

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

УДК 624.07

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ДИАФРАГМ ЖЕСТКОСТИ ЗДАНИЙ ПРИ ВЗРЫВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

А. Хейдари, В.В. Галишникова

Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

В работе представлены результаты компьютерного моделирования поведения конструкции диафрагмы жесткости каркасного здания при действии динамических нагрузок от взрывной волны. Моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS. Приведено сравнительное исследование прочности типовых железобетонных диафрагм и композиционных диафрагм, усиленных пластинами из высоколегированной стали.

Ключевые слова: взрывные воздействия, конструкции зданий, железобетонные диафрагмы жесткости, композиционные диафрагмы, компьютерное моделирование.

В последние годы существенно возросла угроза террористических актов против мирного населения. Одним из распространенных видов атак террористов является взрыв начиненного взрывчатым веществом автомобиля в непосредственной близости от здания. Подобные действия ведут к человеческим жертвам как в результате самого взрыва, так и в результате последующего обрушения несущих конструкций здания.

В связи с этим со стороны инженеров-строителей усилилось внимание к обеспечению живучести (способности сопротивляться лавинообразному обрушению в результате выхода из строя одного или нескольких конструктивных элементов) зданий и сооружений. Одним из способов обеспечения живучести является разработка конструктивных мероприятий, позволяющих избежать мгновенного и полного обрушения несущих конструкций и обеспечить возможность людям покинуть поврежденное здание. К таким мероприятиям можно отнести, например, использование системы тросов, поддерживающих междуэтажные перекрытия; проектирование рам повышенной гибкости, эффективно воспринимающих взрывные волны, распространяющиеся как в воздухе, так и в грунте. Весьма эффективным считается использование композитных диафрагм жесткости — железобетонных диафрагм с внутренней обшивкой из стального листа.

Разрабатываемые новые конструктивные системы нуждаются в расчетном обосновании. Расчет конструкций на действие взрывных волн может производиться при помощи численных методов высокой точности с учетом действительных нелинейных характеристик материалов (деформационной модели), реализованных в виде программных комплексов; приближенных аналитических динамических методов; упрощенных методов расчета, основанных на применении эквивалентных статических нагрузок. Каждая из этих групп методов имеет свою область применения.

В настоящей работе выполнен расчет конструкции диафрагмы жесткости каркасного здания при помощи численных методов. Автором разработана компьютерная модель композитной диафрагмы жесткости в программном комплексе ANSYS и выполнено исследование прочности конструкции при воздействии взрыва.

Динамические нагрузки на здание от взрыва. В статье рассматриваются динамические воздействия, которые могут быть созданы взрывами конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) — твердых, порошкообразных, пластичных или жидких. Известны взрывы ВВ в виде тротила, гексогена, аммонитов и т.п. Мощность заряда ВВ обычно измеряется в килограммах тротилового эквивалента и вычисляется умножением массы заряда на коэффициент:

$$C_f = \text{Удельная энергия килограмма ВВ} / \text{Удельная энергия тротила.}$$

Нагрузки, вызванные взрывом ВВ, обладают следующими свойствами:

— эффектом случайности, так как заранее неизвестно, какая часть здания подвергнется наибольшему воздействию;

— кратковременным динамическим характером;

— мгновенным воздействием от одной сотой до одной целой секунды.

При взрыве конденсированных ВВ происходит быстрое выделение энергии в виде теплового излучения и взрывной волны, обладающей ударным фронтом. На ударном фронте происходит скачкообразное изменение давления, плотности и температуры. Ударная волна распространяется как по воздуху, так и по земле. Основные повреждения наносятся зданиям воздушными ударными волнами. Волны распространяются со скоростью, превышающей скорость звука. При набегании ударной волны на здание часть ее отражается от фронтальной стены, а часть проникает внутрь здания через проемы, при этом ударному воздействию подвергаются внутренние конструкции здания — перекрытия, перегородки и т.д. В дополнение в процессе обтекания здания взрывной волной происходит рефракция волн, вызывая повышение или понижение давления в этих областях. После установления процесса обтекания вся поверхность здания окружена избыточным давлением.

При моделировании воздействия взрывной ударной волны на здание использована следующая расчетная зависимость: давление P в некоторой фиксированной точке на местности в заданный момент времени прямо пропорционально весу ВВ в тротиловом эквиваленте W и обратно пропорционально кубу расстояния от центра взрыва R^3 . На рисунке 1 показаны кривые избыточного давления P_B в зависимости от расстояния от центра взрыва R .

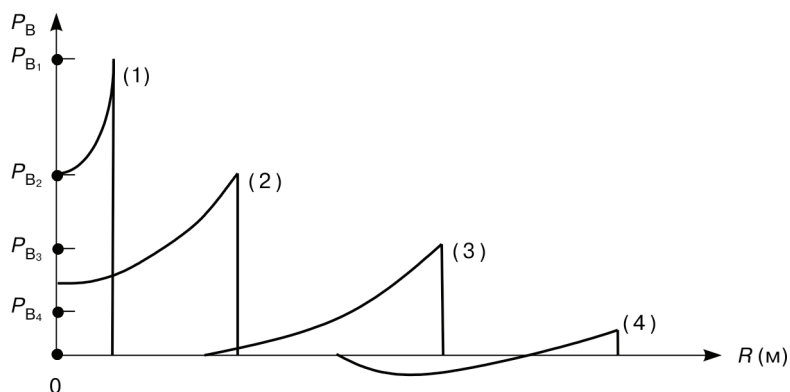


Рис. 1. Пики избыточного давления

На рисунке 2 показан график изменения давления в фиксированной точке на местности в зависимости от времени.

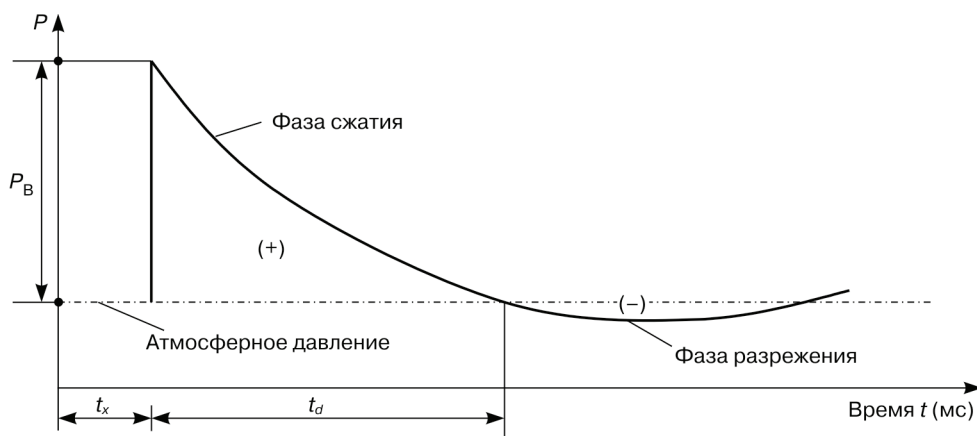


Рис. 2. Изменение давления во времени в фиксированной точке:

P_B — избыточное давление на фронте волны, t_x — время, за которое взрывная волна достигает преграды, t_d — продолжительность фазы сжатия

Моделирование воздействия взрывной волны выполнялось при помощи приведенных ниже уравнений и зависимостей.

Максимальное избыточное давление волны, действующее на фронтальную поверхность здания, обращенную к фронту волны, определялось из приближенной экспериментальной зависимости:

$$P_{SO} = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \left(\frac{W}{R^3} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где W — масса взрывчатого вещества, приведенная к тротиловому эквиваленту; R — расстояние между центром взрыва и преградой (стеной здания).

При встрече ударной волны с фронтальной стеной здания происходит ее отражение, вследствие чего стена подвергается действию динамической нагрузки от отраженной ударной волны. Распределение давления по высоте стены при-

нималось по упрощенной треугольной схеме. Максимальное значение давления на фронте отраженной волны вычислялось по следующему правилу:

$$P_R = \begin{cases} 2P_0 + \frac{6}{7P_0 + P_{SO}} & P_{SO} < 10 \text{ бар} \\ 41g^{P_{SO}} + 1,5 & P_{SO} \geq 10 \text{ бар} \end{cases} \quad (2)$$

Здесь P_0 — внешнее атмосферное давление, принимаемое равным 1 бар.

Время действия отраженной волны на преграду принималось равным времени действия падающей волны (продолжительности фазы сжатия):

$$t_d = \begin{cases} 10,23 \frac{\sqrt[3]{W}}{\sqrt{P_{SO}}} & P_{SO} < 70 \text{ бар} \\ 20,77 \frac{\sqrt[3]{W}}{\sqrt{P_{SO}}} & P_{SO} \geq 70 \text{ бар} \end{cases} \quad (3)$$

Конструкция композиционных диафрагм жесткости здания. Основной функцией конструктивных диафрагм жесткости зданий является восприятие горизонтальных нагрузок. До 1970-х гг. в основном применялись железобетонные диафрагмы жесткости. В 1970-х гг. началось постепенное внедрение в практику строительства стальных диафрагм жесткости, которые нашли применение в ответственных зданиях, возводимых в Японии, США и Канаде. В это же время появились композиционные диафрагмы жесткости, представляющие собой комбинацию железобетонных панелей и стальной листовой обшивки.

В композиционной диафрагме жесткости решающее значение имеет обеспечение совместной работы стальной пластины и железобетонной панели. Для вновь строящихся зданий проектируется конструкция диафрагмы, в которой стальная пластина соединяется с железобетонной панелью при помощи регулярно расположенных стальных стержней-коротышей, приваренных к стальной пластине и воспринимающих касательные (срезные) напряжения. При усилении существующих зданий стальная пластина крепится на панели диафрагмы при помощи стяжных болтов. Детали конструкции диафрагмы показаны на рис. 3. В железобетонной панели диафрагмы предусматривается минимальное армирование для восприятия напряжений усадки, ползучести и т.п. Толщина стальной пластины зависит характеристик железобетонной панели и расчетных нагрузок.

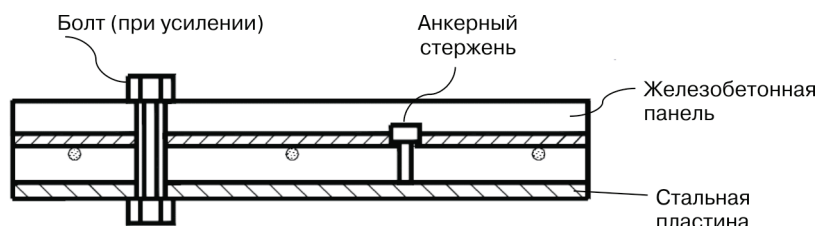


Рис. 3. Детали конструкции композиционной диафрагмы жесткости

Моделирование конструкции и исследование работы диафрагм жесткости здания в ПК ANSYS. В настоящем исследовании были выполнены моделирование и расчет диафрагм жесткости 6-этажного каркасного здания высотой 20,5 м при действии взрывной нагрузки. Были рассмотрены два вида диафрагм — обычные железобетонные диафрагмы без усиления стальной пластиной и усиленные диафрагмы с различной толщиной стальных пластин. Толщина железобетонной панели во всех случаях принималась равной 30 см, прочность бетона при сжатии — равной 30 МПа, расчетное сопротивление стали — 345 МПа. Центр взрыва принимался на расстоянии 10 м от здания.

При помощи ПК ANSYS был выполнен нелинейный динамический расчет конструкций диафрагм. Для моделирования использовался элемент SHELL91, допускающий использование до 16 различных слоев композиционного материала. SHELL91 — это восьмиузловой элемент с шестью степенями свободы в каждом узле. Закрепление стены в фундаменте принято жестким, для моделирования заземления использовался элемент LINK8. Результаты расчетов, выполненных для разных толщин стальных пластин и мощности заряда, приведены в табл. 1.

Нетрудно убедиться, что использование композиционной диафрагмы позволяет существенно снизить уровень сжимающих напряжений в бетоне.

Таблица 1

Расчетные значения напряжений в стальной пластине и бетоне диафрагмы

Толщина пластины, см	Мощность заряда, кг ТЭ	Давление фронта волны, МПа	Главные напряжения в стальной пластине, МПа	Главные сжимающие напряжения в бетоне, МПа
0	300	1	0	40
0	500	1,69	0	60
0,8	300	1	225	30
0,8	500	1,69	370	38
1,0	500	1,69	360	36
1,2	500	1,69	340	33
1,5	500	1,69	325	30
2	500	1,69	287	28
2	1 000	3	500	45

По результатам серий расчетов построены графики зависимости необходимой толщины стальной пластины от мощности заряда взрывного устройства для бетонов классов 25, 30 и 35 МПа (рис. 4).

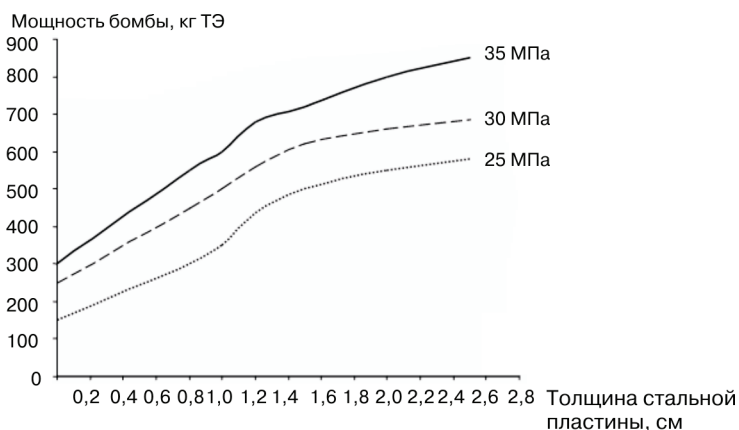


Рис. 4. Графики зависимости толщины стальной пластины от мощности заряда

Подобные графики, построенные для различных конструктивных типов диафрагм жесткости и сочетаний свойств материалов, могут быть полезными при выборе оптимального варианта конструкции.

Результаты расчета показали, что использование композиционных диафрагм жесткости позволяет существенно повысить сопротивляемость здания взрывным воздействиям.

С возрастанием толщины стальной пластины повышается прочность композиционной диафрагмы, однако после достижения значения 12—14 мм возрастание прочности замедляется. Поэтому можно заключить, что толщина стальной пластины 12—14 мм является оптимальной.

Целесообразно использование легированной стали с повышенным значением расчетного сопротивления, так как это дает возможность получить конструкцию с высокой прочностью при взрывных воздействиях при достаточно небольших толщинах стального листа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Bangash M.Y.H.* Prototype building structures: analysis and design. Thomas Telford, 1999.
 - [2] *Bangash M.Y.H.* Impact and explosion — structural analysis and design. Blackwell Science, 1993.
- ANSYS version 5.4 Registered for Mahab Ghods Company, Tehran, IRAN.

STRENGTH ANALYSIS OF COMPOSITE SHEAR WALLS UNDER EXPLOSION LOADINGS

A. Heidari, V.V. Galishnikova

Peoples' Friendship University of Russia
Ordshonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

The results of computer modeling of the behavior of shear walls of a building under the action of explosion loads are presented in this paper. The modeling was performed with the ANSYS software. Comparative analysis of two types of shear walls is carried out: ordinary reinforced concrete shear walls and composite shear walls with the external reinforcement of high-strength low-alloy steel plate.

Key words: explosion loading, structural strategies, aid cables, ordinary reinforced concrete shear wall, composite shear wall.