

УДК 539.3

**П.П. Чеверда**, канд.техн.наук,  
**Г.М. Іванченко**, д-р техн. наук,  
**М.Г. Кушніренко**, канд.техн.наук,  
**А.М. Козовенко**, канд.техн.наук

## **АНАЛІЗ РЕАКЦІЙ В ЕЛЕМЕНТАХ ПРОСТОРОВИХ СХЕМ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ З'ЄДНАННЯ**

Виконано дослідження реакції стінових панелей для двох варіантів просторового з'єднання з плитним фундаментним ростверком житлового будинку при дії двох сполучень навантажень. Будівля моделювалась як просторовий скінченно-елементний каркас зі сталими жорсткісними характеристиками. Для окремого просторового вузла за допомогою програмного комплексу SCAD досліджувався вплив способів з'єднання стінових панелей з плитним ростверком на несучу здатність. Параметри напружено-деформованого стану визначались для варіанту монолітного виготовлення елементів будинку та варіанту просторового з'єднання стінових панелей зі збірних елементів індустріального виготовлення. Аналіз дослідження результатів показав, що значення внутрішніх зусиль відрізняються, тому будівництво об'єктів промислового та цивільного призначення зі збірного залізобетону є більш економічним завдяки зменшенню витрат на армування елементів.

Будівництво багатоповерхових житлових будинків та будівель промислового призначення з використанням індустріального та монолітного залізобетону потребує постійного вдосконалення методів розрахунку з урахуванням сумісної роботи несучих елементів просторових розрахункових схем. Це обумовлено необхідністю зменшення власної ваги будівлі та збільшення її поверховості, забезпечуючи при цьому необхідну міцність, жорсткість і стійкість будівлі в цілому. При проектуванні будівель і споруд з уніфікованих елементів індустріального виробництва виникає потреба їхнього з'єднання між собою у вузлах металевими закладними деталями, забезпечуючи при цьому надійність, геометричну незмінюваність просторової схеми протягом усього періоду експлуатації. Такі з'єднання стінових панелей та відповідні об'ємно-планувальні рішення і дозволяють вирішити всі питання безпеки та довговічності. Але, оскільки автоматизоване моделювання розрахункових схем складних об'єктів будівництва з використанням існуючих програмних засобів для різних граничних умов з'єднання елементів є трудомістким, то виникає потреба у дослідженні реакції їхньої сумісної роботи з метою подальшого узагальнення граничних умов для певного класу задач.

Постановка задачі по визначенню параметрів напружено-деформованого стану розрахункової моделі багатопверхового житлового будинку від дії статичного навантаження полягає в дослідженні реакції взаємодії стінових панелей з іншими несучими елементами будівлі з монолітного залізобетону та будівлі зі збірних залізобетонних виробів індустріального виготовлення. Розрахунок двох варіантів розрахункових схем виконується з використанням методу скінчених елементів, який передбачає дискретизацію конструктивної схеми окремими скінченими елементами певних розмірів. Розв'язок статично невизначуваних задач методом скінчених елементів (МСЕ) базується на побудові функціоналу повної потенціальної енергії [1,2]. Для його побудови використаємо принцип можливих переміщень, суть якого полягає в наступному: якщо механічна система, на яку накладені кінематичні в'язі, знаходиться у рівновазі під дією прикладених сил, то сума можливих робіт усіх зовнішніх і внутрішніх сил, що діють у межах цієї системи, на будь-яких нескінченно малих можливих переміщеннях, дорівнює нулю. Тоді згідно з принципом можливих переміщень запишемо, що

$$\delta\Pi = \delta U + \delta W = 0. \quad (1)$$

Розглянемо скінчений елемент просторової моделі під дією довільного зовнішнього навантаження, який зображений на рис. 1.

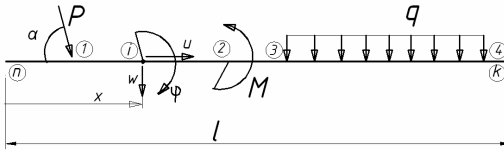


Рис. 1. Скінчений елемент просторової моделі

В кожному перерізі  $i$  скінченного елемента виникають три переміщення  $\rightarrow u, w, \varphi$ , з яких  $u, w$  є незалежними переміщеннями, а  $\varphi$  - кут повороту виражається через прогин  $w$ . Всі переміщення згідно з гіпотезою плоских перерізів є функціями одного аргументу  $x$ , тобто:

$$\begin{aligned} u &= u(x), \\ w &= w(x), \\ \varphi &= \varphi(x). \end{aligned} \quad (2)$$

Надамо перерізу  $i$  скінченного елемента, який зображений на рис. 2, можливі переміщення і запишемо вираз для роботи внутрішніх сил

$$dU_i = N_i \cdot du_i + M_i \cdot d\varphi_i. \quad (3)$$

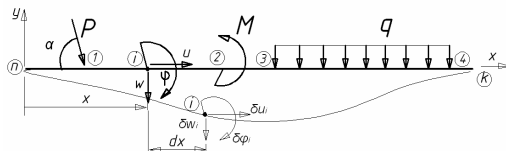


Рис. 2. Деформований скінченний елемент

Оскільки  $\varepsilon = \frac{du}{dx}$ , а  $du = \varepsilon \cdot dx$ ,  $d\varphi = k \cdot dx$ , то після перетворення вираз для роботи внутрішніх сил (3) матиме наступний вигляд

$$dU = N \cdot \varepsilon \cdot dx + M \cdot k \cdot dx. \quad (4)$$

Проінтегруємо даний вираз і запишемо формулу для роботи внутрішніх сил

$$U = \int_0^l N \cdot \varepsilon \cdot dx + \int_0^l M \cdot k \cdot dx = \int_0^l N \frac{du}{dx} dx + \int_0^l M \frac{d^2 w}{dx^2} dx. \quad (5)$$

Тоді можлива робота внутрішніх сил на можливих переміщеннях буде обчислюватись за формулою

$$\delta U = \int_0^l N \cdot \delta \frac{du}{dx} dx + \int_0^l M \cdot \delta \frac{d^2 w}{dx^2} dx, \quad (6)$$

а робота зовнішніх сил на можливих переміщеннях за виразом:

$$\delta W = P \cdot \cos \alpha \cdot \delta u_1 + P \cdot \sin \alpha \cdot \delta w_1 + M \cdot \delta \varphi_2 + \int_{x_3}^{x_4} q(x) \delta w_x dx. \quad (7)$$

Після певних перетворень рівняння рівноваги системи матиме вигляд:

$$\int_0^l N \cdot \delta \frac{du}{dx} dx + \int_0^l M \cdot \delta \frac{d^2 w}{dx^2} dx - \delta W = 0, \quad (8)$$

де  $u(x)$ ,  $w(x)$  – розв'язок даного рівняння.

Дослідження реакції взаємодії стінових панелей з іншими несучими елементами будівлі виконувалось для розрахункової моделі з вихідними даними, які наведені в роботі [3]. Параметри напружено-деформованого стану багатоповерхового житлового будинку від дії статичного навантаження визначались за допомогою програмного комплексу МОНОМАХ, що наведені у роботі [4]. Житловий будинок, який зображений на рис. 3, моделювався як просторовий збірний залізобетонний каркас з розмірами в плані по довжині ( $L$ ) 32.4 м і 16.2 м по ширині ( $B$ ). Стінові панелі розміром 3,60x2,8 м та плити перекриття приймалися як скінченно-елементні пластини прямокутної форми з розмірами 0,45x0,4 м та товщиною 0,16 м. Сили взаємодії між окремими

несучими елементами підвальної частини будинку визначались для двох варіантів з'єднання стінових панелей за допомогою програмного

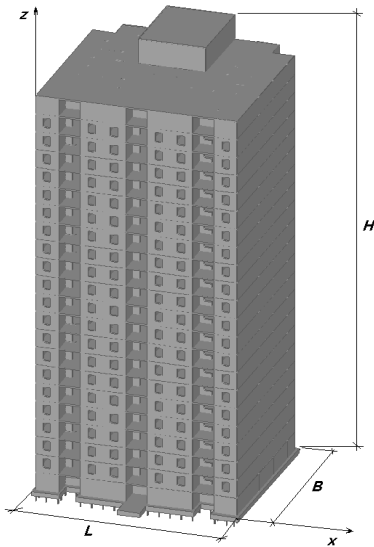


Рис. 3. Просторова модель будинку

комплексу SCAD. Для обох варіантів з'єднання стінових панелей з плитами перекриття та ростверком згідно з [5] визначалось сумарне постійне навантаження від власної ваги верхніх поверхів будинку та короточасне вітрове навантаження, яке діяло в напрямку вісі  $X$  глобальної системи координат. Постійне навантаження інтенсивністю  $500 \text{ кН/м}$  та короточасне вітрове навантаження інтенсивністю  $1,0 \text{ кН/м}$  моделювалось як вузлове зосереджене навантаження, яке прикладалось до елементів підвальної частини будинку на умовній відмітці  $\pm 0.00$ . З'єднання палі сталі жорсткості з залізобетонним стрічковим ростверком моделювалось шарнірним. За першим варіантом дослідження реакції сумісної роботи

стінових панелей при монолітному просторовому з'єднанні з ростверком та палями в кожному вільному вузлі скінченно-елементної моделі призначались шість можливих переміщення, а у закріпленому вузлі ростверка з палями моделювалась їхня відсутність. За другим варіантом при збірному з'єднанні стінових панелей між собою та з ростверком за допомогою закладних деталей призначались наступні граничні умови: у вузлах з'єднання стінових панелей з ростверком через закладні деталі та у вузлах вільного обпирання елементів на ростверк всі кутові та лінійні переміщення моделювались такими, що можливі; у вузлах розташування палі та з'єднання стінових панелей з ростверком металевими закладними деталями всі кутові переміщення моделювались, як можливі, а всі лінійні переміщення такими, що відсутні; у вузлах з'єднання між собою стінових панелей металевими закладними деталями та у вільних вузлах всі кутові та лінійні переміщення моделювались такими, що можливі. Згідно з даними граничними умовами виконувався розрахунок двох варіантів з'єднання елементів при дії двох сполучень навантажень: за першим сполученням навантажень враховувалось тільки постійне - від власної

ваги будинку, за другим - постійне навантаження та вітрове в напрямку осі  $X$ . Для кожного варіанту з'єднання стінових панелей з ростверком та сполучення навантажень визначались максимальні значення напружень та деформацій вузлів елементів, величини яких для ростверку та стінових панелей наведені у порівняльних таблицях 1, 2 відповідно.

Таблиця 1

Максимальні значення величин напружено-деформованого стану у ростверку

№ пп	Спосіб з'єднання елементів	Максимальні значення напружено-деформованого стану у ростверку при дії									
		постійного вертикального навантаження					постійного вертикального та вітрового навантаження				
		$X$ , <i>мм</i>	$Y$ , <i>мм</i>	$Z$ , <i>мм</i>	$M_x$ , <i>кН*м</i>	$M_y$ , <i>кН*м</i>	$X$ , <i>мм</i>	$Y$ , <i>мм</i>	$Z$ , <i>мм</i>	$M_x$ , <i>кН*м</i>	$M_y$ , <i>кН*м</i>
1	Монолітне виготовлення елементів	0,0	0,0	-0,3	-4,1	-176,3	0,0	0,0	-0,3	-4,15	-176,3
2	Збірні елементи індустріального виготовлення	0,0	0,0	-0,3	0,0	-178,3	0,0	0,0	-0,3	-0,1	-178,3

Таблиця 2

Максимальні значення величин напружено-деформованого стану у стінових панелях

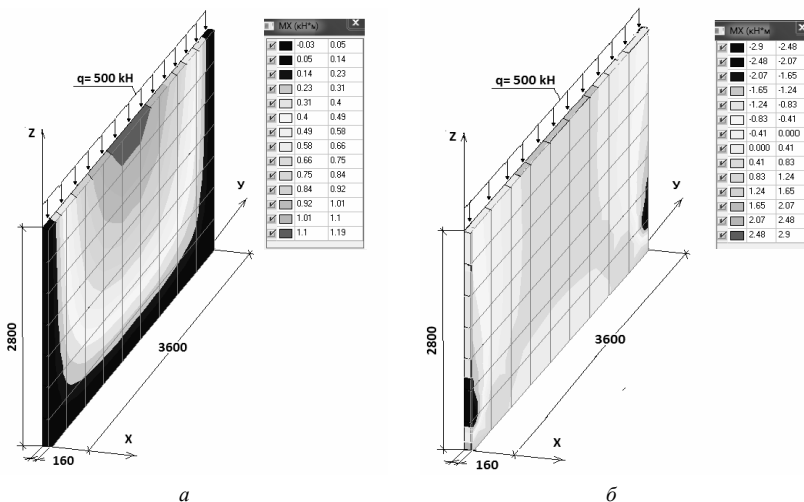
№ пп	Спосіб з'єднання елементів	Максимальні значення напружено-деформованого стану у стінових панелях дії									
		постійного вертикального навантаження					постійного вертикального та вітрового навантаження				
		$X$ , <i>мм</i>	$Y$ , <i>мм</i>	$Z$ , <i>мм</i>	$M_x$ , <sub>2</sub> <i>кН*м/м</i>	$M_y$ , <sub>2</sub> <i>кН*м/м</i>	$X$ , <i>мм</i>	$Y$ , <i>мм</i>	$Z$ , <i>мм</i>	$M_x$ , <sub>2</sub> <i>кН*м/м</i>	$M_y$ , <sub>2</sub> <i>кН*м/м</i>
1	Монолітне виготовлення елементів	-0,04	-0,04	-0,3	-2,82	-8,15	-0,11	-0,04	-0,3	2,9	8,09
2	Збірні елементи індустріального виготовлення	-0,04	-0,04	-0,3	-0,03	-0,32	-0,2	-0,04	-0,31	1,19	0,47

Аналіз результатів дослідження напружено-деформованого стану двох варіантів просторового з'єднання стінових панелей з ростверком, як це видно з результатів таблиці 1, показав наступне:

- переміщення вузлів скінченно-елементної моделі за напрямками осей  $X, Y, Z$  глобальної системи координат для двох варіантів з'єднання при дії двох сполучень навантажень не відрізняються. При цьому горизонтальна сила вітрового навантаження, що приймається в межах нормативних величин, не впливає на горизонтальні деформації ростверку, оскільки вона сприймається стіновими панелями, які просторово з'єднані;
- згинальні моменти  $M_y$  у ростверку при дії двох сполучень навантажень майже не відрізняються. Однак при жорсткому з'єднанні вузлів елементів, для випадку їхнього монолітного виготовлення при дії двох сполучень навантажень, у ростверку виникає крутильний момент, який необхідно враховувати при проектуванні додатковим армуванням ростверку;
- при проектуванні та будівництві будинків з'єднання стін з ростверком бажано виконувати не монолітним, а таким, де стіни будинку вільно або шарнірно (через закладні деталі) опираються на плитний або стрічковий ростверк. Таке виконання з'єднання стін з ростверком зменшить витрати на виготовлення та армування.

Результати, які наведені у таблиці 2, показали, що значення внутрішніх зусиль в стінових панелях та переміщення вузлів скінченно-елементної моделі у напрямку дії вітрового навантаження для двох варіантів з'єднання при дії двох сполучень навантажень значно відрізняються. Згинальні моменти, ортогональні осям  $X$  та  $Y$ , для жорсткого з'єднання елементів при двох сполученнях навантажень залишаються незмінними, а переміщення моделі у напрямку осі  $X$  при одночасній дії постійного і вітрового навантажень зросли майже втричі. Для елементів, які з'єднані шарнірно, згинальні моменти та переміщення для двох сполучень навантажень відрізняються. Дані результати свідчать про те, що у елементах, які з'єднані жорстко за просторовою схемою, як це показано на рис. 4,б, відбувається перерозподіл внутрішніх зусиль та деформацій і тому вплив вітрового навантаження, яке діє на будинок у межах норм є не суттєвим. При шарнірному з'єднанні кожний елемент включається в роботу окремо і просторова робота майже не впливає на загальний напружений стан стінових панелей.

Тому, з урахуванням зазначеного можна зробити висновок, що будівництво об'єктів промислового та цивільного призначення зі збірного залізобетону є більш економічним завдяки меншим витратам на армування елементів.

Рис. 4. Ізолінії згинальних моментів  $M_{xz}$ ,  $\text{кНм}$ :

- а) фрагмент стінової панелі для варіанту з'єднання елементів зі збірного залізобетону;  
 б) фрагмент стінової панелі для варіанту монолітного з'єднання залізобетонних виробів

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Баженов В.А., Перельмутер А.В., Шишов О.В.* Будівельна механіка. Комп'ютерна технологія: Підручник/ За заг. ред. д.т.н., проф. В.А.Баженова.-К.: Каравела, 2009. -696 с.
2. *Легостасв А.Д.* Метод скінченних елементів. Конспект лекцій.-К.:КНУБА, 2004.-112с.
3. *Чеверда П.П., Геращенко О.В., Мищенко О.О.* Дослідження динамічної реакції просторового каркасу висотної будівлі при дії сейсмічного навантаження. Сб. Опір матеріалів і теорія споруд. Вип.86.-Київ, КНУБА.-2010.-С.140-147.
4. *Чеверда П.П., Геращенко О.В.* Вплив дії сейсмічного навантаження на несучу здатність пальового ростверку житлового будинку. Сб. Опір матеріалів і теорія споруд. Вип.88.-Київ, КНУБА.-2011.-С.97-101.
5. *ДБН В.1.2-2:2006.* Навантаження і впливи. Норми проектування. Мінбуд України, 2006.

Стаття надійшла до редакції 21.12.2012 р.

*Cheverda P.P., Ivanchenko G.M., Kushnirenko M.G., Kozovenko A.M.*

### **АНАЛИЗ РЕАКЦИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СХЕМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ СОЕДИНЕНИЯ**

Выполнены исследования реакции стеновых панелей для двух вариантов пространственного их соединения с плитным фундаментным ростверком жилого дома при действии двух сочетаний нагрузок. Здание моделировалась как пространственный конечно-элементный каркас с элементами постоянной жесткости. Для отдельного пространственного узла с помощью программного комплекса SCAD исследовалось влияние способов соединения стеновых панелей с ростверком на несущую способность. Параметры напряженно-деформированного состояния определялись для варианта монолитного изготовления элементов дома и варианта пространственного соединения стеновых панелей из сборных элементов индустриального изготовления. Анализ исследования результатов показал, что значения внутренних усилий отличаются, поэтому строительство объектов промышленного и гражданского назначения из сборного железобетона является более экономичным, поскольку уменьшаются затраты на армирование элементов.

*Cheverda P.P., Ivanchenko G.M., Kushnirenko M.G., Kozovenko A.M.*

### **ANALYSIS OF REACTIONS IN THE ELEMENTS OF SPATIAL PATTERNS AT DIFFERENT BONDING TECHNIQUES**

Investigation of the reaction wall panels for two variants of spatial connection plate foundation raft house with two combinations of loads. The building is modeled as a spatial finite-element frame with constant stiffness characteristics. To separate spatial node using software package SCAD studied the effect of connection methods of wall panels with plate raft on their carrying capacity. Parameters of the stress-strain state determined for variant monolithic manufacturing building elements and variant spatial connection of wall panels with prefabricated elements of industrial production. Analysis showed that the values of internal forces are different, so the construction of industrial and civil use of precast concrete is more economical because of the reduced costs of reinforcement elements.