

ЛЕКЦІЯ 3

Приклади застосування програмних засобів скінчено-елементного і скінчено-різницевого аналізу. Структурний аналіз пружньо-деформованого стану конструкцій, моделювання балочними, стрижньовими, трубчастими і суцільними елементами.

Плоска задача

Плоский напружений стан (Plane stress) - маються на увазі нульові напруження у напрямку осі Z . Така задача підходить для компонентів, у яких розмір по осі Z менший за розміри по осях X і Y . Деформація по осі Z у цьому випадку не дорівнює нулю. Можливе задання товщини (по осі Z). Використовується для конструкцій, типу плоских панелей, які навантажені у площині (рис. 4), або тонкостінних дисків під тиском або відцентровим навантаженням.

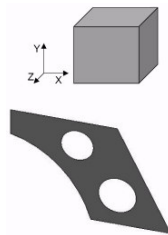


Рисунок 4 - Приклад пластини, яка може розглядатися у плоскому напруженому стані

Плоскі деформації (Plane strain) – маються на увазі нульові деформації у напрямку осі Z . Підходить для компонентів, у яких розмір по осі Z набагато більше розмірів по осях X і Y . У цій задачі напруження по осі Z не дорівнюють нулю. Використовується для довгих конструкцій з постійним поперечним перетином типу балок (рис.5).

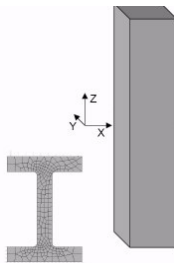


Рисунок 5 - Приклад бруса, який підходить для аналізу плоскої деформації

Осесиметричний елемент (Axisymmetry) – мається на увазі, що 3-D модель та її навантаження можуть бути створені шляхом обертання 2-D перетину на 360° навколо осі Y . Вісь симетрії повинна збігатися з віссю Y глобальної системи координат. Від'ємні значення координат X не допускаються. Напрямок Y - осьовий, напрям X - радіальний, напрям Z - окружний.

Окружні переміщення дорівнюють нулю; окружні напруження і деформації звичайно дуже важливі. Використовується для судин під тиском (рис. 6), прямолінійних труб, валів і т.д.

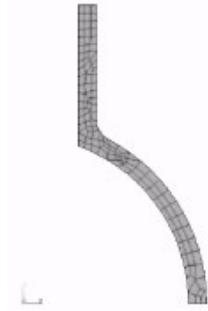


Рисунок 6 - Приклад осесиметричної моделі

Параметричне моделювання

APDL - походить від *ANSYS Parametric Design Language* (мова параметричного моделювання ANSYS), це мова сценаріїв, що дозволяє параметризувати моделі і автоматизувати найзагальніші задачі. Використовуючи APDL, можна:

- 1) вводити розміри моделі, властивості матеріалів і т.д.;
- 2) у термінах параметрів, а не числами одержувати інформацію з бази даних ANSYS, таку, як координати вузлів, максимальні напруження і т.д.;
- 3) виконувати математичні операції над параметрами, включаючи векторні і матричні операції;
- 4) визначати аббревіатури (скорочення) для часто використовуваних команд або макросів;
- 5) створювати макроси для виконання послідовності дій з використанням умовних переходів (if-then-else), циклів (do-loop), які призначені для введень користувача.

Для визначення параметра використовується формат

Name=Value (Имя=Значение).

Це може бути набрано у вікні введення або в діалозі **Scalar Parameters** (Скалярні параметри) (**Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters...**)

Ім'я параметра – буквено-цифрове позначення завдовжки до 8 символів. Значенням може бути: число, раніше введений параметр, математична функція, параметричний вираз або буквенний рядок (рис.7).

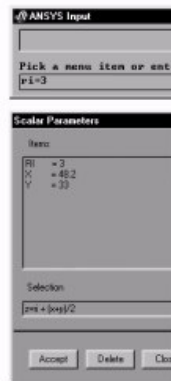


Рисунок 7 - Вікно для введення скалярних параметрів

Вище розглядалися *скалярні параметри*, які мають єдине значення або числове, або рядкове. ANSYS також підтримує *масиви (array parameters)* - це параметри, які містять в собі множину значень. Доступні числові і рядкові масиви.

Для отримання інформації з бази даних і передачі її параметра використовується команда ***GET** або **Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data...** (рис. 8).



Рисунок 8 - Вікно для отримання параметрів із бази даних

Вирішувачі

Призначення *вирішувача (solver)* – розв’язання системи лінійних сумісних рівнянь, які описують ступені вільності системи. Час розв’язання може бути від декількох секунд до декількох годин залежно від розміру моделі і швидкодії комп’ютера. Для лінійного статичного аналізу з одним кроком навантаження потрібне тільки одне таке розв’язання, тоді як для нелінійного або динамічного аналізів можуть бути потрібні десятки, сотні і навіть тисячі таких розв’язань. Тому тип вирішувача, який буде вибрано, дуже важливий. Доступні в ANSYS вирішувачі можуть бути зведені до двох типів:

- 1) *прямі (Direct elimination)* вирішувачі:
 - Frontal;
 - і Sparse;
- 2) *ітераційні (Iterative)* вирішувачі:
 - PCG (Pre-conditioned Conjugate Gradient);
 - ICCG (Incomplete Cholesky Conjugate Gradient);
 - JCG (Jacobi Conjugate Gradient).

Прямі вирішувачі розв’язують таким чином:

- 1) формулюються матриці окремих елементів;
- 2) прочитуються ступені вільності (DOF) для першого елемента;
- 3) виключаються будь-які DOF, які мають відоме значення, або які можуть бути виражені у термінах інших DOF, потім рівняння записується у файл з розширенням .tri. DOF, які залишилися, складають ширину фронту (wavefront);
- 4) повторюються кроки 2 і 3 для всіх елементів, поки не буде виключено всі DOF. Тоді файл з розширенням .tri буде містити в собі трикутну матрицю (triangularized matrix);
- 5) рішення за DOF знаходиться зворотною підстановкою (back substitution), потім використовуються матриці елементів для обчислення результатів в елементах.

Ширина фронту (wavefront - числа DOF, які не можуть бути виключені в процесі триангуляції. Вона збільшується і зменшується в процесі розв’язання і у результаті дорівнює нулю, коли вже виключено всі DOF. Ширина фронту прямо впливає на час розв’язання задачі: чим більше ця величина, тим довше час розв’язання. Переупорядкування елементів — вибір певного порядку, в якому елементи оброблятимуться вирішувачем, — може зменшити ширину фронту. ANSYS автоматично виконує переупорядкування елементів перед початком розв’язання.

Ітераційні вирішувачі одержують розв’язання таким чином:

- 1) формулюються матриці окремих елементів;
- 2) збирається глобальна матриця жорсткості;
- 3) на початку розв’язання беруться нульові значення для всіх DOF, і ітерації тривають до отримання збіжності (базуючись на заданому допуску залишкової сили);
- 4) використовуються матриці елементів для обчислення результатів в елементах.

Головна відмінність між ітераційними вирішувачами в ANSYS — PCG, JCG, ICCG — тип методу попереднього формування глобальної матриці.

Спеціальні можливості отримання результатів розрахунку

Запит вказівкою (Query picking) дозволяє досліджувати в моделі напруження, переміщення або інші результати у зазначеному місці. За допомогою цього методу також можна швидко знайти в моделі місця максимуму і мінімуму величини, яка вивчається.

Доступно тільки в інтерактивному режимі (команди немає):

General Postproc > Query Results > Nodal або Element або Subgrid Solu...

Виберіть величину і натисніть **OK** (рис. 9).

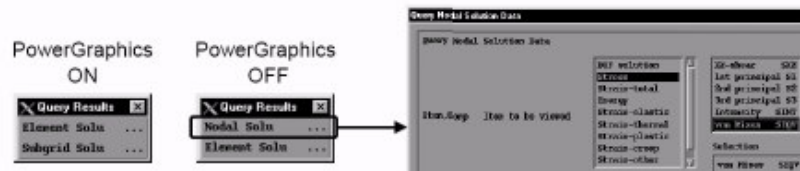


Рисунок 9 - Отримання даних розрахунку за допомогою Query Results

Потім вкажіть будь-яку точку в моделі для перегляду значень результатів у цій точці. Кнопки **Min** і **Max** показуватимуть значення в точках мінімуму і максимуму. Використовуйте кнопку **Reset** для очищення екрана перед повторним вибором. Зазначте, що номер об'єкта, його координати і значення результату показані в меню вказівки.

Інший спосіб перегляду результатів дії з траєкторією (Path operations), - який дозволяє:

- аналізувати результати уздовж довільної траєкторії на моделі;
- виконувати математичні операції уздовж траєкторії, включаючи інтеграцію і диференціювання;

- виводити зображення, які відображають зміну результатів уздовж траєкторії.

Доступно тільки для моделей, які містять 2-D або 3-D об'ємні або оболонкові елементи.

Три кроки для створення зображення уздовж траєкторії:

- визначення траєкторії;
- визначення даних уздовж траєкторії;
- відображення даних.

1. Визначення траєкторії. Потрібна така інформація:

- точки, які визначають траєкторію (від 2 до 1000);
- вузли або координати на робочій площині;
- кривина траєкторії, яка визначається у активній системі координат (CSYS);
- ім'я траєкторії.

Активізуйте потрібну систему координат (CSYS).

General Postproc > Path Operations > Define Path > By Nodes або On Working Plane

Вкажіть вузли або координати робочої площини (WP), яка визначає необхідну траєкторію і натисніть кнопку **OK**. Введіть ім'я траєкторії. Значення полів **nSets** і **nDiv** здебільшого випадків краще за все залишати без зміни.

2. Визначення даних уздовж траєкторії

General Postproc > Path Operations > Map onto Path... (або команда **PDEF**)

Виберіть потрібну величину, наприклад, **SX**. Введіть мітку для величини, яка використовуватиметься в зображеннях і лістингу. Тепер можна відобразити траєкторію, якщо це необхідно.

General Postproc > Path Operations > Plot Paths

(або використовуйте команду **/PBC,PATH,1** разом з командами **NPLOT** або **EPLOT**)

3. Відображення даних

Можна відображати величини уздовж траєкторії або у вигляді графіка:

PLPATH або **General Postproc > Path Operations > On Graph...**

або уздовж геометрії траєкторії:

PLPAGM або **General Postproc > Path Operations > On Geometry...**

Визначення похибок розрахунку

У скінченно-елементному розв'язанні напруження обчислюються на по-елементній основі, тобто напруження окремо розраховуються в кожному елементі. Проте при відображенні вузлових напружень в **POST1** відображаються згладжені кольорові контури, тому що напруження усереднюються у вузлах. Якщо відображаються елементні рішення, то виводяться усереднені дані і на зображеннях видно розриви кольорових контурів на межах елементів.

Відмінність між усередненими і неусередненими напруженнями свідчить про якість сітки. На основі цього будуються оцінки похибки (*error estimation*) (рис. 10).

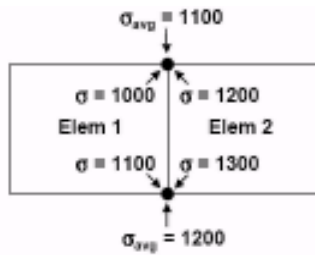


Рисунок 10 - Оцінка похибки

Оцінка похибки доступна тільки в POST1 і лише для:

- лінійного статичного аналізу міцності;
- об'ємних (2-D і 3-D) і оболонкових елементів;
- графічного режиму **Full graphics** (не **PowerGraphics**);

Якщо не забезпечуються ці умови, ANSYS автоматично відключає оцінку похибки.

Для включення/відключення оцінки похибки використовуйте **ERNORM.ON/OFF** або **General Postproc > Options for Outp.**

POST1 обчислює такі величини похибки. Структурний аналіз:

- percentage error in energy norm (SEPC) (відсоток похибки у нормі енергії);
- element stress deviations (SDSG) (відхилення напружень в елементі);
- element energy error (SERR) (похибка енергії елемента);

max і min межі напружень (SMXB, SMNB).

Відсоток похибки у нормі енергії (SEPC) - приблизна оцінка похибки напружень (або переміщень) у вибраному наборі елементів. Може використовуватися для порівняння подібних моделей структур з подібними навантаженнями. **SEPC** - відображається у легенді при зображенні деформованого стану. Її значення можна також переглянути за допомогою команди **PRERR** або **GeneralPostproc > List Results > Percent Error**.

На практиці необхідно прагнути, щоб значення **SEPC** не перевищувало 10%. Якщо воно вище, тоді визначте точки сингулярності напружень (навантаження/закріплення в точках) і виключіть елементи в їх околі. Якщо все одно похибка вище, відобразіть зображення похибки енергії елемента. Елементи з високим рівнем похибки енергії - кандидати на покращання сітки (рис. 11).



Рисунок 11 - Приклад оцінки похибки SEPC

Відхилення напружень в елементі (SDSG) - величина, яка показує, наскільки напруження в елементах не збігаються з усередненими напруженнями в їх вузлах. **SDSG** можна відобразити у вигляді кольорових контурів за допомогою **PLESOL.SDSG** або **General Postproc > Plot Results > Element Solu...**

Великі значення похибки **SDSG** є не обов'язково негативним фактом, особливо якщо це є малий відсоток від номінальних напружень у структурі. Наприклад, в цій моделі (рис. 12) відхилення напружень у потрібній зоні становить лише 1.5%.

Похибка енергії елемента (SERR) - енергія, яка пов'язана з невідповідністю напружень у вузлах елемента. Це базова величина, з якої розраховується решта оцінок похибки. **SERR** має розмірність енергії. Для відображення **SERR** у вигляді кольорових

контурів використовуйте команду **PLESOL.SERR** або **General Postproc > Plot Results > Element Solu...**

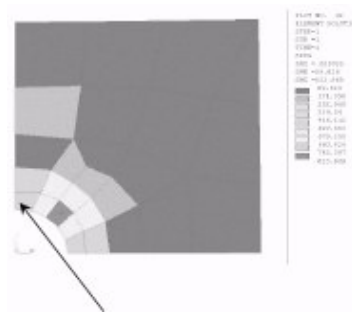


Рисунок 12 - Оцінка похибки SDSG

Звичайно, елементи з високим рівнем похибки **SERR** – кандидати на поліпшення сітки. Проте оскільки величина **SERR** буде завжди найбільшою в зонах сингулярності напружень, то спочатку виключіть ці елементи.

Межі напружень (SMXB і SMNB). Межі напружень можуть допомогти визначити потенційний вплив похибки дискретизації сітки на величину максимального напруження. Вони відображаються у легенді кольорових зображень напружень як **SMXB** (верхня межа) і **SMNB** (нижня межа). Ці межі не оцінюють дійсні максимуми і мінімуми, але визначають доверительну область. Без інших додаткових перевірок немає підстав довіряти тому, що істинний максимум напружень буде нижчим за **SMXB**. Попередження: якщо не виключені елементи поблизу зон сингулярності напружень, використання меж напружень немає сенсу, як показано на рисунку 13.

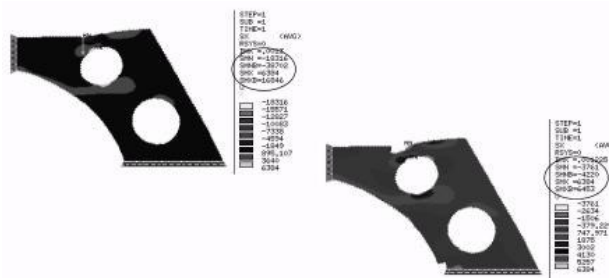


Рисунок 13 - Оцінка меж напружень