

А. А. МЕЛИКЯН

СЕЙСМИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ ГРУНТА НА ПОДЗЕМНОЕ СООРУЖЕНИЕ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В работе приводятся результаты изучения влияния статического и динамического давлений малосвязного грунта на модель тоннельной обделки; даются рекомендации для определения давления грунта при проектировании подземных сооружений в сейсмических районах.

Рациональное проектирование подземных сооружений требует всестороннего изучения нагрузок, действующих на крепь или обделку. Между тем до настоящего времени все еще недостаточно изучен один из основных видов нагрузки — давление несвязных и малосвязных грунтов. Особенно слабо изучено давление, обусловленное динамическим воздействием грунта. Известно также, что решение этой задачи встречает большие затруднения из-за сложности механизма возникновения горного давления. Изучение этого вопроса в натуре требует много времени и больших материальных затрат. В последнее время большое развитие получил метод изучения горного давления на моделях. При этом приходится преодолевать затруднения, связанные с соблюдением требований статического и динамического моделирования.

Основной задачей настоящей работы является изучение зависимости между статическим и динамическим давлением малосвязного грунта на модель тоннельной обделки. Эта весьма актуальная задача пока еще окончательно не решена.

При решении ее выполнены экспериментальные работы с использованием сейсмической платформы, современной измерительной аппаратуры и полигона, специально оборудованного для этих целей. Выполнены также экспериментальные работы по изучению явления сводообразования, которое в настоящей работе связывается с фактическим давлением грунта, полученным экспериментальным путем. На основе анализа существующих теорий горного давления в условиях статического и динамического воздействия в качестве исходного для экспериментальных исследований принят метод М. М. Протодьяконова.

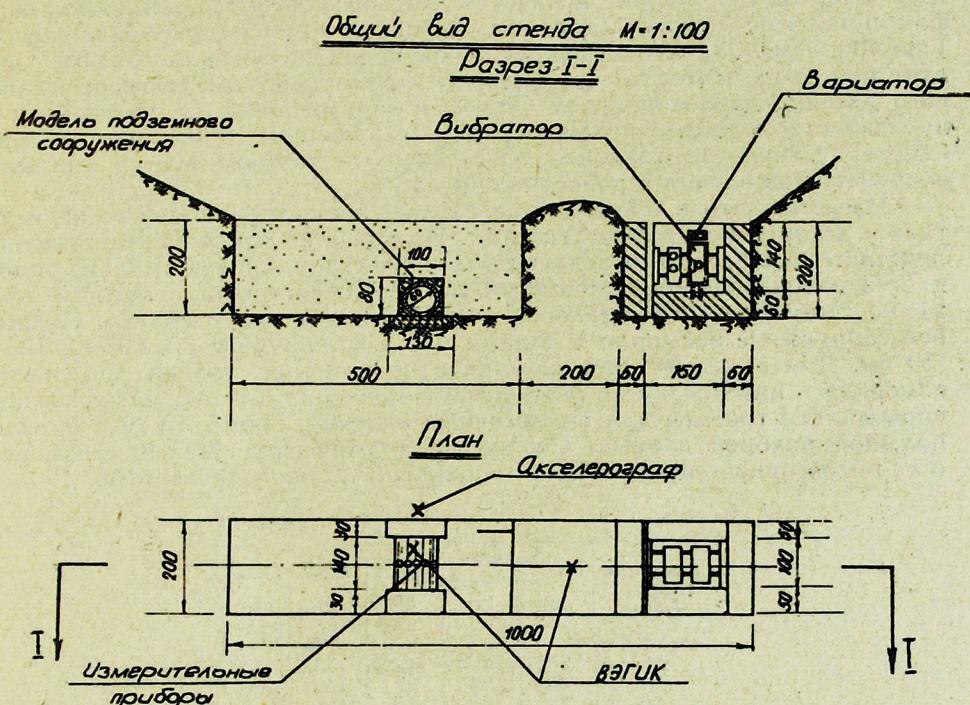
Несмотря на благоприятные условия работы тоннельных сооружений при сейсмическом воздействии, имеются многочисленные примеры повреждения и разрушения указанных выше сооружений, в основном, в порталных частях.

Вопросы динамики сыпучих тел относятся к одним из наиболее сложных и малоизученных вопросов механики. В настоящее время известно значительное число работ по определению величины давления сыпучих материалов в условиях статического воздействия методом моделирования. Наиболее известными из них являются работы М. М. Протодьяконова, Е. Энгессера, К. В. Руппенайта, В. Д. Ривкина и В. П. Запольского, Е. Я. Махно, Д. Бонарда и Е. Рекордина и др.

В настоящей работе изучение давления грунта на модель подземного сооружения в условиях колебаний проводится по новой методике.

Явление сводообразования изучалось экспериментальным путем на специальном приборе из органического стекла размерами $150 \times 100 \times 100$ см. Исследовалась взаимосвязь между высотой свода давления и шириной выработки. Опыты производились с песками различного гранулометрического состава и различной степени влажности. В процессе проведения экспериментов было замерено 360 сводов давления и установлена зависимость между высотой свода давления, объемным весом, транулометрическим составом, влажностью и объемом, заключенным внутри свода давления, на основании которых были построены соответствующие графики и дана интерпретация механизма передачи давления сыпучего материала на дно экспериментального прибора.

Для проведения исследований по изучению давления грунта на модель подземного сооружения в статических условиях был создан специальный стенд, который был расположен на территории, имеющей од-



Фиг. 1. Стенд для испытаний моделей подземных сооружений.

породный поверхностный слой грунта (лессовидные суглинки), мощностью свыше 3 м. Стенд, изображение которого приводится на фиг. 1, состоит из установки модели подземного сооружения, вибратора, возбуждающего колебательные движения системы, приборов, позволяющих измерять и записывать величину статистического и динамического давлений грунта, а также амплитуду смещения и ускорения движения модели и ее основания во время колебаний.

В качестве подземного сооружения использована труба, имеющая длину 200 см, внутренний диаметр 60 см и толщину стенок 2,5 см. Труба разделена пятью поперечными диафрагмами толщиной 2,5 см с целью

придания ей жесткости. По концам трубы заделана в бетонные оголовки, имеющие фундамент, глубиной 20 см. Вся установка засыпается кварцевым песком, имеющим следующие характеристики: объемный вес — $\gamma = 1,53 \text{ г}/\text{см}^3$; влажность — $w = 8,3\%$; угол внутреннего трения — $\phi = 33^\circ$; температура — $t = 15^\circ\text{C}$; гранулометрический состав: фракции от 0,15 до 5 мм. Генератором, возбуждающим колебания, служил переоборудованный вибратор ВЦМ-2 системы ВНИИГС, помещенный на расстоянии 4,5 м от оси подземного сооружения. Пульсирующая сила, достигающая 7 т, передавалась грунту через бетонную обойму, в которой был помещен вибратор. Изменение характеристик колебания (частоты и амплитуды) производилось с помощью механического вариатора, позволяющего плавно изменять число оборотов от 200 до 1700 об/мин. Для измерения амплитуды смещения и ускорения основания сооружения использовались вибрографы ВЭГИК и ртутные акселерографы конструкции М. Г. Хачияна. В среднем сечении сооружения было установлено пять измерительных приборов, в качестве которых были использованы дифференциальные датчики давления. Диапазон измеряемого давления от 1 до $400 \text{ г}/\text{см}^2$. Запись давлений производилась осциллографом. Следует при этом отметить, что большим преимуществом дифференциального датчика давления перед другими типами является возможность производства записи динамической составляющей давления. В этом случае статическое давление на мембранию компенсируется подачей воздушного давления в полость корпуса.

Известно, что в большинстве случаев подземное сооружение залегает в достаточно плотных грунтах. Поэтому, во избежание искажения действительной картины давления, грунт засыпки предварительно уплотняется интенсивными вибрациями до такого состояния, которое примерно соответствует одинаковой степени уплотнения в натуре. Подземное сооружение засыпалось слоями песка толщиной в 30, 60, 90, 120 и 150 см. Для каждого слоя засыпки в пяти точках модели сооружения измерялась интенсивность статического давления в $\text{г}/\text{см}^2$. Эксперименты проводились трижды для аналогичных условий. При этом был получен большой разброс данных. Средние арифметические значения измеренных интенсивностей статического давления приводятся в табл. 1.

Таблица 1

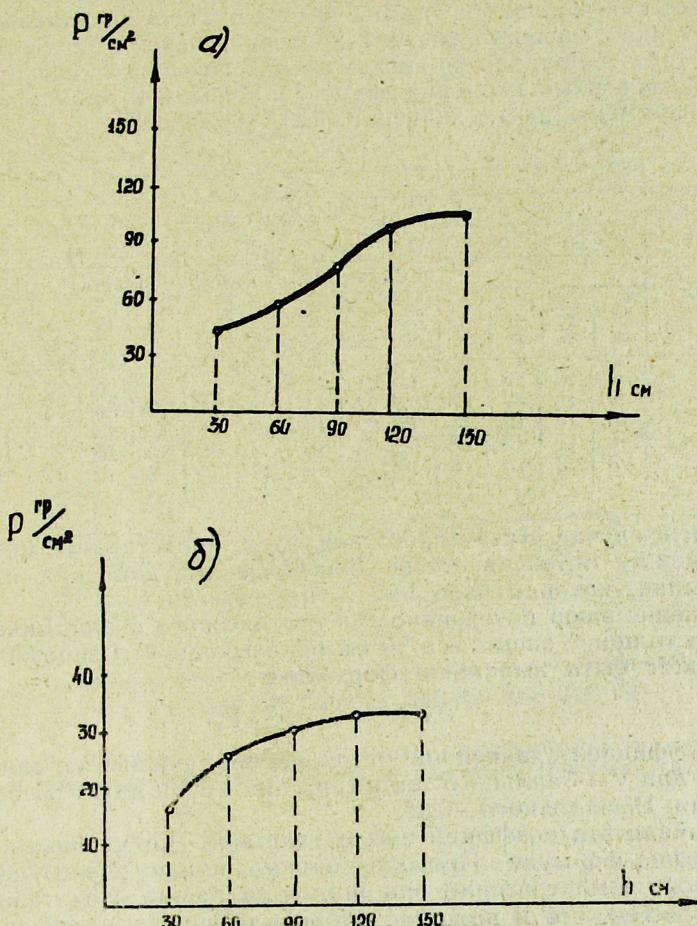
№ точки сооружения	Толщина засыпки, см				
	30	60	90	120	150
I	14	31	45	74	74
II	40	56	78	103	104
III	52	61	90	120	121
IV	37	50	74	94	95
V	6	28	60	60	61

На фиг. 2а изображен график зависимости между интенсивностью статического давления и толщиной засыпки, который подтверждает теорию свободообразования, так как рост интенсивности давления при высоте в 120 см практически затухает.

Таким образом, теоретические предпосылки достаточно хорошо совпадают с данными экспериментов. Определенный интерес представляет сопоставление давлений, полученных экспериментальным и теоретическим путем. Для определения давления на круглые выработки пользуются наиболее распространенным методом М. М. Протодьяконова, дополн-

ненным сотрудниками МетроГипротранса. По этому методу давление для одной из точек модели сооружения получилось равным 118 г/см^2 . Значение того же давления, полученного экспериментальным путем, оказалось равным $P=120 \text{ г/см}^2$.

Далее проводилось экспериментальное изучение давления грунта на модель обделки тоннельной выработки в динамических условиях. Предварительно исследовалось влияние сводообразования в условиях сейсмического воздействия, которое осуществлялось на сейсмической платформе Грузинского политехнического института. Изучение этого явле-



Фиг. 2. Графики зависимости между интенсивностью давления и толщиной засыпки.

ния производилось при частотах и амплитудах, моделированных в соответствии с VII, VIII и IX-балльными землетрясениями. Результаты экспериментов сведены в таблицы. Построены соответствующие графики зависимости между h — высотой свода давления в динамических условиях и k_c — сейсмическим коэффициентом.

Сопоставление экспериментальных данных с величинами, полученными по формуле Протодьяконова: $h_g = \frac{b}{f - k_c}$ показывает, что в

случае IX-балльного землетрясения следует ожидать увеличения h_g на 20% по сравнению с h_{cm} .

Однако в случае связных грунтов, когда величина сцепления достигает существенного значения, влияние инерционных сил невелико. Эксперименты дали возможность получить интенсивности динамического давления грунта в пяти точках сечения сооружения при различных ступенях ускорений грунта, т. е. при разных величинах пульсирующей силы, возбуждаемой вибратором, а также акселерограммы движения грунта в точках, расположенных в непосредственной близости от сооружения. В табл. 2 приводятся средне-арифметические значения интенсивности динамического давления грунта, причем, и в данном случае разброс экспериментальных значений был небольшим.

Таблица 2

№ точки сооружения	Толщина засыпки, см														
	Сейсмический коэффициент — k_c														
	30	60	90	120	150	30	60	90	120	150	30	60	90	120	150
I	8	18	23	12	15	21	12	17	21	14	20	22	14	21	22
II	9	13	17	17	25	27	17	25	31	19	30	34	20	30	34
III	10	14	16	14	17	23	14	19	24	19	28	35	19	29	35
IV	8	11	13	15	22	24	15	18	25	16	26	29	16	27	29
V	3	3	5	6	10	12	6	14	15	8	16	17	8	16	18

Как и в случае статического давления, представляет интерес зависимость между интенсивностью динамического давления и толщиной слоя засыпки, которая изображена на фиг. 2б.

Сравнение эпюров интенсивностей статического и динамического давлений при толщине засыпки в 90 см показывает, что динамическое давление может быть выражено формулой:

$$P_{\text{сейсм}} = P_{\text{стат}} \times k,$$

где k — коэффициент, зависящий от ускорения и равный по данным экспериментов: для VII-балльного землетрясения — 0,20; для VIII-балльного — 0,30 и для IX-балльного — 0,36.

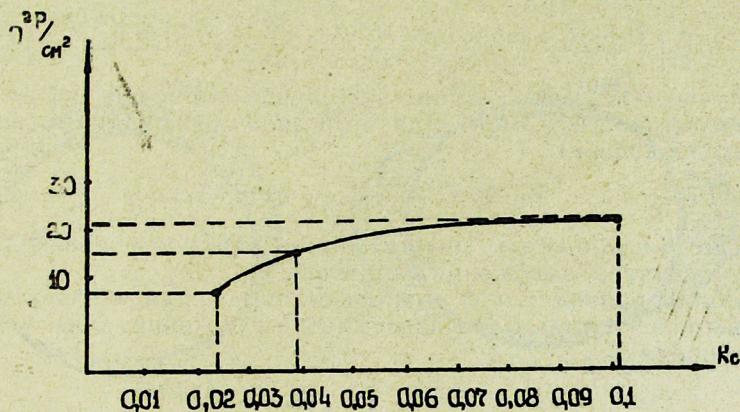
Сравнивая эти коэффициенты с данными, полученными по приведенной выше формуле Протодьяконова, можно убедиться, что для IX-балльного землетрясения они примерно равны. Некоторая разница объясняется тем, что в процессе виброуплотнения уменьшается угол внутреннего трения сыпучего тела и тем самым повышается давление грунта на модель сооружения. Поэтому надо полагать, что при переходе от опытов к натуре отношение динамического давления к статическому будет несколько меньшим, чем это получилось в экспериментах. Были записаны также параметры, входящие в формулу ускорения (частота и амплитуда) для различных значений числа оборотов мотора. Данные записи прибором ВЭГИК, установленным на модели, приведены в табл. 3; там же подсчитаны соответствующие значения сейсмического коэффициента k_c .

На основании данных табл. 3 построен график зависимости между интенсивностью динамического давления и величиной k_c для точки II модели сооружения $h=90$ см, показывающий рост давления с увеличением ускорения. График изображен на фиг. 3.

В настоящей работе в порядке постановки рассматривается также вопрос учета сейсмического напряженного состояния грунтовой среды при проектировании подземных сооружений типа тоннелей. Этот вопрос рассматривался в литературе и ранее другими исследователями, которыми был получен порядок величин сейсмических напряжений в грунтовой среде. Однако давление грунта на обделку, обусловленное таким напряженным состоянием, не изучалось.

Таблица 3

Число оборотов мотора, об/мин	Амплитуда, мм	Частота, герц	k_c	Примерный балл землетрясения
750	0,037	12,7	0,024	VII
880	0,043	15,0	0,039	VIII
1200	0,110	16,0	0,106	IX



Фиг. 3. График зависимости между интенсивностью динамического давления и величиной k_c для точки II модели сооружения.

Следует заранее оговориться, что горное давление, обусловленное развитием в грунтовой среде сейсмических инерционных сил, зависит от ускорения, а рассматриваемый вид горного давления непосредственно зависит от скорости смещения частиц грунта. Решая задачу определения горного давления, обусловленного напряженным состоянием грунтовой среды, можно принять, что поперечное сечение подземного сооружения ввиду его малых размеров, по сравнению с длиной сейсмических волн от 200 до 3500 м для различных грунтовых условий, не исключает поле напряжений, так как сооружение попадает в зону одного знака волны напряжений.

Решение задачи было выполнено в вычислительном центре АН Грузинской ССР на основании работ Савина и Шеленговского. Для тоннелей неглубокого заложения задача ставилась следующим обра-

зом. Дана бесконечная полуплоскость, ослабленная круговым отверстием, в которое вложена жесткая круглая шайба (фиг. 4). На бесконечности приложены сжимающие напряжения, действующие параллельно границе полуплоскости. В качестве приближения предполагается, что по отношению к грунтовой среде обделка имеет достаточную жесткость. Радиус обделки r_o и расстояние h от центра шайбы до границы полуплоскости даны. Требуется определить радиальные напряжения на контуре обделки. Рассматриваемая полуплоскость с помощью дробно-линейной функции $z = \frac{1}{1 - a\xi}$ отображается в плоскости ξ на окружность с центром в точке $\xi=0$ и радиусом $\frac{1}{a}$. При этом:

$$a = \frac{1}{2\sqrt{h^2 - r_o^2}} \quad \text{и} \quad P_o = \frac{2\sqrt{h^2 - r_o^2}}{r_o} (h - \sqrt{h^2 - r_o^2}).$$

Таким образом, рассматриваемая область в плоскости переходит в кольцо. Решая поставленную задачу для этого кольца, можно показать, что радиальные напряжения имеют вид:

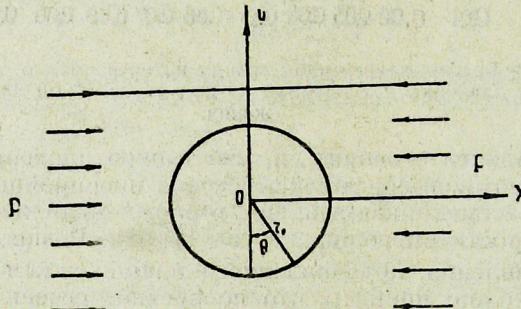
$$\begin{aligned} \bar{p} &= P_1 + P_2; \\ P_1 &= \frac{p}{2} \left\{ 1 - \frac{[(1+a^2p^2)\cos\theta - 2ap]^2 - (1-a^2p^2)^2 \sin^2\theta}{(1-2ap\cos\theta+a^2p^2)^2} \right\}; \\ P_2 &= \frac{p}{2} \left[\frac{(1+\mu)(1+a^4p_o^{-4})\cos 2\theta - 4ap_o(1+a^2p_o^{-2})\cos\theta + 6a^2p_o^{-2}}{(1+3\mu)(1-2ap_o\cos\theta+a^2p_o^{-2})} - \frac{\lambda+2\mu}{3\lambda+2\mu} \right]. \end{aligned}$$

В случае большой глубины заложения тоннелей расчетная схема становится несколько иной. Для этой задачи радиальные напряжения получаются равными:

$$\bar{p} = \frac{p(z+1)}{2z} \left(\cos 2\theta + \frac{z}{2} \right).$$

На фиг. 5 изображены эпюры напряжений, построенные для указанных двух случаев заложения тоннелей.

В табл. 4 приводятся нормальные напряжения, обусловленные сейсмическим воздействием для подземных сооружений, залегающих в различных породах.



Фиг. 4. Схема бесконечной полуплоскости, ослабленной круговым отверстием.

В результате проведенных работ получены следующие выводы:

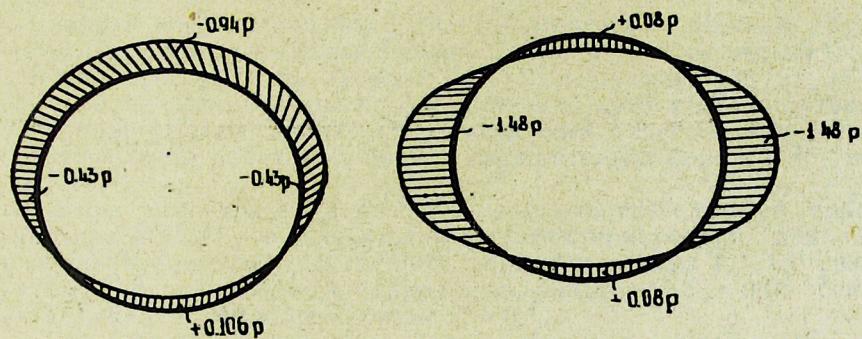
1. При помощи метода простых моделей имеется возможность достаточно изучить явление сводообразования. При этом положение М. М. Протодьяконова о том, что основной формой равновесия горного

массива после проведения выработки является естественный разгружающий свод, еще раз подтвердилось экспериментами.

Таблица 4

Характер грунта (породы)	Р, кг/см ²	Нормальные напряжения рр кг/см ²		
		неглубокое заложение		глубокое заложение
		замковое сечение	пятивое сечение	
Скальные породы	5,6—8,0	5,3—7,5	2,4—3,4	8,3—11,8
Меловые отложения	1,4—5,0	1,3—4,7	0,6—2,2	2,1—7,4
Грунты средней прочности	0,6—1,3	0,6—1,2	0,3—0,6	0,9—1,9
Грунты слабые	0,2—0,6	0,2—0,5	0,6—0,3	0,3—0,9

2. Давление грунта в статических условиях, полученное экспериментальным путем, оказалось достаточно близким давлению, подсчитанному по методу М. М. Протодьяконова, дополненному Метрогипротрансом. При этом характер эпюры статического давления грунта согласуется с теоретическими эпюрами, полученными для подземных сооружений, имеющих круглое очертание.



Фиг. 5. Эпюры напряжений для различных случаев заложения тоннелей.

3. Установлено полное соответствие между сводообразованием, определенным с помощью обрушения грунта, и давлением на крепь выработки, замеренным инструментально.

4. Согласно данным экспериментов по определению статического давления грунта на модель подземного сооружения, боковое давление оказалось равным 60—70 % от вертикального.

5. Определение высоты свода давления в условиях динамического воздействия следует вести по формуле:

$$h_g = \frac{b}{f - k_c},$$

где k_c — сейсмический коэффициент.

Динамическое давление грунта, составляющее значительную часть от статического, при больших ускорениях указывает на необходимость учета сейсмического давления малосвязных грунтов на крепления

подземных сооружений в районах, подверженных сейсмическим воздействиям. Очертание эпюры динамического давления почти повторяет очертание эпюры статического давления грунта.

6. Установлена зависимость между величиной динамического давления и сейсмическим коэффициентом k_s .

7. В качестве ориентировочной рекомендации для проектирования подземных сооружений, расположенных в сейсмических районах, давление грунта может быть определено по предлагаемой в работе формуле.

8. Теоретически установлено, что обделка подземной выработки подвергается действию значительного давления грунта, обусловливаемого напряженным состоянием грунтовой среды при распространении сейсмических волн. Показана необходимость экспериментального изучения данного вопроса по предлагаемой в работе методике.

Результаты настоящей работы предполагается использовать для усовершенствования раздела нормативов по сейсмостойкому строительству, касающегося расчета подземных сооружений на сейсмостойкость. Они частично использованы при выполнении работы по разработке практических методов расчета подземных сооружений на сейсмостойкость.

Институт строительной механики
и сейсмостойкости
АН Грузинской ССР.