УДК 624.138.9

В.И. Клевеко

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АРМИРОВАННЫХ ГЛИНИСТЫХ ОСНОВАНИЙ

Использование армированных оснований в глинистых почвах изучено еще недостаточно хорошо. Таким образом, для внедрения в практику конструкций фундаментов на армированных основаниях необходимо провести анализ их напряженно-деформированного состояния, чтобы выявить рациональные сферы применения и разработать оптимальные конструкции армированных оснований. Для изучения работы армированных оснований были проведены сложные теоретико-экспериментальные исследования: модельные лабораторные исследования, натурные испытания, численное моделирование работы армированных оснований в водонасыщенных глинистых грунтах. Проведенные исследования позволили получить качественную и количественную картину работы армированных оснований и их напряженно-деформированного состояния, чтобы определить рациональную сферу применения и разработать рекомендации для их проектирования.

Ключевые слова: армированные основания, глинистые грунты, экспериментальные исследования, численное моделирование, рациональная область применения.

V.I. Kleveko

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

RESEARCH OF THE WORK OF REINFORCED CLAY SOILS

Using reinforced bases in clay soils is studied still insufficiently well. Therefore, in order to use the building practice of constructions of the bases on the reinforced ground it is necessary to carry out the analysis of their stress-deformed condition to reveal a rational scope and to develop optimum constructions of the reinforced bases. For studying of work of the reinforced bases complex theoretical-experimental researches have been carried out: laboratory modelling researches, natural tests, numerical modelling of work of the reinforced bases in water sated clay soils. The carried out researches have allowed to receive a qualitative and quantitative picture of reinforced soil work of the bases and their stress-deformed condition to define a rational scope and to develop recommendations or their designing.

Keywords: reinforced base, clay soils, experimental studies, numerical modeling, rational scope.

Введение

Затраты на возведение фундаментов зданий и сооружений могут составлять до 35 % от общей стоимости строительства. Уменьшение затрат на устройство фундаментов является весьма актуальной проблемой, особенно при строительстве на переувлажненных пылевато-глинистых грунтах. Улучшение свойств таких грунтов позволило бы значительно снизить стоимость возведения фундаментов.

Одним из способов улучшения прочностных и деформационных свойств оснований является применение армированного грунта, представляющего собой комбинацию грунта и арматуры. Введение армирующих элементов позволяет значительно улучшить прочностные и деформационные характеристики грунтов, а следовательно, снизить затраты на возведение фундаментов. Большинство экспериментальных и теоретических исследований армированных грунтов проводилось в песках [1], работа же армированных оснований (АО) в пылевато-глинистых грунтах изучена еще недостаточно, хотя такие работы проводятся с 90-х гг. прошлого века [2–6]. Для использования в строительной практике конструкций оснований из армированного грунта необходимо было провести анализ их напряженно-деформированного состояния (НДС) и разработать инженерный метод расчета данных конструкций.

Закономерности взаимодействия армирующих прослоек в пылевато-глинистых грунтах изучены недостаточно, поэтому необходимо было выполнить комплексные исследования НДС активной зоны АО.

На основе этих экспериментов выявлена оптимальная область применения АО в пылевато-глинистых грунтах и их НДС.

1. Экспериментальные исследования

1.1. Модельные исследования

Экспериментальные исследования проводились в два этапа. Первый этап включал в себя проведение маломасштабных модельных штамповых испытаний различных конструкций АО в лабораторных условиях. Второй этап представлял собой штамповые испытания АО в естественных грунтовых условиях и дал количественные показатели работы АО.

На первом этапе экспериментальных работ осуществлялись испытания маломасштабных моделей различных конструкций АО на действие вертикальной нагрузки в суглинке при показателе текучести

I_L от 0,2 до 0,8 с трехкратной повторяемостью. Исследования проводились для двух видов армирования: одно- и двухслойного. В качестве арматуры применялось два вида геосинтетических материалов: нетканый синтетический материал (НСМ), имеющий прочность на растяжение 15,0–16,0 кН/м, линейный модуль деформации 25–28 кН/м, и стеклоткань, имеющая прочность на растяжение 45 кН/м, линейный модуль деформации 2100 кН/м. В качестве модели фундамента использовался жесткий круглый металлический штамп диаметром 64 мм. Армирующий материал закладывался в грунт при однослойном армировании на глубине $0,3d$ (d – диаметр штампа), а при двухслойном – на глубине $0,3$ и $0,5d$ и представлял собой круг диаметром $3d$.

Рис. 1. Зависимость коэффициента $K_{арм}$ от показателя текучести грунта

Одной из задач экспериментальных исследований с моделями АО являлось установление закономерности развития осадки от нагрузки для различных конструкций и армирующих материалов, а также сравнение их несущей способности с неармированным грунтом. Для оценки несущей способности АО был введен коэффициент влияния армирования $K_{арм}$, равный отношению несущей способности АО к несущей способности неармированного. Для иллюстрации был построен график зависимости коэффициента влияния армирования $K_{арм}$ от показателя текучести грунта, приведенный на рис. 1.

Для сравнения эффективности однослойного и двухслойного армирования была определена характеристика удельной несущей способности АО, равная отношению несущей способности армированного основания к площади армирующей прослойки. На рис. 2 показан график зависимости удельной несущей способности от показателя текучести.

Рис. 2. Зависимость удельной несущей способности основания от показателя текучести грунта

Анализ результатов, полученных после проведенных исследований, позволяет сделать следующие выводы:

1. Армирование основания в зависимости от консистенции приводит к повышению несущей способности в 2 раза и более по сравнению с несущей способностью неармированного основания в аналогичных условиях.

2. Наиболее эффективное применение армирования достигается в грунтах тугопластичной и мягкопластичной консистенции ($I_L = 0,4 \dots 0,6$).

3. Удельная несущая способность однослойных АО выше в среднем в 1,6 раза по сравнению с двухслойными, поэтому более эффективно использование однослойного армирования.

4. В исследованном диапазоне влажностей грунта более эффективно использование армирующих материалов с высокими прочностными и деформативными характеристиками.

5. Для более корректного сравнения осадки двухслойного армирования легкосжимаемыми НСМ необходимо учитывать собственную сжимаемость этих материалов [7].

1.2. Полевые испытания

Для проверки результатов модельных исследований и определения НДС АО были проведены натурные штамповые исследования. При проведении испытаний использовался жесткий круглый штамп диа-

метром 600 мм. В качестве армирующего материала применялась стеклоткань размером $3d$, располагающаяся на глубине $0,25d$ (d – диаметр штампа). Испытания проводились для армированного и неармированного основания в глине мягкопластичной консистенции.

Для изучения НДС активной зоны АО замерялись нормальные напряжения с помощью датчиков давления (мессдоз) и вертикальные перемещения с помощью грунтовых марок. По результатам испытаний получены графики зависимости осадки штампа от нагрузки и значения вертикальных напряжений и перемещений.

На рис. 3 приведены графики зависимости осадки штампа от нагрузки для армированного и неармированного оснований. Из графиков «осадка – нагрузка» видно, что расхождения в экспериментальных и расчетных перемещениях для обоих видов оснований незначительны.

Рис. 3. Сравнение результатов натурного и численного экспериментов

Анализ результатов натурных штамповых исследований в глинистых грунтах позволяет сделать следующие выводы:

1. Армирование основания в грунтах мягкопластичной консистенции приводит к повышению их несущей способности минимум в 1,2 раза при снижении осадок до 1,6 раза.

2. НДС АО заметно отличается от НДС неармированного. Введение армирующего элемента трансформирует распределение напряжений в верхней части активной зоны основания на глубине до $1,25d$. Вертикальные напряжения под армирующей прослойкой снижаются в среднем на 38–39 %.

2. Численное моделирование

На основе численных исследований методом МКЭ по программе PLAXIS дан анализ НДС армированных грунтовых оснований в пылевато-глинистых грунтах. Выполнено сравнение теоретических и экспериментальных результатов исследований.

Для исследования НДС АО и сравнения его с неармированным основанием были определены вертикальные напряжения и перемещения в активной зоне основания с помощью программы PLAXIS. Решалась осесимметричная задача в упругопластической постановке. Для расчетов применялась «продвинутая» модель грунта Мора – Кулона. В отличие от обычной модели Мора – Кулона, где дилатансия грунта не ограничена, в «продвинутой» модели дилатансия имеет предельную величину. Сравнения результатов расчета по МКЭ и натурных наблюдений приведены на рис. 3. Анализ этих графиков показывает, что для АО средняя погрешность составляет 12,7 %, а для неармированного основания – 11,4 %. Сравнение результатов величин вертикальных перемещений марок показало, что средняя погрешность для АО составила 4,4 %, а для неармированного основания – 8,2 %. Проведенный анализ позволил установить, что программа PLAXIS дает возможность с достаточной точностью рассчитывать АО.

Изучение влияния прочностных характеристик грунта (C и φ) и параметров армирования (глубина заложения армирующего материала z , жесткость на растяжение армирующего материала G_{rf}) на расчетное сопротивление АО с помощью программы PLAXIS позволяет сделать выводы:

1. Расчетное сопротивление АО возрастает при увеличении G_{rf} практически во всем диапазоне прочностных характеристик грунтов,

но наиболее рациональный диапазон значений G_{rf} составляет 1000–2000 кН/м.

2. Оптимальное значение заглубления армирующей прослойки для материалов с жесткостью на растяжение 1000–2000 кН/м составляет 0,2–0,25 d .

Выводы

1. Для малонагруженных фундаментов наиболее оптимальным является использование однослойного армирования горизонтальными прослойками с их размещением на глубине (0,2–0,25) d от подошвы фундамента. Рациональная область применения армирования в грунтах с $I_L = 0,4 \dots 0,6$.

2. Армирование грунтового основания горизонтальными прослойками позволяет повысить несущую способность пылевато-глинистого грунта до 1,2 раза и снизить осадки фундаментов на АО до 1,6 раза.

3. Выполненными исследованиями НДС АО установлено, что введение армирующего элемента трансформирует распределение напряжений в пределах верхней части активной зоны основания на глубину до 1,25 d . Вертикальные напряжения под армирующей прослойкой снижаются в среднем на 38–39 %.

4. Наиболее оптимальным для армирования является применение синтетических тканых материалов из полиэфирного волокна с жесткостью на растяжение 1000–2000 кН/м.

5. Использование аппарата МКЭ в упругопластической постановке по «продвинутой» расчетной модели грунта Мора – Кулона позволяет спрогнозировать работу АО в широком диапазоне грунтовых условий и действующих нагрузок, получить количественные значения параметров работы системы «фундамент – АО», которые легли в основу предлагаемого инженерного метода расчета.

6. Применение армированных оснований позволяет снизить стоимость возведения фундаментов до 25 % и трудоемкость до 30 % по сравнению с традиционными конструкциями. Особенно эффективно применение армированных оснований в глинистых грунтах для сооружений со сравнительно большими осадками, например в дорожном строительстве [8].

Библиографический список

1. Татьянников Д.А., Клевеко В.И., Пономарев А.Б. Анализ работы армированного песчаного основания на основе штамповых модельных испытаний // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2012. – № 4 (8). – С. 92–102.

2. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals / A.A. Bartolomey, A.N. Bogomolov, V.I. Klevеko, A.B. Ponomaryov, V.G. Ofrikhter // Proceedings of the twelfth European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. –Amsterdam. Netherlands, 1999. – Vol. 2. – P. 1197–1202.

3. Клевеко В.И. Оценка напряженно-деформированного состояния армированных оснований в пылевато-глинистых грунтах: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2002. – 152 с.

4. Клевеко В.И. Оценка величины осадки фундамента на глинистых основаниях, армированных горизонтальными прослойками // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2012. – № 1. – С. 89–98.

5. Klevеko V.I. Research of the clay soil reinforced bases work // Proceedings 5th European Geosynthetics Congress. – Valencia, 2012. – Vol. 4. – P. 317–321.

6. Золотозубов Д.Г., Клевеко В.И., Пономарев А.Б., Нестеров Р.С. Некоторые результаты исследований армогрунтовых оснований // Актуальные проблемы геотехники: сб. ст., посвященный 60-летию профессора А.Н. Богомолова / ВолгГАСУ. – Волгоград, 2014. – С. 165–171.

7. Татьянников Д.А., Клевеко В.И. Влияние сжимаемости армирующего материала на осадку фундамента при штамповых модельных испытаниях на примере геокомпозита // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Строительство и архитектура. – 2013. – № 2. – С. 124–132.

8. Клевеко В.И. Применение геосинтетических материалов в дорожном строительстве в условиях Пермского края // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического ун-та. Строительство и архитектура. – 2013. – № 1. – С.114–123.

References

1. Tatyannikov D.A., Klevеko V.I., Ponomarev A.B. Analiz raboty armirovannogo peschanogo osnovaniya na osnove shtampovykh model'nykh ispytaniy [Analysis of reinforced sandy base with punching

model tests]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Urbanistika*, 2012, no. 4 (8). pp.92-102.

2. Bartolomey A.A., Bogomolov A.N., Kleveko V.I., Ponomaryov A.B., Ofrikhter V.G. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals. *Proceedings of the twelfth European conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, Amsterdam, Netherlands, 1999, vol. 2, pp. 1197-1202.

3. Kleveko V.I. Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya armirovannykh osnovanij v pylevato-glinistykh gruntakh [Evaluation of stress-strain state of reinforced bases in silty clay soils]. Thesis of Doctor's degree dissertation, Perm, 2002, 152 p.

4. Kleveko V.I. Otsenka velichiny osadki fundamenta na glinistykh osnovaniyakh, armirovannykh gorizontálnymi proslojkami [Evaluation of settlement on clay foundation footing reinforced with horizontal layers]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhayushhej sredy, transport, bezopasnost zhiznedeyatel'nosti*, 2012, no. 1. pp. 89-98.

5. Kleveko V.I. Research of the clay soil reinforced bases work. *Proceedings 5-th European Geosynthetics Congress*, Valencia, 2012, vol. 4. pp. 317-321.

6. Zolotozubov D.G., Kleveko V.I., Ponomarev A.B., Nesterov R.S. Nekotorye re-zul'taty issledovaniy armogruntovykh osnovanij [Some research results reinforced soil foundations]. *Sbornik statej, posvyashhennyj 60-letiyu professora A.N. Bogomolova "Aktual'nye problemy geotekhniki"*. Volgograd, 2014, pp. 165-171.

7. Tatyannikov D.A., Kleveko V.I. Vliyanie szhimaemosti armiruyushhego materiala na osadku fundamenta pri shtampovykh modelnykh ispytaniyakh na primere geokompozita [The compressibility reinforcements on precipitation fundament die model tests, the example of geocomposite]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2013, no. 2, pp. 124-132.

8. Kleveko V.I. Primenenie geosinteticheskikh materialov v dorozhnom stroitel'stve v usloviyakh Permskogo kraja [Application of geosynthetics in road construction in Perm Region]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2013, no. 1, pp.114–123.

Об авторах

Клевеко Владимир Иванович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (e-mail: vlivkl@pochta.ru).

About the authors

Kleveko Vladimir Ivanovich (Perm, Russia) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Building production and geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: vlivkl@pochta.ru).

Получено 04.04.2014