

В. А. ХАРИТОНОВ

ИЗУЧЕНИЕ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В статье приводятся результаты экспериментального изучения работы свайных фундаментов при сейсмовзрывных воздействиях и влияния их жесткости на динамические характеристики зданий.*

В последнее время свайные фундаменты получили большое распространение, особенно при строительстве на вечно мерзлых грунтах, где этот вид фундаментов является основным. Применение их в сейсмических районах ограничивается из-за отсутствия исследований поведения свай при динамическом воздействии.

Свайные фундаменты при землетрясении подвергаются сложному силовому воздействию. С одной стороны, на сваю действуют вертикальные силы от собственного веса ростверка, рандбалки и всей надфундаментной части, а с другой, в момент землетрясения инерционные силы от надфундаментной части и силы, возникающие при колебаниях сооружения, грунтов и фундамента. Кроме того, среда (грунт), в которой работает свая, при землетрясении также меняет свои свойства (внутреннее трение, плотность), и соответственно меняется сопротивление сваи в грунте. Конструкции фундамента, глубина его заложения, характеристики грунта, в котором заложен фундамент, оказывают существенное влияние на процесс передачи сейсмического воздействия от грунта к зданию. Кроме того, следует также отметить, что при одной и той же схеме надфундаментной части сооружения изменение типа фундамента влияет на динамические характеристики здания, что существенно сказывается на степень его сопротивляемости сейсмическому воздействию.

В работе приводятся определения предельного сопротивления сваи при сейсмическом воздействии, а также влияния конструкции фундаментов, степени жесткости заделки колеблющейся системы в грунт, на сопротивление зданий и сооружений сейсмическому воздействию.

Измерения колебаний сооружений производились с помощью электродинамических датчиков. Регистрация осуществлялась гальванометрами на осциллографе. Чувствительность электродинамических датчиков регулировалась специальными шунтовыми устройствами, собранными в шунтевые коробки комплектно для 6 вибрографов. Регистрация колебаний была возможна для амплитуд в диапазоне от 1 до 2000 μ , и ускорений от 0,001 до 1,5 g. Деформации свай регистрировались также прогибсферами и мессурами часового типа с точностью измерения 0,01 мм.

Балльность имитированного землетрясения оценивалась сейсмометром Медведева по величине смещения сферического маятника, имеющего период собственных колебаний 0,25 сек. и логарифмический декре-

* Пользуясь случаем, выражаем благодарность за рекомендации и советы в подготовке методики проведения испытаний А. Г. Назарову, Ш. Г. Напетваридзе, Б. Н. Самкову и за содействие в комплектовании и подготовке измерительной аппаратуры Е. С. Борисевичу и Д. А. Харину.

мент затухания 0,5, а также по величине зарегистрированного ускорения колебаний грунта.

Испытания проводились на площадках, которые представляют собой аллювиальные отложения рр. Ангара и Селенга. В первом случае площадка сложена супесчаными и суглинистыми отложениями и относительно выдержаным пластовым залеганием и переменной мощностью. Естественная влажность супеси 15—20%, объемный вес — 1,7 г/см³; для суглинка соответственно — 15—35% и 1,6—2,0 г/см³. Уровень грунтовых вод располагается на глубине 10—15 м. Скорость сейсмической волны 500 м/сек., затухание иллюстрируется графиком зависимости амплитуд колебания от расстояния до источника возбуждения, приведенным на фиг. 1. Во втором случае четвертичные напластования суглинков и супеси толщиной 3—6 м располагаются на мощном слое гравийно-галечниковых отложений. Физико-механические свойства супесей: влажность 13—37%, пористость 28—40%, объемный вес 1,5—2,0 г/см³; суглинков: влажность 3—35%, пористость 42—57%, объемный вес 1,4—1,96 г/см³. Скорость сейсмической волны в поверхностном слое супеси и суглинка в интервале 250—300 м/сек. В гравийно-галечниковых отложениях скорость сейсмической волны от 600 до 700 м/сек. Затухание колебаний в поверхностном слое и подстилающих гравийно-галечниковых отложениях показано графиками зависимости амплитуд колебания от расстояния до места сейсмического возбуждения, представленных на фиг. 2, 3.

На первой площадке сваи сечением 35×35 см забивались в слой супеси на глубину 2,5—3,5 м, на второй сваи сечением 30×30 см — на глубину 4—6,5 м в слой супеси и далее до глубины 3,0—4,0 м в слой гравия. Если в первом случае свая может рассматриваться как висячая, то во втором она работает как стойка.

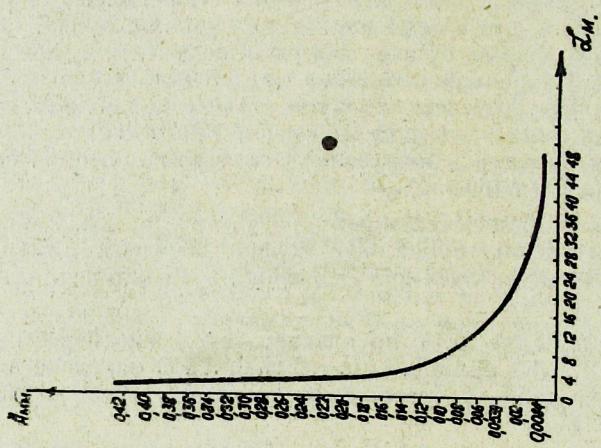
Сваи забивались дизель-молотом с весом ударной части 1800 кг, паровоздушным молотом с весом ударной части 1800 кг и молотом со свободным падением, весом 3800 кг. На фиг. 4 показан график зависимости погружение — энергия ударов.

На каждой строительной площадке были определены предельные сопротивления свай, а для второй площадки дополнительно выявлены модули упругости и модуль общей деформации грунта, в котором находился ствол сваи. На первой площадке предельное сопротивление составляло порядка 70—90 т вертикальной статической нагрузки, на второй 90—120 т. Для выявления поведения свай при сейсмическом воздействии на свае монтировалась загрузочная площадка, которая позволяла нагружать сваю до 100 т (фиг. 5).

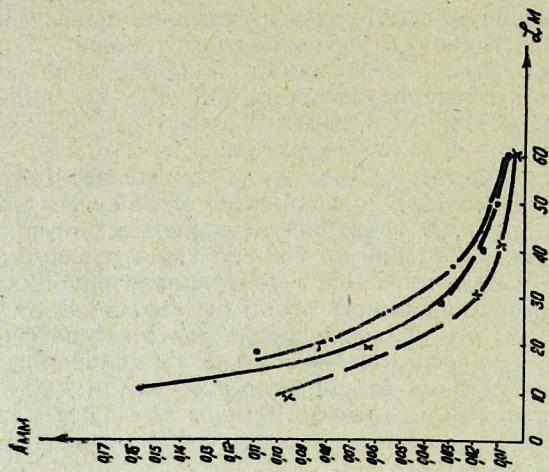
Испытание проводилось одновременно на двух сваях. Сейсмические толчки землетрясения имитировались серией взрывов с замедлением 0,035 и 0,25 сек. Продолжительность взрывания находилась в интервале 0+5 сек.

На первой площадке был произведен ряд взрывов с имитацией землетрясения в V и VI баллов. При вертикальной нагрузке в 25—35 т мгновенные осадки сваи не превышали 0,1 мм. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

На второй площадке испытание проводилось дважды. В первом случае на сваи сечением 30×30 см было нагружено 50 т и произведено восемь серий взрывов, имитирующих землетрясение в V, VI, VII и IX баллов. Осадки свай при испытании колебались в интервале 0,2—1,0 мм. Результаты эксперимента сведены в табл. 2. При этом следует отметить, что при последующих равновеликих по силе сейсмических возбуждениях осадки уменьшались. Оценка балльности при испытаниях



Фиг. 1. Зависимость амплитуды колебаний грунта от расстояния до источника возбуждения.



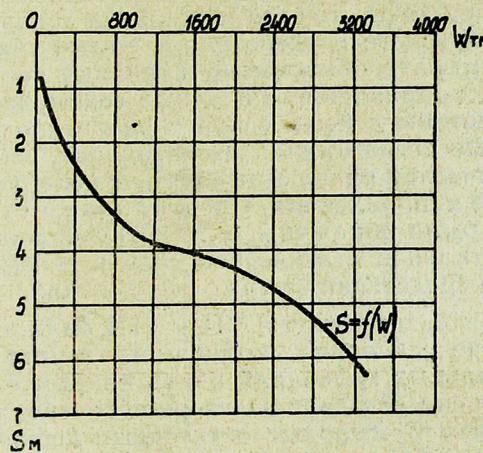
Фиг. 2. Зависимости амплитуды колебаний в поверхностном слое грунта от расстояния до источника возбуждения.

на первой площадке и в первом случае второй площадки производилась по сейсмометру Медведева.

Во втором случае на второй площадке были испытаны две сваи. При этом было произведено семь серий взрывов с имитацией землетрясений силой VI, VII, VIII и IX баллов. На сваи сечением 30×30 см было нагружено до 65 тонн. Осадки сваи при сейсмическом воздействии колебались



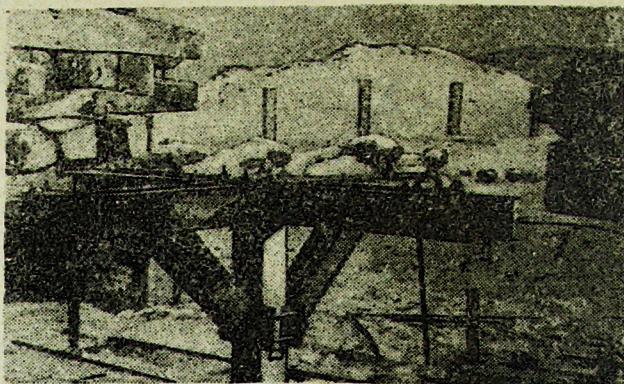
Фиг. 3. Зависимость амплитуды колебания грунта (гравия) от расстояния до источника возбуждения.



Фиг. 4. Осредненный график зависимости погружения свай от энергии ударов.

в интервале 0,4—1,5 мм. Результаты испытаний сведены в табл. 3. В этом эксперименте балльность определялась по сейсмометру Медведева и по величине ускорения колебаний почвы у сейсмометра.

На второй площадке, кроме одиночных свай, были испытаны кусты из четырех свай, объединенных ж/б ростверком, которые были забиты на глубину 4—5 м. Острие свай было погружено в толщу гравия. Испытание проводилось в два этапа. На первом этапе испытывался ростверк под действием горизонтальной сейсмической силы до смещения в 10 мм. Эта величина деформации была признана безопасной для целостности испытуемого свайного ростверка. На втором этапе ростверки испытывались при сейсмическом воздействии. Для этого ростверки были предварительно обжаты силою в 10 тонн.



Фиг. 5. Загрузочная площадка (фотография).

Эта сила соответствовала сейсмическому воздействию в вертикальном направлении в VIII баллов, подсчитанной для свайного ростверка с надфундаментной частью. Для сохранения в момент колебания постоянной величины горизонтальной статической силы между домкратом и ростверком устанавливалась компенсационная пружина. Достаточность этой меры была доказана постоянством показания (до сейсмического воздействия и после) шкалы манометра, установленного на домкрате, обжимающем свайный ростверк.

При испытаниях направление движения сейсмической волны было перпендикулярно действию сейсмической горизонтальной силы. Вследствие этого остаточные деформации регистрировались вдоль действия горизонтальной статической силы, а амплитуды колебаний в трех взаимно-перпендикулярных направлениях. Следует также отметить, что боковые грани ростверка были обнажены до отметки подошвы их тела, а со-противление горизонтальной статической силе и сейсмическому воздействию оказывали непосредственно только стволы свай.

При сейсмическом воздействии в VII и VIII баллов (балл оценивался по СБМ и величине ускорения колебаний грунта у сейсмометра) амплитуды горизонтальных колебаний вдоль направления действия статически приложенных сил для двух ростверков соответственно равнялись 0,3—0,5 и 0,5—1,45 мм. Суммарные остаточные деформации достигали 1,7 мм. Амплитуды колебаний ростверков вдоль направления действия сейсмических волн находились в интервале 1,7—2,0 мм, вертикальные амплитуды соответственно достигали 1,8 и 2,1 мм.

Ускорения колебаний свай и свайного ростверка были меньшими, чем ускорение колебания грунтов основания.

Интересующими нас динамическими характеристиками были величины периодов и амплитуд колебаний зданий и сооружений. В исследо-

Таблица 1

Результаты экспериментальных замеров перемещений свай на первой площадке 1961 г.

Дата	Интервал времени взрывов в серии	Беск 3 аппаратур без цеппин без цеппин без цеппин без цеппин без цеппин без цеппин без цеппин	Мгновенные перемещения свай № 4 в мм		Мгновенные перемещения свай № 3 в мм		Параметры вертикальные затяжения	
			вертикальные горизонтальны тальные		вертикальные горизонтальны тальные		горизонтальны тальные	
			прибор № 1	прибор № 2	прибор № 1	прибор № 2	прибор № 1	прибор № 2
26 X	I	1	0	10	50	2,0	+0,01	+0,035
27 X	II	3	0,25-0,5-0,75	3×40	50	1,5	V1	+0,028
28 X	III	3	0,25 0,5-0,75	3×30	45	1,0	V	-0,093
28 X	IV	1	0	80	65	1,0	V	+0,032
28 X	V	4	0-0,25-0,5-0,75	4×5	15	1,0	V	+0,038

Примечание. Для вертикальных перемещений + приращение вниз;
— удаление свай в сторону взрыва;

Для горизонтальных перемещений + — удаление свай в противоположную сторону.

Таблица 3

№ серии	Колебания грунта у свай				Свай № 1 (65 т)				Свай № 2 (51 т)				Свай № 1		Свай № 2		
	СВМ в ММ	СВМ в ММ	БГ-1 сек., м	БГ-2 сек., м	БГ-1 сек., м	БГ-2 сек., м	БГ-3 сек., м	БГ-3 сек., м	БГ-1 сек., м	БГ-2 сек., м	БГ-3 сек., м	БГ-1 сек., м	БГ-2 сек., м	БГ-3 сек., м	БГ-1 сек., м	БГ-2 сек., м	
K-I	10,5	XI	6840 IX	T=0,17 A=1,33	T=0,19 A=1,9	3360	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,07
K-II	1,9	VII	1220 VIII	T=0,21 A=0,60	T=0,11 A=0,25	2640	T=0,17 A=0,95	T=1,18 A=0,16	T=0,18 A=0,865	1200	T=0,29 A=0,28	T=0,19 A=0,25	T=0,18 A=0,44	—	—	—	0,44
K-III	1,85	VII	960 VII	T=0,09 A=0,29	T=0,09 A=0,13	540	T=0,17 A=0,59	T=0,15 A=0,158	T=0,18 A=0,57	348	T=0,16 A=0,165	T=0,15 A=0,117	T=0,16 A=0,81	—	—	—	0,44
K-IV	0,75	V	480 IV	T=0,15 A=0,25	T=0,14 A=0,13	316	T=0,17 A=0,41	T=0,17 A=0,16	A=0,17 A=0,37	2 6	T=0,15 A=0,12	T=0,15 A=0,12	T=0,18 A=0,29	0,07	0,07	0,07	0,035
I	3,1	VII	1440 VIII	T=0,20 A=0,65	T=0,19 A=0,32	2160	T=0,27 T=1,41	T=0,22 T=1,48	T=0,32 T=1,48	1656	T=0,31 A=1,3	T=0,19 A=0,5	T=0,22 A=1,4	0,07	0,07	0,07	0,31
II	1,35	VII	780 VII	T=0,12 A=0,43	T=0,17 A=0,21	600	T=0,2 A=0,62	T=0,19 A=0,20	T=0,20 A=0,57	514	T=0,19 A=0,31	T=0,19 A=0,22	T=0,2 A=0,6	0,04	0,04	0,04	0,14
III	15,6	IX	6600 IX	T=0,17 A=0,18	T=0,17 A=0,18	1440	T=0,2 A=2,28	T=0,28 A=0,38	T=0,24 A=0,89	1320	T=0,36 A=1,74	T=0,2 A=0,36	T=0,2 A=0,93	0,24	0,24	0,24	2,07

Таблица 2

Результаты экспериментальных замеров перемещений свай на второй площадке 1961 г.

Дата	Номер свайного прибора	Интервал времени взрывов в серии	Мгновенные перемещения свай № 8 в мм												Мгновенные перемещения свай № 7 в мм	
			вертикальные				горизонтальные				горизонтальные					
			прибор № 1	прибор № 2	прибор № 3	прибор № 4	прибор № 1	прибор № 2	прибор № 3	прибор № 4	прибор № 1	прибор № 2	прибор № 3	прибор № 4		
11 XII	K-1	0	10	32	0,8	V	0,115	-	0	0	32	-0,04	-	+0,44	-	
12 XII	I-1	0	100	75	0,5	IV	+1,25	+1,95	-1,28	+0,16	32	-0,48	+0,59	+1,59	-	
12 XII	I-15	0-0,25-0,75-1,0-1,5-1,75-2,25-2,5-1,5-3,0-3,25-3,75-4,0-3,0-0	15×10	10	11,0	IX	-0,13	-0,1	+0,10	+0,05	32	+0,16	-0,22	-0,22	-	
12 XII	III-3	0-0,75-1,0	100	50	1,2	V	-0,93	-0,41	-0,69	+0,11	32	-0,16	0	0	-	
13 XII	IV-4	0-0,25-0,75-1,0	100	75	1,0	V	0	0,5	-1,18	+0,18	51	0	0	+0,2	-	
13 XII	V-5	0-0,25-0,75-1,0-0	5×10	22	1,2	VI	0	+0,06	-0,07	+0,67	51	+0,04	0	+0,01	-	
13 XII	VI-9	0-0,75-1,00-1,5-2,25-2,50-3,00-3,75-4,00	3×5	10	2,9	VII	+0,01	10,38	+0,09	+0,68	51	+0,28	0	-1,09	-	
13 XII	VII-12	0-0,25-0,75-1,0-0-1,5-1,75-2,25-2,5-3,0-3,75-4,00	12×10	21	1,0	V	+0,03	+0,02	0	0	51	+0,08	+0,05	+0,43	-	

ваниях рассматривались три наиболее распространенных в строительстве фундамента: свайный, ленточный и столбчатый. Эксперименты проводились на указанных выше первой и второй площадках, а также на строительных объектах г. Красноярска.

На первой площадке испытывались два крупнопанельных бесподвальных здания серии 464, на второй площадке две одиночно стоящие железобетонные колонны, а на площадках г. Красноярска четыре здания серии 464, с подвальным и бесподвальным проектным решением.

Два типовых крупнопанельных четырехэтажных здания серии 464 (на первой площадке) были построены в районе, позволяющем проводить испытания с применением взрывов. Один из домов был возведен на ленточном фундаменте, аналогичном фундаментам, применяемым в данном районе, а рядом другой — на специально запроектированном свайном фундаменте. Кроме фундаментов все остальные детали здания были идентичными. Статическое испытание свай (забитых в основании дома) показало, что их предельное сопротивление вдвое превышает расчетное. На строительных площадках в Красноярске свайные фундаменты зданий были выполнены в соответствии с проектом. Таким образом, в нашем случае описываются испытания двух вариантов свайных фундаментов под здание серии 464 — стандартные и усиленные.

Испытания показали, что стандартные здания, построенные на сваях, имеют период собственных колебаний 0,24—0,26 сек., здание на ленточном фундаменте — 0,18—0,2 сек., т. е. периоды колебаний здания на свайном фундаменте на 25—30 % больше, чем на ленточном. При отсутствии сейсмовзрывного воздействия амплитуды колебаний зданий были практически одинаковыми. Испытания зданий, построенных на усиленном свайном фундаменте, показали, что период колебаний здания на ленточном фундаменте составил 0,22 сек., а на свайном 0,21 сек., что практически можно считать одинаковым. Амплитуды колебаний здания на свайном фундаменте получились в 2—4 раза меньше, чем такого же здания на ленточном фундаменте (фиг. 6).

Испытания отдельно стоящих колонн на свайном и ленточном фундаментах показали, что период колебаний колонны (в спокойном состоянии) на свайном фундаменте составляет 0,25 сек., на столбчатом — 0,21 сек., а амплитуды колебаний в случае свайных фундаментов в 1,5—2 раза больше.

При сейсмическом воздействии в VII—VIII баллов периоды колебаний колонны на свайном фундаменте были порядка 0,21—0,22 сек.; для колонны на столбчатом фундаменте 0,17—0,22 сек. Амплитуды колебаний здания на столбчатом фундаменте примерно в 2 раза больше амплитуды колебаний здания на свайном фундаменте (фиг. 7 и 8).

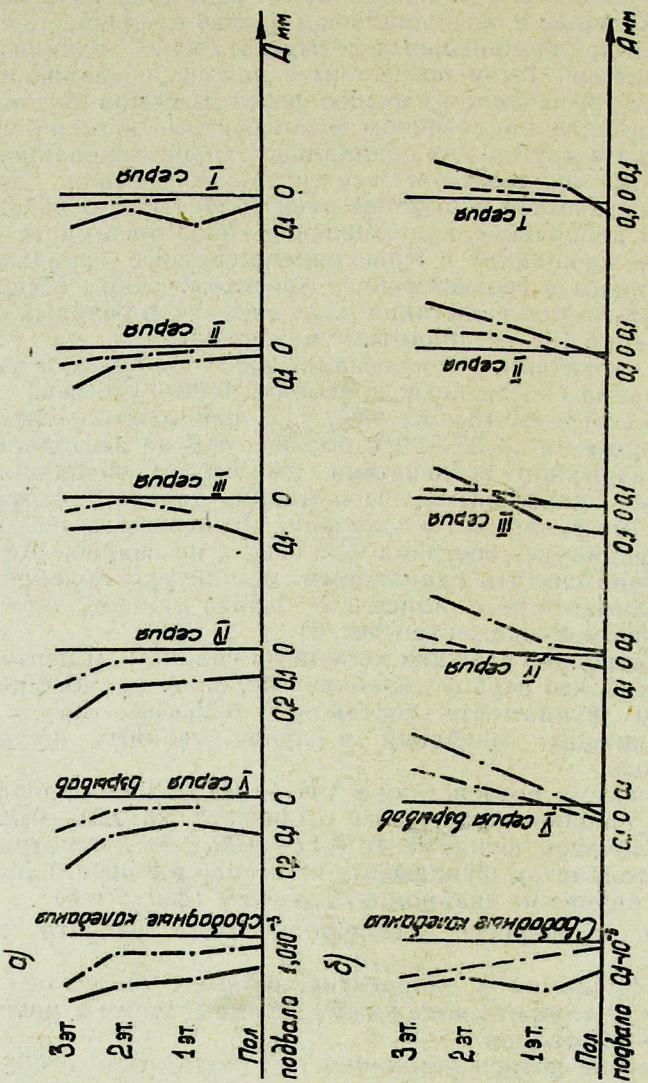
Из анализа изложенного материала можно сделать следующие выводы:

1. Свайные фундаменты, запроектированные с учетом сейсмического воздействия, могут служить надежными фундаментами в районах с сейсмичностью VII—IX баллов.

2. При проверке потери устойчивости ствола сваи следует учесть коэффициент условий работы, зависящий по величине от грунтовых условий и силы сейсмического воздействия.

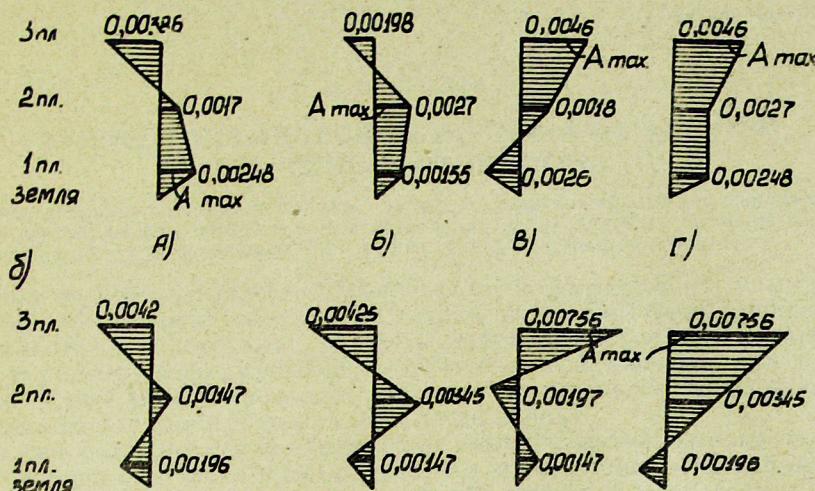
3. Изменением конструкций фундаментов можно на 20—30 % менять период собственных колебаний здания.

4. При возведении зданий и сооружений на сваях уменьшаются величины амплитуд вынужденных колебаний, что, по-видимому, объясняется снижением эффекта сейсмического воздействия на здание за счет несплошной конструкции фундамента, рассеивания энергии в гибких

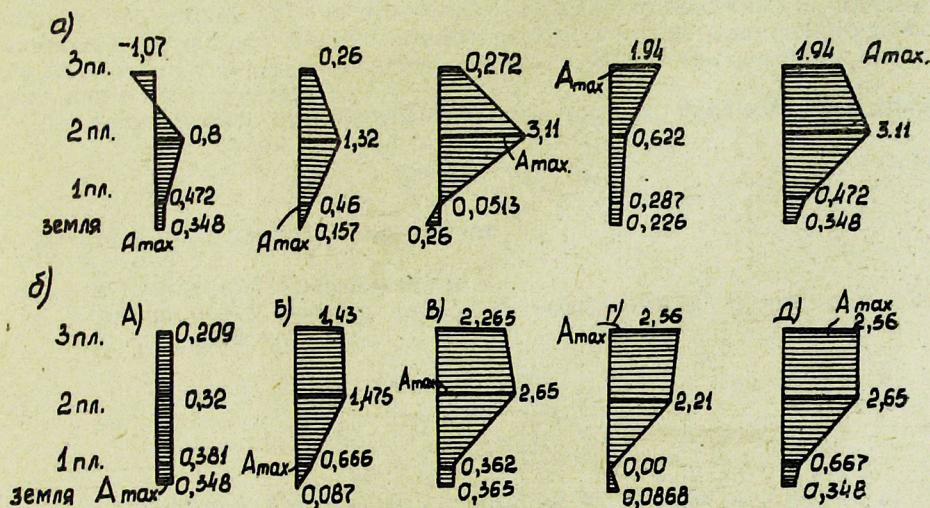


Фиг. 6 Эпюры амплитуд колебаний зданий: а—эпюры максимальных амплитуд свободных и вынужденных колебаний; б—эпюры амплитуд свободных и вынужденных колебаний зданий на ленточном и свайном фундаментах в моментах максимальных амплитуд 3-го этажа.

сваях и поглощения ее из-за пластических деформаций грунта на контакте с боковыми поверхностями свай. Поэтому в сейсмических районах следует давать предпочтение свайным фундаментам перед столбчатыми и ленточными.



Фиг. 7. Эпюры смещений (в мм) при свободном колебании колонн:
а—на столбчатом фундаменте; б—на свайном фундаменте.
Эпюры смещений А, Б, В даны в момент максимумов по площадкам колонн, а эпюра смещений Г отражает абсолютные максимумы.



Фиг. 8. Эпюры смещений (в мм) при колебании колонн от сейсмического воздействия в 7 баллов:
а—на столбчатом фундаменте; б—на свайном фундаменте.
Эпюры смещений А, Б, В, Г даны в момент максимумов на грунте и по площадкам колонн. Эпюры смещений Д отражают абсолютные максимумы.

5. При проектировании зданий и сооружений возможно подбирать конструкцию фундамента в зависимости от рода грунта для регулирования периода свободных колебаний всего объекта в целом.

Красноярский НИИ
по строительству.