

О. В. ГРОМОВА (ДІПТ)

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ СТРУКТУРНОЇ СУМІСНОСТІ МАТЕРІАЛІВ СТАРОГО І НОВОГО БЕТОНІВ ПІД ЧАС РЕМОНТУ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД

Розглянуто застосування методу скінченноелементного аналізу програмного забезпечення «ANSYS» для вирішення питань, пов'язаних зі структурною сумісністю матеріалів основи споруди – старого бетону і ремонтного матеріалу – нового бетону з метою теоретичного обґрунтування процесів зчеплення під час ремонту транспортних споруд.

Рассмотрено применение метода конечно-элементного анализа программного обеспечения «ANSYS» для решения вопросов, связанных со структурной совместимостью материалов основания сооружения – старого бетона и ремонтного материала – нового бетона с целью теоретического обоснования процессов сцепления при ремонте транспортных сооружений.

The article considers application of the finite-element analysis method of the ANSYS software for solution of tasks related to structural compatibility of the materials in the basis of a building structure – the old concrete and repair material vs. the new concrete with the purpose of theoretical substantiation of the coupling processes in repair of transport constructions.

Під час ремонту транспортних споруд перед технологами та проектувальниками стоїть основна задача – досягти міцного і довговічного зчеплення ремонтного шару з основою споруди, що ремонтується. На сьогоднішній день інтенсивний розвиток комп'ютерних технологій дає змогу зазирнути у структуру матеріалів, досліджувати поведінку складних об'єктів під різними впливами тощо.

Процеси зчеплення і порушення цього зв'язку закриті для людського ока і залежать від багатьох факторів. Але за допомогою методів скінченно-елементного аналізу можна змоделювати процеси зчеплення і досліджувати як буде поводитися контактний шар під час різних впливів, різних співвідношеннях властивостей контактуючих матеріалів, прогнозувати довговічність і межу міцності контактної зони.

Програма ANSYS має можливості скінченно-елементного аналізу – від простого лінійного статичного до складного нелінійного динамічного (нестационарного) [1; 2]. Процедура типового розрахунку може бути розділена на три основних етапи:

- побудова моделі;
- додання навантажень (включаючи й граничні умови) і одержання рішення;
- перегляд й аналіз результатів.

Етап побудови моделі включає визначення типів скінченних елементів, їхніх констант, властивостей матеріалу й геометрії моделі.

Завдання типів елементів. Тип елемента визначає застосовність елемента до тієї або іншої області розрахунків (міцносний, тепловий, магнітний й електричний аналізи, рух рідини або зв'язані задачі), характерну форму елемента (лінійну, у вигляді бруска й т. д.), а також двовимірність (2-D) або тривимірність (3-D) елемента, як геометричного тіла.

Завдання констант елементів. Константи елемента – це властивості, специфічні для даного типу елемента, такі, як параметри поперечного перерізу балкового елемента.

Завдання властивостей матеріалів. Залежно від області додання властивості можуть бути лінійними, нелінійними й/або анізотропними. Лінійні властивості можуть залежати або не залежати від температури, бути ізотропними або ортотропними. Нелінійні співвідношення, такі, як криві деформування матеріалу для різних видів зміцнення, криві повзучості, опис гіперпружних властивостей, звичайно задаються у вигляді таблиці. Анізотропні властивості для пружних матеріалів задаються в матричному вигляді.

Створення геометричної моделі. Основною метою на етапі розробки геометричної моделі є створення адекватної кінцевоелементної моделі, що складається з вузлів й елементів. Під час створення скінченноелементної моделі використовуються два методи: твердотільне моделювання й пряма генерація сітки.

У першому випадку описуються геометричні границі моделі, потім програма бере на себе генерацію сітки з вузлами й елементами; розміри й форму елементів можна контролювати. У другому випадку «вручну» задається положення кожного вузла й здійснюється з'єднання елементів між собою.

На етапі додання навантажень й одержання рішення вибирається тип аналізу й встановлення його опцій, прикладаються навантаження, визначаються опції для вибору кроку по навантаженню й ініціюється рішення.

Тип аналізу вибирається на основі умов навантаження й реакції системи, що передбачається одержати. Так, наприклад, якщо потрібно знайти напруги в зоні контакту двох елементів, то варто вибрати статичний аналіз. У програмі ANSYS доступні такі види розрахунків: статичний (або стаціонарний), динамічний (або нестационарний), гармонійний, модальний, спектральний і розрахунок стійкості. Опції аналізу дають можливість уточнити параметри проведеного розрахунку.

Додання навантажень. Під навантаженнями розуміються як зовнішні й внутрішні зусилля, так і граничні умови у вигляді обмежень на переміщення. У програмі ANSYS навантаження розділені на шість категорій: обмеження степенів вільності, сили, поверхневі навантаження, об'ємні сили, інерційні навантаження, навантаження для зв'язаних задач.

Вказівка опцій для кроку навантаження. Опціями кроку навантаження є такі опції, які можуть бути змінені під час переходу від одного кроку навантаження до іншого: число кроків рішення, час закінчення кроку навантаження або вибір вихідних параметрів рішення.

Запуск на рахунок. По команді SOLVE програма звертається за інформацією про модель і навантаження до бази даних і виконує обчислення. Результати записуються в спеціальний файл й у базу даних.

Для перегляду результатів використовуються два постпроцесори програми ANSYS. Загальний постпроцесор використовується для аналізу результатів одного кроку рішення й забезпечує, серед іншого, одержання ліній рівня, картину деформованого стану, листінг результатів, оцінку похибки розрахунку, об'єднання розрахункових випадків, проведення обчислень на основі отриманих даних.

Постпроцесор процесу навантаження використовується для перегляду результатів у зазначених точках розрахункової моделі, на кожному кроці рішення можна одержати графік результатів як функцію часу, листінг результатів, виконати арифметичні й алгебраїчні обчислення.

Розробка математичної моделі тришарового зразка: випробування на вигин. Розрахункова схема випробування лабораторного зразка для дослідження структурної сумісності матеріалів старого і нового бетонів наведена на рис. 1.

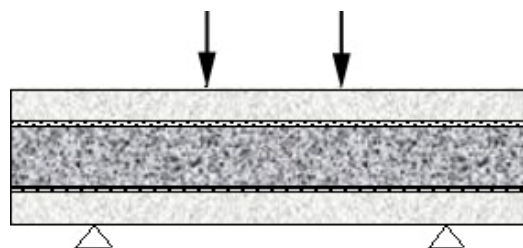


Рис. 1. Розрахункова схема випробування лабораторного зразка

Геометрична і кінцевоелементна моделі досліджуваного зразка розроблені в препроцесорі програми ANSYS.

Як базовий елемент вибраний кінцевий елемент SOLID65 моделюючий матеріал бетону. На рис. 2 наведена скінченноелементна модель тришарового зразка.

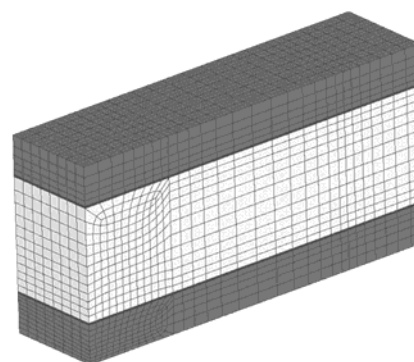


Рис. 2. Скінченноелементна модель досліджуваного зразка

Навантаження і закріплення. Навантаження, прикладене до вузлів скінченноелементної сітки у вигляді зосередженої сили, показане стрілками.

Граничні умови прийняті у вигляді заборони по лінії (показана пунктиром) переміщень по осі Y і умови симетрії по осях X і Z відповідно, як показано на рис. 3.

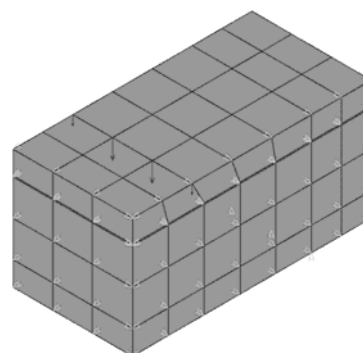


Рис. 3. Скінченноелементна модель з навантаженнями і граничними умовами

Завдання властивостей матеріалу бетону. Властивості матеріалів:

Для бетону, ANSYS вимагає завдання таких вхідних даних властивостей матеріалу: модуль пружності (E); межу одновісної міцності у разі стиску (R_{ct}); межа одновісної міцності у разі розтягу (R_p); коефіцієнт Пуассона (μ); коефіцієнт зсувних переміщень (β_f).

На рис. 4 і табл. 1 наведені значення залежності деформацій нового бетону від напруг.

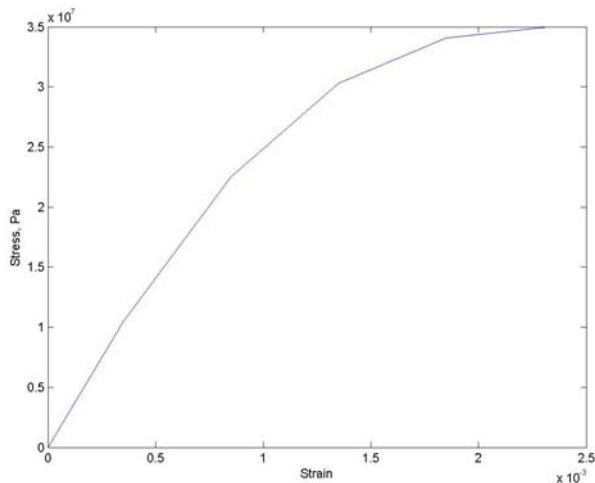


Рис. 4. Залежність деформацій нового бетону від напруг

Таблиця 1

Залежність деформацій нового бетону від напруг

№ кроку	1	2	3	4	5
Напруги, МПа	5,013	10,36	14,11	16,05	16,71
Деформації, $\times 10^{-4}$	2,6	6,0	9,5	13	17,3

Визначення параметрів старого бетону. На рис. 5 і табл. 2 наведені значення залежності деформацій старого бетону від напруг.

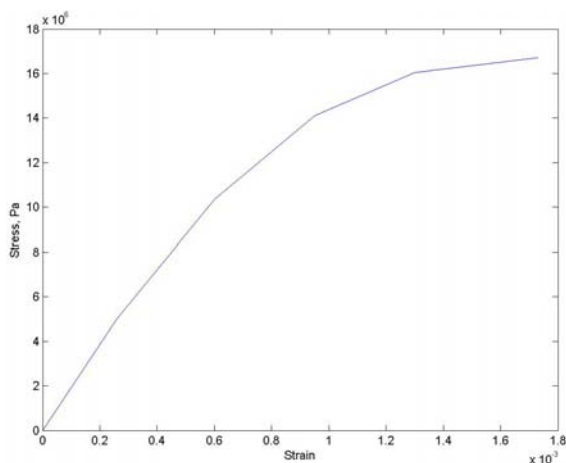


Рис. 5. Залежність деформацій старого бетону від напруг

Таблиця 2

Залежність деформацій старого бетону від напруг

№ кроку	1	2	3	4	5
Напруга, МПа	10,5	22,5	30,3	34,1	35
Деформації, $\times 10^{-4}$	3,5	8,5	13,5	18,5	23,3

Модель старого бетону має модуль пружності бетону $E = 30$ ГПа; значення межі міцності при стиску $R_{ct} \approx 35$ МПа; значення межі міцності на розтягу $R_p = 3,68$ МПа.

На рис. 6 наведена структура матеріалів моделі зразка.

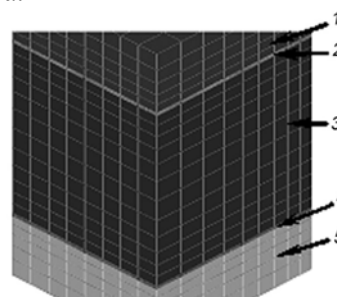


Рис. 6. Структурна схема матеріалів зразка: 1, 5 – ремонтний шар; 2, 4 – проміжний шар; 3 – старий бетон

У табл. 3 наведені значення пружних і нелінійних характеристик матеріалів бетону.

Вибір методу моделювання умов взаємодії багатошарових конструкцій. На першому етапі дослідження проведений вибір методу моделювання умов взаємодії шарів старого і нового бетонів під час прикладення навантаження.

Порівняльний аналіз різних умов взаємодії шарів нового і старого бетонів проведений за допомогою обчислювального експерименту.

Розробка математичної моделі і реалізація статичного структурного нелінійного аналізу проведена за допомогою програми ANSYS.

Особливості моделювання умов структурної сумісності за допомогою елемента зв'язку COMBIN40. Для моделювання умов взаємодії шарів старого і нового бетону протестований елемент зв'язку COMBIN40.

Елемент COMBIN40 комбінує паралельно властивості пружного зсуву і демпфірування, і приєднаного послідовно зазору. Маса може бути пов'язана з одними або обома центральними вузловими крапками. Елемент має один степінь вільності в кожному вузлі або центральний зсув, обертання, тиск і температуру. Маса, пружність, зсув, демпфер і зазор можуть бути видалені з елемента. Сполучний елемент показаний на рис. 7.

Таблиця значень пружних і нелінійних характеристик матеріалів бетону

№ матеріалу	Пружні характеристики	Бетон (CONC)	
1	$EX = 0,193E+11$	ShrCf-Op	0,2
	$NUXY = 0,2$	ShrCf-Cl	0,25
	$ALPX = 0,178E-04$	UnTensSt	$0,250E+07$
	$DENS = 2400,0$	UnCompSt	$0,150E+08$
2	$EX = 0,193E+11$	ShrCf-Op	0,2
	$NUXY = 0,2$	ShrCf-Cl	0,25
	$ALPX = 0,178E-04$	UnTensSt	$0,250E+07$
	$DENS = 2400,0$	UnCompSt	$0,150E+08$
3	$EX = 0,3E+11$	ShrCf-Op	0,2
	$NUXY = 0,2$	ShrCf-Cl	0,25
	$DENS = 2400,0$	UnTensSt	$0,368E+07$
		UnCompSt	$0,350E+08$
4	$EX = 0,193E+11$	ShrCf-Op	0,2
	$NUXY = 0,2$	ShrCf-Cl	0,25
	$DENS = 2400,0$	UnTensSt	$0,250E+07$
		UnCompSt	$0,150E+08$
5	$EX = 0,193E+11$	ShrCf-Op	0,2
	$NUXY = 0,2$	ShrCf-Cl	0,25
	$DENS = 2400,0$	UnTensSt	$0,250E+07$
		UnCompSt	$0,150E+08$

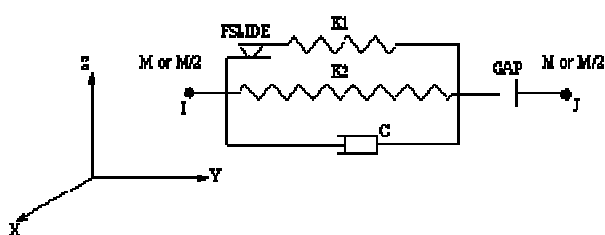


Рис. 7. COMBIN40 – сполучний елемент

Елемент визначається двома вузлами, двома пружними константами K_1 і K_2 (н/м) і коефіцієнт демпфування C (н \times с 2 /м) і маса M (н \times с 2 /м), і величина зазору GAP (м) або (радіани), і сила тертя (обмеження ковзання) $FSLIDE$ (н).

Моделювання умов структурної сумісності із завданням у приконтактному шарі умов контактної взаємодії. Для аналізу умов контактної взаємодії шарів двошарового бетонного зразка використані контактні елементи типу «поверхня-поверхня» наведені на рис. 8.

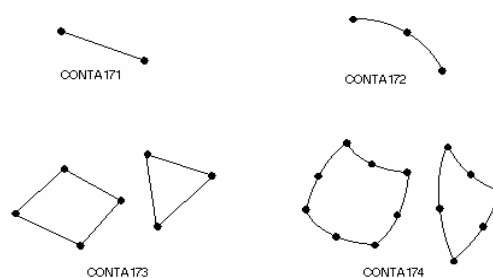


Рис. 8. Контактні елементи типу «поверхня-поверхня»

Задачі, що включають контакт між двома межами, одна межа визначається відповідно цільовою поверхнею, а інша як контактна поверхня. Ці дві поверхні разом складають «контактну пару». Використовування TARGE169 і CONTA171 або CONTA172 визначає 2-D контактну пару.

Для 3-D контактних пар, використовується TARGE170 з CONTA173 або CONTA174. Необхідно визначити вірогідність контакту, який може відбутися в процесі деформації моделі.

Виділивши потенційні контактні поверхні, визначимо на них контактні і цільові елементи, які потім відстежуватимуть кінематику процесу деформації. Цільові і контактні елементи, які утворюють контактні пари асоціюються з різними реальними константами для кожної поверхні, як показано на рис. 9.

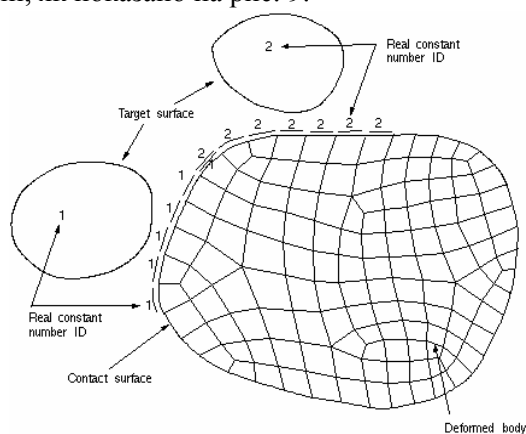


Рис. 9. Локалізація контактних зон

Контактні зони можуть бути довільні проте для ефективнішого вирішення (з погляду часу рішення) потрібно прагнути визначати контактні зони як можна трохи менше, але разом з тим треба бути впевненим, що всі зони контактна визначені. Різні контактні пари повинні бути визначені різними номерами реальних констант, навіть якщо реальні константи елементів однакові. Немає обмежень на кількість доступних поверхонь.

У нашій математичній моделі використовується пара контактних елементів CONTA170 – CONTA174. Завдання реальних констант і ключових опцій елементів. ANSYS використовує набір з 11 реальних констант і декілька визначальних опцій елементів для керування контактом у разі використання контактних елементів поверхня-поверхня.

Реальні константи. З 11 реальних констант, дві (R_1 і R_2) використовуються для визначення геометрії елементів цільової поверхні. Інші 9 використовуються для елементів контактної поверхні. Для реальних констант FKN, FTOLN, ICONT, PINB, PMAX, PMIN, і FKOP можна призначати як позитивні, так і негативні значення. ANSYS розпізнає позитивне значення як відносний масштабний коефіцієнт і визначає негативне значення як абсолютну величину. ANSYS використовує глибину прилеглих елементів як задане значення, яке необхідне для визначення значень ICONT, FTOLN, PINB, PMAX і PMIN.

Для прикладу, позитивне значення 0,1 для ICONT позначає початковий коефіцієнт замикання від 0,1 глибини прилеглого елемента як показано на рис. 10. У той же час негативне значення 0,1 позначає фактичну смугу регулювання в 0,1 одиниць вимірювання довжини.

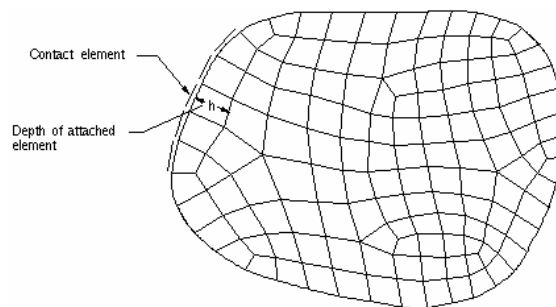


Рис. 10. Визначення глибини прилеглих елементів

Ключові опції елемента (Element Key Options). Кожен контактний елемент має декілька управляючих опцій. Ми рекомендуємо використовувати установки за умовчанням, які підходять для більшості контактних задач. Для більш спеціального застосування можна перевизначити установки.

Ключові опції елемента (KEYOPTS) дозволяють керувати багатьма параметрами контактної взаємодії:

- алгоритм розв'язування контактної задачі (penalty+Lagrange or penalty) (KEYOPT(2));
- (тільки для 2-D) напружений стан, коли використовуються суперелементи (KEYOPT(3));
- (тільки для контактних елементів низького порядку) положення точки визначення контакту (KEYOPT(4));
- вибір матриці жорсткості (KEYOPT(6));
- керування тимчасовим кроком (KEYOPT(7));
- ефект зовнішнього проникнення (KEYOPT(9));
- режим (поведінка) контактної поверхні (rough, bonded, etc.) (KEYOPT(12)).

Порівняльний аналіз напружено-деформованого стану тришарових зразків показав як якісну, так і кількісну збіжність результатів розрахунку при завданні умов контактної взаємодії (з коефіцієнтом тертя = 0) і взаємодії шарів через елемент зв'язку COMBIN40.

Висновок

На підставі проведеного аналізу і можливостей регулювання різних умов зв'язку контактних шарів старого і нового бетонів, розглянутих вище, елемент COMBIN40 може бути ефективно застосований для вирішення задач дослідження структурної сумісності матеріалів з різними фізико-механічними властивостями.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Програма ANSYS. Руководство пользователя / Пер. с англ. Идрисова. – Снежинск. – 1996. – 23 с.
2. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.

Надійшла до редколегії 05.05.2006 р.