

МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ПУТЕПРОВОДОВ МОСТОВОГО И ТОННЕЛЬНОГО ТИПОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Петренко В.Д.

Тютькин А.Л.

Селихова Т.А.

*Днепропетровский национальный университет
железнодорожного транспорта*

Решение общей проблемы нормальной эксплуатации путепроводов мостового и тоннельного типов, которая складывается из множества частных вопросов, даст возможность получения наиболее полной и четкой репрезентативной информации о поведении их конструкций. Развитие транспортного строительства в Украине, связанное с увеличением объемов промышленных перевозок, определяет возникновение проблемы расчета транспортных сооружений на основаниях, представленных слоистыми грунтовыми формациями. В связи с этим серьезное значение имеет обеспечение условий нормальной эксплуатации таких сооружений, что вызвано отрицательными явлениями, которые присущи сложным транспортным объектам.

Одним из путей решения данной проблемы является максимальный учет специфических свойств слоистых грунтовых оснований, взаимодействующих с транспортными сооружениями, что обеспечивает наиболее полное знание и возможное прогнозирование поведения системы «транспортное сооружение–грунтовое основание».

Специфической особенностью работы транспортных сооружений является восприятие ними динамических воздействий от движущегося транспорта. Такие воздействия в совокупности с разнообразием мест их приложения на транспортное сооружение существенно усложняют расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) ввиду необходимости обязательного учета не только силовой, но и инерционной составляющей. При этом быстро изменяющиеся во времени по величине и направлению динамические воздействия вызывают волновые колебания как транспортного сооружения, так и основания, на котором оно установлено.

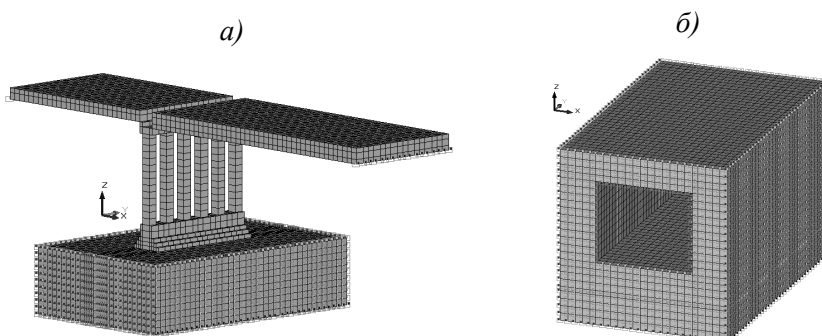
Сложность поведения сооружений и грунтовых оснований при динамических нагрузках существенно выше, чем при статических, причем в расчетах НДС оснований требуется оценивать влияние многих факторов, которые не учитываются в статических расчетах. Существующие аналитические положения разделяют область динамических расчетов на динамику сооружений и динамику грунтов [1]. Такое деление тенденциозно и вместе с тем применяется и для статических расчетов оснований, хотя оно и является значительным упрощением реальной работы системы «сооружение–основание».

Совместное рассмотрение и анализ этой системы как единственно верный подход к исследованию реального сооружения и основания, отмечали М.Н. Гольдштейн [2], С.С. Вялов [3], М.В. Малышев [4] и другие исследователи. Но применение этого подхода до сих пор не нашло широкого распространения по причине сложности одновременного анализа

обеих частей системы «сооружение–основание», которая в случае динамического воздействия существенно повышается.

Вместе с тем, стремление к достижению расчетных показателей, наиболее адекватных реальным параметрам НДС, заставляет находить некоторые способы учета как статических, так и динамических воздействий на сооружение и грунтовое основание. В настоящее время в ограниченном числе исследований достаточно глубоко разработана область динамических расчетов фундаментов в условиях сейсмического воздействия [1], но подход к расчету фундамента с упрощением свойств оснований позволяет получать лишь результаты в узких рамках взаимодействий в системе «сооружение–основание».

Развитие численных методов, в частности метода конечных элементов (МКЭ), дало возможность проведения не только статических расчетов, но и некоторых видов динамического анализа конструкций путепроводов, что ранее было практически сложно и доказывается очень малым объемом работ в этой области. Проведение анализа даже собственных частот и форм для путепровода любого типа с учетом или без учета присоединенных масс грунта было или невозможным или выполнялось на основе простейших двух- или трехмассовых моделей [5, 6]. Такой подход к решению динамических задач не может считаться плодотворным, и поэтому в данной работе проводится модальный анализ конструкций путепроводов мостового и тоннельного типов с учетом присоединенных масс грунта. Причем модель для решения задачи поиска собственных форм и частот учитывает реальные инерционные и деформационные характеристики сооружения. В ней учтен также пространственный фактор работы путепровода и взаимодействие элементов фундамента с окружающим основанием (рис. 1.).



а) мостового типа; б) тоннельного типа.

Рисунок 1 – Конечно-элементные модели путепроводов

Представленная схема является пространственной на основе объемных конечных элементов типа параллелепипеда. Размер конечного элемента (КЭ) изменяется в зависимости от толщины некоторых конструктивных элементов путепровода, но общий объем конечного элемента, как и в дальнейшем модальном анализе тоннельного путепровода, не превышает $0,25 \text{ м}^3$. Применены КЭ следующих размеров: $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ м для моделирования окружающего массива; $0,24 \times 0,7 \times 0,5$ и $0,7 \times 0,7 \times 0,5$ м – для моделирования фундамента и стоек путепровода; $0,5 \times 0,52 \times 0,35$ и $0,5 \times 0,52 \times 0,5$ для моделирования пролетных строений и КЭ некоторых других размеров. Количество узлов модели – 17 774, количество КЭ – 14 028. Сооружение смоделировано полностью, то есть точно смоделированы все геометрические параметры. Для учета взаимодействия сооружения путепровода с окружающим массивом вокруг него был

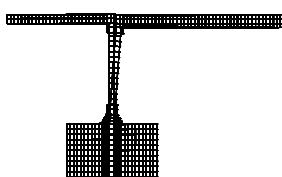
смоделирован определенный объем грунта: под фундаментом путепровода на глубину 5 м, что соответствует учету слоя суглинка мощностью 2,5 м и слоя глины мощностью 2,5 м, полученных по результатам инженерно-геологических изысканий. Сбоку от фундамента путепровода смоделирован слой грунта мощностью 5 м, что дает достаточную возможность проследить влияние конструкции на основание.

Количество узлов модели путепровода тоннельного типа – 17 760, количество КЭ – 14 724. По длине сооружение смоделировано полностью, то есть длина модели составляет 18 м, также точно смоделированы и остальные геометрические параметры. Для учета взаимодействия путепровода с окружающим массивом вокруг него был смоделирован некоторый объем грунта под лежнем путепровода на глубину 3,3 м, что соответствует учету слоя суглинка мощностью 1,3 м и слоя глины мощностью 2 м, полученных по результатам инженерно-геологических изысканий. Сбоку от стоек путепровода смоделирован слой грунта мощностью 2 м, что дает достаточную возможность проследить влияние конструкции на окружающее основание.

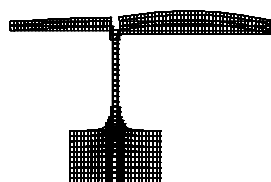
В моделях заданы деформационные характеристики суглинка (модуль упругости $E = 37,6 \cdot 103$ КПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, удельный вес $\gamma = 20$ КН/м³); глины (модуль упругости $E = 59,8 \cdot 103$ КПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,35$, удельный вес $\gamma = 20$ КН/м³) и железобетона (приведенный модуль упругости $E = 370 \cdot 103$ КПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,1$, удельный вес $\gamma = 25$ КН/м³).

В качестве граничных условий КЭ-модели применены деформационные граничные условия: по низу модели (грунтового основания) поставлены запреты на линейные и угловые перемещения по оси Z и X, а также по бокам модели – X и Y. Так как пролетное строение жестко крепится к промежуточной опоре, то на его другом конце поставлены только запреты по вертикальной оси Z, что позволяет добавить пролетному строению одну отсутствующую степень свободы и не моделировать устои, считая их неподвижными.

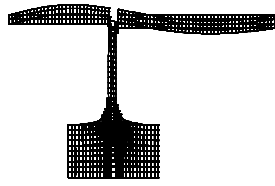
С использованием профессионального расчетного комплекса SCAD на основе разработанных моделей проведен модальный анализ с определением частот и форм собственных колебаний (рис. 2, 3).



*1 собственная форма,
частота – 2,7 Гц*



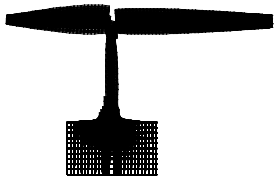
*2 собственная форма,
частота – 24,0 Гц*



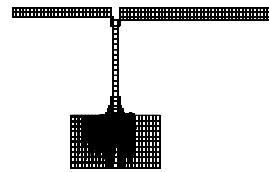
3 собственная форма,
частота – 38,2 Гц



4 собственная форма,
частота – 38,8 Гц

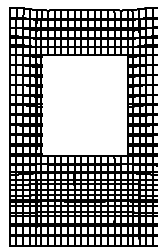


5 собственная форма,
частота – 43,0 Гц

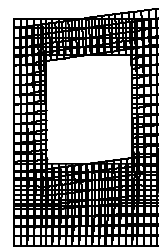


6 собственная форма,
частота – 43,8 Гц

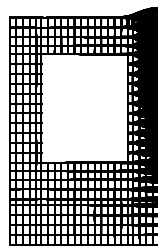
Рисунок 2 – Результаты модального анализа путепровода мостового типа



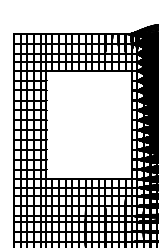
1 собственная форма,
частота – 31,51 Гц



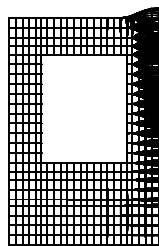
2 собственная форма,
частота – 33,43 Гц



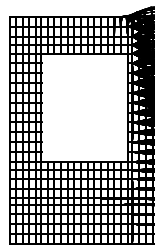
3 собственная форма,
частота – 61,76 Гц



4 собственная форма,
частота – 68,75 Гц



5 собственная форма,
частота – 75,47 Гц



6 собственная форма,
частота – 83,62 Гц

Рисунок 3 – Результаты модального анализа путепровода тоннельного типа

На рис. 2. представлены схемы собственных форм колебаний с соответствующими им частотами для путепровода мостового типа, на рис. 3. – тоннельного. Получены формы свободных колебаний мостового путепровода вплоть до 12-й, со значениями частот: 7-я – 50,93 Гц, 8-я – 55,23 Гц, 9-я – 58,71 Гц, 10-я – 59,9 Гц, 11-я – 59,6 Гц, 12-я – 60,7 Гц. Характер полученных форм отражает динамическую работу путепровода, так информативными являются 7-я форма (скручивание стоек вокруг своей оси), 8, 9 и 10-я являются изгибными. Причем изгиб пролетных строений влечет за собой сдвиг фундамента, 11-я характеризуется перемещениями фундамента, а 12-я является формой скручивания пролетных строений вокруг продольной оси. Также получены формы свободных колебаний тоннельного путепровода вплоть до 12-й со значениями частот: 7-я – 92,81 Гц, 8-я – 102,82 Гц, 9-я – 113,43 Гц, 10-я – 124,29 Гц, 11-я – 135,44 Гц, 12-я – 61,04 Гц. Характер полученных форм отражает динамическую работу путепровода. Так, формы с 7-ой по 11-ю схожи между собой и отражают работу стоек путепровода, а 12-я является формой изменения всей конструкции.

Следует отметить, что разработанная модель является наиболее информативной по своим результатам, так как она создана без учета симметрии системы путепроводов, то есть правая часть системы не заменялась условием симметрии по вертикальной оси. Применение этого приема моделирования, полностью корректного в решении задач в статической постановке, несколько некорректно для решения динамических задач, в том числе и модального анализа, так как все кососимметричные формы колебаний не могут быть определены, что несколько снижает надежность исследований. В разработанных моделях, которые являются элементами с малой размерностью (до 20 тысяч конечных элементов), возможно отражение общей системы без необходимости применения приема введения в модель симметрии по вертикальной оси, что дало возможность получения репрезентативной информации о колебаниях этих двух систем.

Выводы

Проведенный модальный анализ конструкций путепроводов мостового и тоннельного типов является первым этапом динамического анализа, так как выяснение форм и частот собственных колебаний считается первой задачей такого рода исследования, и может быть основой для динамического анализа конструкций путепроводов на поездную гармоническую нагрузку или спектр воздействий различного типа.

Литература

1. Справочник по механике и динамике грунтов / под ред. В.Б. Швеца. – К.: Будівельник, 1987. – 232 с.
2. Гольдштейн М.Н., Царьков А.А., Черкасов И.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. – М.: Транспорт, 1981. – 320 с.
3. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов: Учеб. пособие для строительных вузов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
4. Малышев М.В. Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений. – М.: Стройиздат, 1980. – 136 с.
5. Кудрявцев И.А. Применение метода конечных элементов для расчета конструкций на транспорте: Учеб. пособие. – Гомель, 1985. – 67 с.
6. Бакиров Р.О., Лой Ф.В. Динамический расчет и оптимальное проектирование подземных сооружений: Учеб. пособие для вузов. – М.: Стройиздат, 2002. – 464 с.