

SEISMO

FORUM
EURASIAN

VI Евразийский форум по
сейсмической безопасности
сооружений и городов



Научно-практическая конференция
с международным участием

'АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОЛОГИИ, БЕЗОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ И ЗДАНИЙ, ЭКСПЕРТИЗА И ОЦЕНКА РИСКОВ'

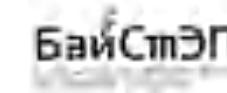
Памяти Ю.А. Бержинского

05 – 07 декабря 2023 года

Инновационная система пассивной пространственной (3D)
сейсмоизоляции СИС КСП с возможностью компенсации
просадок грунта на вечномерзлых и слабых почвах

Костарев Виктор Владимирович, канд.техн.наук, ст.научн. сотрудник,
президент фирмы «ЦКТИ-Вибросейм», Санкт-Петербург

www.cvs.spb.su



Проблемы СП 14.13330 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах»

Действующий СП 14.13330.2018 (СП) является анахронизмом в современной практике проектирования и строительства сейсмостойких сооружений и не соответствует не только лучшим мировым образцам, но и современным стандартам стран СНГ и ближнего зарубежья. Недостатки СП простираются от его структуры до технической сути его разделов, содержащих существенные ошибки, которые могут привести к серьезным ошибочным проектным решениям и коллапсу сооружений при событии проектного землетрясения. Массовых катастрофических последствий применения СП 14 удается пока избежать только благодаря естественному запасу прочности сооружений, ограниченности зон интенсивной сейсмичности в РФ и отсутствию событий с пиковыми ускорениями грунта более 0.2g в районах массового строительства. Наиболее серьезные проблемы СП14 связаны с:

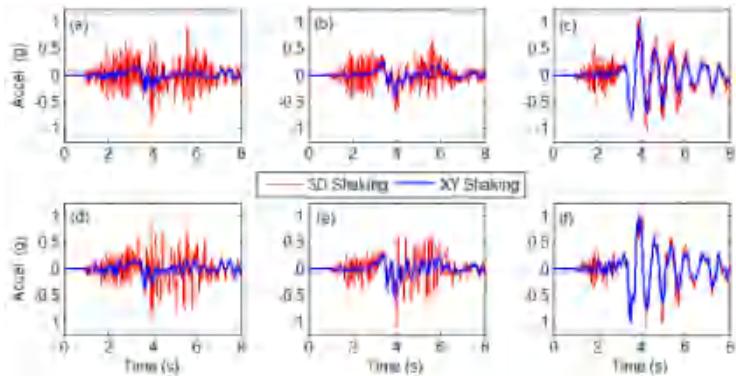
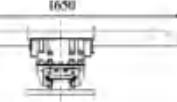
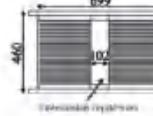
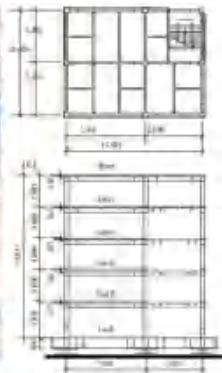
- Определением исходного проектного сейсмического воздействия. Отсутствием связи между проектными решениями, сейсмическим риском, метрики возможного ущерба людскими и материальными потерями, в частности, стоимости человеческой жизни и возможным страховым возмещением.
- Учетом грунтовых условий. Рекомендуемыми спектрами динаминости (спектрами реакции).
- Отказом от метрики интенсивности землетрясения, выраженной в ускорениях.
- Пренебрежением вертикальной составляющей сейсмического воздействия.
- Применением комбинации необоснованных эмпирических коэффициентов K_0 , K_1 и K_ψ , определяющих сейсмическую нагрузку.
- Грубыми ошибками в определении сейсмических перемещений (до 16 раз!).
- Неучетом «пи-дельта» эффекта, который является одним из основных причин разрушения зданий при землетрясениях, особенно с гибкими этажами.

Таким образом, СП14.13330.2018 обладает существенными недостатками и требует коренной переработки.

Поведение сейсмоизолированных зданий при Tohoku 2011 Great East Japan Earthquake. Низкая эффективность известных сейсмоизолирующих устройств (СИС). Увеличение сейсмической реакции по вертикали до 2.5 раз! (M.Iiba, T. Saito, 2013-2015)

	Site	Usage	Structure Type	Floor	Δ (km)	Main isolator and damper	Location of Sensors	ACC. (cm/s ²)			Disp. of SI (cm)
								X	Y	Z	
KA	Sendai	Office	SRC	B2F 9F	172	HRB	under SI above SI top floor	289 121 142	251 144 170	235 374 524	15.7
KB	Fukushima	Office	RC	2F	178	NRB, LRB, OD	under SI above SI top floor	582 176 155	758 213 185	446 516 621	24.6
KC	Fukushima	Office	RC	3F	184	Unknown	under SI above SI top floor	411 184 154	334 226 157	324 463 581	5.8
KD	Tsukuba	Office	PcaPc	7F	334	NRB, LRB, SD	under SI above SI top floor	327 92 126	233 76 91	122 198 243	6.8
KE	Tokyo	Musium	RC	B1F 3F	382	HRB	under SI above SI top floor	100 76 100	79 89 77	84 87 90	4.2
KF	Tokyo	Office	RC	B2F 12F	386	NRB, LRB	under SI above SI top floor	104 55 94	91 41 82	58 62 104	5.1
KG	Kawasaki	Residence	PcaPc	6F	401	NRB, LRB	under SI above SI top floor	86 58 63	104 65 68	34 49 55	5.22
KH	Odawara	Office	RC	6F	457	NRB, LRB	under SI above SI top floor	136 58 63	120 134 67	47 47 48	25.2

Натурные испытания зданий с СИС на самой мощной в мире сейсмоплатформе E-Defence, Japan.
Подтверждение низкой эффективности LRB и TPB. При добавлении вертикальной компоненты 3D сейсмического воздействия здания с СИС не имели преимуществ перед жестко опретым вариантом.
Наблюдались сходные повреждения не структурных элементов и оборудования (K. Ryan, S.Furukawa, 2012)



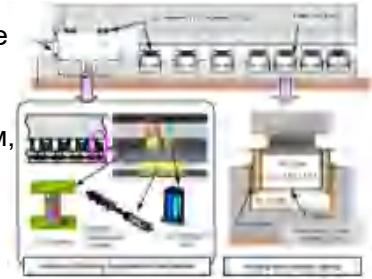
Реакция жестко опретого и изолированного зданий при 2D и 3D воздействии (слева).

Повреждения в изолированном здании (справа).

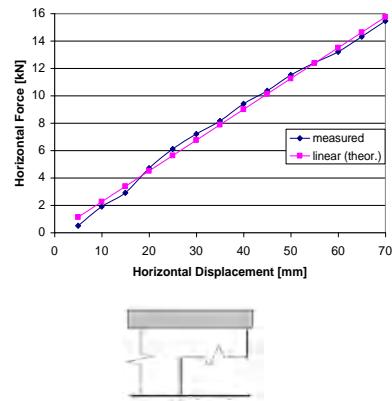
Разработка эффективной пассивной пространственной 3D СИС является насущной задачей современного сейсмостойкого строительства. СИС КСП (BCS) – практическое решение проблемы

Система **3D СИС КСП - BCS** (Контроль сейсмических перемещений, Base Control System) эффективное решение проблемы пространственной сейсмоизоляции. Является совместной разработкой фирм ЦВС (Вибросейсм), Санкт-Петербург и GERB, GmbH, Berlin. СИС КСП состоит из параллельно установленных 3D блоков витых пружин и 3D высоковязких демпферов. СИС КСП обеспечивает требуемую жесткость (частоты) СИС раздельно в горизонтальном и вертикальном направлениях с контролируемым демпфированием, повышающим эффективность СИС и сокращающем относительные смещения СИС, что очень важно для распределительных систем (*umbilical displacements*) изолированного здания . СИС КСП позволяет также обеспечивать равномерную загрузку элементов СИС, компенсировать просадки зданий на слабых грунтах и на грунтах в районах вечной мерзлоты и поддерживать вертикальную позицию сооружения. В настоящее время обеспечена полное импортозамещение.

Предыдущие мало успешные попытки созданий 3D СИС. Сложность конструкции, применение активных систем, низкая надёжность. В ряде случаев необходимость обеспечения внешней энергией (AC/DC).



Эффективность СИС КСП (BCS). Натурные испытания элементов СИС КСП с построением линейных и нелинейных моделей для расчета сооружений с СИС КСП

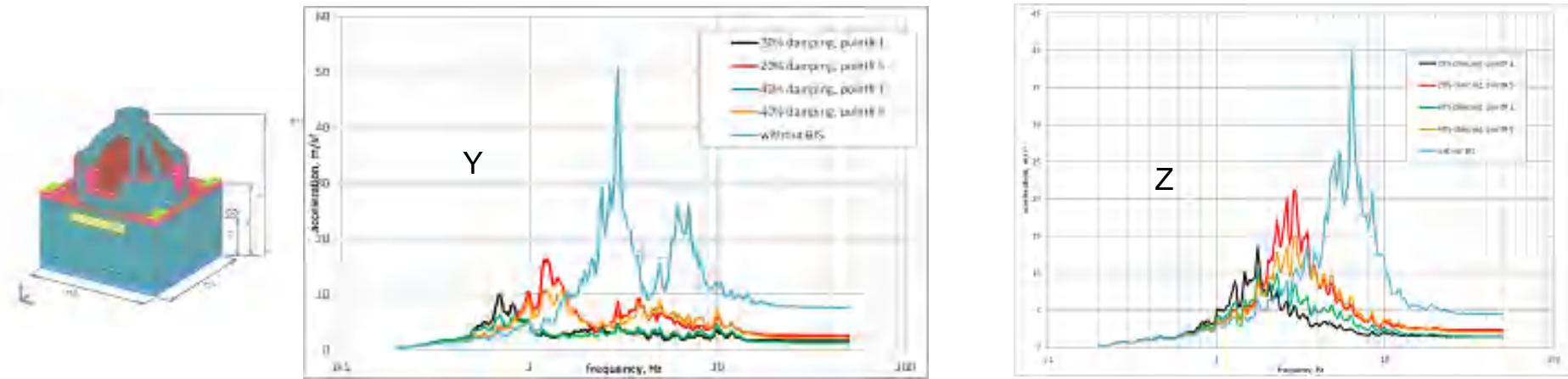


Натурные испытания витой пружины на максимальные горизонтальные и вертикальные смещения. Определение характеристик пружинного блока и построение расчетной модели анализа сооружений с СИС КСП. Пружинный блок работает линейно в большом диапазоне перемещений.



Натурные испытания пространственного 3D высоковязкого демпфера типа ВД по ТУ ЦВС на стенде фирмы GERB, Berlin и построение расчётовкой модели для анализа сооружений с СИС КСП.

Расчетные исследования эффективности СИС КСП для ответственных сооружений с использованием верифицированных расчетных моделей на базе натурных испытаний

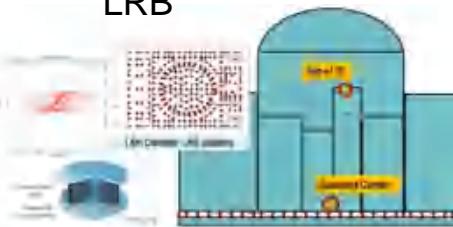


Результаты аналитического исследования ЦВС эффективности СИС КСП для здания реактора ВВЭР-1200 массой около 900 тыс. тонн. Сравнение варианта жесткого опирания здания и с применением СИС КСП.

Эффективность СИС КСП в горизонтальном направлении (Y) в вертикальном направлении (Z) в зависимости от уровня демпфирования в системе. Высокая эффективность СИС КСП во всех направлениях сейсмического воздействия, что недостижимо для всех известных СИС.

Результаты независимого сравнительного аналитического исследования (Dan Chiosel, USA, SMiRT 2017) эффективности СИС BCS, LRB и жесткого опирания здания реактора PWR с учетом волнового движения грунта SSI ACS SASSI

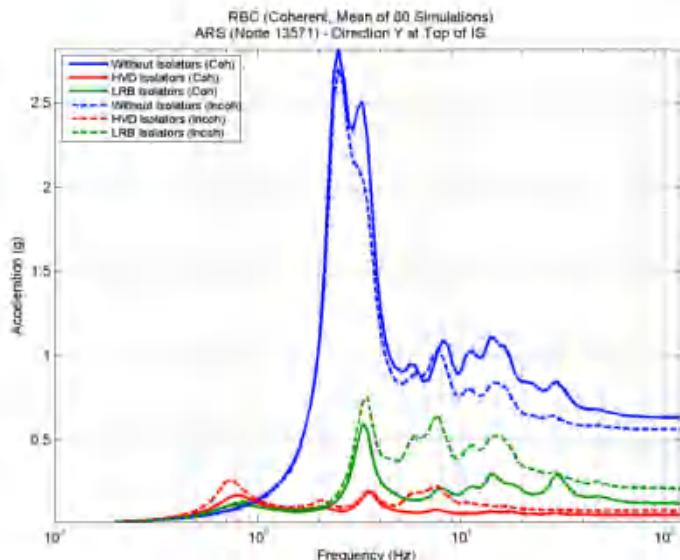
LRB



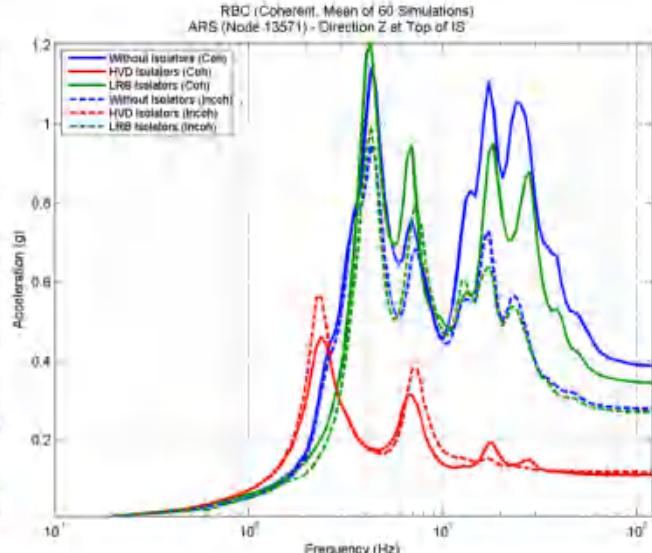
СИС КСП



Горизонталь, спектр Y



Вертикаль, спектр Z



Расчетная модель (слева) и результаты сравнительного аналитического исследования SSI Dan Chiosel для трех вариантов опирания здания реактора: (1) жесткого, (2) с применением СИС КСП и (3) с LRB - резино-металлической опорой при учете когерентного (сплошные линии) и некогерентного (прерывистые линии) волнового сейсмического воздействия.

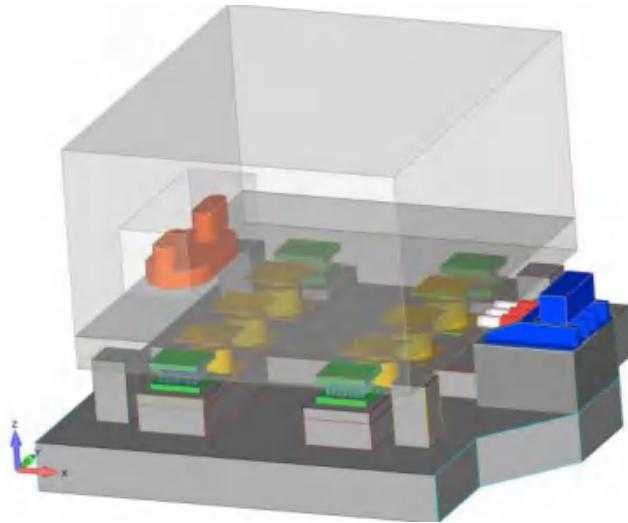
Эффективность в горизонтальном направлении (Y), в вертикальном - (Z). Синий цвет – жесткое опирание здания. Зеленый цвет – LRB, Красный цвет – СИС КСП. Очевидное преимущество СИС КСП во всех направлениях сейсмического воздействия.

Стендовая база ЦНИИП Минстроя, СРОСЭКСПЕРТИЗА и ЦВС для натурных испытаний, валидации и сертификации антисейсмических опор, изоляторов и демпфирующих устройств

Инверсионный стенд СИСТ (SIST) для натурных испытаний сейсмоизолирующих систем (СИС)

Габаритные размеры СИСТ составляют 15 x 15 м x 15 м

Инверсионный метод испытаний означает, что почва (платформа) не перемещается (как в сейсмоплатформах), а сама испытуемая Конструкция сотрясается на собственных частотах, обеспечивая элементам СИС полный диапазон нагрузок и деформаций с амплитудами, соответствующими условиям ПЗ, МРЗ и ЗПВ.

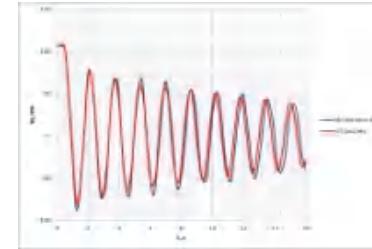


1. Модель здания с переменной массой от 400 до 3 000 т.
Нагрузка на каждую испытуемую опору варьируется от 100 до 750 тонн;
2. Мощный фундамент на средних исследованных грунтовых условиях;
3. Гидравлическая система - толкатель с функцией быстрого снятия нагрузки усилием до 1050 тонн и диапазоном перемещений +/- 350 мм;
4. Механический Вибратор;
5. Испытуемые Изоляторы;
6. Испытуемые Демпферы.

Общий вид стенда натурных испытаний СИСТ, нагрузочное устройство мощностью 1050 тонн, Санкт-Петербург. Натурные испытания СИС КСП на запроектное сейсмическое воздействие с пиковым ускорением 0.65g



Результаты испытаний СИС КСП

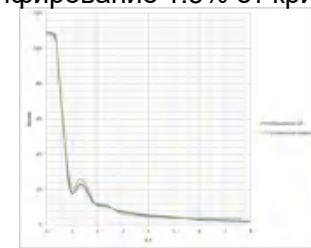


**Реакция системы без демпферов,
демпфирование 1.5% от критического**



Пружинный блок 465/1200
тонн
Сейсмическое смещение 150

3D демпфер в рабочем состоянии



**Реакция системы с демпферами
с демпфированием , близким к
критическому**

Примеры испытаний. Полномасштабные испытания РОЧ со свинцовым сердечником (LRB) на стенде СИСТ (2023)

Производство РПИ Курскпром, Тип 300 x 300 грузоподъемность изолятора 100 тонн.



Стенд детальных исследований опор, сейсмических изоляторов и демпферов (СДО), ЦВС, Санкт-Петербург, РФ

Стенд СДО позволяет испытывать и получать расчетные линейные и нелинейные характеристики опор, сейсмических изоляторов и демпферов различных типов в горизонтальном и вертикальном направлениях при переменной статической и динамической нагрузках. Размеры образцов до 1200 x 1200 x 1000 мм.

Перемещения до 500 мм. Усилия 50 тонн горизонталь и 40 тонн – вертикаль.



Общий вид СДО с маслостанцией высокого давления



Компьютерная система управления СДО



Испытание 3D высоковязкого демпфера ВД по ТУ 4192....

Примеры применения СИС КСП (BCS) демпферов ВД. Инновационное решение сейсмической защиты Иркутского аэропорта землетрясения



Два здания нового Иркутского аэропорта



Демпфера ВД прибыли в Иркутск из Санкт-Петербурга



Соединение демпферами ВД двух соседних зданий, имеющих различную массу, собственные
частоты и формы вынужденных колебаний

Примеры применения СИС КСП (BCS) в мире для вибрационной, сейсмической и звуковой изоляции зданий, сооружений и оборудования



Kings Cross Building Isolation, London



Shanghai Symphony Orchestra Vibration and Seismic Isolation



Hing Scrapper Building Isolation
Porta Nuova, Milano, Italy



Hongkong Lyric Theatre Complex Isolation

Примеры применения СИС КСП (BCS) в мире для вибро и сейсмоизоляции ответственного оборудования



Вибро и сейсмоизоляция мощных турбоагрегатов



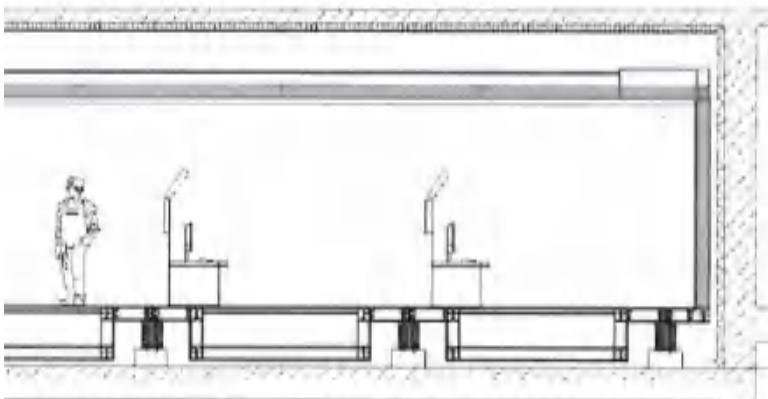
Вибро и сейсмизоляция
дизель-генератора



Сейсмоизоляция солнечной
электростанции на PGA 1.0 g

Сейсмоизоляция
мощного
трансформатора

Система сеймоизоляции и виброизоляции – «плавающий пол» систем АЭС на основе применения блоков пружин и демпферов СИС КСП



АЭС Оккилоота III EPR 1600, Финляндия

Система защиты БЩУ АЭС от сейсмики, вибрации, шума и ударных
воздействий от падения самолета массой 400 тонн

Система сейсмоизоляции и виброизоляции систем АЭС на основе применения блоков пружин и демпферов



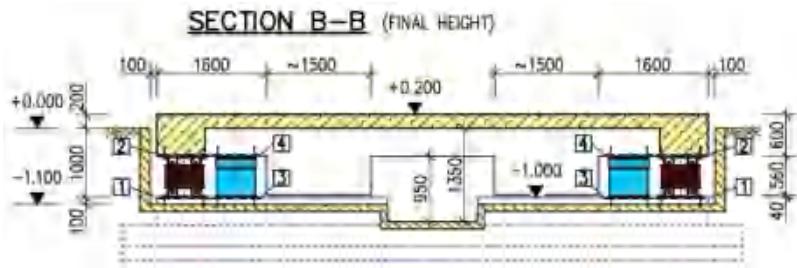
АЭС Госген, Швейцария.

Защита бассейна выдержки отработанного топлива массой 5800 тонн от сейсмики 0.55g, и удара от падения самолета массой 400 тонн

Доказательство эффективности СИС КСП при реальном землетрясении.

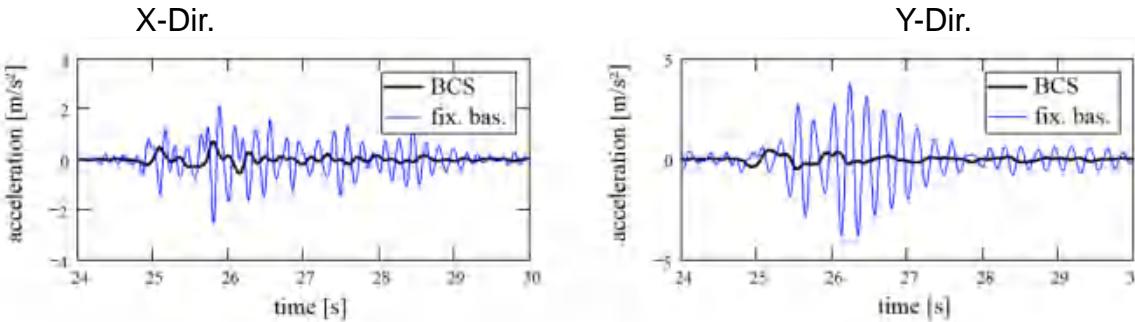
Применение BCS/SIS для двух аналогичных зданиях Университета Мендоза, Аргентина

(слева обычно опертое здание на фундаменте, справа с использованием СИС КСП)



Экспериментальные результаты функционирования 3D СИС КСП (BCS) при реальном землетрясении

PGA = 0.12g. Accelerations at the top of the isolated and Non-Isolated Buildings

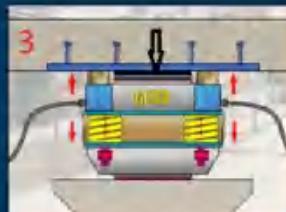


Сравнительные результаты снижения всех параметров 2-х зданий

Distortion in springs and dampers 3.0 mm.
Constant acceleration distribution along
the isolated building height.
Comparative acceleration measurements at
“Ni” and “I” buildings’ roofs:
 $X_{ni/i} = 0.25/0.05g$
 $Y_{ni/i} = 0.4/0.06g$
 $Z_{ni/i} = 0.06/0.07g$

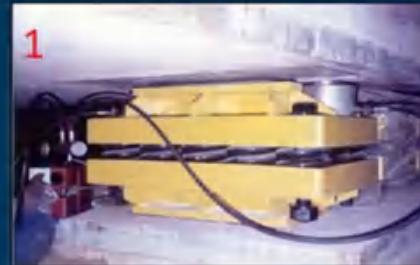
No structural damage.
Roof 3D Acceleration reduction > 75%
Structure:
Axial forces reduction > 60%.
Shear force reduction > 75%
Bend. Moment reduction > 90%
Story Drift reduction > 80%

Примеры применения СИС КСП (BCS) для компенсации просадок грунта и обеспечения проектного положения сооружения, в том числе в районах вечной мерзлоты



регулировка реакции опоры

GERB



Сжатие



Установка пластин

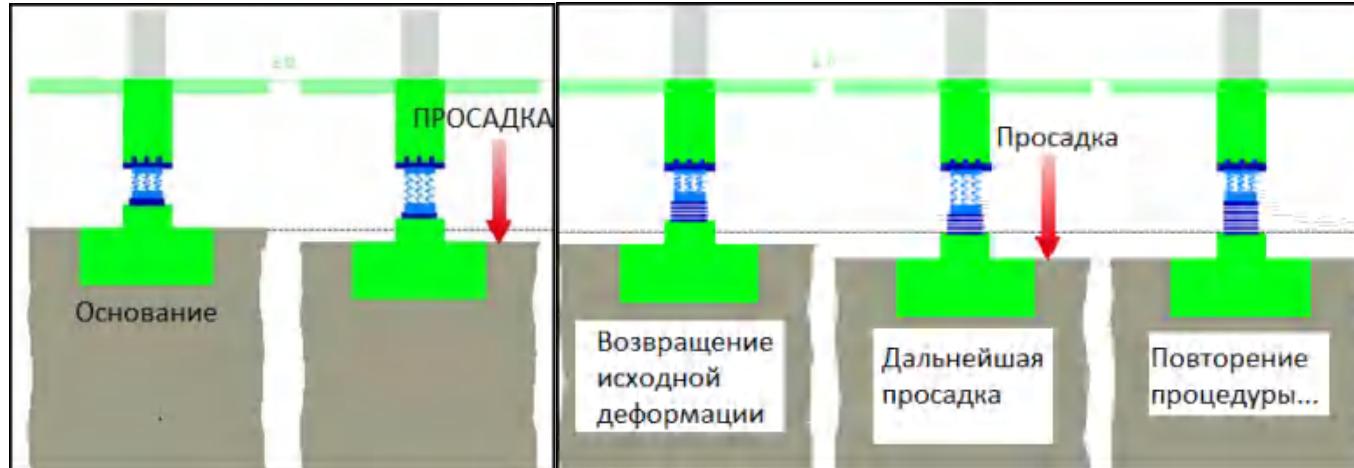
GERB

КОНТРОЛЬ ПРОСАДОК ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

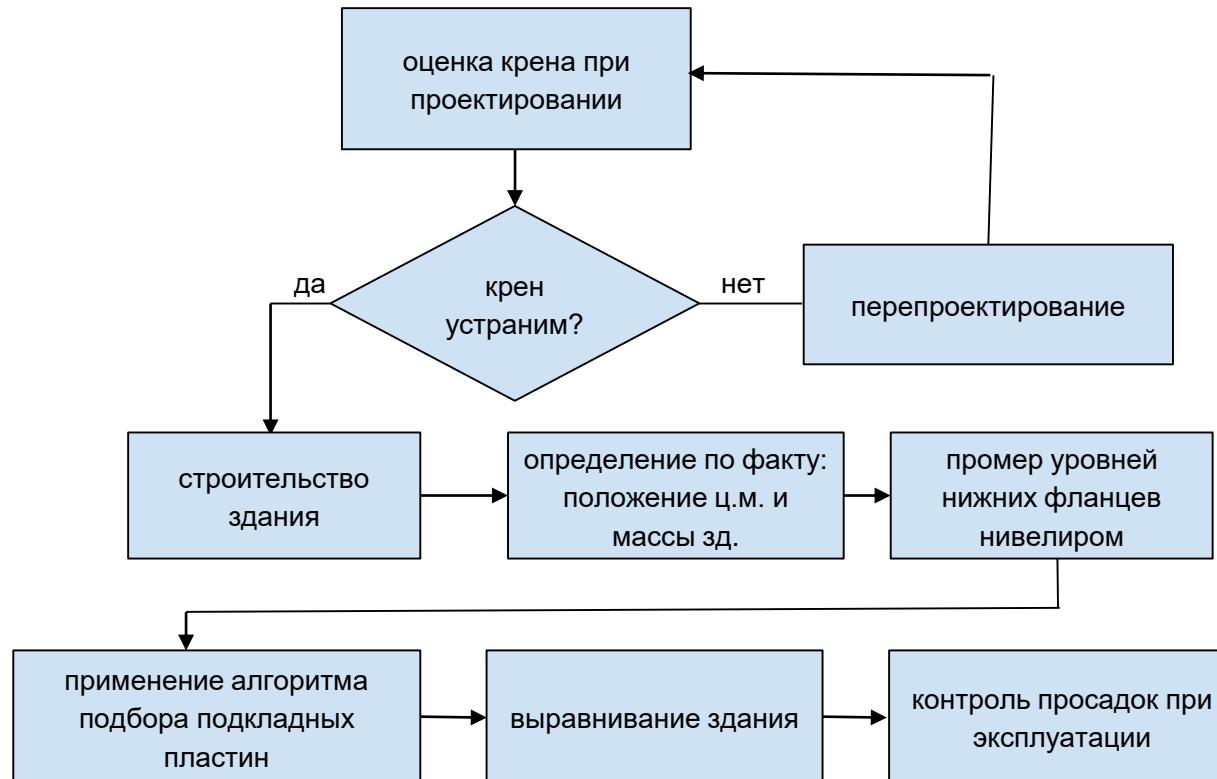
После выравнивания здания на этапе ввода в эксплуатацию дальнейший контроль за просадками может быть осуществлен:

- прямыми геодезическими измерениями уровней;
- путем контроля деформаций пружинных блоков.

При дальнейших возможных просадках одной или нескольких свай под пружинными блоками необходимо компенсировать просадки установкой пластин с толщинами, равными глубинам ухода свай.



БЛОК-СХЕМА КОНТРОЛЯ НАД КРЕНАМИ



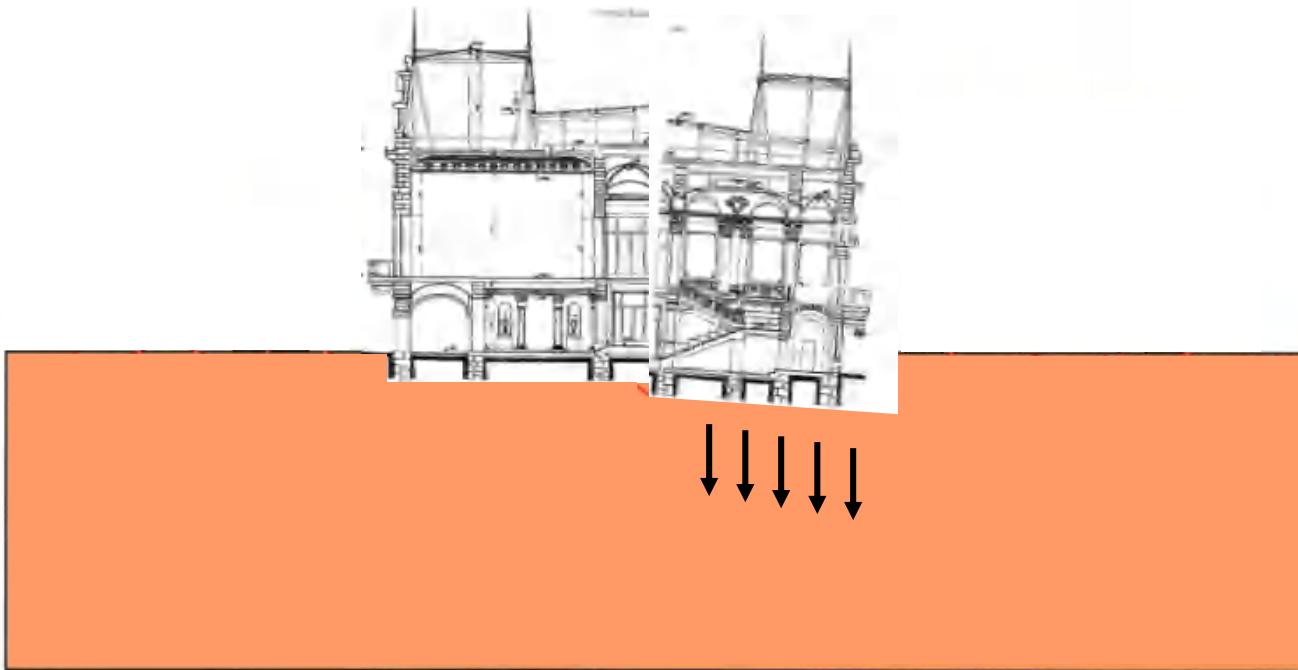


Трецинообразование и угроза разрушения здания из-за просадок грунта в старинной церкви Church St. Remigius, Bergheim, Germany. Компенсация просадок системой СИС КСП

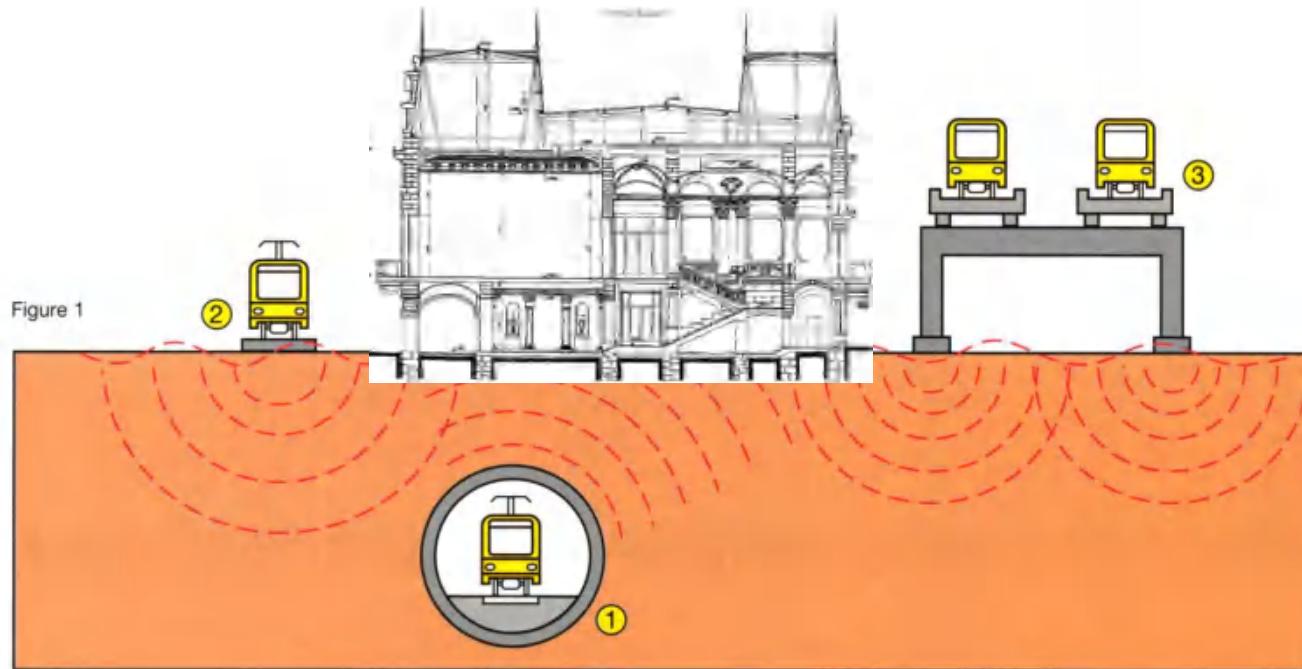


Восстановление памятника архитектуры – дворца (1832 года постройки после существенных просадок грунта)

Изоляция от внешней вибрации и компенсация просадок грунта системой СИС КСП



Изоляция от внешней вибрации и компенсация просадок грунта системой СИС КСП



Видео

Заключение

1. СП14.13330.2018 с Изменениями обладает существенными недостатками, которые могут приводить к серьезной недооценке сейсмической опасности для зданий и сооружений. Документ требует коренной переработки.
2. Анализ прошедших сильных землетрясений, натурные исследования на сейсмоплатформе E-Defence выявили недостаточную эффективность современных «горизонтальных» СИС (LRB, TPB).
3. Аналитические и натурные экспериментальные исследования, а также опыт прошедшего землетрясения установили преимущества системы пространственной сейсмоизоляции СИС КСП (BCS) перед наиболее распространёнными в мире системами СИС LRB и TPB, обеспечивая сейсмическую изоляцию во всех направлениях, включая вертикальное направление сейсмического воздействия.
4. Система контроля сейсмических перемещений СИС КСП, помимо высокой эффективности при землетрясениях, позволяет:
 - Обеспечивать вибрационную, ударную и шумовую изоляцию зданий и сооружений;
 - Компенсировать возможные просадки грунта на слабых и просадочных грунтах, а также в районах вечной мерзлоты;
 - Эффективно снижать теплопередачу от сооружения на грунт вечной мерзлоты, что предотвращает либо замедляет размерзание основания и, таким образом, повышает стабильность положения и увеличивает срок службы зданий, сооружений и объектов энергетической инфраструктуры.