

Расчет характеристик стержневых конструкций при динамическом воздействии с учетом слоистости грунтового основания с использованием методов МКЭ-МГИУ

М.И. Кадомцев, К.А. Эксузян, И.Ф. Развеева

Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: В работе рассмотрена методика расчета стержневых конструкций, для основания – методом граничных элементов, для конструкции – методом конечных элементов. В качестве сооружения была взята стальная рама на грунтовом основании, шарнирно закрепленная в двух точках. Приведены результаты расчета амплитудно-частотной характеристики рамы без грунтового основания методом конечного элемента, результаты расчета амплитудно-частотной характеристики рамы на грунтовом основании при совместном использовании метода конечных элементов и метода граничных элементов. По проведенным исследованиям сделан вывод о точности учета динамических свойств грунтового основания.

Ключевые слова: диагностика конструкций, локализация повреждений, вибрационные методы диагностики.

В настоящее время интенсивно развиваются методы мониторинга состояния конструкций и локализации дефектов зданий и сооружений. Одно из основных направлений, по которому идет развитие – оценка состояния конструкций по динамическому отклику на внешние воздействия (VBDD - vibration based damage detection). Здесь используется либо подход на основе корреляционных методов, такой, например метода damage index [1], или методы машинного обучения [2,3]. В подавляющем большинстве статей в качестве алгоритма машинного обучения используется нейронные сети и обучение с учителем (supervised learning). И для первого и для второго направления для применения методов обнаружения повреждений необходимо иметь эталонный образец. Совершенно очевидно, что в случае строительных конструкций сложно найти реальное здание, идентичное обследуемому, да еще и с заданным состоянием – заведомо неповрежденное, или имеющее дефекты необходимой конфигурации. Поэтому совершенно естественно, что в большинстве случаев для получения тренировочного

набора данных, или эталонных значений динамического отклика используются различные модели. Это могут быть, например, конечноэлементные модели [1], или вообще, сейсмическая модель здания, представляющая собой вертикальный, жестко закрепленный стержень с сосредоточенными массами [2].

При этом, чаще всего анализ проводится в частотной области, исследуются амплитудно-частотные, фазо-частотные характеристики динамического отклика, формы собственных колебаний. Как показано, например, в работе [4], собственные колебания здания существенно зависят от свойств грунта основания. Таким образом, расчет динамических характеристик сооружения без корректного учета распространения волн в слоистом основании может привести к существенным погрешностям.

При этом учет полубесконечного основания в современных конечноэлементных комплексах расчета имеют существенные ограничения [4]. В частности, техника идеально сопряженных слоев [5] (PML – Perfectly Matched Layers), не позволяет корректно рассматривать многослойные основания. При этом реальное грунтовое основания как правило имеет выраженную слоистую структуру. При учете слоистости основания ситуация, когда слой с меньшей скоростью распространения упругих волн («мягкий» слой) лежит на слое с большей скоростью волн («жесткий» слой), приводит к возникновению резонансных явлений. При этом амплитудно-частотные характеристики конструкции с учетом основания будут существенно отличаться от аналогичных характеристик, рассчитанных без учета основания.

В данной работе для расчета стержневых конструкций предлагается методика расчета [6], при использовании которой слоистое основание рассчитывается методом граничных элементов, а конструкция – методом конечных элементов.

1. Постановка задачи

Рассматриваемая область представляет собой с (рис. 1)

Перемещение точек среды удовлетворяют уравнениям Ламе

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \text{grad div } \mathbf{u} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (1)$$

где ∇^2 - оператор Лапласа.

При рассмотрении задачи мы считаем, что напряжения и перемещения сохраняют непрерывность при переходе через границы слоев, то есть предполагаем, что слои грунтового основания стыкуются между собой жестко. Проблема рассматривается в плоской постановке, однако также может быть рассмотрена осесимметричная или трехмерная задача без принципиальных изменений схемы рассуждения.

Решение задачи предлагается проводить по следующей схеме

1. Исследуемая область разбивается по некоторой фиктивной границе γ (рис.1). Граница может быть выбрана произвольным образом. Это может быть граница фундамента и грунтового основания, или просто некоторый представительский объем грунта.

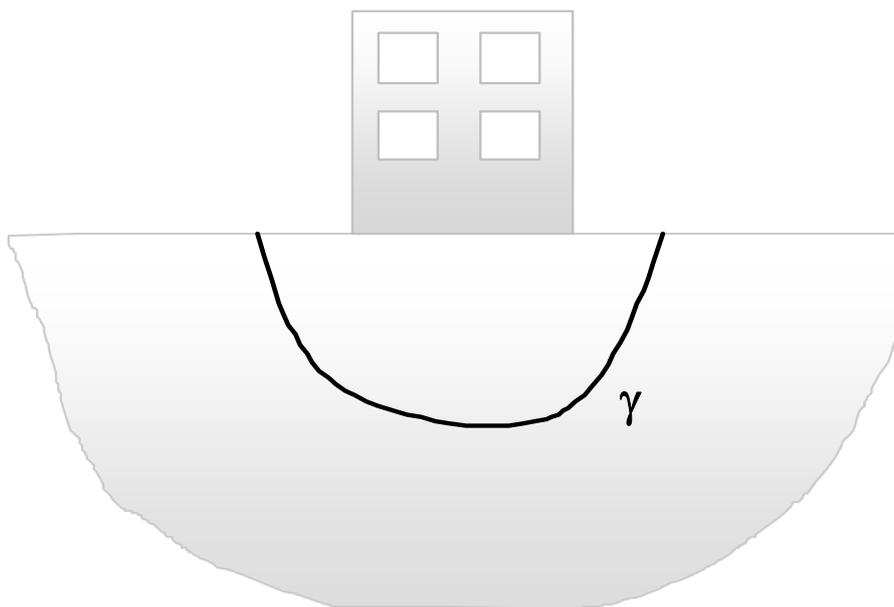


Рис. 1. Разделение области по границе γ .

2. После разделения верхняя часть разбивается на сетку конечных элементов, а граница нижней части – на сетку граничных элементов. Разбиение необходимо производить таким образом, чтобы узлы конечных и граничных элементов совпадали на границе γ (рис.2).

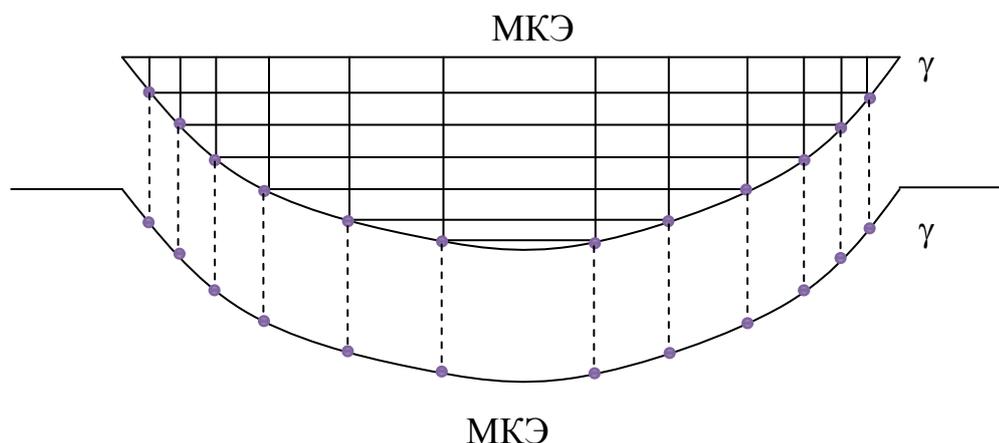


Рис. 2. Соответствие узлов конечноэлементной сетки на границе γ

3. Дальнейшие рассуждения будем проводить исходя из линейной постановки задачи. Если граница γ разбита на N узлов то на границе γ имеем N неизвестных усилий R_k , $k=1..N$ (рис.3). Представим усилия R_k в виде (2)

$$\vec{R}_k = \vec{R}_{kx} + \vec{R}_{ky} = p_{k1} \vec{F}_{k1} + p_{k2} \vec{F}_{k2} \quad (2)$$

Здесь \vec{R}_{kx} и \vec{R}_{ky} проекции соответственно на оси OX и OY , \vec{F}_{k1} и \vec{F}_{k2} - единичные силы, сонаправленные с ортами осей OX и OY соответственно.

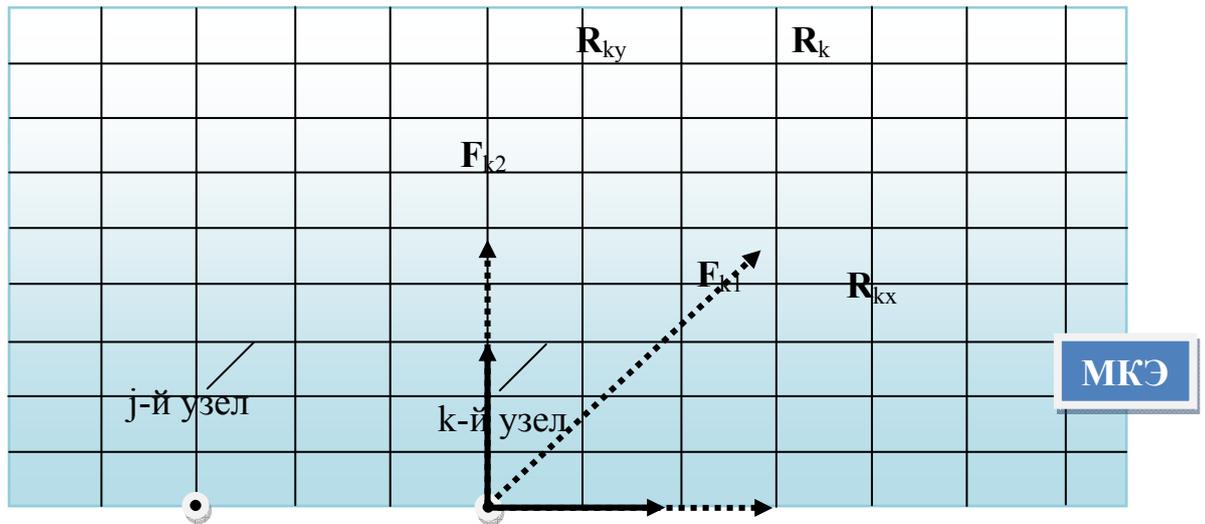


Рис. 3. Представление неизвестных усилий в k -м узле на границе γ .

Учитывая (2), перемещения на границе можно представить в виде (3)

$$\bar{\mathbf{u}}_j^{(1)}(x, y, z, \omega) = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^2 [p_{kl} \bar{\mathbf{u}}_{kjl}^{(1)}(x, y, z, \omega) + \bar{\mathbf{u}}_{jl}^{(1p)}(x, y, z, \omega)] \quad (3)$$

Здесь $\bar{\mathbf{u}}_{kjl}^{(1)}(x, y, z, \omega)$ - перемещения в j -м узле от единичного усилия, приложенного в k -м узле в направлении орта il , p_{kl} - неизвестные интенсивности усилий.

Аналогичным образом, построив решение для верхней части, используя МКЭ (рис. 6), получим

$$\bar{\mathbf{u}}_j^{(2)}(x, y, z, \omega) = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^2 p_{kl} \bar{\mathbf{u}}_{kjl}^{(2)}(x, y, z, \omega) \quad (4)$$

Предложенная схема иллюстрируется следующим примером:

В качестве сооружения берется стальная рама на грунтовом основании, шарнирно закрепленная в двух точках (рис. 4). Расстояние между опорами рамы составляет 20 метров.

Грунтовое основание моделируется двухслойной полуплоскостью, параметры которой определены в таблице 1

Таблица № 1

Параметры двухслойной полуплоскости

	Модуль Юнга, Па	Плотность, кг/м ³	Коэфф. Пуассона	Толщина, м
Слой 1	$3,4 \cdot 10^5$	1600	0,33	6
Слой 2	$3,4 \cdot 10^9$	1600	0,20	1
Полуплоскость	$3,4 \cdot 10^8$	1800	0,20	∞

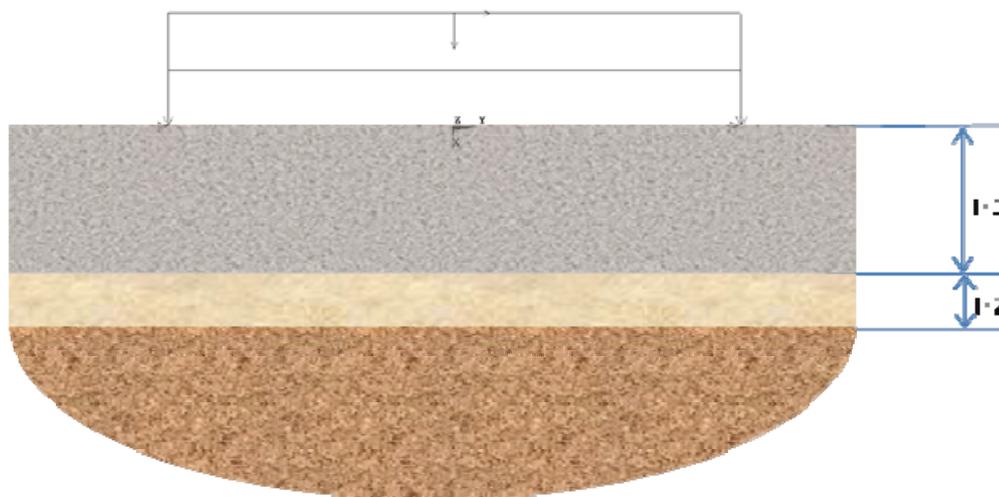


Рис. 4. Рама на грунтовом основании

Результаты расчета амплитудно-частотной характеристики рамы без грунтового основания методом конечного элемента приведен на рисунке 5а, результаты расчета амплитудно-частотной характеристики рамы на грунтовом основании при совместном использовании метода конечных элементов и метода граничных элементов приведены на рисунке 5б

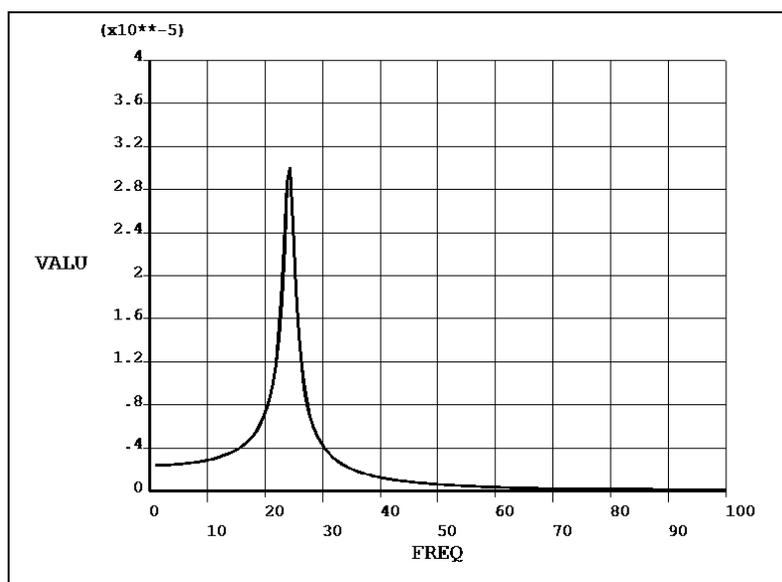


Рис. 5а. Амплитудно-частотная характеристика рамы без грунтового основания

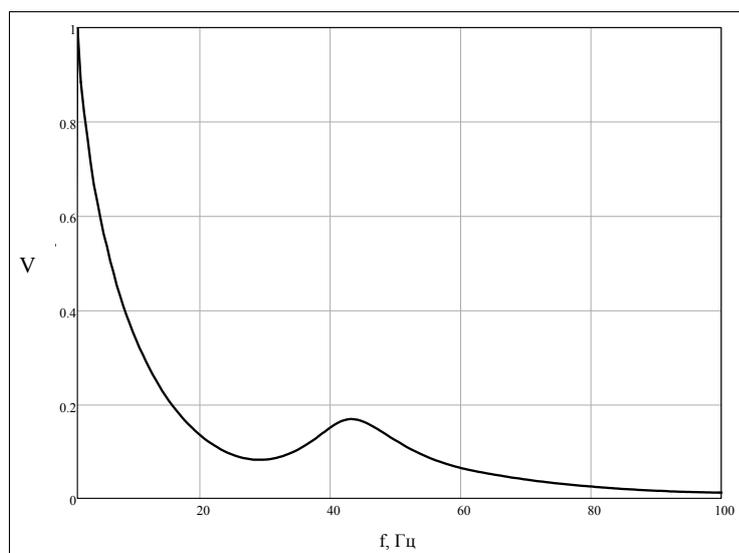


Рис. 5б. Амплитудно-частотная характеристика рамы на грунтовом основании.

Корректность расчетов при совместном использовании методов граничных и конечных элементов обуславливается тем, что при повышении жесткости подстилающего слоистого полупространства амплитудно-

частотная характеристика рамы на грунтовом основании стремится к амплитудно-частотной характеристике рамы без грунтового основания.

Проведенные исследования показали, что расчет динамических характеристик зданий и сооружений без учета свойств основания приведет к некорректным результатам. Предложенный метод расчета с совместным использованием методов конечного и граничного элемента позволяет точно учесть динамические свойства грунтового основания, в особенности затухания волнового поля на бесконечности, при этом являясь весьма экономным с точки зрения использования вычислительных ресурсов.

Литература

1. Шатилов, Ю.Ю., Эксузян, К.А Идентификация повреждений несущих стальных конструкций моста вибрационными методами диагностики // Инженерный вестник Дона. 2016. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3762.
2. Osama Abdeljaber, Onur Avci, Serkan Kiranyaz, Moncef Gabbouj ,Daniel J. Inman Real-time vibration-based structural damage detection using one-dimensional convolutional neural networks // Journal of Sound and Vibration 388 (2017) pp. 154–170.
3. Chia-Ming Changa, Tzu-Kang Linb, Chih-Wei Chang Applications of neural network models for structural health monitoring based on derived modal properties // Measurement 129 (2018) pp. 457–470.
4. M I Kadomtsev, A A Lyapin On study of steady-state dynamics of construction objects on half-infinite foundations using FEM-BEM // 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. p. 456.
5. Basu, U. Explicit finite element perfectly matched layer for transient three-dimensional elastic waves // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2009. No. 77(2). pp. 151–176.

6. Кадомцев, М.И., Ляпин, А. А., Селезнев, М.Г. Исследование динамики заглубленных фундаментов методами граничных и конечных элементов // Строительные конструкции и расчет сооружений. 2010. № 3. С. 61–64.

7. Шатилов, Ю.Ю. Локализация дефектов железобетонной колонны при помощи методов вибрационной диагностики // Инженерный вестник Дона. 2014. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2723.

8. Кадомцев, М.И., Ляпин, А.А., Шатилов, Ю.Ю. Математическая реализация вибрационного метода идентификации повреждений в пролетных строительных конструкциях // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2178.

9. Кадомцев, М.И., Шатилов, Ю.Ю., Жигульская, Ю.И. Локализация повреждений железобетонных элементов конструкций с предварительно напряженной арматурой // Инженерный вестник Дона. 2013. №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2124.

10. Кадомцев, М.И., Ляпин, А.А., Шатилов, Ю.Ю. Вибродиагностика строительных конструкций // Инженерный вестник Дона. 2012. №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/941.

References

1. SHatilov, YU.YU., Eksuzuyan, K.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3762.

2. Osama Abdeljaber, Onur Avci, Serkan Kiranyaz, Moncef Gabbouj, Daniel J. Inman. Journal of Sound and Vibration 388 (2017) pp. 154–170.

3. Chia-Ming Changa, Tzu-Kang Linb, Chih-Wei Chang Applications of neural network models for structural health monitoring based on derived modal properties. Measurement 129 (2018) pp. 457–470.



4. Kadomtsev M.I., Lyapin A.A. On study of steady-state dynamics of construction objects on half-infinite foundations using FEM-BEM. 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. p. 456.
5. Basu, U. International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2009. No. 77(2). pp. 151–176.
6. Kadomcev, M.I., Lyapin, A. A., Seleznev, M.G. Stroitel'nye konstrukcii i raschet sooruzhenij. 2010. № 3. pp. 61–64.
7. SHatilov, YU.YU. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2723.
8. Kadomcev, M.I., Lyapin, A.A., SHatilov, YU.YU. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2178.
9. Kadomcev, M.I., SHatilov, YU.YU, ZHigul'skaya, YU.I. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013. №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2124.
10. Kadomcev, M.I., Lyapin, A.A., SHatilov, YU.YU. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012. №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/941.