

На правах рукописи

Бессонов Виталий Викторович

**ПРОЧНОСТЬ ГЛИНИСТЫХ И ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВЫХ
ОСНОВАНИЙ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ В ПЛАНЕ ФУНДАМЕНТОВ
С УЧЁТОМ ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ГРУНТА ОТ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ**

Специальность 25.00.08 –
Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Барнаул - 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Королёв Константин Валерьевич

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор
Коробова Ольга Александровна
(ГОУ ВПО «Новосибирский гос. арх.-стр. ун-т»)

- кандидат геолого-минералогических наук
Осипова Марина Александровна
(ГОУ ВПО «Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова»)

Ведущая организация: **ООО «СибТрансСтрой»** (г. Новосибирск)

Защита состоится 20 мая 2011 г. в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.09 в ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.
<http://www.altstu.ru>; ntsc@desert.secna.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.004.09. E-mail: karelina7@mail.ru.

Автореферат разослан 11 апреля 2011 г. и размещен на сайте <http://www.altstu.ru>

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



И.В. Карелина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При проектировании оснований сооружений одним из основных вопросов является оценка их прочности или несущей способности, расчёт предельной нагрузки фундаментов на основании. Надежность определения этой величины зависит, прежде всего, от выбора модели грунта и от качества определения его механических свойств.

В практике инженерных расчётов несущей способности наибольшее распространение получили решения, основанные на теории предельного равновесия грунтов (ТПРГ). Расчёты, выполняемые в рамках этой теории, содержат некоторый набор характеристик прочности. В большинстве случаев – это связность грунта и его внутреннее трение.

Прочностные свойства грунтов обусловлены большим количеством геологических факторов – это происхождение, условия образования, возраст, физико-геологические процессы, протекавшие ранее и современные. Кроме того, они зависят также и от способа нагружения и величины нагрузки. Влияние на прочность грунта первой группы факторов, как правило, учитывается на стадии лабораторных и полевых исследований свойств грунтов, когда весь комплекс геологических факторов де-факто приводит к конкретным, фиксируемым в опыте значениям физико-механических характеристик. По существу здесь остается проблема прогноза изменения механических свойств на период эксплуатации сооружения. Учёт способа и характера нагружения грунта на стадии лабораторных испытаний требует особых подходов, основанных на теоретическом анализе механического поведения грунтового массива под нагрузкой.

Для определения предельного давления на основания фундаментов на сегодняшний день широко используются строгие решения ТПРГ в плоской и осесимметричной постановках. В общем случае пространственной задачи используются приближённые методы решения (инженерные), либо методы, основанные на достаточно сложных с точки зрения практического применения критериях прочности грунтов.

Приближённые методы, как правило, основаны на переходе от плоской задачи к пространственной с помощью коэффициентов формы или коэффициентов пространственности. Эта же методика используется в формуле СНиП 2.02.01-83*.

Существует большое количество предложений по поводу методов определения коэффициентов формы. Здесь нет единого мнения и с теоретической, и с экспериментальной точек зрения. Зачастую эти коэффициенты не зависят от прочностных, то есть механических, свойств грунтов любого генезиса.

В ряде случаев приходим к необходимости учитывать зависимость прочностных свойств грунта от условий и характера нагружения, в частности, при больших давлениях. По этой проблеме существуют только отдельные решения частных плоских или осесимметричных задач.

Таким образом, определение прочности или несущей способности грунтовых оснований прямоугольных в плане фундаментов, которые весьма распространены, является актуальной задачей современного проектирования и строительства. При этом в связи с устойчивой тенденцией роста нагрузок на основание, необходимо также рассмотреть вопрос о методах расчета прочности грунта с учётом её зависимости от величины нагрузки.

Цель работы заключалась в совершенствовании метода расчёта прочности глинистых и песчаных оснований прямоугольных фундаментов на основе решений теории предельного равновесия грунтов с учётом особенностей их механических свойств. Для достижения этой цели были поставлены следующие конкретные задачи:

1. Получить решение задачи о прочности грунтовых оснований прямоугольных фундаментов в плане на основе строгих решений плоской и осесимметричной задач ТПРГ. При этом решение в осевой симметрии рассматривается вне концепции полной пластичности.

2. Получить выражения для определения коэффициентов формы, зависящих не только от соотношения сторон фундамента, но и от угла внутреннего трения грунтов.

3. Провести крупномасштабные и лотковые опыты по определению прочности грунтовых оснований прямоугольных в плане фундаментов на глинистых и песчаных грунтах.

4. Получить решения плоской и осесимметричной задач о штампе при нелинейном графике сдвига.

5. На основе этих решений произвести оценку прочности песчаных оснований прямоугольных фундаментов при больших нагрузках.

Исходные данные и личный вклад автора.

В основу работы положены материалы исследований, выполненных автором в период с 2005 по 2009 гг. Диссертационная работа выполнялась в составе временного научного коллектива кафедры и НИЛ «Геология, основания и фундаменты» Сибирского государственного университета путей сообщения. В 2005 г. по теме «Проведение полевых экспериментов по определению физико-механических характеристик грунтов в районе жилмассива «Снегири» г. Новосибирска», в 2006 г. по теме «Расчёты по возможности увеличения нагрузки на существующие фундаменты здания по ул. Энергетическая, д. 9 в г. Жуковский», в 2009 г. по теме «Испытания грунтов вертикальной статической нагрузкой свай-оболочкой №2 в ру-

словой опоре №84 моста ч/з р. Юрибей новой ж.д. линии Обское-Болваненково» и в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» в 2009-2013 гг.

Научная новизна работы заключается

- в совершенствовании методики определения прочности грунтовых оснований прямоугольных фундаментов, основанной на решении плоской и осесимметричной задачи ТПРГ вне концепции полной пластичности;
- в получении новых коэффициентов формы, зависящих не только от соотношения сторон фундамента, но и от параметров прочности грунта (угла внутреннего трения);
- в получении новой системы уравнений для осевой симметрии вне концепции полной пластичности при нелинейном графике сдвига;
- в получении строгих статических решений задачи Прандтля для условий плоской деформации и осевой симметрии вне концепции полной пластичности при нелинейном графике сдвига;
- в определении на основе плоских и осесимметричных решений предельного давления на песчаные грунтовые основания прямоугольных фундаментов при нелинейном графике сдвига.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

- разработана методика определения прочности глинистых и песчаных оснований квадратных и прямоугольных фундаментов;
- предложены новые коэффициенты формы, которые позволяют обосновано повысить оценку прочности оснований прямоугольных фундаментов;
- разработана методика определения предельного давления на песчаные основания ленточных, круглых и прямоугольных фундаментов при больших нагрузках;
- предлагается использовать величину предельного давления на основания прямоугольных фундаментов, полученную по данной методике, при определении осадки на нелинейном участке графика зависимости «осадка»-«нагрузка».

Методы исследований. Основными методами, использованными в работе, являются: строгий статический метод ТПРГ (метод характеристик); метод конечных разностей при численном интегрировании канонических уравнений ТПРГ; методы математического анализа при выводе канонических уравнений; экспериментальные методы исследований механики грунтов.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались на Международных научных студенческих конференциях «Сту-

дент и научно-технический прогресс» на секции «Математика», подсекция «Механика сплошной среды» в 2002, 2004, 2005 гг. в НГУ (г. Новосибирск), на Новосибирских межвузовских научных студенческих конференциях МНСК «Интеллектуальный потенциал Сибири» по направлению «Современные проблемы технических наук» на секции «Теория расчёта инженерных сооружений и конструкций» в 2002...2004 гг. в НГАСУ (г. Новосибирск), на научно-технических конференциях «Наука и молодёжь XXI века» в 2003...2005, 2007 гг. в СГУПС (г. Новосибирск), на 61-й, 62-й, 64-й научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава НГАСУ на секции «Актуальные проблемы инженерной геологии, оснований и фундаментов» в 2004, 2005, 2007 гг., на Всероссийской конференции «Актуальные проблемы строительной отрасли» (65-я научно-техническая конференция) в НГАСУ в 2008 г., на межвузовской конференции «Геотехника: актуальные теоретические и практические проблемы» в 2005, 2006 гг. в СПбГАСУ (г. Санкт-Петербург), на семинарах кафедр «Геология, основания и фундаменты» СГУПС в 2005...2011 гг. и «Основания, фундаменты, инженерная геология и геодезия» АлтГТУ в 2011 г.; представлены в сборнике научных статей СГУПС «Инженерная геология, механика грунтов, основания и фундаменты» (2007 г.), в журналах, рекомендованных ВАК, «Промышленное и гражданское строительство», №4 в 2008 г. (г. Москва), «Ползуновский вестник», № 2, ч.1, АлтГТУ им. И.И. Ползунова в 2011 г. (г. Барнаул).

Публикации. По теме диссертации автором было опубликовано 8 печатных работ.

На защиту выносятся:

- решение задачи о предельном давлении на грунтовые основания прямоугольных фундаментов по схеме Мейергофа на основе строгих решений задачи Прандтля в плоской постановке и для условия осевой симметрии вне концепции полной пластичности;

- новые формулы для определения коэффициентов формы, зависящих как от соотношения сторон фундамента, так и от угла внутреннего трения глинистых и песчаных грунтов;

- результаты крупномасштабных и лотковых экспериментальных исследований зависимости прочности оснований прямоугольных фундаментов от соотношения сторон, выполненных на глинистых и песчаных грунтах;

- каноническая система уравнений осесимметричной задачи статического метода ТПРГ при нелинейном графике сдвига вне концепции полной пластичности;

- результаты решений плоской и осесимметричной задач Прандтля при нелинейном графике сдвига;

– результаты решения задачи о предельном давлении на основаниях прямоугольных фундаментов при нелинейном графике сдвига на основе схемы Мейергофа.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести разделов, выводов, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 176 страниц, в том числе 95 рисунков и 30 таблиц. Список литературы содержит 118 источников, в том числе 18 иностранных.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены особенности строгого решения плоской и осесимметричной задач теории предельного равновесия грунтов, в том числе с нелинейным графиком сдвига, а также приближенные методы определения прочности грунтовых оснований прямоугольных фундаментов. Дана инженерно-геологическая оценка условий Колывань-Томской складчатой зоны в районе г. Новосибирска, на территории которой проводились опыты.

Решение плоской задачи о предельном давлении штампа на жесткопластическое основание без учёта собственного веса грунта принадлежит Л. Прандтлю. Данное решение было основано на предложениях, сделанных Ф. Кеттером и В. Ренкиным. Большой вклад в развитие ТПРГ в тот период внесли работы В.И. Новоторцева, Г. Рейсснера, Г. Мейергофа, С.И. Белзецкого, Н. М. Герсеванова, П.П. Лаупмана, И.В. Яропольского, П.Д. Евдокимова и др.

Законченную математическую формулировку и метод численного решения статической плоской задачи в строгой постановке ТПРГ дал В.В. Соколовский. Им же впервые было дано численное решение задачи о несущей способности глинистого и песчаного основания гладкого штампа (случай одностороннего выпора). Обобщение этой задачи на случай шероховатого фундамента было дано М.В. Малышевым и Ю.И. Соловьевым.

Развитию плоской задачи также посвящены труды Г.А. Гениева, С.С. Голушкевича, М.И. Горбунова-Посадова, Л.Р. Ставницера, А.С. Строганова, В.Г. Федоровского и др.

Решение осесимметричной задачи теории предельного равновесия грунтов было осуществлено В.Г. Березанцевым, принявшим гипотезу полной пластичности для предельно напряжённой сыпучей среды. Эта гипотеза ограничивала диапазон исходных данных, в частности, величину боковых пригрузок. Рассмотрение этой задачи вне концепции полной пла-

стичности А.М. Карауловым дано возможность получать предельную нагрузку для любых значений боковых пригрузок.

Таким образом, теория предельного равновесия грунтов была достаточно хорошо разработана для плоской и осесимметричной задачи в отношении задачи о предельном давлении штампа на основание, сложенное глинистыми и песчаными грунтами. В случае пространственной задачи мы сталкиваемся с принципиальными трудностями уже при постановке самой задачи, и, как следствие, до сих пор широко используются приближённые методы расчёта.

В частности, в работах Л.М. Тимофеевой предлагается определять прочность оснований прямоугольных фундаментов по схеме Мейергофа, предполагающей сопряжение решений плоской задачи для средней части фундамента и осесимметричной для его концов. В рамках этой же схемы были выполнены исследования А.И. Калаевым.

Многие приближённые методы основаны на переходе от плоской задачи к пространственной с помощью коэффициентов формы или коэффициентов пространственности. У разных авторов коэффициенты формы отличаются весьма существенно, и зачастую они не зависят от прочностных свойств грунта. Этому вопросу посвящены, например, работы Бринч-Хансена, Де Беера, А. Весича и др. Эта же методика используется в формуле СНиП 2.02.01-83*.

Проблеме учёта зависимости прочностных свойств грунта от достигнутого уровня напряжённого состояния посвящены работы В.В. Соколовского, В.Г. Березанцева, Ю.И. Соловьёва, А.К. Черникова, А.И. Калаева и др. В этих исследованиях рассматривались плоская и осесимметричная задачи, при этом решения в условиях осевой симметрии были даны в рамках гипотезы полной пластичности Хаара-Кармана.

Поскольку экспериментальные исследования планировалось проводить на грунтах г. Новосибирска, то был выполнен анализ инженерно-геологических условий опытных участков, расположенных на территории Колывань-Томской зоны.

В геологическом строении Колывань-Томской складчатой зоны определяющим является геолого-генетический комплекс нижнесреднечетвертичных субаэральных отложений, сформированных в водной и воздушной средах, например, за счёт поверхностных стоков талых и дождевых вод, разливов речных и озёрных вод, деятельности ветра (краснодубровская свита $saQ_{1-II}krd$). Свита представлена мощной толщей лёссовых супесей и суглинков, чередующихся с пачками песков и горизонтами погребенных почв, слагающих обширный предсалаирский шлейф.

В пониженных участках рельефа, где собственно и были проведены опыты, распространены супеси и суглинки туго- и мягкопластичной кон-

систенции. Плавный переход от суглинков к супесям происходит как по площади, так и по разрезу.

Вторая глава посвящена теоретическим исследованиям прочности глинистых и песчаных грунтовых оснований прямоугольных фундаментов. Предлагается определять предельное давление на основания прямоугольных штампов, отталкиваясь от схемы Мейергофа, согласно которой эту величину можно приближенно оценить с помощью статических строгих решений плоской и осесимметричной задач теории предельного равновесия о вдавлении штампа в грунтовую среду.

Предлагаемое решение базируется на строгих статических решениях задачи о прочности глинистых или песчаных оснований ленточных фундаментов с шероховатой подошвой (М.В. Малышев, Ю.И. Соловьев) и аналогичной задачи в условиях осевой симметрии вне концепции полной пластичности (А.М. Караулов).

Результат решения плоской задачи о штампе приводят к стандартному виду

$$p_{\text{л}} = \gamma b N_{\gamma\text{л}} + q N_{q\text{л}} + c N_{c\text{л}}, \quad (1)$$

где $N_{\gamma\text{л}}$, $N_{q\text{л}}$, $N_{c\text{л}}$ – коэффициенты несущей способности, зависящие от угла внутреннего трения φ , град., глинистых и песчаных грунтов;

γ – удельный вес грунта основания, кН/м³;

b – ширина ленточного фундамента, м;

q – пригрузка, определяемая как $q = \gamma d$ (d – глубина заложения подошвы фундамента, м), кПа;

$$N_q = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} e^{\pi \text{tg} \varphi}, N_c = (N_q - 1) \text{ctg} \varphi, \quad (2)$$

где φ – угол внутреннего трения, град.

Для коэффициента $N_{\gamma\text{л}}$, определяемого из численного решения, можно использовать аппроксимационную зависимость

$$N_{\gamma\text{л}} = 1,66 \cdot \text{tg} \varphi \cdot e^{4,66 \cdot \text{tg}^{1,09} \varphi}. \quad (3)$$

Результаты решения осесимметричной задачи будем использовать также в стандартном виде

$$p_{\text{кр}} = \gamma r N_{\gamma\text{к}} + q N_{q\text{к}} + c N_{c\text{к}}, \quad (4)$$

где $N_{\gamma\text{к}}$, $N_{q\text{к}}$, $N_{c\text{к}}$ – коэффициенты несущей способности, полученные после уточнения значений параметра Лоде.

Прочность оснований фундаментов с подошвой прямоугольной формы была определена по схеме Мейергофа (рис. 1) в виде суммы предельных давлений в средней части штампа как для ленточного фундамента (1), и на концах штампа, как в случае осевой симметрии (4).

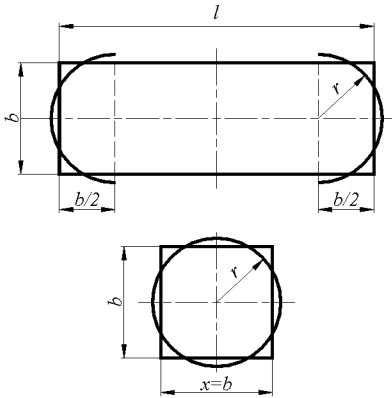


Рис. 1. Геометрическая интерпретация предлагаемого решения

квадратного и круглого фундаментов. Отсюда следует, что выражение (4) можно записать следующим образом

$$p_{кр} = \gamma \frac{b}{\sqrt{\pi}} N_{\gamma к} + q N_{qк} + c N_{ск}. \quad (6)$$

Далее, учитывая формулу (1), получаем величину силы предельного давления для средней части фундамента площадью $b(l-b)$, где l – длина штампа (рис. 1). Затем на основе осесимметричной задачи, решённой вне концепции полной пластичности (6), получаем величину силы предельного давления на глинистые или песчаные основания для концевых участков, общая площадь которых равна $\pi(b/\sqrt{\pi})^2 = b^2$.

Тогда, учитывая (5), (1) и (6), предельное давление на основания, сложенные глинистыми и песчаными грунтами, прямоугольных фундаментов шириной b и длиной l определится как

$$p_u = \frac{\left(\gamma \frac{b}{\sqrt{\pi}} N_{\gamma к} + q N_{qк} + c N_{ск} \right) b^2}{bl} + \frac{(\gamma b N_{\gamma л} + q N_{qл} + c N_{сл}) b(l-b)}{bl}. \quad (7)$$

Выражение (7) приведём к стандартному виду

$$p_u = \gamma b N_{\gamma} \xi_{\gamma} + q N_q \xi_q + c N_c \xi_c, \quad (8)$$

где ξ_{γ} , ξ_q , ξ_c – коэффициенты формы подошвы фундамента, определяемые по формулам

В результате предельное давление на глинистые и песчаные основания прямоугольных фундаментов определится как

$$p_u = \frac{p_{кр} \pi r^2 + p_l b(l-x)}{bl}, \quad (5)$$

где $p_{кр}$ – предельная нагрузка на основание в случае осевой симметрии на концах прямоугольного штампа в пределах длины x , кПа;

p_l – предельная нагрузка на основание ленточного фундамента (плоская задача) на участке длиной $l-x$, кПа.

Радиус круглого фундамента определим через равенство площадей

$$\xi_{\gamma} = 1 + \left(\frac{N_{\gamma\kappa}}{N_{\gamma\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} - 1 \right) \frac{1}{\eta}; \quad \xi_q = 1 + \left(\frac{N_{q\kappa}}{N_{q\pi}} - 1 \right) \frac{1}{\eta}; \quad \xi_c = 1 + \left(\frac{N_{c\kappa}}{N_{c\pi}} - 1 \right) \frac{1}{\eta}, \quad (9)$$

где $\eta = l/b$.

Для дальнейшего анализа коэффициенты формы удобно представить в следующем виде

$$\xi_{\gamma} = 1 + \frac{a_{\gamma}}{\eta}; \quad \xi_q = 1 + \frac{a_q}{\eta}; \quad \xi_c = 1 + \frac{a_c}{\eta}, \quad (10)$$

где $a_{\gamma} = \frac{N_{\gamma\kappa}}{N_{\gamma\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} - 1$; $a_q = \frac{N_{q\kappa}}{N_{q\pi}} - 1$; $a_c = \frac{N_{c\kappa}}{N_{c\pi}} - 1$.

Коэффициенты a_{γ} , a_q , a_c могут быть определены по следующим аппроксимационным формулам

$$\begin{aligned} a_{\gamma} &= 1,68 \operatorname{tg} \varphi \cdot e^{0,09 \operatorname{tg} \varphi} - 0,6; \\ a_q &= \operatorname{tg}^{0,07} \varphi \cdot e^{0,74 \sin \varphi} - 0,8; \\ a_c &= 0,8685 \varphi + 0,1767. \end{aligned} \quad (11)$$

На рис. 2 представлены графики зависимости коэффициентов a_{γ} , a_q , a_c от угла внутреннего трения согласно предлагаемому методу (11) (предлагаемые), по Бринч-Хансену (БХ), Де Бееру (ДБ), СНИП. Графики зависимости коэффициентов формы ξ_{γ} , ξ_q , ξ_c от угла внутреннего трения и отношения сторон фундамента согласно предлагаемому методу (9) (предлагаемые), по Бринч-Хансену (БХ), Де Бееру (ДБ), представлены на рис. 3. Таким образом, коэффициенты формы, зависящие не только от отношения сторон фундамента, как это сделано в СНИПе и у ряда авторов, но и от прочностной характеристики грунта – угла внутреннего трения, позволяют обосновано повысить прочность глинистых и песчаных оснований прямоугольных фундаментов.

Из рис. 3 можно сделать важный вывод о том, что предельное давление на грунтовое основание, получаемое по предлагаемой методике возрастает при переходе от прямоугольного фундамента к квадратному.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям прочности оснований, сложенных глинистыми и песчаными грунтами, ленточных фундаментов, а также штампов с подошвой прямоугольной и квадратной форм.

Были проведены крупномасштабные эксперименты в полевых условиях и лотковые опыты в лабораторных условиях. Цель полевых и лотковых экспериментов заключалась в проверке зависимости коэффициентов формы от угла внутреннего трения и выявлении закономерности изменения предельного давления на основания в зависимости от формы штампа.

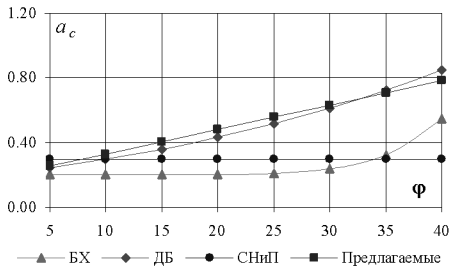
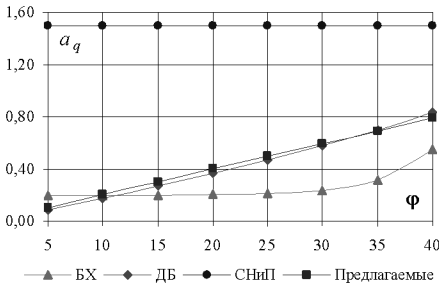
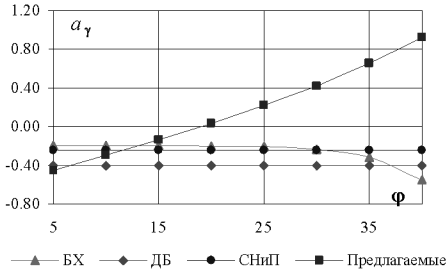


Рис. 2. Графики зависимости коэффициентов a_γ , a_q , a_c от угла внутреннего трения φ

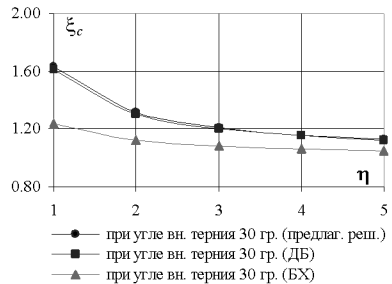
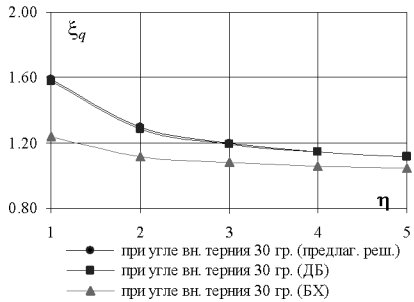
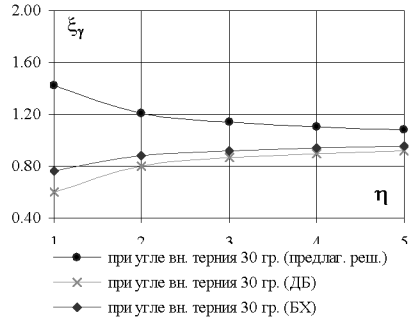


Рис. 3. Графики зависимости коэффициентов формы ξ_γ , ξ_q , ξ_c от соотношения сторон фундамента η и угла внутреннего трения φ

Полевые эксперименты были проведены на глинистом основании (штампы шириной 30 см). В районе проведения испытаний грунтовое основание было представлено суглинком мягкопластичным (угол внутреннего трения $\varphi=16^\circ$, удельное сцепление $c=12$ кПа). Удельный вес грунта $\gamma=19$ кН/м³; удельный вес частиц грунта $\gamma_s=26,9$ кН/м³; естественная

влажность $w = 0,260$. В минералогическом составе преобладают минералы: кварц, полевые шпаты, карбонаты. Присутствуют мусковит, серицит, хлорит, эпидот, цоизит, роговая обманка. Всего было проведено 2 серии опытов со штампами, спецификация которых приведена в таблице 1, общий вид – на рис. 4.

Таблица 1. Спецификация штампов

| Номер серии | Форма штампа | Ширина b , м | Длина l , м | Соотношение сторон l/b | Площадь, m^2 |
|-------------|---------------|----------------|---------------|--------------------------|----------------|
| 1 | Прямоугольный | 0,3 | 1,500 | 1:5 | 0,450 |
| | | 0,3 | 1,200 | 1:4 | 0,360 |
| | | 0,3 | 0,900 | 1:3 | 0,270 |
| 2 | Квадратный | 0,3 | 0,300 | 1:1 | 0,090 |



Рис.4. Общий вид штампов

При проведении опытов в качестве моделей фундаментов были использованы металлические штампы с прямоугольной и квадратной формой подошвы (см. табл. 1 и рис. 4). Для создания нагрузки на штамп применялся домкрат марки ДГ100. Нагрузка на штамп подавалась вертикально без эксцентриситета. Регистрация давления производилась образцовым

манометром.

Каждая ступень давления выдерживалась до условной стабилизации деформации грунта (осадки штампа).

Вертикальные перемещения регистрировались прогибомерами Аистова 6 ПАО ЛИСИ. Для прямоугольных и квадратных штампов использовались 4 прибора, фиксирующих осадку штампа в четырех точках, расположенных по углам штампа.

Из рис. 5, на котором приведены результаты испытаний, видно, что прочность глинистого основания увеличивается при переходе от ленточного фундамента к квадратному.

Лотковые эксперименты были осуществлены на кафедре «Геология, основания и фундаменты» СГУПСа в большом пространственном лотке. Опыты проводились в 4 серии (2 серии с ленточным штампом и 2 серии с квадратным штампом).

Данные эксперименты представляли собой испытание грунтового основания, сложенного маловлажным песком средней крупности и средней плотности (угол внутреннего трения $\varphi=34^\circ$, удельное сцепление $c=1$ кПа), штампами прямоугольной и квадратной форм (см. табл. 2).

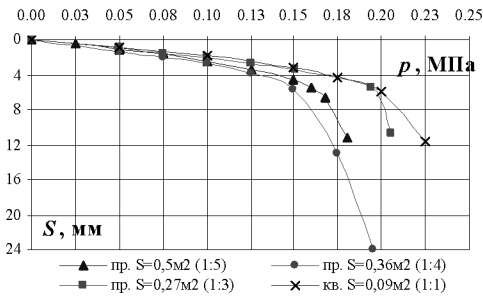


Рис. 5. Сопоставление зависимости $S(p)$ для штампов с различным соотношением сторон (l/b)

брана на второй надпойменной террасе р. Инья.

Удельный вес грунта $\gamma = 17,5 \text{ кН/м}^3$; удельный вес частиц грунта $\gamma_s = 26,7 \text{ кН/м}^3$; естественная влажность $w = 0,030$.

По минералогическому составу песок полиминеральный, состоящий из кварца, полевых шпатов, роговой обманки и слюды. Преобладающее значение имеет кварц, содержание которого достигает 60-85%. Данная порода была ото-

Таблица 2. Спецификация штампов

| Номер серии | Форма штампа | Ширина b , м | Длина l , м | Соотношение сторон l/b | Площадь, м^2 |
|-------------|--------------|----------------|---------------|--------------------------|-----------------------|
| 1-2 | Ленточный | 0,140 | 0,900 | 1:6 | 0,126 |
| 3-4 | Квадратный | 0,140 | 0,140 | 1:1 | 0,0196 |

Испытания производились на подготовленном песчаном основании. Лоток представлял собой сварную металлическую конструкцию, снабжённую упорной рамой. Габаритные размеры объема рабочей части лотка составляют: длина 2,8 м, ширина 1 м, высота 1,36 м. Передняя стенка лотка выполнена из органического стекла, с нанесенной на нём масштабной сеткой (100×100 мм) и усилена металлическими ребрами жёсткости. Песок в основание штампа укладывался слоями, при этом его одинаковая плотность в каждом опыте обеспечивалась ручной трамбовкой основания слоями толщиной около 3 см. После отсыпки каждого слоя и уплотнения поверхность грунта тщательно выравнивалась. После каждого испытания установка разбиралась, а основание «переподготавливалось», как сказано выше.

Нагрузка на штампы создавалась гидравлическим домкратом ДГ-50-2 и подавалась вертикально без эксцентриситета. Регистрация давления производилась образцовым манометром.

Каждая ступень давления выдерживалась до условной стабилизации деформации песка (осадки штампа).

Вертикальные перемещения регистрировались 4-мя прогибомерами Аистова 6 ПАО ЛИСИ, фиксировавшими осадку каждого края штампа.

Результаты опытов представлены на рис. 6 в виде зависимости $S = f(p)$.

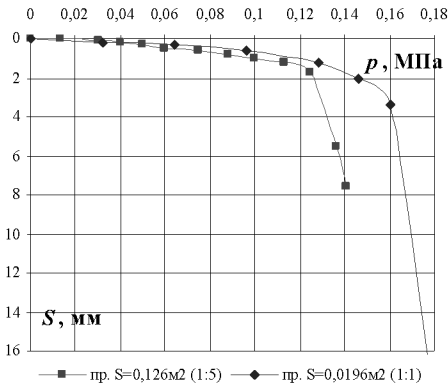


Рис. 6. Зависимость $S(p)$ для прямоугольного из 1 серии опытов и квадратного из 4 серии опытов штампов

ловиях пространственной задачи.

На рис. 7 приведено сопоставление экспериментальных данных, полученных в полевых условиях в результате крупномасштабных опытов, с данными теоретических расчётов. Обозначения, приведённые на рисунке: $p_{\text{опн}}$ – экспериментальные данные, полученные в рамках настоящей работы в полевых условиях; $p_{\text{н}}$ – результаты расчётов по предлагаемому методу; $p_{\text{Тим}}$ – то же по методике Л.М. Тимофеевой; $p_{\text{БХ}}$ – расчётные данные по методу Й. Бринч-Хансена.

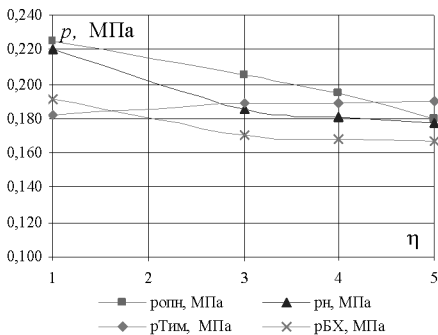


Рис. 7. Сопоставление экспериментальных данных с теоретическими (полевые опыты)

ным методикам примерно одинаковое.

Как видно из рис. 6, предельное давление на песчаное основание квадратного штампа снова оказывается большим по сравнению с несущей способностью песчаного основания ленточного (прямоугольного) штампа.

В четвертой главе производится сравнение экспериментальных данных с результатами теоретических исследований по определению прочности глинистых и песчаных оснований при вертикальном действии на штамп внешней нагрузки в ус-

Согласно нашим расчётам и экспериментальным данным, предельное давление на основание фундамента увеличивается при переходе от ленты к квадрату, такой эффект наблюдается и в расчётах по Бринч-Хансену.

Из графиков, приведённых на рис. 7, видно, что при коэффициенте $\eta = 5$ предельное давление, полученное экспериментальным путём, а также посчитанное по различным

В случае квадратного штампа ($\eta = 1$) оценки предельного давления у разных авторов не коррелируют с опытными данными и существенно разнятся между собой. Предлагаемая методика дает наилучшую сходимость с опытными данными.

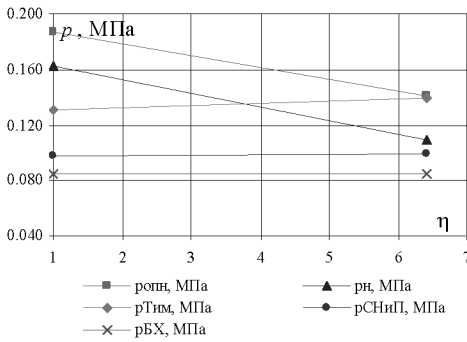


Рис.8. Сопоставление экспериментальных данных с теоретическими (лотковые опыты) $p_{\text{СНиП}}$ – результаты расчетов согласно СНиП.

На рис. 8 приведено сопоставление экспериментальных данных, полученных в лотковых опытах, с теоретическими.

В данном случае лучший результат был получен при определении прочности основания по предлагаемой методике. Расхождение с опытными данными немного превышает 20%. Для песчаных грунтовых оснований расхождение

между теоретическими и экспериментальными данными больше, чем в случае с глинистыми грунтами.

Пятая глава посвящена определению предельного давления на основания, сложенные песчаными грунтами, прямоугольных фундаментов с учётом нелинейности графика сдвига.

Согласно многим экспериментальным данным начальные участки графика сдвига без особой погрешности могут быть аппроксимированы прямой линией. Под начальным участком понимают диапазон давлений от $\sigma_n \approx 0,1 \dots 0,5$ МПа. Дальнейшее увеличение давления приводит к нелинейной зависимости касательных напряжений от нормальных по площадке сдвига. При нормальных напряжениях, значение которых находится в пределах от 0 до 2,5 МПа, весь участок может быть аппроксимирован как прямой, так и кривой, но в первом случае наблюдается большая погрешность между экспериментальными и аппроксимационными значениями напряжений (рис. 9).

Для осуществления решения были использованы экспериментальные данные, полученные на кафедре «Геология, основания и фундаменты» НИИЖТа П.С. Вагановым в 1977 г.

Определение прочности оснований прямоугольных фундаментов осуществлялось и в этом случае по классической схеме Мейергофа, согласно которой эту величину можно приближенно оценить с помощью статических строгих решений плоской и осесимметричной задач теории предельного равновесия о вдавливании штампа в грунтовую среду с учё-

том нелинейности графика сдвига по расчётной схеме, приведённой на рис. 10.

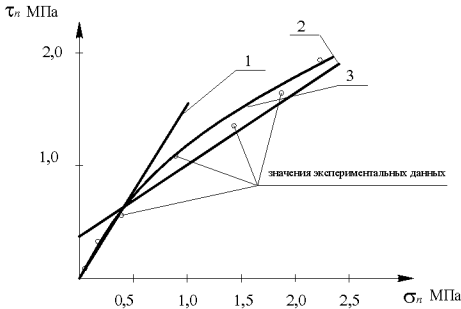


Рис.9. Сравнение различных аппроксимаций условия предельного равновесия

1 – прямая Кулона, аппроксимирующая начальный участок; 2 – прямая Кулона, аппроксимирующая весь участок при диапазоне давлений от 0 до 2,5 МПа; 3 – нелинейная аппроксимация всего участка

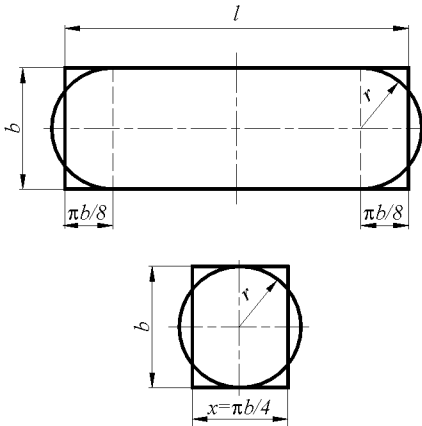


Рис.10. Геометрическая интерпретация предлагаемого решения

Предлагается аппроксимировать нелинейность этого графика в плоскости полусуммы и полуразности главных напряжений

$$\tau = \tau(\sigma); \quad (12)$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2, \sigma = (\sigma_1 + \sigma_3)/2,$$

где σ_1, σ_3 – главные напряжения, МПа (причём $\sigma_1 > \sigma_3$ – сжимающие напряжения положительны).

В данном случае была принята логарифмическая зависимость τ от σ .

Каноническая система уравнений плоской задачи статического метода ТПРГ в системе координат xOz для произвольного условия прочности имеет вид

$$\frac{dx}{dz} = \frac{\sin 2\alpha \pm \sqrt{1 - \tau'^2}}{\tau' + \cos 2\alpha}; \quad (13)$$

$$d\sigma \pm 2 \frac{\tau}{\sqrt{1 - \tau'^2}} d\alpha = \gamma(dz \mp \frac{\tau'}{\sqrt{1 - \tau'^2}} dx),$$

где α – угол наклона σ_1 к вертикали.

Верхние знаки в выражениях (13) отвечают характеристикам первого семейства, нижние – второго семейства.

Каноническая система уравнений статического метода осесимметричной задачи ТПРГ в цилиндрических координатах $Orz\theta$ вне концепции полной пластичности имеет вид

$$\frac{dr}{dz} = \frac{\sin 2\alpha \pm \sqrt{1 - \tau'^2}}{\tau' + \cos 2\alpha}; \quad (14)$$

$$d\sigma \pm 2 \frac{\tau}{\sqrt{1 - \tau'^2}} d\alpha = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \tau'^2}} [\mu_\sigma (\sqrt{1 - \tau'^2} dr \pm \tau' dz) \pm dz] \frac{1}{r} + \gamma(dz \mp \frac{\tau'}{\sqrt{1 - \tau'^2}} dr),$$

где $-1 \leq \mu_\sigma \leq 1$ – параметр Лоде.

Верхние знаки в выражениях (14) соответствуют характеристикам первого семейства, нижние – второго семейства.

Все вычисления осуществлялись методом конечных разностей по линиям скольжения, которые являются характеристиками системы уравнений (13,14) гиперболического типа посредством итераций на каждом шаге интегрирования.

На рис. 11 показана сетка линий скольжения, а также эпюры нормальных и касательных напряжений по подошве фундамента в случае плоской задачи с учётом нелинейности графика сдвига.

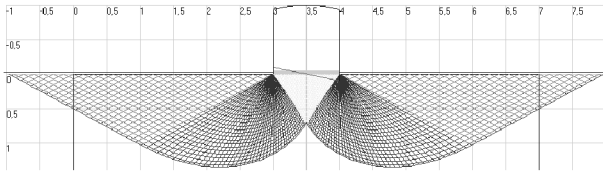


Рис. 11. Сетка линий скольжения, эпюры нормальных и касательных напряжений по подошве фундамента в случае плоской задачи с учётом нелинейности графика сдвига

Результаты расчетов предельного давления на основание от пригрузки q представлены в виде графиков на рис. 12 для плоской задачи ($p_{пл}$) и на рис. 13 для осесимметричной задачи ($p_{кр}$) ТПРГ.

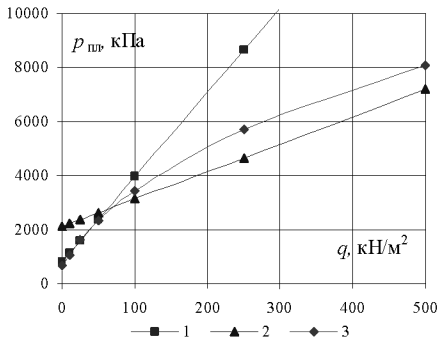


Рис. 12. Графики зависимости предельного давления $p_{пл}$ от пригрузки q в случае плоской задачи

1 – решение при условии прочности в виде прямой Кулона, аппроксимирующей начальный участок; 2 – то же для всего участка; 3 – решение при условии прочности в виде нелинейной аппроксимации всего участка $\tau = 2530 \ln(0,00025\sigma + 1)$.

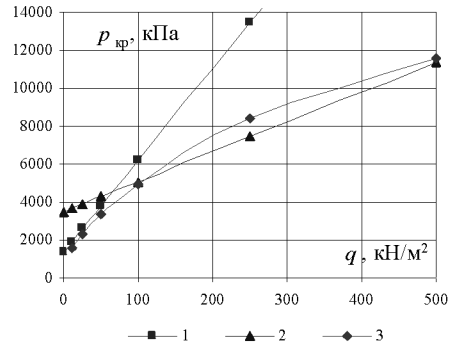


Рис. 13. Графики зависимости предельной нагрузки $p_{кр}$ от пригрузки q в случае осевой симметрии

Из графиков, представленных на рис. 12, 13, видно, что прямая, аппроксимирующая начальный участок, справедлива лишь для небольших пригрузок; при дальнейшем увеличении пригрузки проявляется нелинейный характер зависимости предельной нагрузки p_u от пригрузки q .

Это положение и было учтено введением логарифмической зависимости, которая наиболее точно описывает характер работы грунтов как при больших давлениях, так и на начальном участке (кривая 3).

На рис. 14,15 приведена качественная картина изменения прочности p_u , кПа, основания квадратного ($\eta=//b=1$) (круглого) и прямоугольного ($\eta=//b=5$) (ленточного) штампов в зависимости от пригрузки q , кН/м², при разных аппроксимациях.

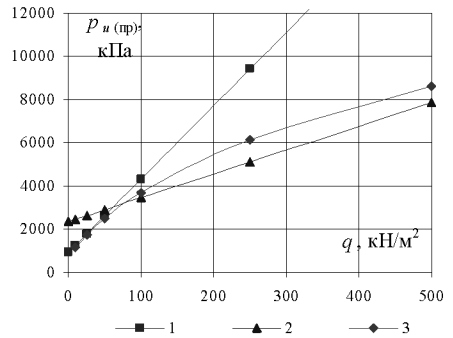
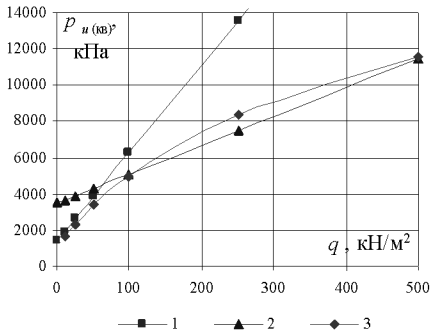


Рис. 14. Графики зависимости предельного давления $p_{u(кв.)}$ от пригрузки q для аппроксимаций в случае квадратного (круглого) фундамента, $\eta=//b=1$

Рис. 15. Графики зависимости предельного давления $p_{u(пр.)}$ от пригрузки q для аппроксимаций в случае прямоугольного (ленточного) фундамента, $\eta=//b=5$

1 – решение при условии прочности в виде прямой Кулона, аппроксимирующей начальный участок; 2 – то же для всего участка; 3 – решение при условии прочности в виде нелинейной аппроксимации всего участка $\tau = 2530\ln(0,00025\sigma+1)$

Итак, расчёты предельной нагрузки, определенной при линейном законе Кулона, аппроксимирующем начальный участок, дают завышенный результат при больших пригрузках. Нагрузка, определенная с учётом прямой Кулона, аппроксимирующей весь участок, оказывается завышенной на начальном участке. И только логарифмическая нелинейная аппроксимация даёт удовлетворительные результаты на всём диапазоне пригрузок. При промежуточных значениях η качественная картина не меняется.

На рис. 16 и 17 показаны графики зависимости отношения предельной нагрузки на основание прямоугольного фундамента к предельной нагрузке на грунтовое основание ленточного фундамента $P_{пр}/P_{пл}$ от соотношения его сторон η и предельного давления $p_{u(пр.)}$, кПа, также от величины η при различных пригрузках в случае нелинейной аппроксимации графика сдвига.

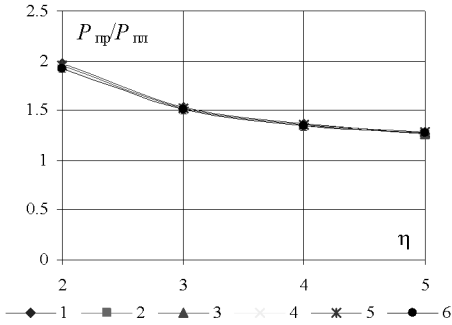


Рис. 16. Графики зависимости отношения $P_{пр}/P_{пл}$ от соотношения сторон прямоугольного фундамента η при различных пригрузках в случае нелинейной аппроксимации

1 – при пригрузке $q = 10$ кПа; 2 – при пригрузке $q = 25$ кПа; 3 – при пригрузке $q = 50$ кПа; 4 – при пригрузке $q = 100$ кПа; 5 – при пригрузке $q = 250$ кПа; 6 – при пригрузке $q = 500$ кПа. Условие Мора $\tau = 2530 \ln(0,00025\sigma + 1)$

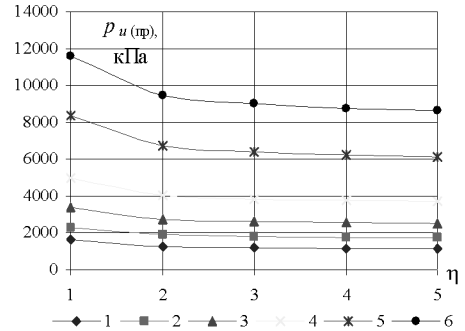


Рис. 17. Графики зависимости предельного давления $p_{u(пр)}$ на основание прямоугольного фундамента от η при различных пригрузках в случае нелинейной аппроксимации

Как видно из рис. 16, отношение $P_{пр}/P_{пл}$ незначительно зависит от величины пригрузки и монотонно убывает при переходе от квадрата к ленте.

Из рис. 16 и 17 следует, что предельное давление на песчаные основания прямоугольных фундаментов увеличивается при переходе от ленты к квадрату.

В шестой главе даны рекомендации по практическому использованию полученных результатов.

Результаты исследований рекомендуется использовать при расчетах грунтовых массивов по первой и второй группе предельных состояний.

При этом по второй группе предельных состояний рекомендуется использовать величину предельного давления на основания прямоугольных фундаментов при определении осадки за пределами линейной зависимости осадки основания от нагрузки, согласно рекомендациям СНиП 2.02.01-83*.

Расчёт по первой группе предельных состояний подразумевает определение несущей способности глинистых и песчаных грунтовых оснований прямоугольных фундаментов.

Расчёт по второй группе предельных состояний, согласно пособию к СНиП 2.02.01-83*, выполняют следующим образом. Осадку основания

s_p при давлении под подошвой фундамента p , превышающем расчетное сопротивление грунта основания R , допускается определять по формуле

$$s_p = s_R \left[1 + \frac{(p_u - R)(p - R)}{(R - \sigma_{zg,0})(p_u - p)} \right], \quad (15)$$

где s_R – осадка основания при давлении $p=R$;

p_u – несущая способность (прочность) глинистого или песчаного грунта, определяемая по формуле (8) с учётом (9);

$\sigma_{zg,0}$ – вертикальное напряжение от собственного веса грунта на уровне подошвы фундамента.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе полученных решений установлено, что при использовании строгих статических решений ТПРГ задачи Прандтля (в плоской постановке и в условии осевой симметрии вне концепции полной пластичности) схема Мейергофа даёт устойчивые результаты для всего диапазона соотношения сторон подошвы фундамента и значений угла внутреннего трения грунтов. При использовании приближённых плоских и осесимметричных решений зависимости коэффициентов формы от исходных данных имели неустойчивый характер.

2. В теоретических решениях и опытах было установлено, что величина предельного давления на грунтовые основания прямоугольных штампов зависит от соотношения сторон его подошвы и угла внутреннего трения φ . При этом предельное давление увеличивается при переходе от штампа с прямоугольной формой подошвы к штампу с квадратной подошвой.

3. Экспериментально было установлено, что полученный в теоретических расчётах характер зависимости предельного давления от соотношения сторон подтверждается на крупномасштабных моделях.

4. Предложена каноническая система уравнений статического метода ТПРГ осевой симметрии вне концепции полной пластичности грунтовой среды при нелинейном графике сдвига. Разработан метод численного интегрирования этих уравнений методом конечных разностей.

5. Получены строгие решения задачи Прандтля при нелинейном графике сдвига в условиях плоской задачи и осевой симметрии.

6. Получено решение задачи о предельном давлении на песчаные грунтовые основания прямоугольных фундаментов при больших нагрузках. Установлены зависимости несущей способности основания в этом случае при различных соотношениях сторон фундаментов.

7. Установлено, что при нелинейном графике сдвига величина пригрузки незначительно влияет на характер изменения предельного давления в зависимости от соотношения сторон.

8. Установлен характер зависимости предельного давления на песчаное основание при нелинейном графике сдвига от пригрузки в плоской, осесимметричной и пространственной задачах.

Список работ автора по теме диссертации:

В изданиях по перечню ВАК:

1. Королёв К.В., Бессонов В.В. О проблеме определения лобового сопротивления песчаных грунтов под нижним концом буровых свай опор мостов // Ползуновский вестник / АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2011. – № 2, ч.1. – С. 203-207.

2. Королев К.В., Бессонов В.В. Уточненные значения коэффициентов формы при определении несущей способности оснований прямоугольных фундаментов // Промышленное и гражданское строительство. – 2008. – №4 – С. 29-30.

3. Королёв К.В., Бессонов В.В. Экспериментально-теоретическая оценка прочности грунта в основании прямоугольных фундаментов // Ползуновский вестник / АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2011. – № 2, ч.1. – С. 208-214.

В других изданиях:

4. Безсонов В.В. Экспериментальные исследования несущей способности оснований прямоугольных штампов // Инженерная геология, механика грунтов, основания и фундаменты: сб. научн. ст. – Новосибирск: СГУПС, 2007. – С. 85-95.

5. Кесарев М.С., Безсонов В.В. К вопросу о построении решений теории предельного равновесия грунтов с учётом нелинейности закона Кулона // Сборник тезисов докладов Новосибирской межвузовской научной студенческой конференции «Интеллектуальный потенциал Сибири»: Современные проблемы технических наук / НГАСУ. – Новосибирск, 2003. – С. 54 - 55.

6. Кесарев М.С., Безсонов В.В. К расчёту несущей способности грунтовых оснований для условий осевой симметрии вне концепции полной пластичности // Материалы XLII Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Математика / Новосибирский гос. ун-т. – Новосибирск, 2004. – С. 137.

7. Кесарев М.С., Безсонов В.В. Особенности решения задачи Прандтля для грунтовой среды // Сборник тезисов докладов Новосибирской

межвузовской научной студенческой конференции «Интеллектуальный потенциал Сибири»: Современные проблемы технических наук / НГАСУ. – Новосибирск, 2002. – С. 53- 54.

8. Королев К.В., Безсонов В.В. Об определении коэффициентов формы на основе плоских и осесимметричных решений статики сыпучей среды // Теоретические и практические проблемы геотехники: межвузовский тематический сборник трудов. – С.-Петербург: СПбГАСУ, 2006 – С. 93-96.

БЕССОНОВ ВИТАЛИЙ ВИКТОРОВИЧ

**ПРОЧНОСТЬ ГЛИНИСТЫХ И ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВЫХ
ОСНОВАНИЙ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ В ПЛАНЕ ФУНДАМЕНТОВ
С УЧЁТОМ ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ГРУНТА ОТ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ**

Специальность 25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и
грунтоведение

Подписано в печать 04.04.2011

1,5 печ. л. Тираж 100 экз. Заказ №2385

Издательство ГОУ ВПО «Сибирский государственный университет путей
сообщения»

630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191