



УДК: 519.21;519.23;699.83

АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ВЕРОЯТНОСТИ

Размухамедов Даниярбек Джахангирович

PhD, РЭУ им.

Г.В.Плеханова

Ташкентский филиал

Арипов Саид-Азим Арипович

Институт гражданской защиты при МЧС

Оценка надежности композиционных материалов для сооружений в сейсмичных районах основана на теории предельных состояний. Эта теория различает предельные состояния по несущей способности (первая группа предельных состояний) и деформациям (вторая группа предельных состояний). Следует отметить важность и особенности метода оценки надежности с точки зрения нормативных требований.

На сегодняшний день, вероятность для анализа сейсмической опасности, является актуальной проблематикой и решение проблем связанных с данным направлением, подразумевает в себе также методы используемые в теории вероятности для решения задач аналитического типа. Следует отметить, что данное исследование посвящено вопросам, связанные с применением вероятностных концепций и обозначений. Данные средства вероятности позволяют производить вычисления без прерывания и выводить промежуточные результаты. Договоренности по номенклатуре позволяют удобно описывать поведение неопределенных величин. [1]

Первоначально, в расчетах применяется набор коэффициентов, который необходим из-за ограниченности и недостоверности исходных сейсмологических данных и другой информации о свойствах материалов, особенностях нагрузки и интенсивности низкочастотных сейсмических воздействий, уровне ответственности сооружения и условиях эксплуатации.

Эти значения коэффициентов определены с помощью данных из натуральных, экспериментальных и расчетных исследований стандартных объектов, соответствующих указанным выше данным и методам статистической обработки. Однако использование этой системы поправочных коэффициентов для уникальных объектов и сейсмических воздействий может привести к неадекватным результатам. [2]

Во-вторых, чаще всего нормативные методы оценки не предоставляют численной оценки надёжности, так как они дают качественное заключение о надёжности основания как конечный результат расчета. Поэтому невозможно



сравнить такие качественные оценки для различных вариантов конструкций оснований.

В-третьих, применение нормативной оценки надёжности характеризуется отсутствием системного подхода, то есть оценки надёжности всей системы сооружения конструкции.

Для определения магнитуды землетрясения, а также последствий связанных с разломами, следует отметить, что тектонические разломы способны вызывать землетрясения различной силы (т.е. магнитуды). Как показывает анализ литературы, авторы Гутенберг и Рихтер впервые изучили наблюдения за магнитудой землетрясений и отметили, что количество землетрясений в регионе, превышающих заданный размер, обычно следует определенному распределению.

$$\log_{10} \lambda_m = a - bm \quad [1.1]$$

где λ_m — частота землетрясений с магнитудой больше m , а a и b — константы. Это уравнение называется законом возврата Гутенберга-Рихтера.

Константы a и b в уравнении 1.1 определяются путем проведения статистического анализа прошлых наблюдений с дополнительными ограничивающими данными, полученными из других геологических данных. Значение a отражает общую частоту землетрясений в данном районе, в то время как значение b отражает соотношение маленьких и больших землетрясений.

Анализ литературы показал, что для предотвращения от разрушений следует применять современные подходы в материаловедении и проектных расчётах, а также технологию производства композиционных материалов, применяемых в строительстве. Хотелось бы отметить, что арамидные волокна используются с прошлого века и выпускаются различными производителями под разными торговыми марками, такими как Kevlar, Twaron, Technora. По химическому строению арамидные волокна сходны с нейлоном, а также по своему строению и по сравнению со стеклом обладают более высокими прочностью и модулем упругости. Они более пластичны при растягивающих нагрузках, но при сжатии остаются эластичными до разрушения. Арамидные волокна обладают хорошей износостойкостью и жесткостью, а также низкой электро- и теплопроводностью.

Углеродные волокна наиболее широко используются при создании композиционных материалов для ремонта и усиления строительных конструкций, использованию в зонах сейсмического воздействия и предотвращения от разрушения. Углеродные волокна изготавливаются из различных видов сырья, называемых прекурсорами. Механические свойства волокон во многом зависят от свойств прекурсора и условий карбонизации, т. е. от степени насыщения исходного материала углекислым газом, что является определяющим для физико-механических свойств получаемых углеродных



волокон. Железобетонные конструкции, изготовленные с использованием композиционных материалов на основе углеродных волокон, обладают исключительными физико-механическими характеристиками (высокая прочность на растяжение и сжатие и модуль упругости, близкий к стали), а также стойкостью к различным агрессивным средам. Однако аналогичные материалы на основе арамидных волокон обладают недостаточной прочностью на сжатие, а стеклопластики имеют относительно низкий модуль упругости [3,4].

Рассматривая технологию изготовления железобетонных пролетов, которые часто подвержены сейсмическому разрушению, были построены в конце XX-начале XXI века, когда математическое моделирование и вероятностные методы были на этапе развития. Анализ литературы показал, что современные требования к строительным конструкциям в зонах сейсмической активности, предъявляются высокие стандарты к несущей способности и надёжности.

Сегодня в целях повышения несущей способности и эксплуатационной пригодности, а также снижения эксплуатационных и транспортных расходов для усиления конструкций в основном применяют композиционные материалы на основе углеродного волокна, обладающие отличными физико-механическими характеристиками. Следует подчеркнуть, что для повышения сейсмостойкости бетонных конструкций широко применяется износостойкая ткань на основе стекловолокна. Кроме того, для защиты опор моста от транспортных повреждений при ударах используются ткани на основе кевларового волокна. Учитывая особенности климатических условий, зачастую плиты проезжей части мостов не имеют качественной гидроизоляции. В связи с этим вода, содержащая хлориды и другие агрессивные вещества, свободно проникает в структуру бетона, вызывая тем самым явление интенсивной коррозии стальной арматуры, что приводит к уменьшению ее сечения. В этом случае хлоридсодержащий бетон необходимо полностью удалить и заменить высококачественными ремонтными материалами [5].

Одним из существенных и актуальных вопросов, является поиск новых инновационных материалов и конструкций, предшествовавшие явлению замены природного камня железобетоном. Внедрение новых материалов и технических решений связано с поиском оптимальных характеристик и требований, которым они должны соответствовать, для увеличения срока их безаварийной работы. Для обеспечения надежной работы элементов конструкций транспортных сооружений необходимо по возможности учитывать все факторы, влияющие на поведение материалов и конструкций из них, а также принимать необходимые меры по уменьшению или устранению негативного влияния внешней агрессивной среды на конструкции. В подтверждение



сказанного хотелось бы отметить, что при больших объемах дефектов и изменении геометрических характеристик сечений сегодня широко применяется внешнее армирование композитными материалами на основе углеродного волокна. Преимуществами современных полимерных композиционных материалов являются их высокая прочность, малый вес, технологичность, невосприимчивость к агрессивным средам эксплуатации, долговечность.

Согласно анализу литературы, полимерные композиционные материалы имеют ряд своих особенностей, которые могут выступать как их недостатками, так и достоинствами в зависимости от поставленной задачи, в частности, низкая ударная вязкость, хрупкое разрушение, высокая удельная прочность, высокая деформативность. Учитывая технологию производства, следует отметить, что композиционные материалы – это материалы, состоящие из двух и более компонентов, при соблюдении ряда дополнительных условий, таких как:

во-первых, доля каждого компонента должна быть не ниже определенного значения, примерно 5-10%;

во-вторых, свойства составляющих компонентов должны существенно различаться и, как следствие, свойства самих композиционных материалов должны заметно отличаться от свойств исходных компонентов. В этом случае сплошная фаза называется связующим, а второй компонент называется наполнителем или армирующей фазой, роль которой заключается в изменении свойств вяжущего в направлении, необходимом для практических целей [6,7]

При усилении строительных конструкций, особенно при использовании композитных армирующих элементов без предварительного напряжения, наибольшее значение имеет модуль упругости композиционных материалов. Такие требования объясняются тем, что только жесткие внешние армирующие элементы могут снизить напряжения в существующей арматуре. наружная арматура из стеклянных или арамидных волокон должна быть значительно толще углеродных из-за их относительно низкого модуля упругости Таб.1 [8].

Таблица 1

Физико-механические характеристики различных видов волокон, используемых при производстве композиционных материалов

Тип фибры	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, ГПа	Деформация удлинения,%	Плотность т/м ³
Высокопрочный углерод ¹	4300-4900	230-240	1.9-2.1	1.8
Высокомодульный углерод ¹	2740-5500	290-330	0.7-1.9	1.78-1.81
Высокомодульный углерод ²	2600-4020	540-640	0.4-0.8	1.91-2.12
Арамид	3200-3600	124-130	2.4	1.44

Стекло	2400-3500	70-85	3.5-4.7	2.6
--------	-----------	-------	---------	-----

Примечание: ¹На полиакрилонитриловом связующем; ²На эпоксидном связующем.

Как показывает анализ литературы, уравнение 1.1 может также применяться для вычисления накопленной функции распределения землетрясений с магнитудой выше определенного минимума m_{\min} (это условие применяется, так как землетрясения ниже m_{\min} будут проигнорированы из-за их незначительности для инженерной подготовки).

$$F_M(m) = P(M \leq m | M > m_{\min}) = \frac{\text{магнитуда землетрясения в пределах } m_{\min} < M \leq m}{\text{магнитуда землетрясения в пределах } m_{\min} < M} =$$

$$\frac{\lambda_{\min} - \lambda_m}{\lambda_{\min}} = \frac{10^{a-bm_{\min}} - 10^{a-bm}}{10^{a-bm_{\min}}} = 1 - 10^{-b(m-m_{\min})}, m > m_{\min} \quad [1.2]$$

где $F_M(m)$ представляет собой накопленную функцию распределения для M . Чтобы получить плотность вероятности для M , можно найти производную.

$$f_M(m) = \frac{d}{dm} F_M(m) = \frac{d}{dm} [1 - 10^{-b(m-m_{\min})}] = b \ln(10) 10^{-b(m-m_{\min})}, m > m_{\min} \quad [1.3]$$

где $f_M(m)$ обозначает функцию плотности вероятности для M .

Необходимо учитывать, что функция вероятности плотности из уравнения 1.3 опирается на закон Гутенберга-Рихтера из уравнения 1.1, предсказывающего теоретически безграничные значения, хотя физические ограничения делают это нереалистичным.[9] В области обычно существуют ограничения на максимальную магнитуду землетрясений из-за размера разломов (магнитуда зависит от площади сейсмического разрыва). Также следует учитывать, что после преобразований уравнение 1.2 принимает максимальное значение в следующем виде.

$$F_M(m) = \frac{1 - 10^{-b(m-m_{\min})}}{1 - 10^{-b(m_{\max}-m_{\min})}}, m_{\min} < m < m_{\max} \quad [1.4]$$

Далее после преобразований, уравнение принимает следующий вид

$$f_M(m) = \frac{b \ln(2.10) 10^{-b(m-m_{\min})}}{1 - 10^{-b(m_{\max}-m_{\min})}}, m_{\min} < m < m_{\max} \quad [1.5]$$

Где m_{\max} представляет собой максимальный уровень землетрясения, которое может быть вызвано данной источником. Это закон рекуррентности Гутенберга-Рихтера ограниченного характера относится к ограниченному распределению размеров. Иллюстрация 1 показывает различные примеры землетрясений с разной силой, включая законы повторяемости Гутенберга-Рихтера и соответствующие им ограниченные законы повторяемости Гутенберга-Рихтера.

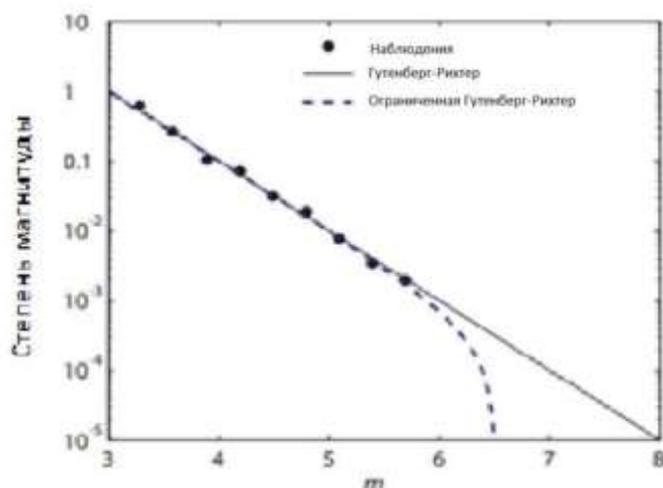


Рисунок 1. Типичное распределение наблюдаемых магнитуд землетрясений, а также законы повторяемости Гутенберга-Рихтера и ограниченные законы повторяемости Гутенберга-Рихтера, соответствующие наблюдениям.

Важно отметить, что мы преобразуем непрерывное распределение значений в дискретный набор значений для наших будущих уравнений. Давайте рассмотрим источник с минимальной магнитудой 5 и максимальной магнитудой 8, с параметром b равным 1. В таблице 2 представлены вероятности, которые необходимо принять во внимание для данного источника в данном случае. В первой строке перечислены 13 разных чисел от 5 до 8. Во второй колонке представлена накопленная функция распределения, которая была рассчитана по формуле 1.4. В третьем столбце представлены вероятности возникновения этого дискретного набора значений, предполагая, что они уникальны; они вычисляются таким образом.

$$P(M = m_j) = F_M(m_{j+1}) - F_M(m_j) \quad [1.6]$$

Где m_j - это набор дискретных значений, расположенных в порядке, где значение $m_j < m_{j+1}$. Этот расчет присваивает вероятности, связанные со всеми переменными между m_j и m_{j+1} и дискретным значением m_j . Пока дискретные величины находятся близко друг к другу, приближенные значения не оказывают влияния на числовые результаты. Интервалы магнитуд в Таблице 1 составляют 0,25 для наглядности, но для анализа PSHA можно использовать интервалы 0,1 или меньше, если это необходимо.

Как показывает анализ Таб.2, вероятность возникновения землетрясения с магнитудой от 5 до 8, при использовании сокращенного метода Гутенберга-Рихтера с коэффициентом b равным 1, составляет шансы. Данные в таблице были вычислены с применением формул 1.4 и 1.6.

Таблица 2

Шансы для магнитуды при источнике с усеченным распределением Гутенберга-Рихтера

m_j	$F_M(m_j)$	$P(M = m_j)$
-------	------------	--------------

5.00	0.0000	0.4381
5.25	0.4381	0.2464
5.50	0.6845	0.1385
5.75	0.8230	0.0779
6.00	0.9009	0.0438
6.25	0.9447	0.0246
6.50	0.9693	0.0139
6.75	0.9832	0.0078
7.00	0.9910	0.0044
7.25	0.9954	0.0024
7.50	0.9978	0.0014
7.75	0.9992	0.0008
8.00	1.0000	0.0000

Анализ показывает, что следующим этапом следует рассмотреть событие A и группу событий E_1, E_2, \dots, E_n , которые взаимоисключающие и исчерпывающие. Используя уравнения условной вероятности, изложенные выше, мы можем составить следующее.

$$P(AE_j) = P(E_j|A)P(A) = P(A|E_j)P(E_j) \quad [1.7]$$

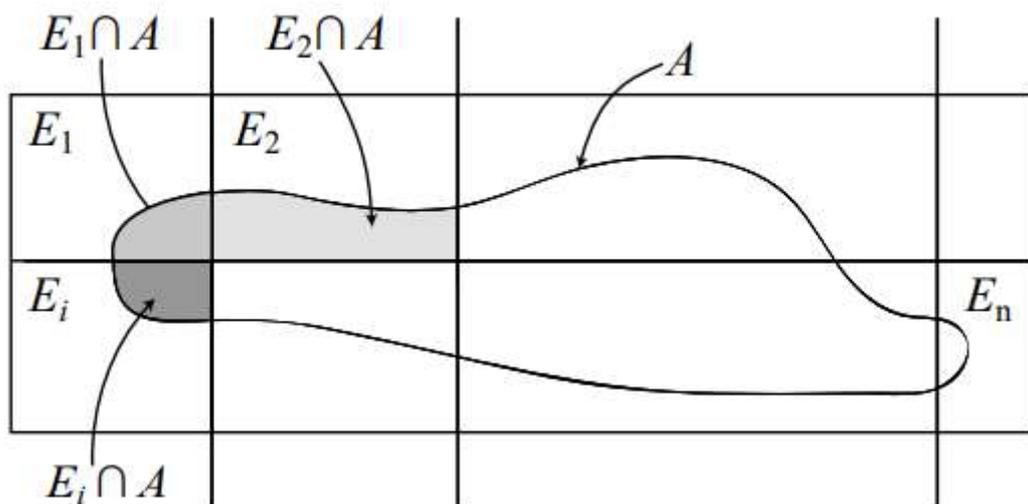


Рисунок 2. Схематическая иллюстрация теоремы о полной вероятности
Перестановка последних двух членов преобразуется в следующее

$$P(E_j|A) = \frac{P(A|E_j)P(E_j)}{P(A)} \quad [1.8]$$

$$P(E_j|A) = \frac{P(A|E_j)P(E_j)}{\sum_{i=1}^n P(A|E_i)P(i)} \quad [1.9]$$

Эти уравнения используются для вычисления условных вероятностей, когда известны лишь связанные с условиями вероятности, в обратном порядке к желаемому результату, для рассмотрения таких параметров как $P(A|B)$ имея только $P(B|A)$. Данный способ расчета применяется при проведении дезагрегации. Для пояснения работы этого уравнения еще раз рассмотрим пример, который используется для объяснения теоремы о полной вероятности.



Представим, что вы только что узнали о землетрясении, которое разрушило здание X. Вам нужно вычислить вероятность его силы, так как вы еще не знаете уровень мощности этого землетрясения.[10] Можно переформулировать уравнение иначе:

$$P(\text{мощность}|\text{разрушение}) = \frac{P(\text{разрушение}|\text{мощность})P(\text{мощность})}{P(\text{разрушение})} \quad [2.1]$$

Подставив число сверху, получаем

$$P(\text{мощность}|\text{разрушение}) = \frac{0.9(0.01)}{0.0379} = 0.24 \quad [2.2]$$

Сложно представить, насколько вероятно возникновение таких сильных землетрясений, так как они обычно сопровождаются обвалом, но их возникновение редко. Подобно теореме полной вероятности, правило Байеса предоставляет полезный способ объединения информации для вычисления вероятности, которая может быть сложна для определения напрямую. Следует отметить, что для описания нормальной случайной величины, упомянутой выше, всегда применяются среднее значение и стандартное отклонение как параметры в ее функция плотности вероятности.[11] Имея информацию о среднем значении и стандартном отклонении нормального распределения, можно определить его полную форму. В общем, это не признается случайным, но это одна из причин удобства работы с обычной случайной величиной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Альберт И.У. Численная оценка вероятности отказа системы «сооружение-сейсмоизолирующий фундамент – основание» при сейсмических воздействиях // Вестник гражданских инженеров. 2008.№1(14). С.17-24
2. Орлов А.И., Пугач О.В. Подходы к общей теории риска // Управление большими системами: сборник трудов, №. 40, 2012, стр. 49-82.
3. Овчинников И.Г., Валиев Ш.Н., Овчинников И.И., Зиновьев В.С. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: экспериментальные исследования особенностей усиления композитами изгибаемых железобетонных конструкций // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2012. – № 4. – С. 1– 22.
4. CNR-DT. 200/2004. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP. Systems for Strengthening Existing Structures. – Rome. – 2004. – 144 p
5. Белан Е.С., Смердов Д.Н., Яшнов А.Н. Составные конструкции железобетонных пролетных строений и методы их расчета // Современное состояние и инновации транспортного комплекса // Материалы Междунар. научн.-техн. конф. – Пермь. – 2009. – Т.2. – С. 49 – 56.
6. Бондаренко В. М. К вопросу о влиянии анизотропии и коррозионных повреждений на силовое сопротивление железобетона при знакопеременном нагружении // Academia. Архитектура и троеительство. 2011 № 1. С. 101–105.



7. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композиционными материалами // Известия Вузов. Стр-во. – 2010. – №2. – С. 112 – 124.
8. Мухамтзянова А.Р. К вопросу об исследовании долговечности железобетонных элементов. – 2017. – № 20 (154). – С. 48 – 52.
9. Столяров В.В., Щеголева Н.В., Кочетков А.В. Основные формулы теории риска при суммировании нормальных законов распределения // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №6 (2017)
10. Пулатова Л.Т., Арипов С.А., Размухамедов Д.Дж. Сеймоусиление бетонных конструкций композитными материалами и изучение их микроструктуры // Formation of psychology and pedagogy as interdisciplinary sciences, International scientific conference, Italy, ISBN 978-955-3605-86-4, p. 264, 2023.
11. Pulatova L.T., Aripov S.A., Razmukhamedov D.D. Assessment of basalt fiber concrete heat resistance indicators at fire and technical expertise // The Scientific Heritage journal №109 (109) 2023, Budapest, Hungary, ISSN 9215-0365