

ТЕМА 11. Моделювання життєвого циклу конструкцій

1. Моделювання процесу навантаження елементів.
2. Моделювання процесу зведення конструкції.
3. Комп'ютерне моделювання життєвого циклу конструкції.

1. Вирішуючи фізично нелінійні завдання кроковим методом, який часто ідентифікують як метод послідовних навантажень, по суті, можна організувати моделювання процесу навантаження конструкції. Дійсно, в цьому випадку навантаження прикладається частинами, а на кожному кроці змінюються характеристики жорсткості системи.

З позицій інженерів, що проектують будівельні конструкції, найбільший інтерес викликає врахування фізичної нелінійності при розрахунку залізобетонних конструкцій. Це пояснюється тим, що з одного боку це найбільш поширений тип конструкцій, з іншого боку, нелінійна залежність між напруженнями і переміщеннями проявляється вже на ранніх стадіях навантаження.

Широко відомий факт, що для залізобетонних плит, що згинаються, і балок прогин при експлуатаційному навантаженні в 3-4 рази перевищує отриманий з лінійно-пружного розрахунку.

Для прикладу розглянемо просту конструкцію – однопролітну затиснену по кінцях балку під рівномірно розподілене навантаження (рис. 21.1).

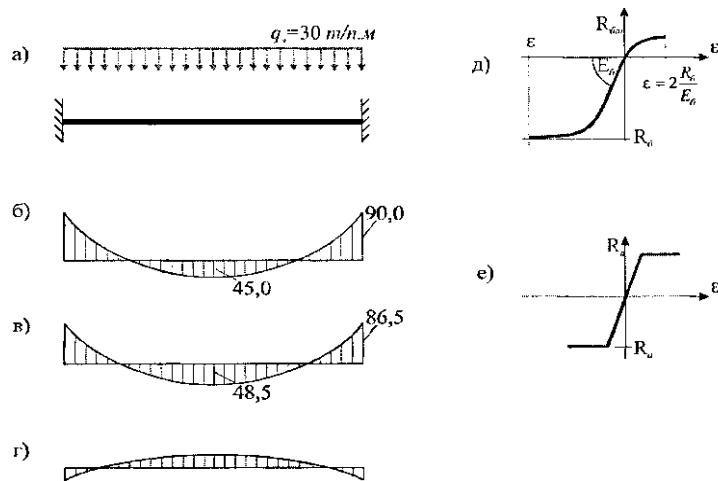


Рисунок 21.1 – Модель процесу навантаження балки

Спочатку балка працює як лінійно пружна, потім з'являються тріщини у опор, потім з'являються тріщини в прольоті, прогини нелінійно наростають, конструкція міняє свою розрахункову схему пристосовуючись до збільшеного навантаження (бетон добре працює на стиск, тому конструкція знаходить додаткові резерви у вигляді додаткової конструктивної схеми стиснутої арки, а також за рахунок збільшення граничного моменту і за рахунок наявності стискуючої сили). В опорних перерізах балки утворюються пластичні шарніри, проте вона продовжує працювати як шарнірно оперта балка + арка за рахунок того, що несуча здатність пролітних перерізів ще не вичерпана. При збільшенні навантаження в пролітних перерізах балки утворюються пластичні шарніри, конструкція перетворюється на механізм, переміщення необмежено наростає, що може свідчити про руйнування конструкції.

Навіть по такому простому прикладу можна судити наскільки убогою виглядає інформація, отримана на основі лінійно-пружного розрахунку (по суті, вона обмежується тільки знанням про епюру моментів – рис. 21.1, б) в порівнянні з інформацією, отриманою на основі комп'ютерного моделювання процесу навантаження у фізично нелінійній постановці.

Для пластинчатих залізобетонних конструкцій моделювання процесу навантаження пов'язане з врахуванням початкової ортотропії, обумовленої розташуванням арматури і подальшої анізотропії, обумовленої появою тріщин.

Використовуючи основні положення викладеної методики комп'ютерного моделювання залізобетонних конструкцій можна організувати комп'ютерне моделювання для конструкцій з інших матеріалів (метал, пластмаси, ґрунт), звичайно, якщо будуть відомі залежності між напруженнями (зусиллями) і деформаціями (переміщеннями). Звичайно, комп'ютерне моделювання процесу навантаження пов'язано з введенням ряду гіпотез і допущень. Це в першу чергу: гіпотеза про активне навантаження; перенесення параметрів нелінійних залежностей для одновісного напруженого стану на залежності між еквівалентним

напруженням і деформаціями; нехтування порушенням цілісності (прийняття розташування тріщин настільки частим, щоб їх можна було б віднести до мікромасштабу) та ін.

В той же час, можна привести ряд аргументів на користь можливості застосування комп'ютерного моделювання вже зараз у рамках наявного інструментарію:

1) більшість прийнятих гіпотез мають такий же порядок погрешностей, що і загальноприйняті допущення, пов'язані з ідеалізацією геометрії, навантажень, фізико-механічних властивостей матеріалу;

2) подальші досягнення в області експериментального вивчення фізико-механічних властивостей матеріалу в області вдосконалення математичних методів, алгоритмів і програмних реалізацій, безумовно, пом'якшуватимуть раніше прийняті допущення і розвиватимуть рамки правомірності комп'ютерного моделювання процесу навантаження;

3) комп'ютерне моделювання процесу навантаження дає величезну кількість цікавої і корисної інформації, яка представляє інтерес для роздумів про дійсну роботу конструкції (зняття піків напружень і зусиль, перерозподіл зусиль, підвищення деформівності, ефекти пристосовності та багато ін.), значення якої просто важко переоцінити.

2. Для сучасних складних споруд (мости, балки, великопролітні покриття, висотні будівлі та ін.), як правило, конструктивна схема обумовлюється не лише експлуатаційною стадією, але і стадією зведення. В процесі зведення конструктивна схема споруди може багаторазово змінюватися, зусилля і переміщення «заморожуватися», визначаючи перерізи елементів і конструкції вузлів саме на цій стадії.

Класичний приклад впливу стадії навантаження на НДС експлуатаційної стадії приведено на рис. 21.2. На трьохпролітну балку прикладено монтажне і експлуатаційне навантаження. Епюра моментів і величина прогину в середині середнього прольоту у випадку, якщо усі навантаження прикладено на остаточну (експлуатаційна стадія) схему, представлена на рис. 21.2, б).

Якщо балка зводиться методом навішування (метод іноді застосовується в практиці мостобудування), тобто на середні опори симетрично навішуються пролітні елементи і спираються на крайні опори, то перед замиканням середнього прольоту епюра моментів і прогин в середині матимуть вигляд, представлений на рис. 21.2, в). Зведена таким чином конструкція працюватиме як трьохпролітна балка тільки на експлуатаційне навантаження. Дійсна епюра моментів є сумарною епюрою від монтажного навантаження для консольної схеми (рис. 21.2, в) і експлуатаційного навантаження для пролітної балки (рис. 21.2, г) матиме вигляд представлений на рис. 21.2, д). Як видно, ця епюра сильно відрізняється від епюри

рис. 21.2, б), отриманої без врахування впливу способу зведення конструкції: опорні моменти в 1,5 разів більші, а прогин в середині в 1,3.

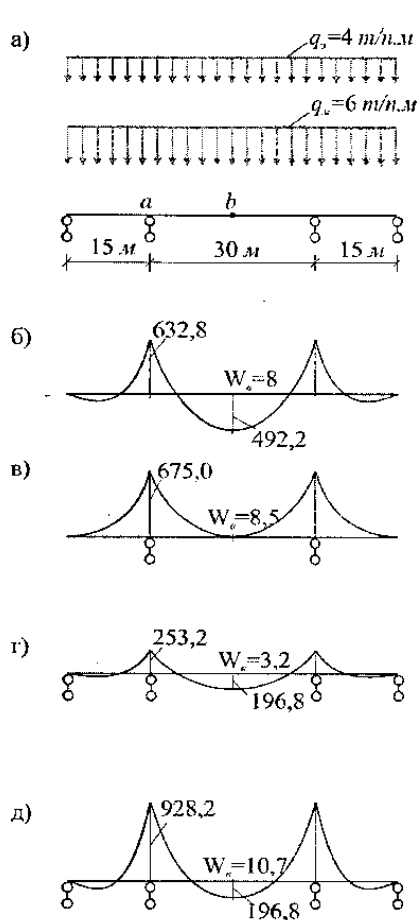


Рисунок 21.2 –
Моделювання процесу
зведення багатопрілітної
балки

Моделювання процесу зведення набуває важливого значення для конструкцій висотних будівель з монолітного залізобетону, оскільки виготовлення монолітних конструкцій пов'язане з установкою тимчасових опор, які істотно змінюють конструктивну схему будівлі на етапах зведення.

Характерна організація комп'ютерного моделювання процесу зведення конструкцій висотних будівель реалізована в спеціалізованому процесорі МОНТАЖ+ у складі ПК ЛІРА.

У цьому процесорі окрім врахування конструктивної схеми несучих конструкцій враховуються процеси зняття і установки тимчасових опор, прикладання і зняття монтажних навантажень, можливої тимчасової зниженої міцності і жорсткості бетону, обумовленої тимчасовим недобором 28-денної міцності бетонної суміші або її тимчасовим замерзанням.

Послідовність моделювання процесу зведення:

- 1) задається конструктивна схема усього об'єкту, тобто описуються усі елементи, включаючи як основні несучі елементи об'єкту (колони, балки, плити, діафрагми), так і тимчасові елементи (елементи опалубки, стійки підмостків та ін.);
- 2) для кожного етапу зведення описуються усі конструктивні елементи, які зведені на момент цього етапу, тимчасові опори, які присутні на цьому етапі, а також опори, які демонтуються на цьому етапі;
- 3) для кожного етапу задаються навантаження (власна вага, монтажні навантаження), які діють на цьому етапі, а також при необхідності понижуючий коефіцієнт міцності бетону.

Початкові дані для останнього етапу відповідають експлуатаційній стадії об'єкту, тобто стадії, коли об'єкт повністю зведений, прибрані тимчасові опори, набрана експлуатаційна міцність бетону, діють експлуатаційні навантаження (власна вага, вітер, сніг, корисні навантаження).

На кожному етапі зведення об'єкту відбувається розрахунок відповідної конструктивної схеми на власну вагу і монтажні навантаження з урахуванням наявних, знятих або доданих тимчасових опор.

Подальший розрахунок на розрахункові поєднання експлуатаційних навантажень (сніг, вітер, власна вага покрівлі) виконуються не з «нульового» НДС змонтованої конструкції, а з НДС відповідного останній стадії монтажу.

Схематично організація комп'ютерного моделювання процесу зведення однопрілітної триповерхової рами представлена на рис. 21.3.

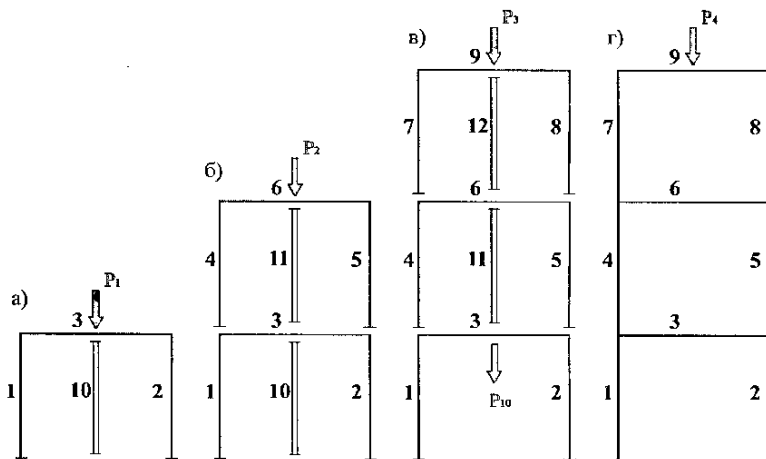


Рисунок 21.3 – Моделювання процесу зведення багатопверхової рами

Перша стадія монтажу (рис. 21.3, а) – змонтовані елементи першого поверху 1, 2, 3 і стійка опалубки 10. Узагальнене навантаження P_1 – власна вага змонтованих конструкцій разом з монтажним навантаженням, відповідним цьому етапу зведення. В результаті розрахунку окрім усіх параметрів НДС визначається арматура в перерізі елементів 1, 2, 3 з урахуванням зниженої міцності бетону, наприклад $K_1=0,3$.

Друга стадія монтажу (рис. 21.3, б) – окрім елементів першого поверху додатково зведені елементи другого поверху 4, 5, 6 і встановлена додаткова тимчасова стійка 11. Навантаження P_2 – власна вага знову зведених конструкцій + монтажне навантаження на цьому поверсі. Зусилля в елементах відповідні навантаженню P_2 підсумовуються із зафіксованими зусиллями в елементах присутніх на етапі 1 від навантаження P_1 . По знайдених зусиллях визначається арматура в усіх елементах 1, 2, 3, 4, 5, 6 з урахуванням неповної міцності бетону, яка може бути різною для різних елементів. Наприклад, для зведених на другому етапі (елементи 4, 5, 6) $K_2=0,3$, а для зведених на першому етапі (елементи 1, 2, 3) $K_1=0,6$.

Третя стадія монтажу (рис. 21.3, в) – окрім елементів перших двох поверхів 1, 2, 3, 4, 5, 6 зведені елементи третього поверху 7, 8, 9, встановлена додаткова тимчасова стійка 12, тимчасова стійка 11 залишена, а тимчасова стійка 10 видалена. Навантаження P_3 – власна вага знову зведених конструкцій разом з монтажним навантаженням на цьому етапі. Видалення тимчасової стійки моделюється додаванням сили P_{10} рівної зусиллю в прибраній стійці.

Накопичення зусиль в елементах на цьому етапі аналогічно другому етапу, тобто для раніше зведених елементів 1-6 відбувається підсумовування зафіксованих зусиль на попередньому другому етапі зі знову отриманими зусиллями на третьому етапі.

По знайдених зусиллях визначається арматура в усіх елементах 1-9 з урахуванням зниженої міцності бетону на цьому етапі, наприклад, $K_3=0,3$, $K_2=0,6$, $K_1=0,8$.

Експлуатаційна стадія (рис. 21.3, г) – на цій стадії розрахункова схема відповідає проектній. Процедура видалення усіх тимчасових стійок виконується аналогічно видаленню стійки 10 на третьому етапі. Узагальнене навантаження P_4 включає усі корисні навантаження і додаткові постійні навантаження, за винятком навантажень від власної ваги, включених в навантаження P_1 , P_2 , P_3 , зусилля від яких зафіксовані на попередніх етапах розрахунку. Міцність бетону на цій стадії може прийматися відповідно до класу бетону або бути дещо зниженою, оскільки заморожування бетонної суміші в процесі монтажу може понизити остаточну міцність бетону.

3. Викладені вище методи комп'ютерного моделювання процесів зведення та навантаження конструкцій дозволяють судити про можливості моделювання (поки що дещо схематичного) життєвого циклу конструкцій. Схема такого моделювання представлена на рис. 21.4.

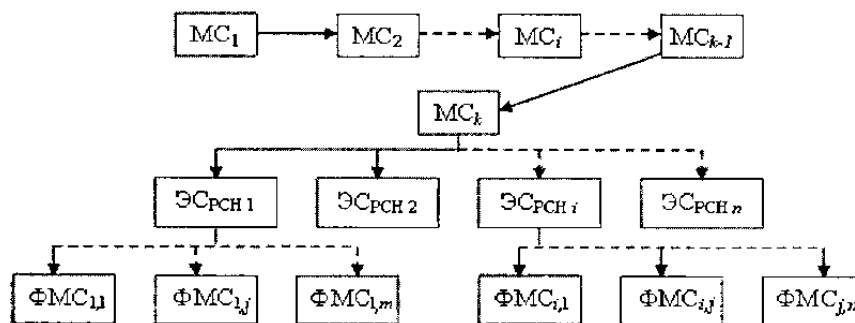


Рисунок 21.4 – Схема моделювання життєвого циклу конструкцій

Введені наступні позначення:

МС – монтажна стадія, загальна кількість k .

ЕС – експлуатаційна стадія, загальна кількість n .

ФМС – форс-мажорні стадії (під такими ситуаціями мається на увазі раптовий вихід з ладу відповідальних несучих елементів), загальна кількість m .

Монтажні стадії послідовно змінюють одна одну і відповідають послідовності зведення конструкції. Остання k -а стадія відповідає зведеній конструкції і її НДС «пам'ятає» усю інформацію послідовності зведення, пов'язану із змінами конструктивної схеми, прикладанням і зняттям монтажних навантажень і т.п.

Стадія МСк є стартовою для розрахунку на експлуатаційні навантаження. НДС на експлуатаційних стадіях визначається розрахунком на різні поєднання навантажень. Деякі експлуатаційні стадії у свою чергу є стартовими для моделювання форс-мажорних ситуацій.

Звичайно, таке моделювання, навіть з урахуванням все зростаючих можливостей сучасної обчислювальної техніки, є громіздким. Виконується велика кількість розрахунків різних конструктивних схем, кожен з них, як правило, потрібно проводити у фізично і геометрично нелінійній постановці. Особливо це стосується форс-мажорних ситуацій, коли необхідно визначати додаткові резерви здатності несучої конструкції не допустити прогресуючого руйнування при мінімальних додаткових витратах матеріалів. Крім того, визначення НДС конструкції на експлуатаційних стадіях повинно враховувати часові зміни властивостей реологій матеріалу (усадка, повзучість та ін.), що також обумовлює необхідність проведення розрахунку в нелінійній постановці.

Програмні комплекси, які дозволяють проводити комп'ютерне моделювання процесів зведення та навантаження, проводити розрахунки фізично і геометрично нелінійній постановці, вже підійшли до вирішення цієї проблеми. Ну і звичайно, програмні комплекси, орієнтовані на моделювання життєвого циклу конструкцій, повинні мати зручний і розвинений моніторинг, що дозволяє в автоматичному режимі відстежувати поведінку конструкції на всіх стадіях і видавати інформацію про ті стадії, які є визначальними для перерізів того або іншого елемента.