

УДК 624.15.001.63

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОСНОВАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ НА КРУПНООБЛОМОЧНЫХ ГРУНТАХ С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

В.А. Козионов*Павлодарский государственный университет**им. С. Торайгырова*

Введение. Строительство современных высотных зданий и сооружений с развитой подземной частью часто осуществляется на основаниях из крупнообломочных грунтов с песчаным или глинистым заполнителем. Условие применения уравнений механики деформируемого тела к описанию напряженно-деформированного состояния (НДС) такой среды [1], записывается в виде

$$h < H < \Lambda, \quad (1)$$

где h – размер скальных обломков;

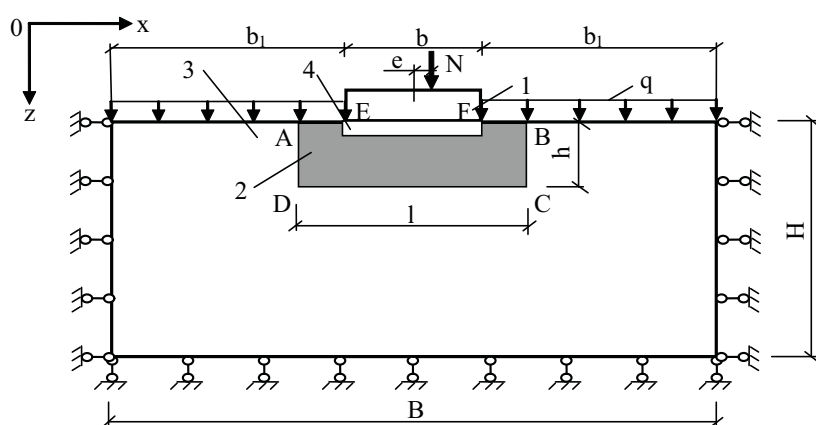
H – размер образца грунта, при котором его можно считать локально однородным эквивалентным материалом;

Λ – расчетная область (характерный размер) массива грунта.

Полное соблюдение данного условия, как показывает обзор наиболее распространенных в практике геомеханических моделей оснований [2], для крупнообломочных грунтов с заполнителем часто оказывается невозможным вследствие особенностей их состава, строения и конструктивных решений фундаментов. Это ограничивает возможности детальных исследований НДС таких оснований, например, на уровне, характерном для однородных грунтовых массивов.

Целью работы, является обоснование новой геомеханической модели грунтового массива крупнообломочных грунтов с заполнителем с использованием подходов механики композиционных материалов, удовлетворяющей условию (1).

Геомеханическая модель основания. Для выполнения расчетов оснований фундаментов на крупнообломочных грунтах автором предлагается геомеханическая модель основания, частично изложенная ранее в работе [3] и др., представляющая собой слой дискретно-неоднородного грунта ограниченной, в общем случае переменной, толщины и длины, примыкающий в основании к фундаменту. В пределах данного слоя формируется базовая механико-математическая модель, учитывающая строение слагающих грунтов и особенности их механического поведения. Остальная часть основания с использованием принципа эквивалентной гомогенности [4], рассматривается как квазиоднородная среда с усредненными по расчетному объему механическими характеристиками (рисунок 1).



1 – фундамент; 2 – слой дискретно-неоднородного грунта;
3 – однородный массив грунта; 4 - подготовка

Рисунок 1 – Расчетная схема основания из крупнообломочных грунтов

Размеры b_1 , B , H устанавливаются на основе общих требований к геомеханическим расчетам оснований, а величины l , h – по результатам специальных расчетов по оценке их влияния на НДС системы «фундамент-основание».

Такая схема разрабатывается по результатам инженерно-геологических изысканий участка строительства с учетом требований СНиП РК 5.01-2002 к исследованиям крупнообломочных грунтов. На ней отражаются особенности состава и расположения структурных элементов (твердые включения, заполнитель, зоны контактов элементов), их размеры, форма и содержание. Эти работы выполняются путем фотографирования площадок массива, анализа гранулометрического состава грунтов, проходки скважин и шурфов, использования стереологических построений и других подходов, рассмотренных в работе [5].

Грунты основания рассматриваются как среда с наиболее адекватной экспериментальным данным механико-математической моделью (линейно или нелинейно-деформируемая среда, включая отражение реологических свойств). Для дискретно-неоднородной области механические характеристики назначаются отдельно для каждого типа включений и заполнителя, а для однородной области - по данным полевых испытаний или расчетно-экспериментальными методами.

Для удобства расчетов область структурно-неоднородного грунта может быть представлена в виде прямоугольника (плоская задача) или параллелепипеда (пространственная задача). Следует отметить, что эта модель основания отличается физической сущностью от модели слоя ограниченной толщины и длины [2].

В частных случаях модель основания может быть представлена дискретным слоем грунта на однородном деформируемом основании ($h < H$ и $l = B$), дискретным слоем грунта на абсолютно жестком основании ($l = B$ и $h = H$, $l < B$ и $h = H$), локальной областью основания ABCD с переменными размерами $l_i = f(x)$, $h_i = f(z)$.

Для участков основания 2 и 3 (рисунок 1) могут выделяться непрерывно-неоднородные или кусочно-однородные области с различными показателями механических характеристик слагающих грунтов с отражением, нередко, сложных условий их залегания (в особенности элювиального генезиса) в основаниях зданий и сооружений. Расчет НДС

основания выполняется методом конечных элементов (МКЭ) с учетом представления его в виде двухуровневого континуума и отражения: крупнообломочной составляющей и заполнителя; типовой структуры, состоящей из включений и заполнителя, обладающей осредненными механическими свойствами; размеров расчетной области основания и фундамента.

Исследованные варианты расчетной модели основания. Рассмотрим результаты исследований по обоснованию предложенной модели крупнообломочного основания. Часть из них опубликована в работе [6], с участием О.В. Тарасовой. В качестве основания рассматривался крупнообломочный грунт с заполнителем, механические свойства которого приведены в таблице 1 [7].

Таблица 1

Механические свойства грунтов

Механические характеристики	Компоненты модели		Осредненные параметры	
	Мергель	Суглинок	n = 0,2	n = 0,4
Модуль сдвига G, КПа	86436	2148	4831	6079
Модуль деформации E, КПа	195000	5800	13430	16780
Коэффициент Пуассона ν	0,128	0,35	0,39	0,38
Сцепление, КПа	600	46	45	50
Угол внутреннего трения, град.	29	32	27	33

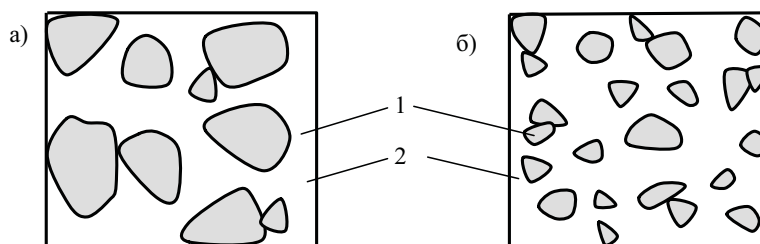
Механические характеристики включений и заполнителя описывались моделью бездилатансионной упругоидеальнопластической среды. Условие прочности описывалось критерием Кулона – Мора. Сетка разбивки содержала до 410 конечных элементов. Расчеты выполнялись МКЭ по программе SCAD.

Математическое моделирование проводилось на двух типах расчетных моделей основания: схема А в виде дискретно-неоднородного основания с отношением размеров включений к ширине подошвы фундамента $d/b=1,0 \dots 3,0$ (серия 1) и $d/b=0,1 \dots 0,3$ (серия 2); схема Б в виде квазиоднородного основания для расчета осадок фундаментов по механическим свойствам заполнителя (серия 3) и осредненным параметрам включений мергеля и заполнителя из суглинка (серия 4).

Все расчеты МКЭ проводились для вариантов содержания включений $n = 0\%, 20\%$ и 40% при размерах ширины подошвы фундамента $b = 1, 2, 3$ и 4 м.

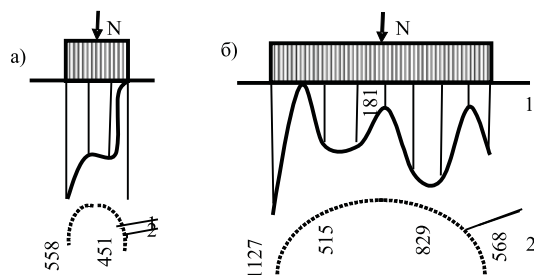
На рисунке 2 приведены исследованные фрагменты «типовых структур» оснований фундаментов на крупнообломочных грунтах с заполнителем.

По степени каркасности исследованные структуры относятся ко второму классу – крупнообломочным грунтам с несовершенным каркасом. Поэтому для данного типа грунтов учитывалось взаимодействие включений и заполнителя.



а – при $d/b=1,0 \dots 3,0$; б – при $d/b=0,1 \dots 0,3$; 1 – включения; 2 - заполнитель
Рисунок 2 – Фрагменты исследованных структур оснований фундаментов

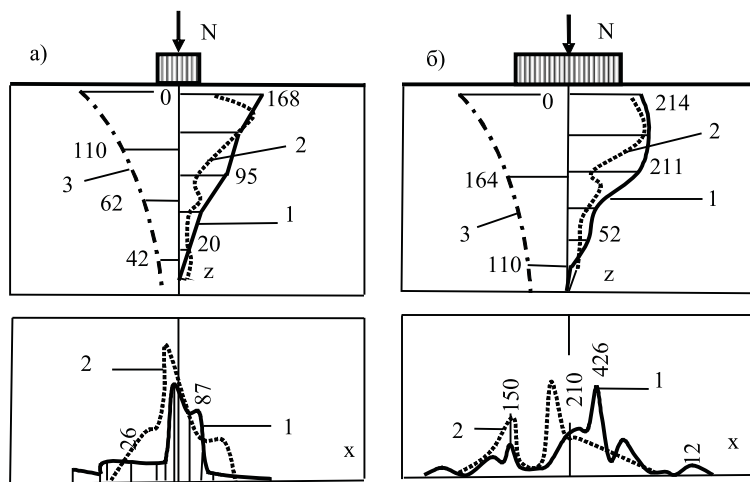
Контактные давления по подошве фундаментов. На рисунке 3 приведены результаты вычислений контактных напряжений по подошве жесткого фундамента при содержании включений $n = 0,4$ и давлении по его подошве $P = 500$ кПа.



а – при $b = 1$ м; б – при $b = 4$ м; неоднородное (1) и однородное (2) основания
Рисунок 3 – Эпюры напряжений $P(x)$ по подошве жесткого фундамента

Из рисунка 3 следует, что наличие включений изменяет, по отношению к однородному основанию, вид эпюры контактных напряжений $P(x)$, которая зависит также от процентного содержания включений, их размера, ширины подошвы фундамента, а также степени развития пластических деформаций в основании. Это обуславливает и различие изгибающих моментов по подошве фундамента.

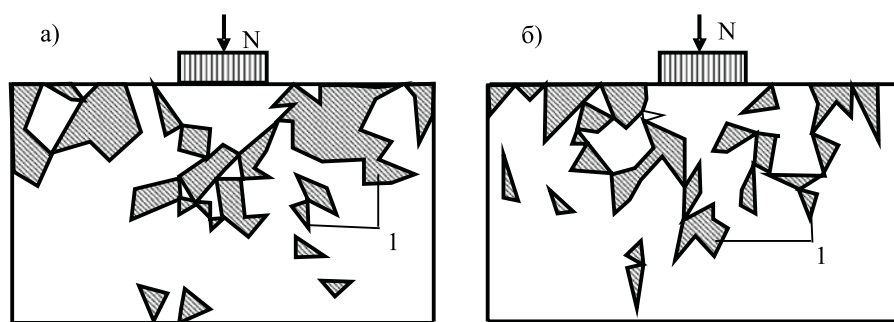
Напряженное состояние основания. На рисунке 4 приведены, в качестве примера, результаты вычислений вертикальных напряжений σ_z в основании фундамента по осям z и x при среднем давлении по его подошве $P = 200$ кПа.



а – при ширине фундамента $b = 1$ м; б – при ширине фундамента $b = 3$ м;
1 – при содержании включений $n=0,4$; 2 – при $n=0,2$; 3 – при $n=0$
Рисунок 4 – Эпюры напряжений σ_z в основании при $d/b=1,0...3,0$ (серия1)

Как видно из рисунка поле напряжений в дискретном основании характеризуется чрезвычайной неоднородностью. У острых углов включений возникает резкая концентрация напряжений, что приводит к возникновению локальных пластических деформаций в материале заполнителя. Из рисунка 4 также следует, что очертание эпюры σ_z в основании даже при одинаковом содержании включений зависит еще от ширины подошвы фундамента. Различие в эпюрах σ_z получено и при отличающихся сочетаниях параметров n и b . В обобщенном виде, можно записать выражение $S_z = f(P, Z, n, b)$. Это указывает на зависимость НДС основания от ширины фундамента, нагрузки, размера и содержания включений и ряда других структурно-механических факторов.

Развитие зон разрушений грунта в основании фундаментов. Наряду с исследованием НДС проводился также анализ прочности оснований. Характерные примеры развития зон разрушений в основаниях приведены на рисунке 5.

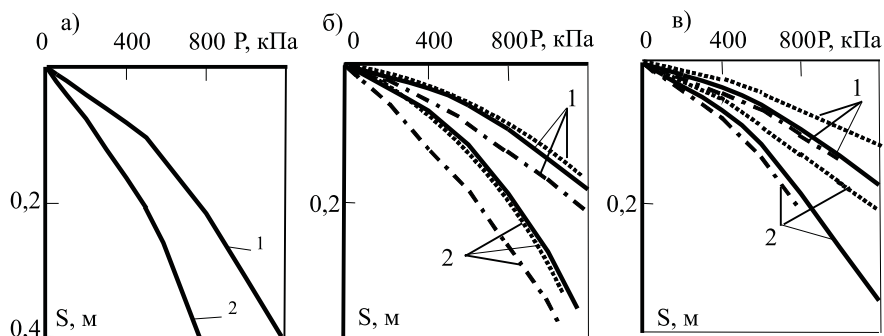


а – при $n=0,2$ (серия 1); б – при $n=0,4$ (серия 1)

Рисунок 5 – Зоны разрушения грунта (1) под фундаментом ($b=3$ м, $P=600$ КПа)

Анализ численных экспериментов показал, что разрушение структуры дискретно-неоднородного основания начинается с заполнителя вокруг концентраторов напряжений. С ростом нагрузки на грунт локальные зоны разрушения развиваются, образуя обширную область, включающую и обломки скального грунта. Характер развития зон разрушения грунта в основании, как показали исследования, существенно зависит от содержания включений, их размера, а также ширины подошвы фундамента. Эти особенности характеризуют проявление в основании масштабной неоднородности, обусловленной структурно-механическими особенностями дискретно-неоднородных грунтов. Отмеченный механизм разрушения грунтов основания отличается от известных данных для однородных сред.

Осадки фундаментов. Из рисунка 6 следует, что графики осадки фундамента S от среднего давления по его подошве P , т.е. $S = f(P)$ имеют нелинейный характер. Они зависят как от содержания включений, так и ширины подошвы фундамента. Учет включений в основании фундаментов во всех случаях снижает их осадку. Для серии расчетов при значениях $d/b=1 \dots 3$, вследствие масштабной неоднородности среды, получена зависимость осадки фундамента от места расположения фундамента на поверхности основания.



а) – $n = 0$; б) – $n = 0,2$; в) – $n = 0,4$; 1 – $b = 1$ м; 2 – $b = 2$ м; сплошная линия – однородная среда; штриховая – $d/b = 0,1 \dots 0,3$; штрихпунктирная – $d/b = 1 \dots 3$

Рисунок 6 – Графики зависимостей $S = f(P)$

Для анализа нелинейности графиков $S = f(P)$ использована формула

$$S = \frac{(1-\nu^2)\omega \cdot b}{A_z^{1/m}} P^{1/m}, \quad (2)$$

где A_z и m – коэффициент деформируемости и параметр упрочнения;
 ω – коэффициент формы и жесткости фундамента;
 ν – коэффициент Пуассона грунта.

Определение параметров A_z и m осуществлялось по компьютерной программе. Анализ данных показал, что для квазиоднородных схем оснований (серии 3 и 4) параметр упрочнения m несущественно зависит от ширины подошвы фундамента и содержания включений, тогда как различие в коэффициентах A_z для фундаментов шириной $b=1$ м и $b=2$ м достигает 60,4%.

Зависимость параметров A_z и m от содержания включений, ширины фундамента и расчетной схемы основания для серий расчетов 1 и 2 имеет сложный характер. Из полученных данных следует, что адекватности осадок не наблюдается ни для одной из рассмотренных моделей оснований. Например, при нагрузке на фундамент $P=400$ кПа различие в осадках составляет 15,5...33,1%. При этом важно отметить, что наименьшее различие в осадках фундаментов получено для моделей оснований в виде квазиоднородной (средней по свойствам) и дискретно-однородной сред при отношении $d/b=0,1 \dots 0,3$ при $b=2$ м.

При практическом соответствии параметров нелинейной зависимости $S=f(P)$ для моделей квазиоднородного и дискретно-однородного оснований можно использовать следующий прием расчета осадок фундаментов на крупнообломочных грунтах с использованием метода М.В. Мальшева [8].

1. По формулам механики грунтов определяются расчетное сопротивление R и предельное сопротивление P_U грунтов квазиоднородного основания.

2. Определяется осадка фундамента S_p по формуле М.В. Малышева для квазиоднородного основания за пределами линейной зависимости, т.е. при $P > R$

$$S_p = S_R \left[1 + \frac{(P_U - R)(P - R)}{(R - \sigma_{zg,0})(P_U - P)} \right] \quad (3)$$

где S_R - осадка квазиоднородного основания при $P=R$;
 $\sigma_{zg,0}$ - напряжение от собственного веса грунта на уровне подошвы.

3. Определяется осадка основания S_{RD} с учетом дискретной неоднородности его строения при $P=R$. Эту величину можно определить численным способом расчета МКЭ, либо методом послойного суммирования применительно к крупнообломочным грунтам по СНиП РК 5.01-2002.

4. Величина S_{RD} подставляется в формулу (3) вместо значения S_R .

Выполним расчет по изложенной методике для фундамента $b=2$ м при $n=0,2$ (рисунок 6б) для среднего давления по его подошве $P=600$ кПа. Для квазиоднородного основания $R=479$ кПа, $P_U=1746$ кПа, $s_{zg,0}=27$ кПа (для глубины заложения фундамента $d=1,5$ м и удельного веса грунта $\rho=18$ кН/м³). При условии $P=R$ величины $S_R = 0,0852$ м, $S_{RD} = 0,0905$ м. Тогда при $P=600$ кПа осадки фундамента составят $S_p = 0,1104$ м (расчет МКЭ – 0,115 м), а $S_{RD} = 0,1175$ м (расчет МКЭ – 0,1207). Таким образом, погрешность расчета составила 2,6 %.

Выводы

1. Обоснованы геомеханическая модель основания, аппарат двухуровневого континуума и методика для расчетов фундаментов на крупнообломочных грунтах с учетом дискретности их строения, различия показателей механических свойств, состава, формы, ориентации, размеров включений и заполнителя.
2. Совокупность разработанных методик позволяет, в дополнение к существующим способам, проводить многовариантные, многофакторные расчеты фундаментов на крупнообломочных грунтах главным образом путем математического моделирования, что повышает эффективность и надежность проектирования различных объектов в сложных грунтовых условиях.
3. Эффективность использования предложенной геомеханической модели возрастает при проектировании оснований высотных зданий, включающих крупные обломки скальных грунтов, сопоставимые с размерами фундаментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ухов С.Б. Грунты как композиционные материалы природного образования. // Строительство в России: прогресс науки и техники. – М.: 1993. – С. 130 – 139.
2. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. М.: Изд-во АСВ, 2005. – 488 с.
3. Козионов В.А. Взаимодействие ленточных фундаментов с дискретно-неоднородным основанием // Материалы международной научной конференции. - Пенза : Приволжский дом знаний, 2008. – С. 60 – 63.

4. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 334 с.
5. Теоретические основы инженерной геологии. Механико-математические основы / Под ред. акад. Е.М. Сергеева. – М. : Недра, 1986. – 256 с.
6. Козионов В.А., Тарасова О.В. Конечноэлементный анализ взаимодействия ленточного фундамента с обломочно-глинистым основанием // Материалы международной научной конференции. – Екибастуз: ЕИТИ, 2009.- С. 591 - 595
7. Козионов В.А., Тарасова О.В. Расчетная оценка влияния формы и содержания включений на механические свойства обломочно-глинистых грунтов // Материалы международной научной конференции «VII Сатпаевские чтения». Т.6, Ч. 1. – Павлодар : ПГУ им. С. Торайгырова, 2009. – С. 120 – 126.
8. Малышев М.В., Болдырев Г.Г. Механика грунтов, основания и фундаменты в вопросах и ответах. – М. : Издательство АСВ, 2000. – 320 с.

Түйіндеме

Толтырғышымен ірісінықты грунттарда іргетастар негізінің құрылым құрылысын есепке алған геомеханикалық моделінің негіздемесі келтіріледі. Негіздің кернеулі-деформацияланған жағдайының ерекшеліктерінің, онда қиратудың аймақтары пайда болуы мен дамуының, сонымен бірге іргетастардың табанына контактық қысымының талдауы берілген.

Resume

The substantiation of geomechanical model of the basis from large fragmental filler grounds, considering structure of their constitution is adduced. The analysis of features of tensely deformed condition of the basis, formation and development in it of destruction zones, and also contact pressure on a sole of the bases is presented.