальных или полускальных грунтах подземных вод (фиг. 1,4; 1,5) заметного усиления остаточных деформаций не наблюдается, но они резко усиливаются при близком нахождении воды от поверхности земли в «мягких» грунтах (фиг. 1,7). Усиление сейсмического воздействия на грунты (например, пески) сказывается при глубине до воды $h < 8$, в особенности $< 3—5$ м; но влияния обводнения не заметно при $h > 10$ м.

В склонах, образованных сланцеватыми полускальными грунтами — глинистыми сланцами (аргиллитами) — фиг. 1,6, — склоны устойчивее при совпадении плоскостей напластования (или сланцеватости) с поверхностью склона, как на фиг. 1,6. При иных сочетаниях плоскостей напластования, например, когда угол их наклона меньше угла склона, остаточные деформации — растрескивание, осыпание, соскальзывание — более характерны. Возникновению сейсмогенных трещин благоприятствует тонкое переслаивание грунтов, резко различных механических свойств (фиг. 1,8).

Песчаные грунты (в особенности обводненные при $h < 5—8$ м) в склонах особенно подвержены сейсмогенным деформациям типа трещин, которые быстро закрываются, и осыпей. Осыпи дают и крупнообломочные грунты в крутых склонах, например, террас (фиг. 1,9).



Фиг. 1. Характерные случаи грунтовых условий (1-15); Н—мощность «мягкого» слоя; h — глубина залегания уровня грунтовых вод; 1—почва; 2—щебень, камни (выветрелый слой); 3—известняк; 4—уровень грунтовой воды; 5—алевролит, песчаник; 6—глина, аргиллит; 7—песок (песок с гравием и галькой); 8—суглинок; 9—торф; 10—увлажнение; 11—насыпь; 12—щебень, камни (осыпи).

Наличие под «мягкими» грунтами скалы способствует усилению остаточных деформаций, в особенности при мощности пласта «мягких» грунтов не более 10 м. Еще сильнее остаточные деформации происходят в покровных суглинках или речных отложениях (пески, суглинки) при малой мощности пласта (<3—5 м), залегающего над плотной скалой с высокими упругими свойствами (фиг. 1,10).

Увлажненные с поверхности глинистые (лёссовые) грунты (фиг. 1,11), пески с $h < 1$ м, водонасыщенные торфяники подвергаются особенно сильным сейсмогенным деформациям типа смятий, сдвигов, надвигов, ступенчатых оседаний, иногда на значительных территориях. Примерами могут служить ярко выраженные сейсмогенные деформации смятий, ступенчатых оседаний в увлажненных лёссах в районе Алма-Ата в местах выходов грунтовых вод, в увлажненных супесях и суглинках пролювиальных конусов выноса у с. Ойтал (северовосточное побережье озера Иссык-Куль) в результате катастрофического землетрясения 1911 г.

Аналогичные явления образования трещин, сопровождающие отседания «мягких» грунтов склонов известны для окрестностей Ашхабада (землетрясение 1948 г.), в ряде районов Чаткальского хребта (землетрясение 1946 г.). Особенно сильные сейсмогенные деформации возникают в местах выклинивания «мягких» грунтов, подстилаемых скалой. Здесь сказывается влияние явления отражения сейсмических волн от скального фундамента и коэффициент отражения значительно меньше единицы.

$$K_{отр} \sim \frac{a_1 \rho_1}{a_2 \rho_2} \ll 1,$$

где $a_1 \rho_1$ — акустическая жесткость «мягкого» грунта;

$a_2 \rho_2$ — акустическая жесткость скалы;

$a_1 a_2$, и $\rho_1 \rho_2$, — скорости сейсмических волн и плотности «мягкого» и скального грунтов.

Если представить себе залегание под скалой «мягких» грунтов (например, известняка над глиной) соотношение получается обратным.

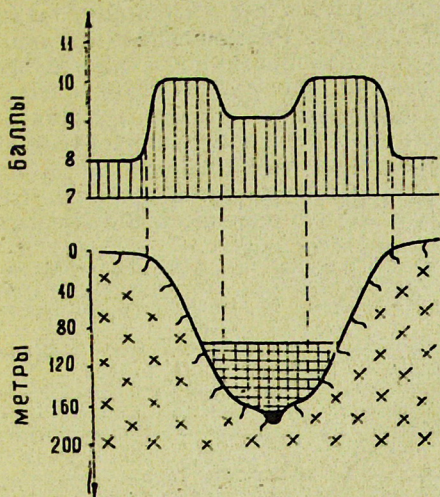
$$K_{отр} = \frac{a_2 \rho_2}{a_1 \rho_1} > 1.$$

Неблагоприятным для существования насыпных грунтов (тела насыпей, плотин) является нахождение под «мягким» грунтом скального фундамента (фиг. 1,12), в особенности в условиях водонасыщения ($h < 3$ м) и незначительной толщине рыхлого слоя ($H < 5$ м). Здесь возникают благоприятные условия для проявления сейсмогенных деформаций. Аналогичным образом проявляются остаточные деформации в рыхлых осыпях обломочного материала, залегающих в основании крутых склонов (фиг. 1,13).

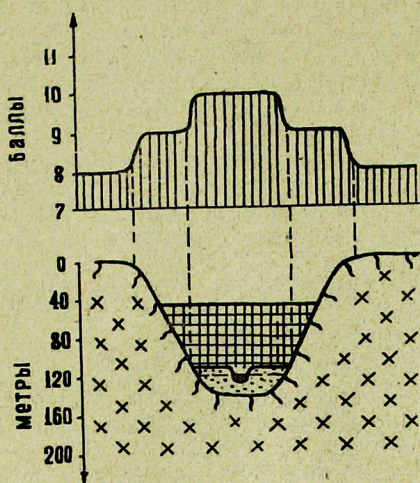
Наконец, сейсмогенные деформации особенно сильно проявляются по тектоническим трещинам (фиг. 1,14). Когда они прикрыты «мягкими» грунтами (фиг. 1,15), последние подвергаются наиболее сильным остаточным деформациям.

Все эти случаи грунтовой обстановки по-разному сказываются на примыкании земляных и каменнонабросных плотин к бортам речных долин. Но сами грунтовые тела плотин (или насыпей) в зависимости от мощности насыпного слоя, характера грунтов русла и берегов в створе плотин, могут также по-разному реагировать на сейсмические воздействия.

Изучение деформаций плотин и насыпей при землетрясениях показывает значительно меньшую их устойчивость по сравнению с естественными склонами, сложенными природными грунтами. Немалую роль здесь играет нарастание амплитуд колебаний тела плотин и насыпей.



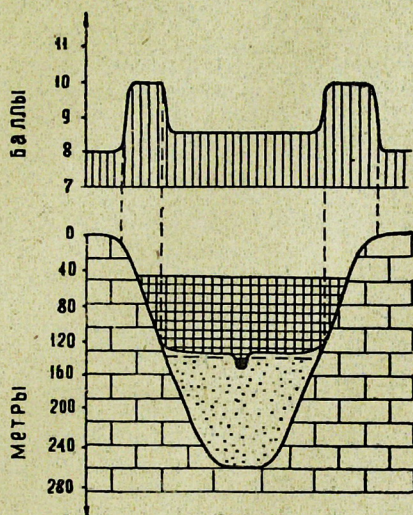
Фиг. 2. Случай сейсмогеологических условий размещения плотины из местных строительных материалов на скале.



Фиг. 3. Случай сейсмогеологических условий размещения плотины из местных строительных материалов на тонком слое аллювия (из «мягкого грунта»).

пей, приводящее к увеличению сейсмической интенсивности на 1—2 балла. Поэтому помимо мощности пласта насыпного грунта следует учитывать характер геологического строения речной долины, что иллюстрируется фиг. 2, 3 и 4.

В том случае, когда основанием земляной плотины служит скальный грунт (фиг. 2), условия более благоприятны, чем в случае, когда в русле залегает слой мягкого аллювиального грунта (фиг. 3). Увеличение амплитуд колебаний мягкого слоя, по сравнению со скальным основанием, в четыре и более раз может вызвать усиление сейсмической интенсивности не менее, чем на 2 балла. Наоборот, более мощный слой аллювия (фиг. 4), когда мощность «мягкого» пласта соизмерима с длиной продольной волны, будет понижать сейсмическую интенсивность в днище долины. Сама плотина, состоящая из насыпного



Фиг. 4. Случай сейсмогеологических условий размещения плотины из местных строительных материалов на мощном слое аллювия (из «мягкого грунта»).

грунта будет в зависимости от его мощности оказывать влияние на изменение сейсмической интенсивности аналогично мягкому аллювиальному слою. Изменение приращения сейсмической интенсивности будет непосредственно влиять на проявление остаточных деформаций.

Изучение ряда зарубежных плотин показывает [10, 11], что каменнонабросные плотины начинают деформироваться с 8—9 баллов, тогда как земляные плотины — уже с 6—7 баллов. Размещение этих плотин, которые наиболее устойчивы в случае распластанного типа, целесообразно ограничивать 8-балльными зонами, где уже в самих насыпных грунтах тела плотин сейсмическая интенсивность может проявляться как 9-балльная. В 9-балльных зонах проявление в плотинах из местных материалов остаточных деформаций может приближаться по их характеру к деформации, отвечающим 10-балльной интенсивности, что опасно для существования этих плотин, и их размещение в 9-балльных зонах должно исключаться.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Н. Рустанович. К вопросу о механизме Ашхабадского землетрясения 1948 г. по материалам геофизич. исследований. ДАН СССР, т. 153, № 1, 1963.
2. С. В. Пучков. Инструментальное сейсмическое микрорайонирование зоны Ашхабадского землетрясения 1948 г. Тр. Ин-та физики Земли АН СССР, № 5, 1959.
3. С. В. Медведев. Инженерная сейсмология. Гос. изд. лит. по строит. архит. и строит. матер., М., 1962.
4. С. В. Медведев. Количественные данные о движениях грунта при сильных землетрясениях. Сб.: «Исследования в области инженерной сейсмологии. Бюлл. Совета по сейсмол. АН СССР», в. 14, 1963.
5. С. В. Медведев. Сейсмическое микрорайонирование городов. Изд-во АН СССР, Тр. Геофиз. ин-та, 1922.
6. И. А. Гзелишвили. Сейсмическое микрорайонирование г. Тбилиси. Сообщения АН ГрузССР, т. VII, № 4, 1946.
7. В. В. Попов. Геология и гидрогеология в военно-инженерном деле. Гл. VI, Изд. ВИА, М., 1947.
8. В. В. Попов. Инженерно-геологические критерии детального сейсмического районирования. Тр. Ин-та физики Земли АН СССР, № 5 (172), 1959.
9. В. В. Попов. Роль инженерно-геологических условий в детальном сейсмическом районировании. Бюлл. Совета по сейсмологии. № 8, АН СССР, 1960.
10. N. N. Ambraseys. On the seismic Behavior of Earth Dams. Доклад на II Международной конференции по сейсмостойкому строительству в Токио, 1960.
11. M. Numata. Earthquake — Resistant Design for Civil Engineering Structures, Earth structures and Foundations in Japan. Доклад на II Международной конференции по сейсмостойкому строительству в Токио, 1960.