

УДК 624.15

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ НОВОГО МЕТОДА КОЛЬЦЕВОГО АРМИРОВАНИЯ СЛАБЫХ ГРУНТОВ

А.А. Землянский, К.А. Землянский, С.А. Дубнов

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований нового метода активного кольцевого армирования слабых грунтов при строительстве и реконструкции уникальных, энергетических, исторических и высотных зданий и сооружений с управляемой эксплуатационной надежностью возводимых объектов.

Ключевые слова: эксплуатационная надежность; кольцевое армирование; преднапряжение по грунту; автоматическое управление НДС грунтового основания.

БОШ ЖЕР КЫРТЫШЫН АРМАТУРА МЕНЕН АЙЛАНТА БЕКЕМДӨӨНҮН ЖАҢЫ МЕТОДУН ЭКСПЕРИМЕНТАЛДЫК НЕГИЗДӨӨ

Бул макалада тургузулуучу объекттердин колдонуудагы бекемдиги менен башкарылуучу уникалдуу, энергетикалык, тарыхый жана бийик имараттарды жана курулмаларды курууда жана реконструкциялоодо бош жер кыртышын арматура менен айлантат активдүү бекемдөөнүн жаңы методун теориялык жана эксперименталдык изилдөөлөрдүн жыйынтыктары сунушталды.

Түйүндүү сөздөр: колдонуудагы бекемдиги; арматура менен айлантат бекемдөө; жер кыртышы чыңалуунун алдында; жер кыртышынын чыңалган деформацияланган абалын автоматтык башкаруу.

EXPERIMENTAL JUSTIFICATION OF NEW METHOD OF RING REINFORCING WEAK SOIL

A.A. Zemljanskij, K.A. Zemljanskij, S.A. Dubnov

The paper presents the results of theoretical and pilot studies of a new method of active ring reinforcing of weak soil at construction and reconstruction of unique, power, historical and high-rise buildings and constructions with the operated operational reliability of constructed facilities.

Keywords: operational reliability; ring reinforcing; pre-tension on soil; automatic control of the VAT of the soil basis.

Анализ результатов обследования различных уникальных, исторических и высотных зданий и сооружений позволил установить, что в преобладающем большинстве случаев лавинообразные и необратимые аварии последних произошли в основном из-за больших абсолютных и неравномерных осадок грунтового основания.

Отмеченный факт наглядно подтвержден и многочисленными работами В.М. Улицкого, В.А. Ильичева, Б.И. Долматова, Е.А. Сорочана и М.Ю. Абелева [1–4]. В настоящее время существует множество пассивных методов усиления слабых грунтов, к которым можно отнести различные способы вертикального и горизонтального армирования грунтов с помощью различных металлических, синтетических и сверхпрочных композиционных материалов.

Использование на практике кольцевых свайных и сплошных шпунтовых стенок позволяет добиться некоторого пассивного эффекта за счет перераспределения вертикальных и горизонтальных напряжений, обусловленного изменением граничных условий загружаемого основания. Однако в результате практического применения указанного армирования, снижение осадки загружаемого основания при равной интенсивности внешней нагрузки происходит не более чем на 60 %, что не позволяет добиться необходимой безаварийной и эффективной эксплуатации высотных зданий и сооружений.

Все это свидетельствует об актуальности рассматриваемой проблемы, связанной с необходимостью разработки принципиально новых методов

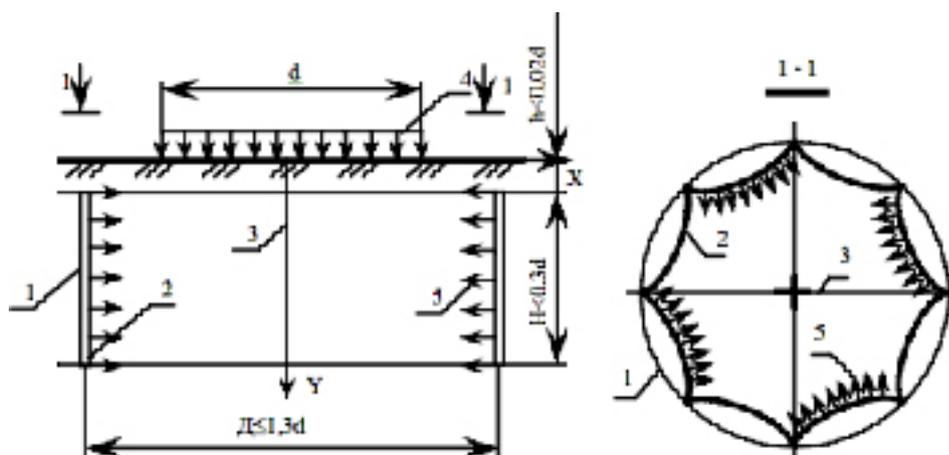


Рисунок 1 – Конструктивная схема кольцевой шпунтовой стенки с преднапряжением по грунту:
 1 – внешняя стенка кольцевой шпунтовой системы; 2 – внутренняя стенка кольцевой шпунтовой системы;
 3 – рабочая зона преднапрягаемого грунта; 4 – нагрузка от здания или сооружения;
 5 – давление горизонтального преднапряжения грунта

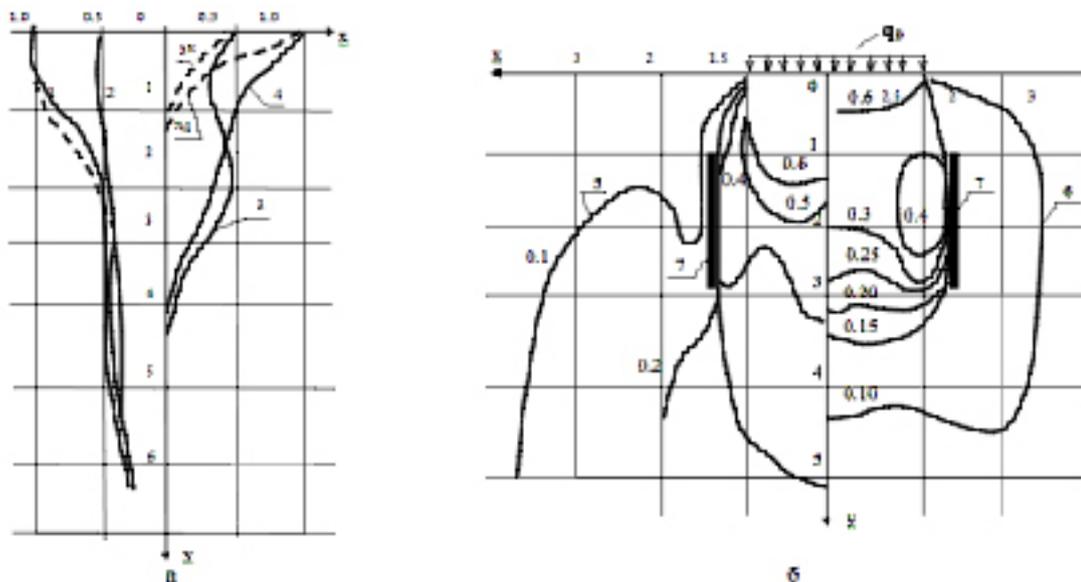


Рисунок 2 – Результаты численного эксперимента с пассивным армированием грунта в основании:
 а – эпюры напряжений в вертикальном сечении грунта основания. 1 – эпюра вертикального напряжения σ_y в сечениях $x = 0$; 2 – эпюра вертикального напряжения σ_y в сечениях $x = b/2$; 3 – эпюра горизонтального напряжения σ_x в сечениях $x = b/2$; 4 – эпюра горизонтального напряжения σ_x в сечениях $x = 0$ (пунктиром показаны эпюры напряжений в неармированном состоянии);
 б – изобары напряжений по оси y и оси x ; 5 – изобары σ_y ; 6 – изобары σ_x ;
 7 – зона армирования грунтового основания

активного усиления слабых грунтов и создания нетрадиционных и высокоэффективных систем армирования грунта.

Аналитическое обоснование. Установленный в работах [2–4] факт значительного увеличения доли вертикальных осадок дневной поверхности грунтового основания из-за больших

перемещений расчетной среды в горизонтальном направлении позволил авторам разработать новый принцип увеличения несущей способности грунтового основания за счет активного горизонтального армирования грунта с помощью полый кольцевой шпунтовой стенки, преднапряженной по окружающему грунту (рисунок 1).

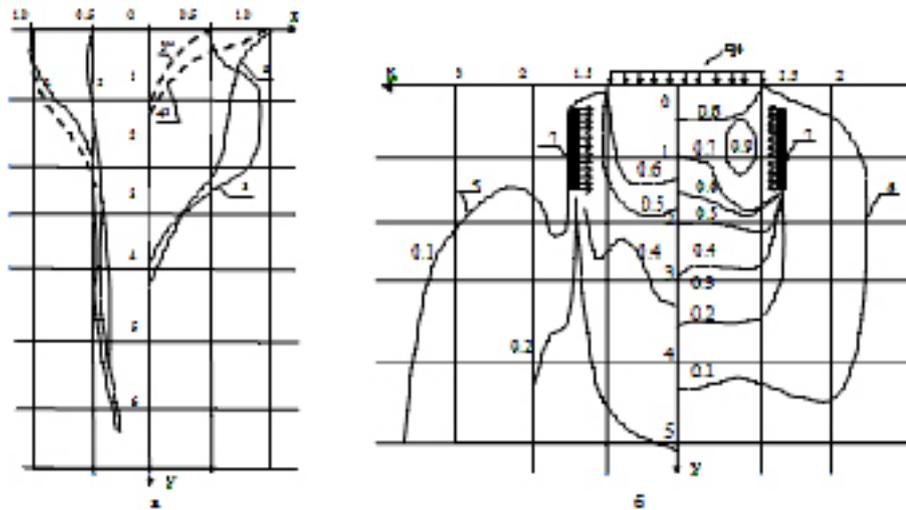


Рисунок 3 – Результаты численного эксперимента с активным армированием грунта в основании:
 1 – эпюра вертикального напряжения σ_y в сечениях $x = 0$; 2 – эпюра вертикального напряжения σ_y в сечениях $x = b/2$; 3 – эпюра горизонтального напряжения σ_x в сечениях $x=b/2$; 4 – эпюра горизонтального напряжения σ_x в сечениях $x = 0$ (пунктиром показаны эпюры напряжений в неармированном состоянии); б – изобары напряжений по оси y и оси x ; 5 – изобары σ_y ; 6 – изобары σ_x ; 7 – зона армирования грунтового основания

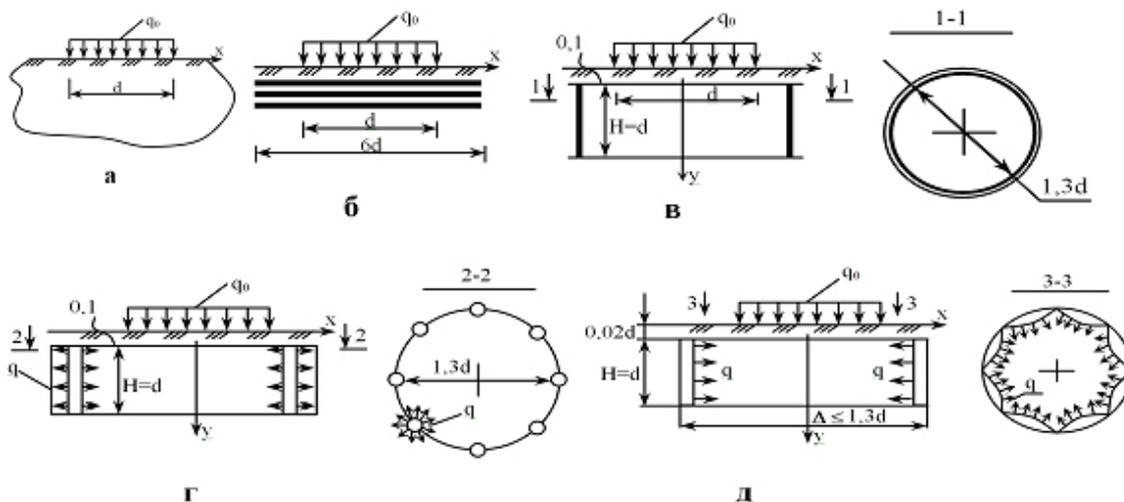


Рисунок 4 – Схемы армирования грунтового основания под здания и сооружения:
 а – неармированное грунтовое основание; б – пассивное армирование грунта горизонтальными элементами;
 в – пассивное армирование грунта жестким заглубленным кольцом; г – активное армирование грунта в кольцевом направлении сваями, преднапряженными по грунту; д – активное армирование грунта кольцевым элементом с преднапряжением по грунту

При этом преднапряжение грунта, находящегося во внутренней зоне кольцевой шпунтовой стенки, может осуществляться за счет давления воздуха, давления жидкости, или давления саморасширяющегося грунтоцементного раствора, нагнетаемого в рабочие полости кольцевой шпунтовой стенки.

Выполнены теоретические исследования с использованием значительного перераспределения

горизонтальных и вертикальных напряжений в исследуемом грунтовом основании, что является на практике главной и доминирующей причиной резкого повышения несущей способности армируемой грунтовой среды. Полученные результаты представлены на рисунках 2, 3.

В ходе аналитического обоснования предложенного метода кольцевого армирования слабых

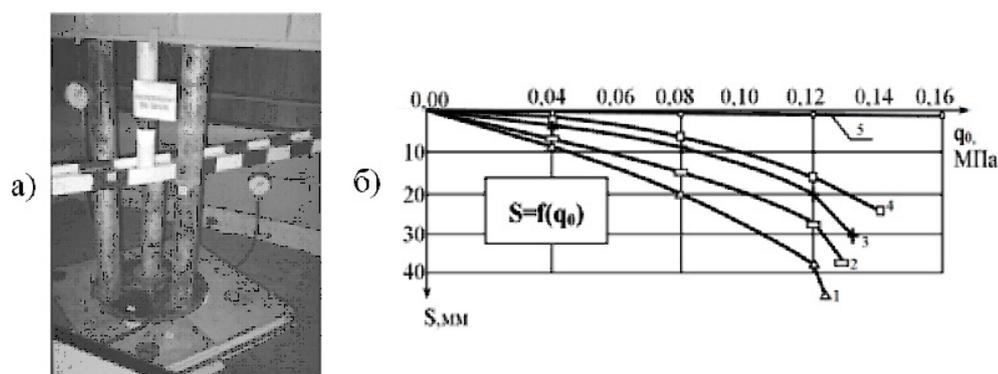


Рисунок 5 – Результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния грунта при активном кольцевом армировании: а – общий вид экспериментальной установки; б – график зависимости средней осадки гибкого штампа от интенсивности внешней нагрузки и способа армирования грунтового основания; 1 – неармированное грунтовое основание $S_1 = 39$ мм; 2 – пассивное армирование грунта линейными элементами $S_2 = 24$ мм; 3 – пассивное армирование грунта жестким кольцевым элементом $S_3 = 20$ мм; 4 – активное армирование грунта сваями, преднапряженными по грунту в кольцевом направлении $S_4 = 18$ мм; 5 – активное армирование грунта кольцевым элементом с преднапряжением внутренней зоны грунта $S_5 = 0,88$ мм

грунтов, в работе выполнена оптимизация конструкции и основных размеров полый кольцевой шпунтовой стенки.

Установлено, что при минимальных затратах рабочий диаметр кольцевого армирующего элемента должен удовлетворять условию $D \leq 1,3d$, где d – диаметр рабочей зоны усиления слабого грунта. Рабочая высота преднапряженного кольцевого элемента должна находиться в пределах $H \leq 0,3d$. Наконец, удаление преднапряженного кольцевого элемента h от дневной поверхности грунтового основания должно составлять не более $0,02d$.

Экспериментальное обоснование. С целью экспериментального обоснования эффективности пассивного и активного армирования грунта автором выполнен целый комплекс исследований, направленный на качественную и количественную оценку уровня уменьшения деформируемости армированного грунтового основания. При этом были рассмотрены пять схем армирования исследуемого грунтового основания, представленные на рисунке 4.

Все эксперименты были выполнены в лотке размером $3 \times 3 \times 4$ м, заполненном кварцевым среднезернистым песком плотностью $\rho = 16$ кН/м³ влажностью $\omega \leq 12$ %, с углом внутреннего трения $\varphi = 34^\circ$ и модулем общей деформации $E_0 = 5,4$ МПа. Нагрузку q_0 от днища резервуара моделировали резиновой диафрагмой, герметично закрепленной на абсолютно жестком штампе диаметром 60 см и 120 см через которую с помощью воздуха можно передавать на грунт абсолютно равномерную распределенную нагрузку интенсивностью q_0 .

По первой схеме для достоверной оценки эффективности различных способов армирования грунта последний загружали через абсолютно гибкий штамп без какого-либо армирования грунтового основания.

По второй схеме осуществляли армирование грунта металлической фольгой, укладываемой горизонтально в грунт, в три слоя во взаимно перпендикулярных направлениях.

По третьей схеме было выполнено армирование грунта в пассивном режиме с помощью жесткого кольца высотой, равной диаметру рабочего штампа, удаленного от дневной поверхности на $h = 0,1d$.

По четвертой схеме создавали армирование грунта в кольцевом направлении одиночными сваями высотой $H = d$ с активным преднапряжением по грунту и удалением друг от друга на расстояние $l \approx 3d$.

По пятой схеме было выполнено армирование грунта в активном режиме с помощью кольцевого элемента, позволяющего осуществить ступенчатое преднапряжение грунта во внутренней полости кольца.

В результате проведения всего цикла запланированных экспериментов были получены графики зависимости усредненных осадок абсолютно гибкого штампа соответственно от интенсивности внешней нагрузки и вида армирования грунта (рисунок 5, а, б).

Анализ полученных результатов показал, что усредненная осадка грунтового основания при вертикальной равномерно распределенной нагрузке интенсивностью $q_0 = 0,12$ МПа составила около 39 мм

Таблица 1 – Уровни варьирования изучаемых факторов

Факторы Уровни	X ₁ (q ₀)		X ₂ (q)		X ₃ (h)		X ₄ (H)	
	физ.зн. (МПа)	код	физ.зн. (МПа)	код	физ.зн. (см)	код	физ.зн. (см)	код
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Верхний X ^в	0,16	+1	0,12	+1	5	+1	50	+1
Основной X ⁰	0,13	0	0,10	0	3	0	35	0
Нижний X ^н	0,10	-1	0,08	-1	1	-1	20	-1
Интервал варьирования	0,03	-	0,02	-	2	-	15	-

Таблица 2 – Матрица планирования экспериментов для линейной аппроксимации модели активного армирования грунтового основания абсолютно гибким штампом

Номер опыта	Факторы и их взаимодействие											Средняя осадка мембраны			Ошибка %	
												Серия опытов		у _{экс} ср		Расчетные значения
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₁ X ₄	X ₂ X ₃	X ₂ X ₄	X ₃ X ₄	I	II			
1	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	2,76	2,60	2,68	2,40	-10,4
2	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	4,20	4,00	4,10	4,17	+1,7
3	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	1,60	1,40	1,50	1,45	+3,4
4	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	3,90	3,70	3,80	4,05	+6,6
5	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	3,20	2,90	3,05	2,90	-4,9
6	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	4,54	4,30	4,42	4,80	+8,5
7	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	2,26	2,10	2,18	2,40	+10
8	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	8,90	8,10	8,50	8,00	-11
9	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	0,68	0,60	0,64	0,80	+25
10	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	5,74	5,30	5,52	5,30	-3,9
11	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	0,80	0,70	0,750	0,60	-20
12	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	0,94	0,82	0,88	1,00	+13,6
13	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	0,91	0,81	0,86	0,68	-21
14	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	3,00	2,60	2,80	2,87	+2,0
15	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	0,54	0,50	0,52	0,40	-23
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1,76	1,60	1,68	1,80	+7,1

при диаметре рабочего штампа, равном 60 см, во втором случае – около 24 мм. В третьем случае указанная осадка составила чуть более 20 мм. В четвертом случае при активном преднапряжении грунта вокруг одиночных свай в пределах q₀ = 0,12 МПа осадка составила около 18 мм. Наконец, в пятом случае при том же уровне преднапряжения осадка составила всего 0,88 мм, что свидетельствует о высокой эффективности предложенного способа активного горизонтального армирования слабых грунтов, так как в результате преднапряжения грунта специальным кольцевым элементом средняя осадка поверхности исследуемого грунтового основания уменьшилась более чем в 40 раз по отношению к неармированному грунтовому осно-

ванию, что свидетельствует о полном подтверждении всех теоретических прогнозов и аналитических исследований, выполненных автором.

С целью пошаговой оптимизации размеров кольцевой системы преднапряжения и зоны активного армирования исследуемого грунтового основания был выполнен целый комплекс экспериментов с использованием классической теории математического планирования экспериментов. При этом в ходе проводимых экспериментов все физико-механические характеристики исследуемого грунта были застabilизированы на одном заданном уровне.

В таблице 1 выделены четыре наиболее значимых и доминирующих фактора, к которым можно

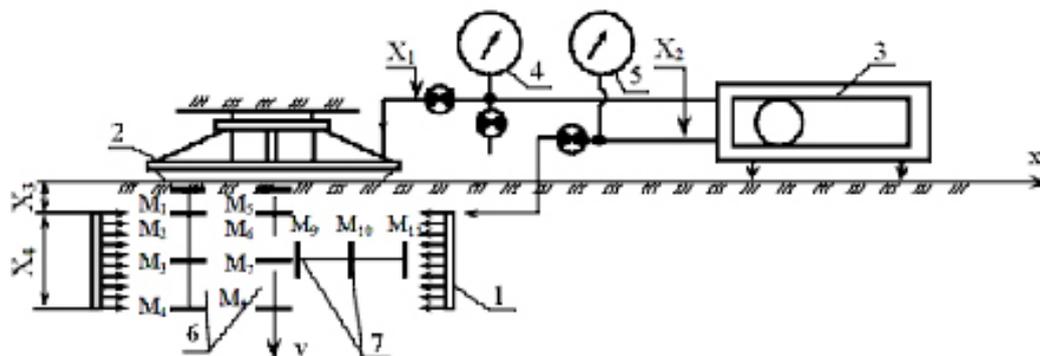


Рисунок 6 – Схема пневмозагрузки грунтового основания через гибкую мембрану и размещение мессдоз для оценки напряженно-деформированного состояния исследуемого основания: 1 – кольцевая система армирования грунта; 2 – жесткий штамп с абсолютно гибкой мембраной; 3 – система пневмозагрузки рабочего штампа; 4 – система измерения давления в штампе; 5 – система измерения давления в кольцевой системе преднапряжения грунта; 6 – мессдозы для измерений давления в вертикальном направлении; 7 – мессдозы для измерений давления в горизонтальном направлении; X_1, X_2, X_3, X_4 – активные факторы (внешнее давление q_0 , давление преднапряжения грунта q , удаление кольцевой системы преднапряжения от дневной поверхности грунта h , высота H кольцевой системы армирования) исследуемые ММПЭ для оценки их влияния на деформирование грунтового основания

отнести: интенсивность внешней вертикальной, равномерно распределенной нагрузки q_0 (X_1) (МПа), передаваемой на исследуемый грунт через гибкую резиновую мембрану абсолютно жесткого штампа; интенсивность преднапряжения грунта q (X_2) (МПа), создаваемого за счет кольцевой системы армирования грунта; удаление кольцевой системы армирования грунта от дневной поверхности h (X_3) (см); высоту кольцевого элемента для активного горизонтального преднапряжения грунта H (X_4) (см) при его постоянном диаметре.

Матрица планирования четырехфакторного эксперимента представлена в таблице 2.

Схема пневмозагрузки исследуемого грунтового основания с активным кольцевым армированием грунта, размещение мессдоз и датчиков перемещения грунта в ходе выполняемых экспериментов для комплексной оценки напряженно-деформированного состояния расчетной среды, представлены на рисунке 6.

Реализация матрицы планирования четырехфакторного эксперимента с запланированной последовательностью и сочетанием изучаемых факторов позволила получить следующее уравнение регрессии:

$$\begin{aligned} \hat{y}_{cpi} = & 2,838 + 1,123X_1 - 0,246X_2 + \\ & + 0,266X_3 - 0,927X_4 - 0,00162X_1X_2 + \\ & + 0,121X_1X_3 - 0,315X_1X_4 + 0,593X_2X_3 - \\ & - 0,288X_2X_4 - 0,480X_3X_1 + \\ & + 0,393X_1X_2X_3 - 0,103X_1X_2X_3X_4, \end{aligned} \quad (1)$$

где \hat{y}_{cpi} – усредненная осадка дневной поверхности грунтового основания, нагруженного равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью q_0 , МПа.

Общий анализ полученного уравнения регрессии показал его достаточно высокую адекватность, обусловленную тем, что ошибка между экспериментальными и расчетными данными не превышает в большинстве случаев 6–8 %, что подтверждено и дополнительной проверкой по F-критерию Фишера [6].

Анализ полученной математической модели свидетельствует о том, что самое большое влияние на ожидаемую усредненную осадку гибкого штампа оказывает X_1 , то есть интенсивность внешней нагрузки q_0 . При этом, как показывает знак у коэффициента корреляции, с увеличением нагрузки осадка грунтового основания увеличивается.

На втором месте по степени влияния находится высота элемента армирования грунта H , в нашем случае X_4 . При этом, исходя из знака, чем больше высота элемента армирования, тем меньше ожидаемая осадка.

На третьем месте по степени влияния на осадку грунтового основания находится удаление элемента армирования от дневной поверхности X_3 . При этом, чем больше удаление исследуемой системы армирования грунта от дневной поверхности, тем выше становится осадка загружаемого основания.

Наконец, на четвертом месте по интенсивности влияния на изучаемый отклик находится

интенсивность преднапряжения грунта внутри исследуемого массива q , в рассматриваемом случае X_2 . При этом, чем больше интенсивность горизонтального давления преднапряжения грунта, тем меньше ожидаемая усредненная осадка исследуемого грунта.

Выводы. Детальный анализ полученных результатов позволил установить очень высокую эффективность предложенного метода активного кольцевого армирования слабых грунтов, достигающих в отдельных случаях более чем сорокакратного уменьшения осадки дневной поверхности исследуемого армированного грунтового основания по сравнению с неармированным.

Выполненные исследования позволили создать новый класс активного кольцевого армирования грунта и новую конструкцию нетрадиционных кольцевых фундаментов несущей способностью и эксплуатационной надежностью которых можно эффективно и целенаправленно управлять с целью предотвращения любых потенциально возможных аварийных, либо предаварийных ситуаций исследуемых объектов.

Предложенный метод активного кольцевого армирования слабых грунтов даст возможность на практике создать абсолютно новое поколение интеллектуально разумных строительных объектов

с управляемой эксплуатационной надежностью, что позволит вывести всю отечественную строительную индустрию России на инновационный путь развития.

Литература

1. Научно-технический журнал “Реконструкция городов и геотехническое строительство” / под ред. В.М. Улицкого. М.: Изд-во АСВ. СПб., 2003–2004. 268 с.
2. Сорочан Е.А. Фундаменты промышленных зданий / Е.А. Сорочан. М.: Стройиздат, 1986. 333 с.
3. Сорочан Е.А. Строительство сооружений на набухающих грунтах / Е.А. Сорочан. М.: Стройиздат, 1989. 312 с.
4. Абелев М.Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах / М.Ю. Абелев. М.: Стройиздат, 1983. 248 с.
5. Справочник проектировщика. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. Е.А. Сорочан, Ю.Г. Трофименкова. М.: Стройиздат, 1985. 480 с.
6. Ковшов В.А. Постановка инженерного эксперимента / В.А. Ковшов. Киев–Донецк: Высшая школа, 1982. 120 с.