Міністерство освіти та науки України
Вінницький національний технічний університет

А. С. Моргун, І. М. Меть

ДИНАМІКА ТА СТІЙКІСТЬ СПОРУД

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2021

УДК 681.3.06:69
М79

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 13 від 29.04.2021 р.)

Рецензенти:
М. М. Сорока, кандидат технічних наук, професор, ОДАБА
В. М. Михалевич, доктор технічних наук, професор
М. Ф. Друкований, доктор технічних наук, професор

Моргун, А. С.

М79 Динаміка та стійкість споруд : навчальний посібник / А. С. Моргун, І. М. Меть. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 75 с.

ISBN 978-966-641-853-4

Навчальний посібник містить класичні методи розрахунку стержневих систем на стійкість та на динамічні вібраційні дії. В ньому також викладено основи МСЕ та уявлення про математичне опрацювання реальних прикладних задач будівництва. Розділи супроводжуються прикладами розв’язання типових задач. Розглянутим темам передують короткі теоретичні відомості.

Посібник призначений для студентів вищих технічних закладів, фахівців у галузі механіки суцільних середовищ та будівельної механіки .

УДК 681.3.06:69

ISBN 978-966-641-853-4

© ВНТУ, 2021

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ 4
ВСТУП 5
РОЗДІЛ 1 ДИНАМІКА СПОРУД 6
1.1 Види подання деформацій 6
1.2 Види динамічних навантажень 8
1.3 Суть динамічного розрахунку. Динамічна розрахункова схема. Число динамічних ступеней вільності. Методи проведення динамічного розрахунку 10
1.4 Система з одним ступенем вільності $n_{дин}$ =1. Вільні затухаючі коливання 13
1.5 Вільні незатухаючі коливання 16
1.6 Вимушені коливання без урахування сили опору F 17
1.7 Вільні коливання системи з декількома ступенями вільності $n = n_{динам}$ 18
1.8 Розрахунок на ударне динамічне навантаження 21
1.9 Динамічний розрахунок статично невизначеної рами на вільні та вимушені коливання від дії гармонійного навантаження 25
1.9.1 Послідовність розрахунку на вільні коливання 26
1.9.2. Динамічний розрахунок на вимушені коливання 32
1.10 Заходи боротьби з вібраційними впливами 38
1.10.1 Способи зменшення резонансних впливів 38

РОЗДІЛ 2 СТІЙКІСТЬ СПОРУД 42
2.1 Поняття критичної сили. Методи розв'язання задач на стійкість 42
2.2 Стійкість прямих центрально стиснених стержнів 45
2.3 Стійкість прямого центрально стисненого стержня з пружнопіддатливою опорою 50
2.4 Визначення стійкості статично невизначеної рами з залученням методу переміщень 52
РОЗДІЛ 3 МЕТОД СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ 61
3.1 Постановка задач будівельної механіки. Локальний метод. Інтегральний метод 61
3.2 Основи МСЕ. Приклад розрахунку 63
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 73

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

Г	– границя досліджуваного елемента
ДБН	– державні будівельні норми
МСЕ	– метод скінченних елементів
МГЕ	– метод граничних елементів
НДС	– напружено-деформований стан
СЕ	– скінченний елемент
САПР	– системи автоматизованого проектування
СЛАР	– система лінійних алгебраїчних рівнянь
ОС	– основна система

ВСТУП

Матеріали – кості тварин, деревина рослин – мають деякі граничні несучі спроможності, які не можеть бути перевищені. Величина об'єкта обумовлюється зусиллями і напруженнями, які можуть витримати його скелет, а також деформаціями, які не можуть бути платнею за функціювання організму чи цілісність об'єкта.

Приблизно так звучать фундаментальні висновки про живу і неживу природу, зроблені з інженерних позицій близько 5 століть тому [21].

Після цього було відкриття Гука – новий ключ до пояснень природи твердих тіл. Вони пружні, стійко опираються зовнішнім впливам, їм властиві особливості поведінки.

В XVIII– XIX століттях був стрімкий розвиток науки. Якісно новою формою її розвитку стало диференціальне та інтегральне числення – форма абстрактного наукового мислення.

Будівництво – одна із провідних галузей народного господарства в історичному аспекті його розвитку. Успішне спорудження будівель промислового призначення, висотних споруд цивільного призначення, резервуарів та інших споруд потребує більш глибокого проникнення в таємниці неживої природи, постійного розвитку основ механіки за дії як сталих, так і динамічних навантажень.

1 $м^3$ води важить 1 т, 1 $м^3$ сталі має масу в 8 раз більшу. Повітря, яке майже без тіла, може бути носієм колосальної кінетичної енергії, яка на своєму шляху залишає багаточисленні руйнування створених людиною споруд, несучі конструкції яких насамперед призначаються для витримування сталого гравітаційного вертикального навантаження.

Питання висотного будівництва тісно пов'язані із їх стійкістю, з динамічними та сейсмічноми впливами і мають значну економічну та соціальну складові.

Сейсмічні впливи є одними із найсильніших в плані руйнування, до споруд в сейсмічних районах висуваються підвищені вимоги щодо міцності конструктивних елементів.

Тому прогнозні розрахунки сьогодення потребують напрацювання математичних моделей визначення НДС споруди, її стійкості від дії як сталих, так і динамічних впливів та для інженера-будівельника є актуальними.

РОЗДІЛ 1 ДИНАМІКА СПОРУД

1.1 Види подання деформацій

Термін «деформація» відноситься до зміни форми континіума від деякої початкової (недеформованої) конфігурації до наступної (деформованої) конфігурації.

Під час вивчення деформацій враховуються лише початкова і кінцева конфігурації, проміжним станам уваги не приділяється. На противагу цьому термін «течія» використовується для позначення неперервного стану руху континіума, і вивчення історії конфігурації є невід'ємною частиною дослідження течії.

Якщо в деякому об'ємі суцільного середовища проходить деформація (чи течія), то його частинки рухаються вздовж різних шляхів в просторі.

Цей рух можна описати рівняннями:

$$x_i = f(X_1, X_2, X_3, t), \tag{1.1}$$

які дають положення x_i частинки в поточний момент, яка в момент $t = 0$ займала точку (X_1, X_2, X_3).

Рівняння (1.1) можна тлумачити як встановлення відповідності між точками початкової конфігурації і їх положенням в поточному стані. Така відповідність вважається однозначною і неперервною з неперервними частинними похідними будь-якого порядку. Такий спосіб опису руху чи деформацій називають ***лагранжевим.***

Коли рух задається як:

$$X_i = f(x_1, x_2, x_3, t), \tag{1.2}$$

де незалежними змінними є x_i і t, то цей спосіб опису руху чи деформацій називають ***ейлеровим.***

Ці дві відповідності (1.1, 1.2) подаються єдиною парою взаємно обернених функцій. Необхідною і достатньою умовою оберненої функції є відмінність від нуля якобіана

$$J = \left| \frac{\partial x_i}{\partial X_j} \right|. \tag{1.3}$$

Диференціювання (1.1) за X_j приводить до тензора $\left|\frac{\partial x_i}{\partial X_j}\right|$, котрий називається ***матеріальним градієнтом*** деформацій:

$$F = \left|\frac{\partial x}{\partial X_1}\right| e_1 + \left|\frac{\partial x}{\partial X_2}\right| e_2 + \left|\frac{\partial x}{\partial X_3}\right| e_3 . \tag{1.4}$$

Частинне диференціювання (1.2) за x_j приводить до тезора $\frac{\partial X_i}{\partial x_j}$, який називають ***просторовим градієнтом*** деформацій Н.

Матеріальний і просторовий тензори деформацій пов'язані правилом частинного диференціювання:

$$\frac{\partial x_i}{\partial X_j} \cdot \frac{\partial X_j}{\partial X_k} = \frac{\partial X_i}{\partial X_j}\frac{\partial x_j}{\partial X_k} = \delta_{ik} . \tag{1.5}$$

Теорія малих деформацій в механіці суцільних середовищ має своєю основною умовою вимогу малості градієнтів переміщень порівняно з одиницею.

Коли в тензорі деформацій Коші, чи в тензорі деформацій Гріна знехтувати похідними другого порядку, то:

- лагранжів тензор нескінченно малих деформацій матиме вигляд

$$l_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i}\right), \tag{1.6}$$

- ейлерів тензор нескінченно малих деформацій матиме вигляд

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right). \tag{1.7}$$

Якщо переміщення і градієнти малі, то різниця між матеріальними і просторовими координатами частин середовища дуже мала. Тому компоненти матеріального градієнта $\left|\frac{\partial x_i}{\partial X_j}\right|$ і компоненти просторового градієнта $\frac{\partial X_i}{\partial x_j}$ майже однакові, тому ейлерів та лагранжів тензори нескінченно малих деформацій можна вважати такими, що дорівнюють один одному, $l_{ij} \equiv \varepsilon_{ij}$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Баженов В. А., Іванченко Г. М., Шишов О. В. Будівельна механіка. Розрахункові вправи. Задачі. Комп'ютерне тестування. – К. : Каравелла, 2006. – 344 с.
2. Баженов В. А., Гранат С. Я., Шишов О. В. Будівельна механіка. Комп'ютерний курс. – К. : Вища школа, 1999. – 540 с.
3. Баженов В. А. Будівельна механіка. – К. : Вища школа, 2000. – 670 с.
4. Баженов В. А., Дащенко А. Ф., Коломиец Л. В., Оробей В. Ф. Строительная механика. Специальный курс. Применение метода граничных элементов. – Одесса : Астропринт, 2001. – 580 с.
5. Безухов Н. И., Лужин О. В., Колкунов Н. В. Устойчивость и динамика сооружений в примерах и задачах : учебное пособие для строительных специальностей вузов. – М. : Высшая школа, 1987. – 264 с.
6. Бутенко Ю. Н. Строительная механика. – К. : Вища школа, 1989. – 480 с.
7. Бутенко Ю. И. Строительная механика. Руководство к практическим занятиям. – К. : Вища школа, 1984. – 327 с.
8. Дарков А. В. Шапошников Н. Н. Строительная механика. – М. : Высшая школа, 1986. – 607 с.
9. Ржаницын А. Р. Строительная механика. – М. : Высшая школа, 1982. – 400 с.
10. Клейн Г. К. Руководство к практическим занятиям по курсу строительной механики (статика стержневых систем). – М. : Высшая школа, 1980. – 384 с.
11. Клейн Г. К., Рекач В. Г., Розенблат Г. И. Руководство к практическим занятиям по курсу строительной механики (Основы теории устойчивости, динамики сооружений и расчета пространственных систем). – М. : Высшая школа, 1972. – 318 с.
12. Дарков А. В., Клейн Г. К., Кузнецов В. І., Лужин О. В., Рекач В. Г. и др. Строительная механика. – М. : Высшая школа, 1976. – 600 с.
13. Моргун А. С. Теорія споруд. Ч. ІІІ. Будівельна механіка. – Вінниця : ВДТУ, 1997. – 90 с.
14. Моргун А. С. Практикум з будівельної механіки. – Вінниця : ВДТУ, 1997. – 90 с.
15. Моргун А. С., Сорока М. М. Механіка тонких оболонок подвійної кривизни. – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 120 с.

16. Орлов А. М., Сорока М. М., Калініна Т. О. Методичні вказівки та вихідні дані до розрахунково-проектувальних робіт по IV частині курсу «Будівельна механіка». – Одеса, 2001. – 76 с.

17. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – М. : АМК, 2007. – 596 с.

18. Піскунов В. Г. Опір матеріалів з основами теорії пружності і пластичності. Ч. І. Книга 3. Опір дво- і тривимірних тіл. – К. : Вища школа, 1995. – 272 с.

19. Піскунов В. Г. Опір матеріалів з основами теорії пружності й пластичності. Ч. ІІ. Книга 5. – К. : Вища школа, 1995. – 207 с.

20. Піскунов В. Г., Шевченко В. Д., Рубан М. М. Опір матеріалів з основами теорії пружності й пластичності. Книга ІІІ. – К. : Вища школа, 1995. – 320 с.

21. Смирнов А. Ф., Александров А. В., Лащеников Б. Я., Шапошников Н. Н. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений. – М. : Стройиздат, 1984. – 416 с.

22. Сорока М. М. Методичні вказівки та вихідні дані до розрахунково-проектувальної роботи із спецкурсу «Будівельна механіка» – Визначення сейсмічних сил для плоскої залізобетонної рами спектральним методом. – Одеса : ОДАБА, 2007. – 26 с.

23. СНиП 2.01.07 – 85. «Нагрузки и воздействия».

24. СНиП 2.03.01 – 84* «Бетонные и железобетонные конструкции».

25. Чирас А. А. и др. Строительная механика. Программы и решения задач на ЭВМ. – М. : Стройиздат, 1990.– 360 с.

26. Шкодін М. М., Моргун А. І., Моргун А. С. Програмування та чисельні методи в розрахунках інженерних споруд. – К. : НМК ВО, 1992. – 207 с.

27. Исаханов Г. В., Гранат С. Я., Мельниченко Г. И., Шышов О. В. Строительная механика. Расчет стержневых систем на ЭВМ. – Киев : Выща школа, 1990. – 227 с.

Навчальне видання

Алла Серафимівна Моргун
Іван Миколайович Меть

Динаміка та стійкість споруд

Навчальний посібник

Рукопис оформлено *А. Моргун*

Редактор *Т. Старічек*

Оригінал-макет виготовив *Г. Багдасар'ян*

Підписано до друку 13.07.2021 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різографічний. Ум. друк. арк. 4,39.
Наклад 50 (1-й запуск 1–21) пр. Зам. № 2021-074.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
інформаційний редакційно-видавничий центр.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 65-18-06.
press.vntu.edu.ua;
Email: irvc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.