

УДК 69.059

ПІДСИЛЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ І СПОРУД В УМОВАХ СЕЙСМІЧНИХ ВПЛИВІВ ЗА НАЯВНОСТІ ЧИННИКІВ ЗНАЧНИХ НЕРІВНОМІРНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ОСНОВИ

Розглянуті основні принципи підвищення ефективності підсилення будівельних конструкцій і споруд за наявності сейсмонебезпеки та складних інженерно-геологічних умов, а також наведений приклад дослідження техніко-економічної ефективності підсилення цегляних стін в умовах просідаючих ґрунтів сейсмонебезпечних територій.

The article deals with the basic principles of efficiency of strengthening of building structures and buildings in earthquake-prone and difficult geological conditions, as well as an example of research of technical and economic efficiency of strengthening of brick walls in the conditions of sedimentary rocks seismic regions.

Ключові слова: ефективність, підсилення, сейсміка, нерівномірні деформації, основа.

Забезпечення надійності будівельних об'єктів, розташованих на майданчиках, де поєднуються такі чинники, як сейсмонебезпека та нерівномірні деформації основ будівель, є актуальним питанням для території України, особливо з огляду на наявність великого обсягу застарілого фонду нерухомості.

Існує значна кількість методів і способів підсилення конструкцій і будівель із різними особливостями та конструктивними рішеннями. При цьому важливо забезпечити достатню ефективність підсилень як з точки зору мінімально допустимої надійності, так й максимального обмеження прямих і майбутніх витрат та супутніх проблем, наприклад, припинення експлуатації.

При підсиленні споруд у різних складних умовах до відповідних рішень із підвищення їх надійності висувають додаткові вимоги, які враховують особливості складних впливів.

Щодо підсилення в умовах сейсмонебезпеки та складних інженерно-геологічних умов, які викликають значні нерівномірні деформації основи, можна виділити наступні основні принципи та особливості, які дозволяють підвищити ефективність таких заходів [1, 2, 3, 4, 5 та ін.]:

- контроль і обмеження ваги елементів підсилення, яка не повинна бути значно більшою у порівнянні з підсилюваними конструкціями, що може призвести до суттєвого збільшення сейсмічних навантажень і розвитку додаткових нерівномірних деформацій основи;
- підсилення конструкцій не повинно викликати суттєвого порушення симетричності



Д.О. Хохлін
доцент кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури, к.т.н.

та регулярності розподілення у плані та по висоті будівлі жорсткостей і мас, що особливо актуально з точки зору сприйняття сейсмічних навантажень;

- наявність додаткових вимог до забезпечення надійного з'єднання елементів підсилення та існуючих конструкцій в умовах можливих динамічних впливів і складного напружено-деформованого стану при великих нерівномірних деформаціях основи;
- наявність додаткових вимог до загальної жорсткості та монолітності будівлі;
- необхідність врахування можливості поєднання навантажень від сейсміки та значних нерівномірних деформацій з різною послідовністю їх прикладання, в т.ч. врахування впливу послаблення основи на динамічні характеристики будівлі.

При дотриманні наведених принципів залишається актуальним також питання вибору оптимальних рішень із підсилення різних конструктивних елементів споруди (стіни, простінки, колони, балки, перекриття тощо) з різних матеріалів із врахуванням особливостей їх напружено-деформованого стану при складних впливах.

Для прикладу дослідження техніко-економічної ефективності підсилення можуть бути

розглянути окремі способи підсилення цегляних стін в умовах просідаючих ґрунтів сейсмонебезпечних територій (необхідно зазначити, що просідання основи в цілому аналогічне дії більшості інших чинників значних нерівномірних деформацій основ). Одним із прогресивних шляхів є використання сучасних композитних матеріалів на прикладі технологій концерну «Sika».

Для підсилення цегляних стін і простінків часто використовують сталеві конструкції (прокатну та листову сталь, сітки тощо) зі зварними або болтовими з'єднаннями. Для споруд у зазначених складних умовах використання сталевих елементів підсилення є більш прийнятним, враховуючи значно краще співвідношення міцності та питомої ваги у порівнянні з тим же залізобетоном [6] (за одним із наведених вище принципів). При порівнянні властивостей металевих та, наприклад, вуглецевих (більш уживаних) композитних елементів підсилення останні мають суттєві переваги: значно менше відношення власної ваги до міцності, майже повна корозієстійкість, відсутність обмежень за довжиною, спрощений, більш дешевий і швидкий монтаж, більша втомна міцність. Недоліками можна вважати роботу тільки на розтяг, розподіл навантаження тільки уздовж волокон, необхідність термічного захисту та більшу вартість матеріалу. На рис. 1 наведені діаграми [7], що ілюструють, в першу чергу, міцнісні переваги композитних матеріалів перед сталевими (а вуглецеві композити крім того мають більшу жорсткість).

Використовують кілька різновидів стрічок, які розрізняються за розмірами перерізу та модулем пружності (табл. 1). Основні механічні характеристики стрічок Sika CarboDur та полотен Sika Wrap наведені у табл. 2.

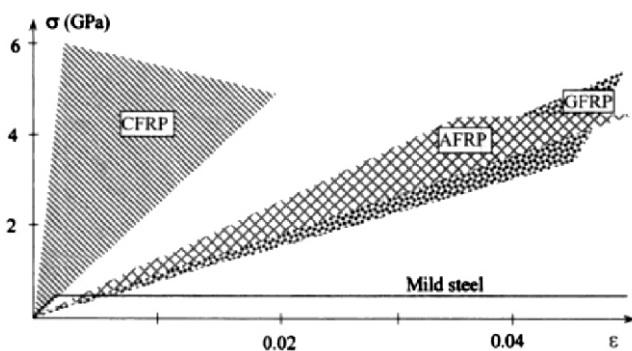


Рис. 1. Діаграми напруження-деформації одноосісного розтягу для різних типів композитних матеріалів та сталі (CFRP – з вуглецевими волокнами, AFRP – арамідними, GFRP – скляними)

Таблиця 1

Різновиди стрічок Sika CarboDur

Sika CarboDur S (Модуль пружності $E > 165000$ МПа)			
Тип	Ширина, мм	Товщина, мм	Площа перерізу, мм ²
Sika CarboDur S512	50	1,2	60
Sika CarboDur S612	60	1,2	72
Sika CarboDur S812	80	1,2	96
Sika CarboDur S1012	100	1,2	120
Sika CarboDur S1212	120	1,2	144
Sika CarboDur S1512	150	1,2	180
Sika CarboDur S614	60	1,4	84
Sika CarboDur S914	90	1,4	126
Sika CarboDur S1214	120	1,4	168
Sika CarboDur M (Модуль пружності $E > 210000$ МПа)			
Sika CarboDur M614	60	1,4	84
Sika CarboDur M914	90	1,4	126
Sika CarboDur M1214	120	1,4	168
Sika CarboDur H (Модуль пружності $E > 300000$ МПа)			
Sika CarboDur H514	50	1,4	70

Таблиця 2

Основні механічні властивості стрічок Sika CarboDur та полотна

Показник/Різновид	Модуль лінійної пружності, ГПа	Міцність на розтяг, МПа	Середні напруження при відриві, МПа	Деформації при відриві, %
Стрічка Sika CarboDur S	>165	>2800	3050	>1,70
Стрічка Sika CarboDur M	>210	>2400	2900	>1,20
Стрічка Sika CarboDur H	>300	>1300	1450	>0,45
Полотно Sika Wrap 230 C	230	3500	230000	15,00

Можливі різні варіанти нанесення стрічок у залежності від розмірів, форми та передбаченого напружено-деформованого стану стін або простінків (перехресне діагональне та (або) вертикально-горизонтальне, спіральне, комбіноване). Полотна наклеюють по всій площині конструкції, що підсилюється (прикладі на рис. 2). Необхідно відмітити, що при нанесенні підсилювальних стрічок можливе їх попереднє напруження. Така можливість за умови розрахованого обґрунтування може підвищувати ефективність підсилення, створюючи додаткове обтиснення кладки, що зменшує або нейтралізує відповідні за напрямом розтягувальні зусилля та підвищує зчеплення елементів кладки (наприклад, збільшується міцність на зріз за неперев'язаними швами) [8].

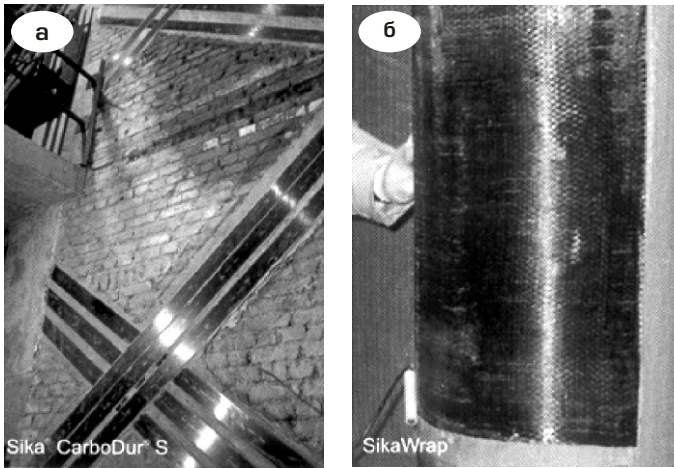


Рис. 2. Приклади нанесення підсилювальних стрічок (а) та полотна (б)

Для розрахункового дослідження ефективності підсилення стінових конструкцій композитними матеріалами «Sika» було проведено моделювання в ПК «ЛІРА». Для цього була створена модель суцільної стінової панелі. Розрахунки виконували у нелінійній постановці, враховуючи те, що розглядувані композити працюють тільки на розтяг. При цьому бралася до уваги нелінійність деформування кладки.

Для порівняння побудовані плоскі моделі конструкцій без підсилення (рис. 3), з підсиленням композитними стрічками (рис. 4), полотном і сталевим прокатом (рис. 5).

Загальні характеристики моделей наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Основні параметри розрахункових моделей стінової панелі

Характеристика	Значення	
Загальні розміри	2,8 6,0 м, товщина СЕ 0,51 м	
Основний розмір скінченних елементів	0,2 0,2 м	
Фіксація переміщень нижнього ряду вузлів	по X, Y, UZ	
Навантаження	Вертикальне та горизонтальне	Власна вага, вертикальне – 60 т (по 2,0 т на середні та 1,0 т на крайні верхні вузли), горизонтальне – 39 т (по 1,30 т на середні та 0,65 т на крайні верхні вузли)

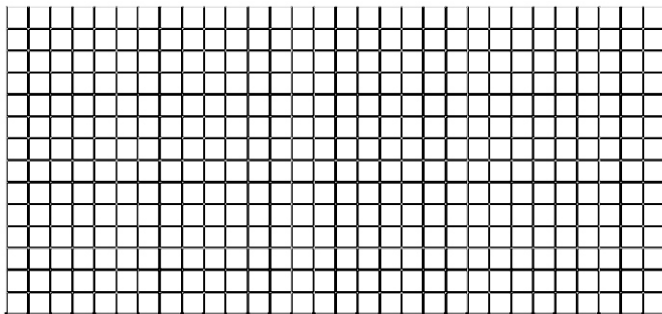


Рис. 3. Модель стіни без підсилення

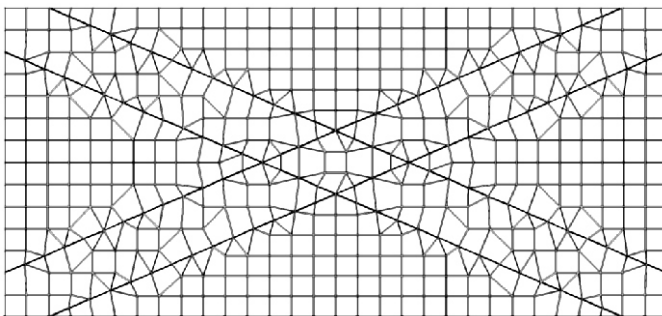


Рис. 4. Модель стіни, підсиленої композитними стрічками

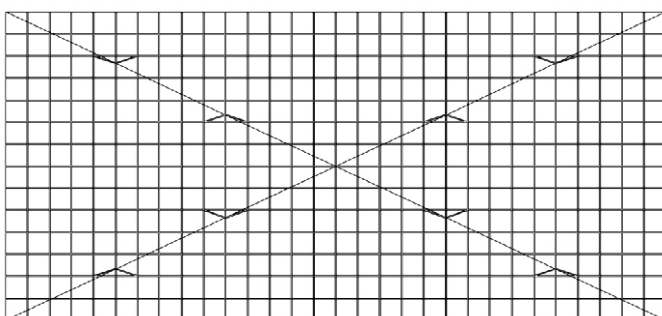


Рис. 5. Моделі конструкцій, підсилені сталевим прокатом

Для підсилення стіни композитами використані стрічки Sika CarboDur S1012 і таке ж полотно (в два шари). За основу моделей з підсиленням сталевим прокатом для прикладу взяті детально описані способи для стін та простінків при дії сейсмічного навантаження, наведені у [3]. Для стіни обрано сталеву раму з перехресними зв'язками.

Перерізи прокату визначені з врахуванням приблизної рівності вартісних показників витрати матеріалів на час дослідження з варіантом підсилення композитами. Обраховані загальні орієнтовні витрати композитних матеріалів склали для стінової панелі: Sika CarboDur S1012 – 56,9 м або Sika Wrap 230С – 67,2 м²; сталевому прокату: кутики 160 160 16.

Змодельовані конструкції навантажували вертикальним та горизонтальним навантаженнями (див. табл. 3). Величини навантажень обирали з урахуванням недопущення виникнення суттєвого тріщиноутворення (максимум 1-2 СЕ з тріщинами в картині руйнування, отриманій при розрахунку у ПК) у стіні через неможли-

вість на даному етапі моделювання при нелінійному розрахунку у ПК «ЛІРА» окремих особливостей руйнування кам'яної кладки. Враховано дію нерівномірної жорсткості основи зі зміною відповідних коефіцієнтів жорсткості основи стіни. При цьому були перевірені (з використанням програми «ЛІР-СТК») міцність та стійкість всіх елементів підсилення, відсоток їх використання не перевищив для сталевих прокату 65 % та 1 % для композитів.

Для оцінки ефективності підсилення порівнювали узагальнені зусилля N , M , Q у горизонтальних перерізах кладки стіни, які проходять через центри вибірки СЕ.

Зусилля визначалися за формулами:

$$N = \sum_i A_i N_{yi} ; \quad (1)$$

$$M = \sum_i A_i N_{yi} x_i ; \quad (2)$$

$$Q = \sum_i A_i \sigma_{xyi} ; \quad (3)$$

де N_{yi} – нормальні напруження в СЕ у горизонтальній площині; A_i – площа горизонтальних перерізів СЕ; x_i – горизонтальні координати центрів СЕ відносно центра загального перерізу у горизонтальній площині; σ_{xyi} – дотичні напруження в СЕ у горизонтальній площині.

У табл. 4 наведена вибірка напружень у СЕ розрахованих моделей стіни (з різними варіантами підсилення та без нього) та отримані відповідні зусилля у загальних горизонтальних перерізах. З таблиці видно, що при приблизно однаковій вартості матеріалів підсилення зі сталевих прокату є суттєво більш ефективним порівняно з композитними матеріалами з точки зору розвантаження цегляних стін при дії сейсмічного навантаження та нерівномірної жорсткості (деформацій) основи.

Таким чином, згідно з отриманими результатами можна дійти висновку про надмірно високу ціну композитних матеріалів на час проведення досліджень порівняно зі сталевими матеріалами. Крім того, є необхідність у розробленні більш ефективних форм використання композитних елементів у зазначених складних умовах, враховуючи значний потенціал наведених матеріалів, наприклад, використання більш складних комбінованих картин нанесення стрічок на стіни.

Порівняння підсилення конструкцій з використанням сталевих прокату та інших стандартних матеріалів, наприклад, залізобетону, свідчить про те, що сталеві матеріали мають значно краще співвідношення міцності та маси [6]. Ця властивість також зменшує масу елементів підсилення, що сприятливо впливає на сейсмічні навантаження.

Слід зазначити, що при підсиленні стін та простінків відбувається збільшення їх жорсткості. При цьому зменшується період коливань як конструкцій, так і будівлі в цілому, що, в свою чергу, може призводити до підвищення спектрального коефіцієнта динамічності та відповідно сейсмічного навантаження, що необхідно враховувати при розробленні підсилення.

При визначенні конструктивних та інших заходів захисту існуючих будинків в умовах просідаючих ґрунтів сейсмонебезпечних територій, як правило, необхідно вирішувати комплекс проблем (тріщиноутворення, крени, прогини та вигини будівель та їх відсіків тощо). Причому в процесі їх вирішення бажано забезпечити призупинення розвитку вищенаведених дефектів шляхом повного або часткового підси-

Таблиця 4

Зміна узагальнених зусиль при підсиленні стінової панелі з урахуванням нерівномірного деформування основи

Тип підсилення	Переріз	Зміна узагальненого зусилля, %					
		N		M		Q	
Композитні стрічки по діагоналі	Верхній	+0,15	+0,35	-2,06	-0,83	-1,65	-1,40
	Середній	-0,03		-1,06		-2,52	
	Нижній	+1,04		-0,56		-0,24	
Композитне полотно у два шари	Верхній	-0,05	+0,99	-0,18	-2,01	-0,00	-0,25
	Середній	+0,25		-0,96		+0,09	
	Нижній	+3,16		-2,86		-0,77	
Сталева підсилення по контуру з перехресними зв'язками	Верхній	-16,93	-2,76	-49,57	-48,23	-36,81	-49,69
	Середній	-9,72		-70,12		-43,86	
	Нижній	+22,94		-34,18		-67,18	

лення системи «основа–фундамент». Тобто необхідно розробити комплекс заходів як конструктивних, так і, наприклад, із вирівнювання наднормативних кренів.

Одночасно з конструктивними та іншими заходами з відновлення та підсилення споруд у сейсмонебезпечних умовах ефективними можуть бути окремі методи активного сейсмозахисту та сейсмозахисного екранування, направлені на зменшення зусиль у конструкціях під час землетрусу (адаптивні системи, сейсмоізоляція надземної частини споруд, екранування основ і фундаментів, системи з підвищеним демпфіруванням та гасниками коливань). Їх використання пов'язано з рядом складностей: влаштуванням систем активного сейсмозахисту в існуючих будівлях у порівнянні з такими, що проектують, а також із наявністю ризику розвитку значних нерівномірних деформацій основи та споруди в цілому [5]. Достатньо реальною та дуже перспективною бачиться розробка методів сейсмозахисного екранування основ і фундаментів існуючих будівель, наприклад, шляхом влаштування екранів у вигляді стінок або траншей, які перешкоджають впливам хвильового типу та добре пристосовуються до їх стохастичного характеру [9].

Висновки. Особливості наявних складних умов накладають певні вимоги та обмеження при розробленні підсилення існуючих будівель і споруд. Важливим є вироблення та впровадження відповідних загальних принципів підсилювальних заходів. Щодо підсилення будівель за умов одночасного впливу сейсмонебезпеки та існуючих нерівномірних деформацій основи можна виділити наступні шляхи підвищення їх ефективності: максимальне наближення до дійсного напружено-деформованого стану споруди при її розрахунку на особливі сполучення навантажень, наприклад, врахування при розрахунках будівель можливості суміщення дії сейсмічних впливів та значних нерівномірних деформацій основи; дослідження оптимального співвідношення між міцністю, питомою вагою та ціною елементів підсилення з врахуванням їх конструктивних і технологічних особливостей; обмеження впливу підсилювальних заходів на симетричний та регулярний розподіл жорсткостей і мас у будівлі; розроблення та впровадження для підвищення сейсмостійкості існуючих будівель систем активного сейсмозахисту, в т.ч. екранування їх основ і фундаментів, із врахуванням ризику розвитку значних нерівномірних деформацій основ.

-
- [1] Будівництво у сейсмічних районах України: ДБН В.1.1-12:2006. – Офіц. вид. – [На заміну СНиП II-7-81*]; Чинні від 2007-01-02]. – К.: Укрархбудінформ: Мінбуд України, 2006. – 82 с.
- [2] Будинки і споруди на підроблюваних територіях і просідаючих грунтах: ДБН В.1.1-5-2000. – Офіц. вид. – [На заміну СНиП 2.01.09-91; Чинні від 2000-07-01] – К.: Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 2000. – 87 с.
- [3] Повышение сейсмостойкости зданий: Серия О.00 – 2.96с. / Я.М. Айзенберг, С.И. Чигрин, А.В. Черкашин, С.А. Минков. – М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1996. – Выпуск О-1: Каменные и кирпичные здания. Материалы для проектирования. – 82 с.
- [4] Хохлін Д.О. Конструктивний захист житлових будинків масових серій, що експлуатуються в умовах просідаючих ґрунтів сейсмонебезпечних територій : дис. ...канд. техн. наук : 05.23.01 / Хохлін Денис Олексійович. – К., 2009. – 204 с.
- [5] Хохлін Д.О. Особливості напружено-деформованого стану будівель при суміщенні сейсмічних впливів та значних нерівномірних деформацій основи // Будівельні конструкції. – К.: НДІБК, 2012. – Вип. 76. – С. 269-277.
- [6] Бучок Ю.Ф. Будівельні конструкції: Основи розрахунку: Підручник / Бучок Ю.Ф. – К.: Вища шк., 1994. – 447 с.
- [7] Externally bonded FRP reinforcement for RC structures: Technical report fib Bulletin No. 14. – Lausanne: FIB, 2001. – 138 p.
- [8] Сика Україна: Информационный диск 2005, вер. 5.0 / ООО «Сика Украина». – К.: Сика Украина, 2005. – 1 электронный опт. диск (CD-ROM); 12 см. – Систем. вимоги: Pentium-266; 32 Mb RAM; CD-ROM; Windows 98/2000/NT/XP. – Назва з титул. екрану
- [9] Кранцфельд Я.Л. О перспективах сейсмозащитного экранирования грунтовых оснований зданий и сооружений // ОФМГ, №1-2012. – М.: НИИОСП, 2012. – С. 23-27.

Надійшла 25.01.2013 р. 