

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ МЕТОДОЛОГИИ НЕЛИНЕЙНОГО СТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ЕГО СОГЛАСОВАННОСТИ С БАЗОВОЙ НОРМАТИВНОЙ МЕТОДИКОЙ РАСЧЁТА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА ДЕЙСТВИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИЛ

А.В. Соснин

Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС (МИИТ)),
Смоленский филиал, г. Смоленск

В случае интеграции метода нелинейного статического анализа (далее – НСМ) в практику проектирования зданий и сооружений в сейсмических районах России, процедура его применения должна быть понятна инженерам. Рассматриваются основные допущения и преимущества методологии НСМ, а также его согласованность с линейно-спектральным методом расчёта (далее – ЛСМ). Приводятся примеры сооружений, расчёты которых выполнены по НСМ в том числе в комплексе SAP2000.

Ключевые слова: сейсмостойкие конструкции; диаграммный метод расчёта конструкций, схемы распределения сейсмических сил; метод проектирования сооружений с прогнозируемым уровнем повреждений их несущих конструкций.

Главная задача проектирования зданий и сооружений в сейсмических районах – предотвращение обрушения системы в целом при редком (сильном) землетрясении. Линейно-спектральный метод расчёта (далее – ЛСМ) не всегда гарантирует требуемый уровень сейсмостойкости зданий, иначе их обрушения не происходили бы. При решении проблемы с помощью положений, удовлетворяющих требованиям СП 14.13330.2014 [1], возникает ряд трудностей [2–4], к основным из которых относятся: чувствительность к алгоритмам конечно-элементного моделирования, резкая избирательность акселерограмм к отдельным собственным частотам объекта и отсутствие в нормах «прозрачной» методики.

Для повышения качества расчётной оценки сейсмостойкости многоэтажных зданий массовой застройки в качестве основного инструментария автор предлагает использовать методологию нелинейного статического расчёта [5, 6]. Полное наименование метода, указываемое в зарубежной нормативной документации и научных публикациях – *Nonlinear Static Analysis Procedure (Pushover Analysis)*. Необходимость обсуждения возможности практического использования НСМ спровоцирована своеобразным скептическим отношением некоторых отечественных практиков и учёных к процедурам в нём реализуемым, которые, кажутся им излишне упрощёнными и дискуссионными. При этом основной акцент делается на отсутствие ясного алгоритма расчёта. В статье выполнен обзор основных допущений предлагаемой методологии, которая, действительно, имеет ряд нюансов [7, 8].

В настоящее время НСМ применяется при проектировании сейсмостойких конструкций, зданий и сооружений в различных странах мира, в том числе Китае, Индии, США, Иране, Италии, Греции, Индо-

незии и др. Входящие в него расчётные процедуры интегрированы в такие комплексы, как, например, SAP2000, ETABS, Midas Gen, FESPA, SOFISTIK, SCADA PRO, INDYAS, DRAIN-2DX, SeismoStuct, ADAPTIC, RUAUMOKO 3D. В англоязычной терминологии полное наименование метода в некоторых его модификациях (например, [9]) часто сопровождается словом-префиксом “*simplified*”. Дословный перевод этого слова имеет первое общепринятое значение «упрощенный». Учитывая выполнение оценки сейсмостойкости сооружения с использованием результатов в формате ADRS [5, 6], автор работы считает, что перевод слова “*simplified*” необходимо рассматривать в семантической интерпретации «адаптированный» или «интуитивно понятный». А в контексте сравнения НСМ с процедурой расчёта в нелинейной динамической постановке, технически корректнее применять слово «*simplified*» в смысловом переводе «менее сложный». Такой транслейт-отенок хорошо согласуется с трактовкой, приведённой в Большом толковом словаре ([10, с. 1394]). Преимущества НСМ и большая достоверность результатов его применения в оценке сейсмостойкости (по сравнению с ЛСМ), – очевидны, и подтверждается резolutивной частью многочисленных зарубежных исследований. В случае внедрении НСМ в отечественную практику проектирования, расчётные положения метода должны быть понятны рядовым инженерам. В статье речь пойдёт о подоснове Pushover методологии – процедуре ‘А’ метода спектра несущей способности (англ. *Capacity Spectrum Method*) [11]. С базовыми терминами и определениями НСМ можно ознакомиться в работах [2–6].

Что же концептуально представляет собой рассматриваемый метод? НСМ – это диаграммный метод расчёта, применяя который инженер как бы сознательно допускает, что передача сейсмических

сил сооружению произойдет настолько медленно, что за учитываемое время между внутренними напряжениями в несущих конструкциях и действующими на систему квазистатическими силами обеспечится равновесие. Принимается, что вся приходящая на сооружение энергия землетрясения передается системе при одностороннем параметрическом изменении загрузки. Уравнение движения многомассовой системы в постановке рассматриваемого метода записывается в виде:

$$M \cdot \ddot{U} + R = -M \cdot I \cdot a_g, \quad (1)$$

где M – матрица масс; U – вектор перемещений; R – вектор внутренних сил; I – единичный вектор; a_g – ускорение грунта основания как функция времени.

Параметры диссипации в уравнении (1) отсутствуют, поскольку будут учитываться при построении расчетного спектра реакции $S_a(T)$. Вектор внутренних сил R эквивалентен вектору внешних сил P (вектору сдвигающей силы $V_{sh.b}$), который определяется из выражения

$$P = p \cdot M \cdot \Phi, \quad (2)$$

здесь p – параметр, контролирующий величину

горизонтальной реакции; Φ – вектор форм, не меняющийся в процессе колебаний системы.

Вектор перемещений определяется из выражения

$$U = \Phi \cdot u_t, \quad (3)$$

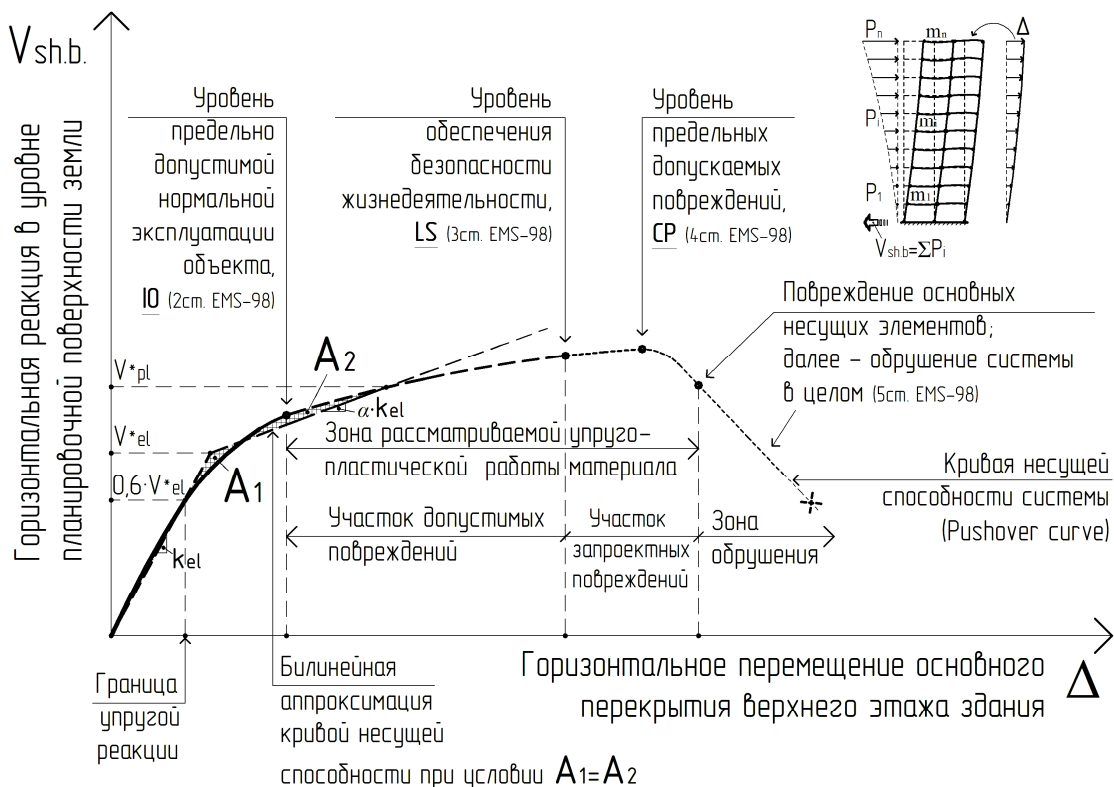
здесь u_t – перемещение верха системы.

При этом матрица-вектор форм Φ для упрощения расчетов нормализуется таким образом, чтобы компоненты в верхней части системы равнялись единице. Уравнение (1) тогда выглядит так:

$$\Phi^T \cdot M \cdot \Phi \cdot \ddot{u}_t + p \cdot \Phi^T \cdot M \cdot \Phi = -\Phi^T \cdot M \cdot I \cdot a_g. \quad (4)$$

Одним из результатов выполнения расчета по НСМ является кривая несущей способности (рис. 1).

Каждому конкретному особому сочетанию нагрузок будет соответствовать своя кривая равновесных состояний системы. Важнейшим нюансом метода является алгоритм конвертации этой кривой из формата «горизонтальная сейсмическая реакция (сдвигающая сила) в основании – перемещение верхней точки системы» в спектр несущей способности формата ADRS [2–6]. Вычисляются коэффициент преобразования (трансформации) PF_i и эффективная модальная масса μ_i (в до-



© Алексей Викторович Соснин, 2015 | Копирование графических материалов без разрешения автора и без размещения обратной ссылки запрещено.

Рис. 1. Графическая визуализация зависимости «горизонтальная сейсмическая реакция – перемещение верхней точки системы» с участками, характеризующими степень повреждения основных несущих конструкций

Примечания:

1. Точка пересечения кривой несущей способности с его билинейной аппроксимацией (в конце итерационного процесса определения оценочного перемещения) соответствует положению точки упруго-пластических свойств системы.
2. В правом верхнем углу изображена принципиальная схема нагружения системы (для примера выбран тип 1 схемы распределения сейсмических сил (табл. 1)).

Теория расчета строительных конструкций

лях единицы), соответствующая основной форме колебаний (коэффициент модальной массы α_1). Коэффициент α_1 определяется по формуле:

$$\alpha_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{w_i}{g} \cdot \varphi_{1,i} \right) \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^N \frac{w_i}{g} \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{w_i}{g} + \varphi_{1,i}^2 \right) \right]} \quad (5)$$

Коэффициент трансформации может принимать значение от 1,0 до 1,6; определяется он из следующего выражения:

$$PF_1 = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{w_i}{g} \cdot \varphi_{1,i} \right)}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{w_i}{g} \cdot \varphi_{1,i}^2 \right)} \quad (6)$$

здесь N – уровень верха (основного покрытия)

системы (здания); $\frac{w_i}{g}$ – масса i -й точки (этажа; яруса) системы (здания); $\varphi_{1,i}$ – амплитуда колебаний i -й точки (этажа; яруса) системы (здания) по первой основной форме колебаний.

Оба указанных коэффициента зависят от формы приложения сейсмических сил по высоте конструктивной системы (см. таблицу).

Принимается, что схема приложения сейсмических сил остаётся неизменной до окончания итерационного расчёта, соответствующего рассматриваемому направлению сейсмического воздействия.

Одним из основополагающих допущений NSP-процедур является преобразование системы со многими степенями свободы (MDOF), соответствующей параметрам рассматриваемой пространственной системы, в эквивалентный ей осциллятор

Значения коэффициента модальных масс и коэффициента трансформации в зависимости от принятой схемы распределения сейсмических сил

Тип схемы ¹	Условное наименование схемы	Выражение для определения сейсмических сил ²	Эффективная модальная масса ³ (α), в д.ед.	Коэффициент преобразования (PF)
1	2	3	4	5
1	По очертанию первой моды	$P_x = \left(\frac{w_x \cdot \Delta_x}{\sum w_i \cdot h_i} \right) \cdot V_{sh.b}$	0,7	1,6
2	Схема перевёрнутого треугольника ⁴	$P_x = \left(\frac{w_x \cdot h_x}{\sum w_i \cdot h_i} \right) \cdot V_{sh.b}$	0,8	1,4
3	мультимодальное распределение	по схеме 1	0,9	1,2
4	равномерно распределённая по ярусам	$P_x = \left(\frac{w_x}{\sum w_i} \right) \cdot V_{sh.b}$	1,0	1,0

Примечания:

1. Указанные схемы приложения сейсмических сил по высоте системы характеризуются:

тип 1 – низшей формой собственных колебаний простейшей консольной модели;

тип 2 – эквивалентным прямолинейным очертанием низшей формы колебаний двумерной модели простой рамной системы;

тип 3 – расчётным откликом системы, определённым суммированием вкладов всех учитываемых форм по любому из правил суммирования (SRSS, CQC, метод 10 %, DSC метод Розенблюэта, метод двойных сумм NRC, метод Лендли-Яу, метод Гупты, GMC);

тип 4 – первой формой собственных колебаний системы с первым «гибким» этажом.

2. В выражениях приведены следующие обозначения для определения сейсмических сил P_x , действующих в пределах рассматриваемого яруса системы:

w_x, w_i – вес яруса системы (индексом x обозначен ярус, на который действует вычисляемая сейсмическая сила);

Δ_x – горизонтальное перемещение системы в пределах яруса, на который действует вычисляемая сила P_x ;

h_i – высота яруса системы;

$V_{sh.b}$ – горизонтальная сейсмическая реакция системы в уровне основания.

3. Указаны рекомендуемые значения коэффициента модальной массы.

4. Для объектов исследования [5] с $T_1 \geq 1,0$ с и регулярным распределением масс и жесткостей в плане и по высоте допускается для типа 2 схемы минимальное значение α принимать равным 0,75.

5. Таблица адаптирована и дополнена автором работы с учётом положений [11].

с $\xi=5\%$ от критического (SDOF) [3]. Принимается, что при внешнем воздействии масса осциллятора M_{eq} отклоняется на расстояние $S_{d,eq}$, что соответствует перемещению покрытия сооружения на величину Δ (см. рис. 1). Применяя полученный в выражении (6) коэффициент трансформации, получаем

$$\Delta = PF_1 \cdot S_{d,eq}, \quad (7)$$

отсюда

$$S_{d,eq} = \frac{\Delta}{PF_1 \cdot \Phi_{1,roof}}. \quad (8)$$

Тогда уравнение движения (1) для эквивалентного одномассового осциллятора можно записать в виде:

$$M_{eq} \cdot S_{d,y,eq} + F_{eq} = -M_{eq} \cdot a_g. \quad (9)$$

Преобразование MDOF в SDOF обусловлено необходимостью обеспечения корректного наложения спектра несущей способности на спектр реакции (который, как известно, строится для SDOF).

Требуемый расчётный спектр реакции определяется только с учётом положения траектории поиска точки упруго-пластических свойств системы (англ. *performance (target) point*), независимо от кривой несущей способности. Преобразование кривой несущей способности в спектр выполняется в соответствии со следующими выражениями:

$$S_a = \frac{V_{sh.b.}}{w \cdot \alpha_1}; \quad (10)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \cdot \Phi_{1,roof}}, \quad (11)$$

здесь S_a – спектральное ускорение; S_d – спектральное перемещение; $V_{sh.b.}$ – горизонтальная сейсмическая реакция в уровне низа (средней пла-

нировочной поверхности земли) системы (здания); w – расчётный сейсмический вес системы (здания); Δ_{roof} – перемещение верха (основного покрытия) системы (здания).

Построение спектра реакции $S_d(T)$ в формате ADRS производится так:

$$S_d = S_a(T) \cdot \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} = \frac{S_a(T)}{\omega(T)^2}, \quad (12)$$

здесь $\omega(T)$ – круговая частота колебаний; T – период собственных колебаний линейно-упругой системы.

В качестве оценочного критерия сейсмостойкости, среди прочих, рассматривается положение точки свойств [2, 5, 6]. Определив величину оценочного перемещения $d_{arg,disp}$, можно проанализировать наступление предельного состояния по критерию необрушения. В графическом виде способ получения значения этого перемещения представлен на рис. 2.

Итерационный расчёт проводится до выполнения условия сходимости:

$$If \frac{(S_{d,j} - S_{d,i})}{S_{d,j}} \leq 0,05. \quad (13)$$

После определения конечного значения S_d , соответствующего расположению точки свойств, важно не забывать преобразовать его в формат MDOF (рис. 2, этап 5):

$$d_{arg,disp} = PF_1 \cdot \Phi_{1,i} \cdot S_d. \quad (14)$$

После прохождения всех вышеуказанных этапов расчёта можно получить информацию о коэффициентах податливости системы μ_R и о коэффициентах редукции R к упругому спектру реакции (как в [5]).

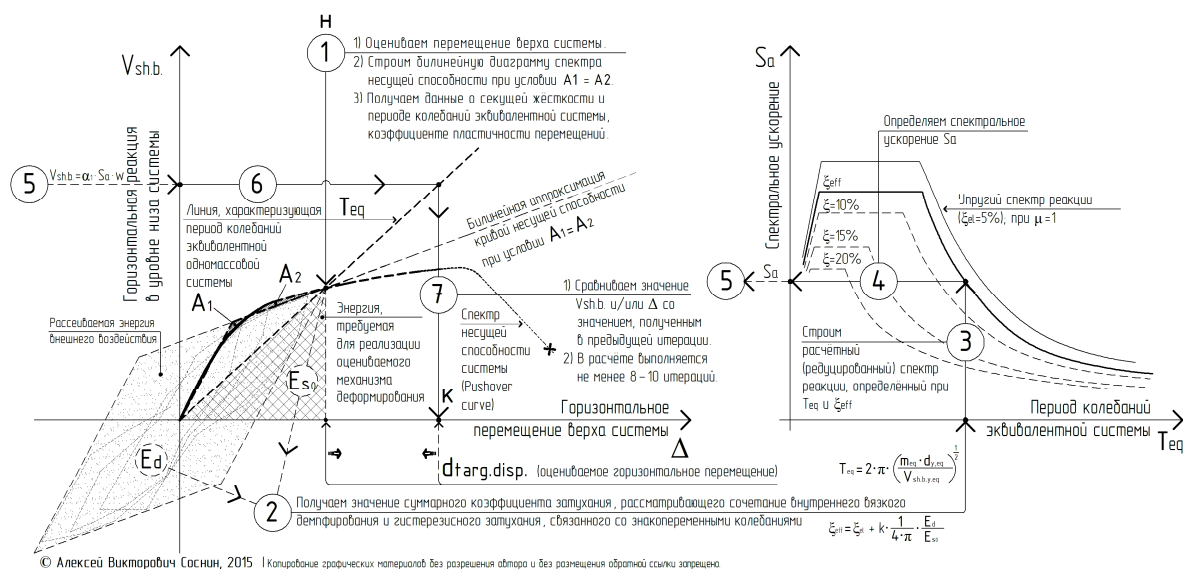


Рис. 2. Графическая визуализация пошагового алгоритма применяемой расчётной процедуры метода нелинейного статического анализа

Теория расчета строительных конструкций

Характерной чертой NSP-процедур является возможность учёта понятия энергоёмкости. В методе CSM потенциальная энергия деформирования (фактически равная площади фигуры, расположенной под спектром несущей способности) определяется упрощённо: значение E_{s0} находится из площади прямоугольного треугольника (см. рис. 2 [6]):

$$E_{s0} = 0,5 \cdot (a_{pl} \cdot d_{pl}). \quad (15)$$

В той же работе [6] приведена обобщённая графическая интерпретация алгоритма, применяемого для оценки энергий в указанной расчётной процедуре, и положения по определению поправочного коэффициента κ [4, с. 82] для затухания, характеризующего работу системы в упруго-пластической стадии.

Автор согласен, что изложенная методология не свободна от недостатков и допущений. При том, что НСМ присущи почти все допущения теории предельного равновесия А.А. Гвоздева [12], а качество оценки сейсмостойкости объекта напрямую зависит от грамотности и инженерной интуиции расчётчика, недостатки метода перекрываются

его главным преимуществом – возможностью анализа реакции системы в момент приближения её к предельному состоянию при действии сейсмических сил [2–6]. Расчётные процедуры НСМ позволяют упразднить сразу несколько частных коэффициентов, характерных ЛСМ в редакции свода правил СП 14.13330.2014 [1]: коэффициент K_1 учитывается непосредственной упруго-пластической работой конструкций; а значения A , β_i и K_{ψ} рассматриваются при построении спектра реакции $S_d(T)$.

Метод нелинейного статического анализа применяется для оценки сейсмостойкости многоэтажных зданий, стальных пространственных конструкций, стадионов, мостов, и даже таких сооружений, как подземные станции метро и даже дамбы. В качестве частного примера можно привести известный национальный стадион Beijing National Stadium (рис. 3), построенный в Пекине для проведения летних Олимпийских игр 2008 года, расчёты которого также выполнялись и в комплексе SAP2000.

Сейчас, в период разработки национальных приложений к Еврокодам, важно накопить отечественный практический опыт использования НСМ

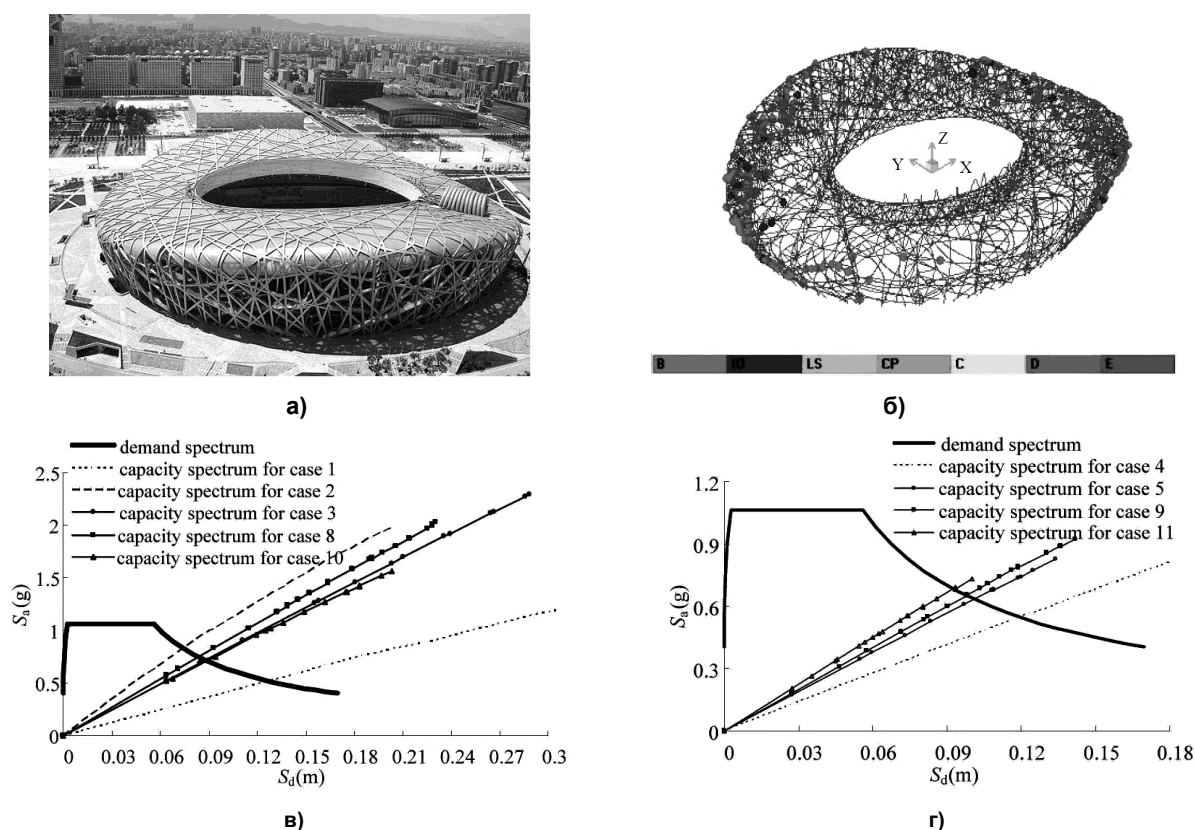


Рис. 3. Национальный Олимпийский стадион в Пекине (Beijing National Stadium, также известный как «Птичье гнездо» / Bird Nest) [13]: а – общий вид сооружения; б – расчётная модель стадиона; в – спектры несущей способности системы при направлении сейсмических нагрузок вдоль оси X; г – спектры несущей способности системы при направлении сейсмических сил вдоль оси Y

Примечания:

1. На рис. 3, б кружочками обозначены места реализации пластических шарниров.
2. На рис. 3, в, г спектры представлены в формате ADRS.
3. Для лучшего понимания графических материалов автор предлагает ознакомиться с работами [9–13].

в расчётах зданий и сооружений и провести широкое обсуждение проблем, связанных с его применением на фоне нормативных и обозримых альтернативных методик расчёта. Эффективным способом для реализации дискуссий могут стать доклады на интеллектуальных площадках крупных строительных вузов.

В заключение (в качестве экспертного мнения) автор предлагает рассмотреть пояснения профессора Эдварда Вильсона (E.L. Wilson; Калифорнийский университет, Беркли, США), данные им в эссе [14]. Профессор Э. Вильсон отмечает, что его практический опыт в оценках сейсмостойкости сооружений прямым динамическим методом и методом Pushover показал различные результаты, но вероятность ошибки в оценке отклика той же системы спектральным методом будет значительно больше.

Выводы

1. Методология НСМ за счёт управления процессом образования в системе пластических шарниров позволяет (в отличие от ЛСМ) обеспечить соблюдение положений пунктов 3.1.2 и 3.1.3 ГОСТ Р 54257–2010 [15].

2. Анализ зарубежного практического опыта выполнения расчётов сейсмостойких сооружений показывает, что НСМ – интуитивно понятный метод расчёта, содержащий процедуры, характеризующие принятый в нём подход, как проектирование сейсмостойких зданий и сооружений с прогнозируемым уровнем повреждений их несущих конструкций (англ. *Performance-Based Plastic Design Approach*). НСМ позволяет снять ряд вопросов [6], неизбежно возникающих в процессе оценки фактической сейсмостойкости существующей застройки по ЛСМ (в редакции СП [1]).

3. Автор статьи считает, что анонсированный М.А. Био и получивший развитие в работах Дж. Хаузнера, Р. Мартеля, Дж. Альфорда, Р. Клафа, И.Л. Корчинского и их последователей спектральный метод, важен, и не следует допускать и мысли о том, что он не был нужен или стал сейчас не востребован. На современном этапе развития теории сейсмостойкости необходимо точнее определить его область применения, – например, использовать ЛСМ только для расчёта несложных систем, работающих в упругой стадии деформирования, а также при слабо нелинейном характере работы конструкций, который наблюдается при частых землетрясениях.

Благодарность автора

Автор выражает искреннюю благодарность доктору технических наук, профессору кафедры «Сопроотивление материалов» Московского государственного строительного университета (МГСУ) Джинчвелашвили Гураму Автандиловичу за дружескую поддержку и наставления.

Литература

1. СП 14.13330.2014. СНиП II-7-81* *Строительство в сейсмических районах* / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, ОАО «НИЦ «Строительство» – М.: ОАО «ЦПП», 2014. – 126 с.
2. *Применение нелинейного статического (Pushover) метода для оценки поведения конструкций при сейсмическом воздействии* / К.Т. Чхиквадзе, Ц.Г. Цискрели, Н.Ш. Члаидзе, Л.Д. Каджая // *Строительная механика и расчёт сооружений*. – 2010. – № 2. – С. 48–52.
3. *Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости (с учётом рекомендаций Еврокода 8, международных стандартов и требований ДБН)* / Ю.И. Немчинов, Н.Г. Марьенков, А.К. Хавкин, К.Н. Бабик. – Киев: ГП ГНИИСК, 2012. – 53 с.
4. *Мкртычев, О.В. Проблемы учёта нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения)* / О.В. Мкртычев, Г.А. Джинчвелашвили. – М.: МГСУ, 2012. – 192 с.
5. *Соснин, А.В. Расчётная оценка сейсмостойкости многоэтажного железобетонного рамно-связевого каркаса по критерию необрушения методом спектра несущей способности (в среде SAP2000)* / А.В. Соснин // *Сб. матер. VI Междунар. молодёж. науч.-практ. конф., 16 окт. 2015 г.* – Новосибирск: НГТУ, 2015. – С. 76–89.
6. *Соснин, А.В. Особенности оценки дефицита сейсмостойкости железобетонных каркасных зданий методом нелинейного статического анализа в SAP2000* / А.В. Соснин // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. – 2015. – № 6(14). – URL: trts.esrae.ru/25-137.
7. *Krawinkler, H. Pushover Analysis: Why, How, When, and When Not to Use It* / H. Krawinkler // *Proceedings 1996 Convention, Structural Engineers Association of California, October 1–6, 1996, Maui, Hawaii*. – P. 17–36.
8. *Krawinkler, H. Pros and Cons of a Pushover Analysis of Seismic Performance Evaluation* / H. Krawinkler, G.D.P.K. Seneviranta // *Engineering Structures*. – 1998. – Vol. 20. – Nos. 4–6. – P. 452–464.
9. *Kilar, V. Simplified Push-Over Analysis of Building Structures* / V. Kilar, P. Fajfar // *11th World Conference of Earthquake Engineering*. – 1996. – Paper No. 11. – 8 p.
10. *Большой толковый словарь русского языка* / Гл. ред. С.А. Кузнецов. – СПб.: Норинт, 2003. – 1536 с.
11. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Vol. 1: ATC-40 Report*. – Applied Technology Council. – Redwood City, California, 1996. – 334 p.
12. *Гвоздев, А.А. Расчёт несущей способности конструкций по методу предельного равновесия. Сущность метода и его обоснование* / А.А. Гвоздев. – М.: Стройиздат, 1949.

13. Qian, J.R. *Application of Pushover Analysis on Earthquake Response Predication of Complex Large-Span Steel Structures* / J.R. Qian, W.J. Zhang,

14. X.D. Ji // *The 14-th World Conference on Earthquake Engineering, October 12–17, Beijing, China, 2008.* – 8 p.

15. Wilson, E.L. *Static Pushover Method*

for the Seismic Analysis of Structures / E.L. Wilson, 2014. – 2 p. – <http://www.edwilson.org/History/Pushover.pdf>

16. ГОСТ Р 54257-2010. *Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования.* – М.: Стандартинформ, 2011. – 14 с.

Соснин Алексей Викторович, старший преподаватель кафедры «Здания и сооружения на транспорте», Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС (МИИТ)), Смоленский филиал, syabryauskas@mail.ru.

Поступила в редакцию 22 декабря 2015 г.

DOI: 10.14529/build160102

ON PECULIARITIES OF THE NONLINEAR STATIC ANALYSIS AND ITS COORDINATION WITH THE STANDARD CALCULATION PROCEDURE (CSM) OF BUILDINGS AND STRUCTURES UNDER SEISMIC LOADS

A.V. Sosnin, syabryauskas@mail.ru

Moscow State University of Railway Engineering, Smolensk Branch, Smolensk, Russian Federation

The nonlinear static analysis should be clear for engineers in case of its integration into building design in seismic regions of Russia. Basic assumptions and advantages of the analysis, as well as its coordination with the linear spectral calculation method are considered by the author. The examples of structures calculated according to NSA, in particular in SAP2000 software are given.

Keywords: earthquake-resistant structures; diagram method of calculation; patterns of seismic force distribution; performance-based plastic design (PBD) method.

References

1. SP 14.13330.2014. SNiP II-7-81*. *Stroitel'stvo v seismicheskikh rayonakh* [Seismic Building Design Code]. Moscow, 2014. 126 p. (in Russ.).
2. Chkhikvadze K.T., Tsiskreli Ts.G., Chlaidze N.Sh., Kadzhaya L.D. [The application of nonlinear static (Pushover) methods for estimating the behavior of structures under seismic excitation]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural Mechanics and Analysis of Construction], 2010, no. 2, pp. 48–52. (in Russ.).
3. Nemchinov Yu.I., Mar'enkov N.G., Khavkin A.K., Babik K.N. *Proektirovanie zdaniy s zadannym urovnem obespecheniya seysmostoykosti (s uchetom rekomendatsiy Evrokoda 8, mezhdunarodnykh standartov i trebovaniy DBN)* [The design of buildings with a given level of assurance of seismic resistance]. Kiev, 2012. 53 p.
4. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A. *Problemy ucheta nelineynostey v teorii seysmostoykosti (gipotezy i zabluzhdeniya)* [Problems of accounting of nonlinearities in the theory of seismic stability (hypothesis and error)]. Moscow, 2012. 192 p.
5. Sosnin A.V. [Computational assessment of seismic resistance of reinforced concrete framed multi-storey braced frame according to the criterion of neobucheniya spectrum method bearing capacity of environment (in SAP 2000)]. *Sb. mater. VI Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 16 oktyabrya 2015.* [The VI International Youth Scientific Conference, October 16, 2015]. Novosibirsk, 2015, pp. 76–89. (in Russ.).
6. Sosnin A.V. [The features of evaluation of deficit of seismic resistance of reinforced concrete frame buildings by the method of nonlinear static analysis in SAP2000]. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve* [Technical Regulation in Transport Construction], 2015. no. 6(14). (in Russ.).
7. Krawinkler H. Pushover Analysis: Why, How, When, and When Not to Use It. *Prosessings 1996 Convention, Structural Engineers Association of California*. Maui, Hawaii, October 1-6, 1996, pp. 17–36.
8. Krawinkler H., Seneviranta G.D.P.K. Pros and Cons of a Pushover Analysis of Seismic Performance Evaluation. *Engineering Structures*, 1998, vol. 20, no. 4–6, pp. 452–464. DOI:10.1016/S0141-0296(97)00092-8.

9. Kilar V., Rilar V., Fajfar P. Simplified Push-Over Analysis of Building Structures. *11-th World Conference of Earthquake Engineering*, 1996, no. 11. 8 p.
10. Kuznetsov S.A. *Bol'shoy tolkovyy slovar' russkogo yazyka* [The big explanatory dictionary of Russian language]. St. Petersburg, Norint Publ., 2003. 1536 p.
11. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Volume 1: ATC-40 Report. *Applied Technology Council*. California, Redwood City, 1996. 334 p.
12. Gvozdev A.A. *Raschet nesushchey sposobnosti konstruksiy po metodu predel'nogo ravnovesiya. Sushchnost' metoda i ego obosnovanie* [Calculation of bearing capacity of structures by the method of limit equilibrium. The essence of the method and its justification]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1949.
13. Qian J.R., Zhang W.J., Ji X.D. Application Of Pushover Analysis On Earthquake Response Predication Of Complex Large-Span Steel Structures. *The 14-th World Conference on Earthquake Engineering*. China, Beijing, October 12–17, 2008. 8 p.
14. X.D. Ji. *The 14-th World Conference on Earthquake Engineering, October 12–17*, Beijing, China, 2008. 8 p.
15. Wilson E.L. Static Pushover Method for the Seismic Analysis of Structures, 2014. 2 p. Available at: <http://www.edwilson.org/History/Pushover.pdf>.
16. GOST R 54257-2010. *Nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy i osnovaniy. Osnovnye polozheniya i trebovaniya* [The reliability of building structures and grounds. The basic provisions and requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 14 p.

Received 22 December 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Соснин, А.В. Об особенностях методологии нелинейного статического анализа и его согласованности с базовой нормативной методикой расчёта зданий и сооружений на действие сейсмических сил / А.В. Соснин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 12–19. DOI: 10.14529/build160102

FOR CITATION

Sosnin A.V. On Peculiarities of the Nonlinear Static Analysis and its Coordination with the Standard Calculation Procedure (CSM) of Buildings and Structures under Seismic Loads. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2016, vol. 16, no. 1, pp. 12–19. (in Russ.). DOI: 10.14529/build160102
