УЧЕТ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЗДАНИЯ С ГРУНТОМ ОСНОВАНИЯ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ¹

О.В. Мкртычев, М.С. Дударева

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

Предмет исследования: исследование направлено на преодоление таких проблем, как учет совместной работы сооружения с основанием, а также моделирование бетонных элементов конструкций нелинейными материалами с непосредственным армированием. Решение такой комплексной задачи не регламентировано действующими нормативными документами.

Цели: исследуется поведение железобетонного здания при сейсмическом воздействии с корректным учетом взаимодействия сооружения с основанием и с применением комплексного подхода к моделированию самого сооружения.

Материалы и методы: корректный учет взаимодействия здания с грунтовым массивом обеспечивается за счет применения методики взаимодействия сооружения с основанием. При сейсмическом воздействии в замкнутом грунтовым массиве наблюдается распространение волн и их отражения от его границ. Для преодоления этого нежелательного эффекта в задаче применяются «неотражающие» границы, которые задаются посредством PML-слоя. Применение PML-слоя помогает наблюдать реальную картину, происходящую во время землетрясения. При моделировании основных несущих элементов материал бетона задается по нелинейной модели. Арматура здания моделируется стержневыми конечными элементами и связывается с бетоном посредством лагранжево-эйлеровых сеток.

Результаты: результаты проведенных исследований, а именно сравнения таких параметров, как относительный сдвиг этажа и накопление повреждений в элементах конструкции, показали, что без учета интерфейса взаимодействия сооружения с основанием мы имеем заниженные значения указанных параметров.

Выводы: необходимо применение рассматриваемой методики при расчете зданий, проектируемых в сейсмических районах, а также решение подобных комплексных задач для исследования поведения железобетонных конструкций во время землетрясения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: взаимодействие с основанием, нелинейная модель, лагранжево-эйлеровые сетки, «неотражающие» границы, сейсмическое воздействие

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мкртычев О.В., Дударева М.С. Учет совместной работы железобетонного здания с грунтом основания при интенсивном сейсмическом воздействии // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. Вып. 2 (28). Ст. 3. Режим доступа: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.2.3

ACCOUNTING THE COMBINED ACTION OF THE REINFORCED CONCRETE BUILDING WITH FOUNDATION SOIL IN CASE OF STRONG GROUND SHAKING²

O.V. Mkrtychev, M.S. Dudareva

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavlshosse, Moscow, 129337, Russian Federation*

Subject of research: the study is aimed at overcoming such problems as accounting the combined action of the structure with base, as well as the modeling of structure concrete elements with nonlinear materials with direct reinforcement. The solution of such a complex task is not regulated by the current regulatory documents.

Purposes: studying the behavior of a reinforced concrete building in case of seismic action with a correct account of the interaction of the structure with base and with the application of a complex approach to the modeling of the structure itself.

Materials and methods: the correct account of the interaction of the building with the soil body is ensured by the application of the method of interaction between the structure and base. Under the seismic action in a closed soil body, the propagation of waves and their reflection from its boundaries is observed. To overcome this undesirable effect, "non-reflecting boundaries" are applied in the task, that are specified by means of the PML layer. The application of the PML layer helps to observe the real picture that occurs during the earthquake. In case of the modeling of the main bearing elements, concrete material is specified by a nonlinear model. The reinforcement of the building is modeled by the rod finite elements and is connected with concrete by means of Lagrangian-Eulerian meshes.

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России, грант №7.1524.2017/ПЧ.

² The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Grant No. 7.1524.2017/ПЧ.

Findings: the results of the conducted studies, namely the comparison of such parameters as the relative shift of the floor and the accumulation of damages in the structural elements, showed that without taking into account the interface of the interaction of the structure with base, we have underestimated values of these parameters.

Conclusions: it is necessary to apply the method under consideration when proportioning of buildings designed in seismic regions, and also to solve similar complex tasks for studying the behavior of reinforced concrete structures during the earthquake.

KEY WORDS: interaction with base, nonlinear model, Lagrangian-Eulerian meshes, “nonreflecting” boundary, seismic action

FOR CITATION: Mkrtychev O.V., Dudareva M.S. Uchet sovместnoy raboty zhelezobetonnoy zdaniya s gruntom osnovaniya pri intensivnom seysmicheskom vozdeystviy [Accounting the combined action of the reinforced concrete building with foundation soil in case of strong ground shaking]. Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie [Construction: Science and Education]. 2018, vol. 8, issue 2 (28), paper 3. Available at: <http://nso-journal.ru>. (In Russian). DOI: 10.22227/2305-5502.2018.2.3

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время с развитием и усовершенствованием различных расчетных программных комплексов особое место отводится численным исследованиям. Это происходит из-за того, что экспериментальные подходы, которые являются более надежными с точки зрения достоверности получаемой информации, становятся достаточно дорогостоящими, а в ряде случаев — и недоступными из-за условий их реализации. В частности, проведение экспериментов в области теории сейсмостойкости, таких как испытания натурных моделей зданий на действие землетрясения, пока в нашей стране не в полной мере доступны не столько из-за частичного отсутствия материальной базы для проведения этих экспериментов, сколько из-за отсутствия информации о методах, которые непосредственно должны быть использованы при работе с натурной моделью сооружения [1, 2]. Поэтому эффективным подходом в подобных случаях становятся методы численного моделирования, представляющие собой цепочку элементов научного исследования, которая начинается с постановки проблем и завершается получением численных результатов и их анализом.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В данной статье рассматривается комплексная задача расчета одноэтажного железобетонного здания с учетом взаимодействия с основанием на трехкомпонентное сейсмическое воздействие. Все исследования проводятся посредством численного моделирования самой конструкции здания, грунта основания, а также всех условий, необходимых для проведения расчетов на землетрясение. Основной целью нашего численного эксперимента является анализ работы методики, позволяющей корректно учитывать взаимодействие сооружения с основанием при расчете на сейсмическое воздействие. В работах [3–5] достаточно подробно описывается эта методика взаимодействия сооружения с основани-

ем (Soil-Structure Interaction — SSI). В статьях [6, 7] описываются подходы к ее численной реализации и применению в расчетах реальных зданий. Нами были проведены исследования с использованием интерфейса SSI в программном комплексе LS-DYNA [8, 9]. При этом необходима оценка работы этой методики в комплексной задаче с проведением анализа полученных результатов.

Под комплексной задачей мы понимаем численное моделирование с учетом следующих особенностей:

- задание материала основных несущих конструкций по нелинейной модели бетона (Continuous Surface Cap Model — CSCM);
- моделирование грунта основания с помощью нелинейной модели Мора — Кулона с учетом возможной потери прочности;
- учет фактического армирования через задание арматуры с помощью стержневых конечных элементов и связывание ее с бетоном посредством лагранжево-эйлеровых сеток;
- корректный учет совместной работы системы сооружение-основание с применением интерфейса SSI;
- задание сейсмического воздействия на свободной поверхности;
- использование «неотражающих» границ с помощью PML-слоя.

Рассмотрим постановку описанной выше задачи с учетом приведенных особенностей, а также приведем полученные результаты и проанализируем их.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчетная схема представляет собой одноэтажное железобетонное здание (рис. 1). Балки, колонны и плита покрытия заданы объемными конечными элементами, а арматура, как уже отмечалось, — стержневыми.

Основные характеристики конструкции: размер здания в плане 6,8 × 6,8 м, высота этажа 3,3 м. Толщина фундаментной плиты 30 см, сечение ба-

Рис. 1. Расчетная схема: *a* — система грунт-фундаментная плита-конструкция; *б* — арматурный каркас

лок 40×40 см, сечение колонн 40×40 см, толщина плиты покрытия 20 см. Бетон класса В25 задавался при помощи нелинейной модели бетона CSCM (рис. 2) [10, 11].

Рис. 2. Поверхность текучести модели бетона CSCM

Используемая модель реализована в конечно-элементном коде программного комплекса LS-DYNA. Она была разработана в Департаменте транспорта Соединенных Штатов для оценки деформаций и повреждений железобетонных конструкций при динамических воздействиях. В отчете [10] приводится достаточно большое количество результатов натурных испытаний различных видов конструктивных элементов. Авторами была проведена верификация результатов этих экспериментов с численной реализацией подобных опытов [12, 13].

Для рассматриваемого здания (см. рис. 1) учитывалось фактическое армирование. Продольная арматура класса А400, поперечная — А240. В соответствии с перечисленными особенностями комплексной задачи объемные элементы бетона связывались со стрежневыми элементами арматуры через лагранжево-эйлеровы сетки [14, 15]. Преимущество использования смешанных сеток состоит в том, что мы рассматриваем произвольную контактную границу между бетоном и арматурой.

Основные характеристики грунта следующие: $\rho = 2000$ кг/м³ — плотность, $E = 100$ МПа — модуль деформации, $\nu = 0,25$ — коэффициент Пуассона.

В качестве расчетного сейсмического воздействия принималась трехкомпонентная акселеро-

грамма, нормированная на девять баллов (рис. 3). Для отражения адекватных результатов акселерограмма была сбалансирована в соответствии с данными [16, 17].

Для оценки работы методики SSI проведем два расчета: первый — без учета интерфейса SSI, второй — с учетом интерфейса SSI.

В первом расчете акселерограмма землетрясения задается на свободной поверхности грунтового массива. Интерфейс SSI реализуется посредством создания трех групп узлов (рис. 4).

Общие узлы, принадлежащие системе грунт-конструкция, будем обозначать индексом *f*. Узлы, относящиеся к конструкции — с индексом *st*, а узлы, относящиеся к грунту — индексом *s*. Уравнение движения во временной области для всей системы, показанной на рис. 4, можно записать в виде

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}_{st}\ddot{\mathbf{I}}_g, \quad (1)$$

где $\mathbf{M}$ — матрица массы всей конструкции, фундамента и грунта,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} [M_{st\ st}] & [M_{st\ f}] & 0 \\ [M_{f\ st}] & [M_{ff}^{st}] + [\bar{M}_{ff}^s] & [\bar{M}_{f\ s}] \\ 0 & [\bar{M}_{s\ f}] & [\bar{M}_{ss}] \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$\mathbf{C}$ — матрица затухания для материала конструкции и грунта,

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} [C_{st\ st}] & [C_{st\ f}] & 0 \\ [C_{f\ st}] & [C_{ff}^{st}] + [\bar{C}_{ff}^s] & [\bar{C}_{f\ s}] \\ 0 & [\bar{C}_{s\ f}] & [\bar{C}_{ss}] \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$\mathbf{K}$ — матрица жесткости всей системы,

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} [K_{st\ st}] & [K_{st\ f}] & 0 \\ [K_{f\ st}] & [K_{ff}^{st}] + [\bar{K}_{ff}^s] & [\bar{K}_{f\ s}] \\ 0 & [\bar{K}_{s\ f}] & [\bar{K}_{ss}] \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$\mathbf{M}_{st}$ — матрица масс, имеющая ненулевые массы для всех степеней свободы конструкции,

Рис. 3. Расчетное сейсмическое воздействие

$$\mathbf{M}_{st} = \begin{bmatrix} [M_{st\ st}] & [M_{st\ f}] & 0 \\ [M_{f\ st}] & [M_{ff}^{st}] & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$\mathbf{I}$ — матрица инерционных сил; $\ddot{\mathbf{u}}_g$ — вектор ускорений на свободной поверхности (может быть получен с помощью простого одномерного анализа места расположения); $\mathbf{u}$ — вектор относительных перемещений по отношению к основанию/фундаменту.

Рис. 4. Реализация методики SSI

Во втором случае система грунтовый массив — фундаментная плита — здание рассматривается как единая система, в которой сейсмическое воздействие на основании принципа Д'Аламбера прикладывается в виде инерционных сил к сосредоточенным массам конструкции, представленной системой с конечным числом степеней свободы. Именно такой подход и реализован в действующем своде правил³.

Следует отметить, что в обеих задачах учтена особенность задания «неотражающих» границ в виде PML-слоя. На рис. 4 данный слой показан синим цветом, а красным цветом — сам грунт. Волна, идущая от источника, проходя через PML-слой, затухает, а отраженная волна настолько мала, что ею пренебрегают. Таким образом, применение

PML-слоя позволяет видеть реальную картину, происходящую во время землетрясения в ограниченном грунтовом массиве [18].

Расчет проводился в программном комплексе LS-DYNA прямым динамическим методом с реализацией явных схем интегрирования уравнения движения [19, 20].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравним результаты, которые были получены для двух рассматриваемых случаев. На рис. 5 приведены графики относительного сдвига этажа в горизонтальных направлениях.

На рис. 6 представлены графики накопления повреждений в бетонном элементе балки.

На рис. 7 показаны изополя развития повреждений в элементах конструкции, а также виден характер разрушения для разных схем в один и тот же момент времени.

³ СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах СНиП II-7-81* (актуализированного СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах» (СП 14.13330.2011)) (с Изменением № 1).

Рис. 5. Относительный сдвиг этажа: а — в направлении X ; б — в направлении Y

ВЫВОДЫ

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что применение интерфейса SSI меняет реакцию конструкции на одно и то же сейсмическое воздействие. Видно, что картина меняется принципиально, о чем говорит рис. 7, на котором показан момент начала прогрессирующего обрушения конструкции, но только в случае использования SSI. Без применения этой методики конструкция также получает повреждения, но разрушения не происходит.

Результаты расчетов говорят о том, что при проведении исследований в области теории сейсмостойкости получить более или менее действительную картину поведения зданий и сооружений

во время землетрясения можно только при решении комплексной задачи, т.е. необходимо численно моделировать наиболее реальные условия, которые имеют место при интенсивном землетрясении.

Для этого нужно учитывать не только перечисленные выше особенности комплексной задачи, но также правильно подобрать метод проведения расчетов, оценивать его сходимость, точность и устойчивость по отношению к конкретной задаче.

Следование рассмотренному и предложенному подходу к проведению расчетов железобетонных зданий на сейсмическое воздействие позволит правильно оценивать сейсмостойкость строительных конструкций, проектируемых для сейсмических районов.

Рис. 6. Накопление повреждений

Рис. 7. Изополя развития повреждений (момент времени $t = 8,5$ с): а — без интерфейса SSI; б — с интерфейсом SSI

ЛИТЕРАТУРА

1. Джинчвелашвили Г.А. Решение задач прикладной механики с помощью методов теории подобия и анализа размерностей // Строительство: наука и образование. 2016. № 2. Ст. 5.

2. Третьякова З.О. Комплексный подход к геометрическому моделированию сооружений // Современные образовательные технологии в преподавании естественно-научных и гуманитарных дисциплин. 2017. С. 688–693.

3. Changwei Y., Jianjing Z., Lin D., Tianbao S. New developments in geotechnical earthquake engineering. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 2014. Pp. 1–7. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/902690>
4. Katzenbach R., Leppla S. Realistic modeling of soil-structure interaction for high-rise buildings. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 117. Pp. 162–171. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.137
5. Orekhov V.V. Analysis of interaction between structures and saturated soil beds subject to static and seismic effects. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015. Vol. 52. Pp. 68–73.
6. Тяпин А.Г. Различия в нормативных подходах к расчету на сейсмические воздействия гражданских сооружений и сооружений АЭС. Часть II. Взаимодействие сооружения с основанием // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2014. № 6. С. 14–17.
7. Тяпин А.Г. Учет взаимодействия с основанием при расчетах на сейсмические воздействия. М. : Изд-во АСВ, 2014. 136 с.
8. Мкртычев О.В., Джинчвелашвили Г.А., Бусалова М.С. Моделирование взаимодействия сооружения с основанием при расчете на землетрясение // Вестник МГСУ. 2013. № 12. С. 34–40.
9. Mkrtychev O.V., Dzinchvelashvili G.A., Busalova M.S. Calculation accelerogram parameters for a “Construction-Basis” model, nonlinear properties of the soil taken into account. *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 91. Pp. 54–57. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.011>
10. Evaluation of LS-DYNA Concrete. Material Model 159. Publication NO. FHWA-HRT-05-063. McLean, 2007. 190 p.
11. Murray Y.D. Users Manual for LS-DYNA Concrete Material Model 159. Report No. FHWA-HRT-05-062. McLean, 2007. 77 p.
12. Mkrtychev O.V., Busalova M.S. Calculation of reinforced concrete structures with a set seismic stability level on an earthquake. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 153. Pp. 475–482. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.161>
13. Mkrtychev O.V., Busalova M.S. Assessment of seismic resistance of the reinforced concrete building by nonlinear dynamic method. *Advances in Engineering Research*. 2016. Vol. 104. Pp. 160–164.
14. Lebedeva N.A., Osiptsov A.N., Sazhin S.S. A combined fully Lagrangian approach to mesh-free modeling of transient two-phase flows. *Atomization and sprays*. 2013. Vol. 23. Pp. 4–69. <https://doi.org/10.1134/S0015462816050094>
15. Белов А.А., Калиткин Н.Н., Пошивайло И.П. Геометрически адаптивные сетки для жестких задач Коши // Доклады Академии Наук. 2016. Т. 466. № 3. С. 276–281. DOI: 10.7868/S0869565216030038
16. Мкртычев О.В., Решетов А.А. Представительный набор акселерограмм землетрясений для расчета зданий и сооружений на сейсмические воздействия // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 7 (106). С. 754–760. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.754-760
17. Trovato S., D’Amore E., Spanos P.D. An approach for synthesizing tri-component ground motions compatible with hazard-consistent target spectrum — Italian aseismic code application // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2017. Vol. 93. Pp. 121–134. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.12.003>
18. Basu Us., Chopra An. Perfectly matched layers for time-harmonic elastodynamics of unbounded domains: theory and finite-element implementation // *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 2003. No. 192. Pp. 1337–1375. DOI: 10.1016/S0045-7825(02)00642-4
19. Мкртычев О.В. Безопасность зданий и сооружений при сейсмических и аварийных воздействиях. М. : Изд-во МИСИ-МГСУ, 2010. 152 с.
20. Cun Hu., Haixiao Liu. Implicit and explicit integration schemes in the anisotropic bounding surface plasticity model for cyclic behaviours of saturated clay // *Computers and Geotechnics*. 2014. Vol. 55. Pp. 27–41. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.07.012>

Поступила в редакцию 29 сентября 2017 г.

Принята в доработанном виде 20 февраля 2018 г.

Одобрена для публикации 31 мая 2018 г.

ОБ АВТОРАХ: **Мкртычев Олег Вартанович** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сопротивления материалов, заведующий лабораторией «Надежность и сейсмостойкость сооружений», **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, mkrtychev@yandex.ru, ResearcherID: Q-2370-2017;

Дударева Марина Сергеевна — ассистент кафедры сопротивления материалов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, marina8busalova@gmail.com.

INTRODUCTION

Currently, with the development and improvement of various estimated software solutions, a special place is given to numerical investigations. This is due to the fact that experimental approaches, which are more reliable from the point of view of the reliability of the information received, become quite expensive, and in some cases — even inaccessible due to the conditions for their implementation. In particular, conducting experiments in the field of seismic stability theory, such as testing of natural models of buildings for the earthquake effect, are not yet fully available in our country, not so much because of the partial lack of a material base for carrying out these experiments, but because of the lack of information about methods that should be directly used when working with the natural model of the structure [1, 2]. Therefore, an effective approach in such cases is the methods of numerical modeling, which are a chain of elements of scientific research, which begins with the formulation of problems and ends with the receipt of numerical results and their analysis.

REVIEW OF LITERATURE

In this article, the complex task of proportioning a single-story reinforced concrete building is considered, taking into account interaction with base of a three-component seismic action. All researches are carried out by means of numerical modeling of the construction of the building itself, the foundation soil, as well as all the conditions necessary for making calculations for the earthquake. The main purpose of our numerical experiment is to analyze the operation of the method, which allows for correctly taking into account the interaction of the structure with base when calculating for seismic action. In articles [3–5], this method of interaction of a structure with a base (Soil-Structure Interaction — SSI) is described in sufficient detail. Ar-

ticles [6, 7] describe approaches to its numerical implementation and application in the calculation of real buildings. We conducted studies using the SSI interface in the LS-DYNA software solution [8, 9]. It is necessary to evaluate the work of this method in a complex task with the analysis of the results obtained.

Under the complex task, we mean numerical modeling taking into account the following features:

- Assignment of the material of the main bearing structures on the nonlinear concrete model (Continuous Surface Cap Model — CSCM);
- Modeling of the foundation soil with the use of the nonlinear Mohr-Coulomb model, taking into account a possible loss of strength;
- Taking into account the actual reinforcement through setting reinforcement with the help of the rod finite elements and linking it with concrete by means of Lagrangian-Eulerian meshes;
- Correct accounting of the joint operation of the construction-to-foundation system with the use of the SSI interface;
- Setting the seismic action on the free surface;
- Use of “non-reflecting” boundaries with the use of PML layer.

Let us consider the formulation of the issue described above taking into account the specified features, and also present the received results and analyze them.

MATERIALS AND METHODS

The design model is a single-storey reinforced concrete building (Figure 1). Beams, columns and roof slab are given by solid finite elements, and the reinforcement, as it was already noted, by rod elements.

The main characteristics of the structure: size of the building in plan view 6.8×6.8 m, floor height 3.3 m. The thickness of the foundation plate is 30 cm, girder section is 40×40 cm, column section is 40×40 cm, the thickness of the roof slab is 20 cm. Concrete of class

Figure 1. Design model: *a* — base-foundation plate-structure system; *b* — reinforcement cage

B25 was set using a nonlinear model of CSCM concrete (Figure 2) [10, 11].

Figure 2. Yield surface of CSCM concrete model

The model used is implemented in the finite-element code of the LS-DYNA software solution. It was developed in the United States Department of Transportation to assess deformations and damages of reinforced concrete structures under dynamic influences. The report [10] gives a sufficiently large number of results of full-scale tests of various types of structural elements. The authors verified the results of these experiments with the numerical realization of similar experiments [12, 13].

For the building under consideration (see Figure 1), actual reinforcement was taken into account. Longitudinal reinforcement of Class A400, the confinement one — Class A240. In accordance with the listed features of the complex task, the solid elements of concrete were linked to the rod reinforcement elements through the Lagrangian-Eulerian meshes [14, 15]. The advantage of using combined meshes is that we consider an arbitrary contact boundary between concrete and reinforcement.

The main soil characteristics are as follows: $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ — density, $E = 100 \text{ MPa}$ — modulus of deformation, $\nu = 0,25$ — Poisson's ratio.

As an estimated seismic action, a three-component accelerogram was adopted, normalized to nine points (Figure 3). To reflect adequate results, the accelerogram was balanced in accordance with the data [16, 17].

To evaluate the operation of the SSI methodology, we perform two calculations: the first one — without taking into account the SSI interface, the second one — taking into account the SSI interface.

In the first calculation an accelerogram of the earthquake is set on the free surface of the soil body. The SSI interface is realized through the creation of three groups of nodes (Figure 4).

The common nodes belonging to the soil-structure system will be denoted by the index f . The nodes related to the structure — with the index st , and the nodes related to the soil — with the index s . The equation of motion in the time domain for the entire system shown in Figure 4 can be written in the following form:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}_{st}\mathbf{I}\ddot{\mathbf{u}}_g, \quad (1)$$

where $\mathbf{M}$ is a mass matrix of the whole structure, foundation and soil,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} [\mathbf{M}_{st\ st}] & [\mathbf{M}_{st\ f}] & 0 \\ [\mathbf{M}_{f\ st}] & [\mathbf{M}_{ff}^{st}] + [\bar{\mathbf{M}}_{ff}^s] & [\bar{\mathbf{M}}_{f\ s}] \\ 0 & [\bar{\mathbf{M}}_{s\ f}] & [\bar{\mathbf{M}}_{ss}] \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$\mathbf{C}$ is a damping matrix for the material of the structure and soil,

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} [\mathbf{C}_{st\ st}] & [\mathbf{C}_{st\ f}] & 0 \\ [\mathbf{C}_{f\ st}] & [\mathbf{C}_{ff}^{st}] + [\bar{\mathbf{C}}_{ff}^s] & [\bar{\mathbf{C}}_{f\ s}] \\ 0 & [\bar{\mathbf{C}}_{s\ f}] & [\bar{\mathbf{C}}_{ss}] \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$\mathbf{K}$ is a rigidity matrix of the entire system,

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} [\mathbf{K}_{st\ st}] & [\mathbf{K}_{st\ f}] & 0 \\ [\mathbf{K}_{f\ st}] & [\mathbf{K}_{ff}^{st}] + [\bar{\mathbf{K}}_{ff}^s] & [\bar{\mathbf{K}}_{f\ s}] \\ 0 & [\bar{\mathbf{K}}_{s\ f}] & [\bar{\mathbf{K}}_{ss}] \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$\mathbf{M}_{st}$ is a mass matrix having non-zero masses for all degrees of freedom of the structure,

$$\mathbf{M}_{st} = \begin{bmatrix} [\mathbf{M}_{st\ st}] & [\mathbf{M}_{st\ f}] & 0 \\ [\mathbf{M}_{f\ st}] & [\mathbf{M}_{ff}^{st}] & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$\mathbf{I}$ is an inertial forces matrix, $\ddot{\mathbf{u}}_g$ is an acceleration vector on a free surface (can be obtained by a simple one-dimensional analysis of the location), $\mathbf{u}$ is a relative moment vector relative to base / foundation.

In the second case, the soil body — foundation slab — building system is considered as a unified system in which seismic action on the basis of the d'Alembert's principle is applied in the form of inertial forces to the concentrated masses of a structure represented by a system with a finite number of degrees of freedom. It is this approach that is implemented in the current set of rules⁴.

It should be noted that both tasks take into account the peculiarity of specifying “non-reflecting” boundaries in the form of a PML layer. In Figure 4 this layer is shown in blue, and the soil itself is shown in red. The wave coming from the source, passing through the PML layer, damps, and the reflected wave is so small that it is neglected. Thus, the application of the PML layer allows one to see the real picture that occurs during an earthquake in a limited soil body [18].

The calculation was carried out with the use of the LS-DYNA software solution by a direct dynamic method with the realization of explicit integration schemes for the equation of motion [19, 20].

⁴ SP 14.13330.2014. Construction in seismic regions SNiP II-7-81* (updated SNiP II-7-81* “Construction in seismic regions” (SP 14.13330.2011)) (with Amendment No. 1).

Figure 3. Estimated seismic action

Figure 4. Implementing SSI methodology

RESEARCH FINDINGS

Let us compare the results obtained for the two cases under consideration. The Figure 5 shows the graphs of the relative shift of the floor in horizontal directions.

The Figure 6 shows the graphs of damage accumulation in a concrete beam element.

The Figure 7 shows isofields of damage development in structural elements, and also shows the nature of destruction for different schemes at the same time.

CONCLUSIONS

Analyzing the results obtained, it can be said that the application of the SSI interface changes the design response to the same seismic action. It can be seen that the picture changes in principle, as shown in Figure 7, which shows the beginning of the progressive collapse of the structure, but only in the case of using the SSI.

Without the application of this methodology, the structure also gets damaged, but no destruction occurs.

The results of calculations show that when carrying out studies in the field of seismic stability theory, it is possible to obtain a more or less real picture of the behavior of buildings and structures during an earthquake only when solving a complex task, i.e. it is necessary to model numerically the most real conditions that occur during an intense earthquake.

In order to do this, it is necessary to take into account not only the above-mentioned features of the complex task, but also to choose the method of calculation, to evaluate its convergence, accuracy and stability in relation to a particular task.

Adherence to the considered and proposed approach to the calculation of reinforced concrete buildings for seismic impact will allow to correctly assess the seismic resistance of building structures designed for seismic regions.

Figure 5. The relative shift of the storey: *a* — in the *X* direction, *b* — in the *Y* direction

Figure 6. Damage accumulation

Figure 7. The isofields of damage development (moment in time $t = 8.5$ s): *a* — without SSI interface; *b* — with SSI interface

REFERENCES

1. Dzinchvelashvili G.A. Reshenie zadach prikladnoy mekhaniki s pomoshch'yu metodov teorii podobiya i analiza razmernostey [Solution of problems of applied mechanics using methods of the theory of similarity and analysis of dimensions]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2016, no. 2, pp. 5. (In Russian)
2. Tret'yakova Z.O. Kompleksnyy podkhod k geometricheskomu modelirovaniyu sooruzheniy [Complex approach to geometric modeling of structures]. *Sovremennye obrazovatel'nye tekhnologii v prepodavanii estestvenno-nauchnykh i gumanitarnykh distsiplin* [Modern educational technologies in the teaching of natural sciences and humanities]. 2017, pp. 688–693. (In Russian)
3. Changwei Y., Jianjing Z., Lin D., Tianbao S. *New developments in geotechnical earthquake engineering. Advances in Materials Science and Engineering*. 2014, vol. 2014, pp. 1–7. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/902690>
4. Katzenbach R., Leppla S. Realistic modeling of soil-structure interaction for high-rise buildings. *Procedia Engineering*. 2015, vol. 117, pp. 162–171. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.137
5. Orekhov V.V. Analysis of interaction between structures and saturated soil beds subject to static and seismic effects. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015, vol. 52, pp. 68–73.
6. Tyapin A.G. Razlichiya v normativnykh podkhodakh k raschetu na seysmicheskie vozdeystviya grazhdanskikh sooruzheniy i sooruzheniy AEHS. Chast' II. Vzaimodeystvie sooruzheniya s osnovaniem [Differences in regulatory approaches to the calculation of seismic impacts of civilian structures and structures of nuclear power plants. Part II. Interaction of a structure with a base]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy* [Seismic construction. Safety of buildings]. 2014, no. 6, pp. 14–17. (In Russian)
7. Tyapin A.G. *Uchet vzaimodeystviya s osnovaniem pri raschetakh na seysmicheskie vozdeystviya* [Consideration of interaction with the base in calculations for seismic actions]. Moscow, ASV Publ., 2014. 136 p. (In Russian)

8. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A., Busalova M.S. Modelirovanie vzaimodeystviya sooruzheniya s osnovaniem pri raschete na zemletryasenie [Modeling of the interaction of a structure with a base when calculating for an earthquake]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2013, no. 12, pp. 34–40. (In Russian)
9. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A., Busalova M.S. Calculation accelerogram parameters for a "Construction-Basis" model, nonlinear properties of the soil taken into account. *Procedia Engineering*. 2014, vol. 91, pp. 54–57. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.011>
10. *Evaluation of LS-DYNA Concrete. Material Model 159*. Publication NO. FHWA-HRT-05-063. McLean, 2007. 190 p.
11. Murray Y.D. *Users Manual for LS-DYNA Concrete Material Model 159*. Report No. FHWA-HRT-05-062. McLean, 2007. 77 p.
12. Mkrtychev O.V., Busalova M.S. Calculation of reinforced concrete structures with a set seismic stability level on an earthquake. *Procedia Engineering*. 2016, vol. 153, pp. 475–482. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.161>
13. Mkrtychev O.V., Busalova M.S. Assessment of seismic resistance of the reinforced concrete building by nonlinear dynamic method. *Advances in Engineering Research*. 2016, vol. 104, pp. 160–164.
14. Lebedeva N.A., Osipov A.N., Sazhin S.S. A combined fully Lagrangian approach to mesh-free modeling of transient two-phase flows. *Atomization and Sprays*. 2013, vol. 23, pp. 4–69. <https://doi.org/10.1134/S0015462816050094>
15. Belov A.A., Kalitkin N.N., Poshivaylo I.P. Geometricheski adaptivnye setki dlya zhestkikh zadach Koshi [Geometrically adaptive grids for rigid Cauchy problems]. *Doklady Akademii Nauk* [Reports of the Academy of Sciences]. 2016, vol. 466, no. 3, pp. 276–281. (In Russian) DOI: 10.7868/S0869565216030038
16. Mkrtychev O.V., Reshetov A.A. Predstavitel'nyy nabor akselerogramm zemletryaseniya dlya rascheta zdaniy i sooruzheniy na seysmicheskie vozdeystviya [Representative set of accelerograms of earthquakes for calculating buildings and structures for seismic impacts]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, no. 7 (106), pp. 754–760. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.754-760
17. Trovato S., D'Amore E., Spanos P.D. An approach for synthesizing tri-component ground motions compatible with hazard-consistent target spectrum — Italian aseismic code application. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2017, vol. 93, pp. 121–134. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.12.003>
18. Basu Us., Chopra An. Perfectly matched layers for time-harmonic elastodynamics of unbounded domains: theory and finite-element implementation. *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 2003, no. 192, pp. 1337–1375. DOI: 10.1016/S0045-7825(02)00642-4
19. Mkrtychev O.V. *Bezopasnost' zdaniy i sooruzheniy pri seysmicheskikh i avariynnykh vozdeystviyakh* [Safety of buildings and structures under seismic and emergency influences]. Moscow, MISI-MGSU Publ., 2010. 152 p. (In Russian)
20. Cun Hu., Haixiao Liu Implicit and explicit integration schemes in the anisotropic bounding surface plasticity model for cyclic behaviours of saturated clay. *Computers and Geotechnics*. 2014, vol. 55, pp. 27–41. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.07.012>

Received September 29, 2017.

Adopted in final form on February 20, 2018.

Approved for publication May 31, 2018.

ABOUT THE AUTHORS: **Mkrtychev Oleg Vartanovich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Strength of Materials, Chief of the Research Laboratory “Reliability and Earthquake Engineering”, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, mkrtychev@yandex.ru, ResearcherID: Q-2370-2017;

Dudareva Marina Sergeevna — Assistant, Department of Strength of materials, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, marina8busalova@gmail.com.