Національна академія наук України

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна

Робота на здобуття щорічної премії Президента Україні для молодих вчених

Геофізичне забезпечення сейсмостійкості об’єктів атомної енергетики та інших потенційно небезпечних об‘єктів

Семенова Юлія Володимирівна
кандидат фіз.-мат. наук, докторант,
старший науковий співробітник відділу
сейсмічної небезпеки
Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН
України

Метою роботи є наукове обґрунтування, розробка та реалізація удосконаленої методики визначення спектральних характеристик ґрунтів з врахуванням їх нелінійного деформування для забезпечення сейсмостійкості об’єктів атомної енергетики та інших потенційно небезпечних об‘єктів.

Практичне значення одержаних результатів. Розвинуті в роботі методи та алгоритми дозволяють на сучасному рівні вирішувати важливу наукову і практичну проблему визначення (прогнозування) кількісних характеристик сейсмічної небезпеки на будівельних і експлуатаційних майданчиках для цілей сейсмічної безпеки потенційно небезпечних об‘єктів. Вирішено задачу побудови частотних характеристик ґрунтових комплексів під досліджуваними майданчиками шляхом їх теоретичного розрахунку з врахуванням нелінійної поведінки геологічного середовища під дією інтенсивних сейсмічних впливів. Показано, що чисельне вирішення нелінійних задач сейсмології на сучасному рівні знань, вимагає врахування даних польових та лабораторних досліджень, якими встановлено експериментальні кореляційні зв‘язки між напруженнями і деформаціями з врахуванням літологічного складу, фізико-механічних параметрів, глибини залягання, величини і тривалості додаткових сейсмологічних навантажень.

Нові теоретичні та методичні розробки роботи мають достатні фізико-математичні та інженерно-геологічні обґрунтування. З їх використанням розраховано «аналітично-емпіричні» частотні характеристики ґрунтових комплексів з врахуванням нелінійних властивостей ґрунтів в основі споруд Ташлицької ГАЕС, компресорної станції «Яготин», Южно-Української АЕС, Кременчуцької ГЕС, Бортницької станції аерації, компресорної станції «Південнобузька» газопроводу «Кременчук – Ананів - Богородчани» та ряду інших об‘єктів.

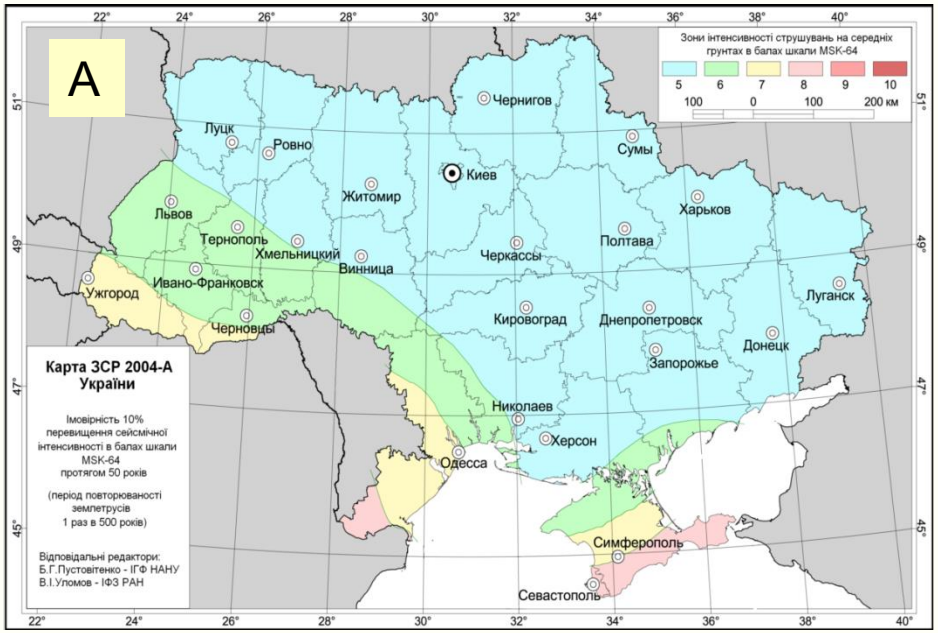
Результати досліджень застосовуються при сейсмічному мікрорайонуванні будівельних та експлуатаційних майданчиків сейсмостійких об'єктів

Актуальність досліджень. Стратегія сейсмічного захисту передбачає впровадження сейсмостійкого проектування і будівництва житла та потенційно небезпечних об‘єктів на базі об‘єктивних знань про кількісні параметри реально існуючої сейсмічної небезпеки на конкретних будівельних майданчиках. В рішенні РНБО, яке введено в дію Указом Президента України № 585/2011 від 12 травня 2011 р., наголошено на необхідність проведення поглибленої переоцінки стану безпеки енергоблоків АЕС України, включаючи перевірку їх сейсмостійкості. Характер і розподіл руйнувань при сейсмічних впливах в значній мірі визначається реакцією місцевих ґрунтових. При інтенсивних сейсмічних впливах поведінка ґрунтів стає нелінійною і проблема оцінки реакції ґрунту суттєво ускладняється. При інтенсивних сейсмічних впливах може спостерігатися ущільнення і просідання, розпушування і набухання рихлих ґрунтів, а в деяких випадках - розрідження водонасичених ґрунтів та інші небезпечні явища. Нелінійність реакції ґрунту призводить до суттєвої зміни форми і спектра сейсмічних коливань, що розповсюджуються в ґрунтових шарах. При інтенсивних впливах значення резонансних частот можуть помітно понизитись відносно значень, встановлених у результаті проведення інструментальних досліджень методом реєстрації слабких землетрусів, вибухів і короткоперіодних мікросейсм.

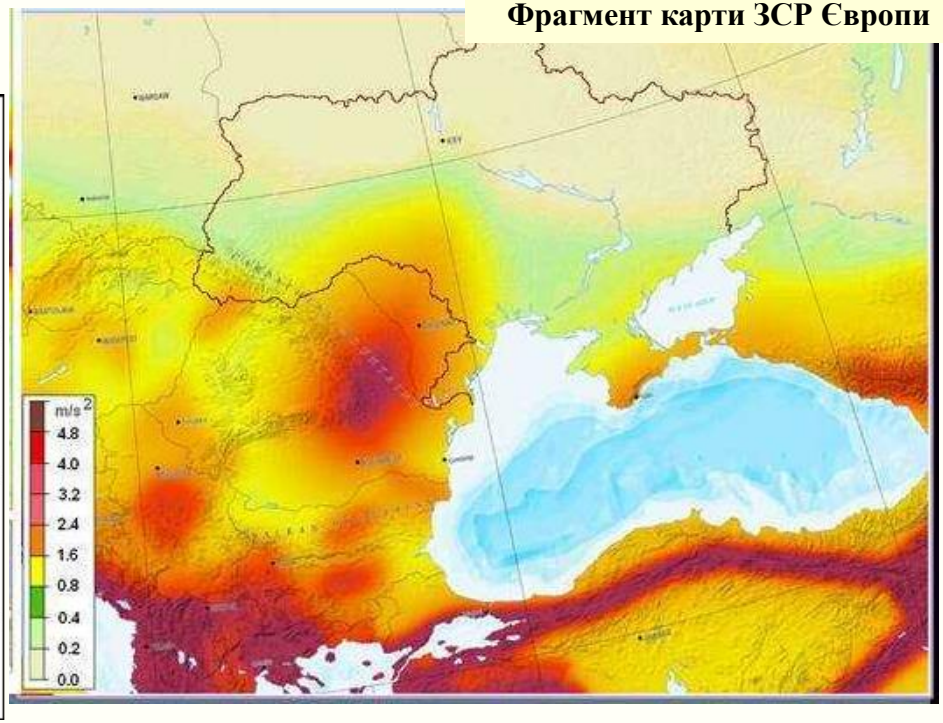
Методи, рекомендовані чинними нормативними документами, а саме Державними будівельними нормами «Будівництво у сейсмічних районах України» ДБН В.1.1-12:2014, передбачають лише лінійні явища в ґрунтах при сейсмічних впливах. В будівлях та спорудах згідно додатку Д ДБН В.1.1-12:2014 нелінійні явища вже враховуються, тому необхідно їх враховувати і в ґрунтах.

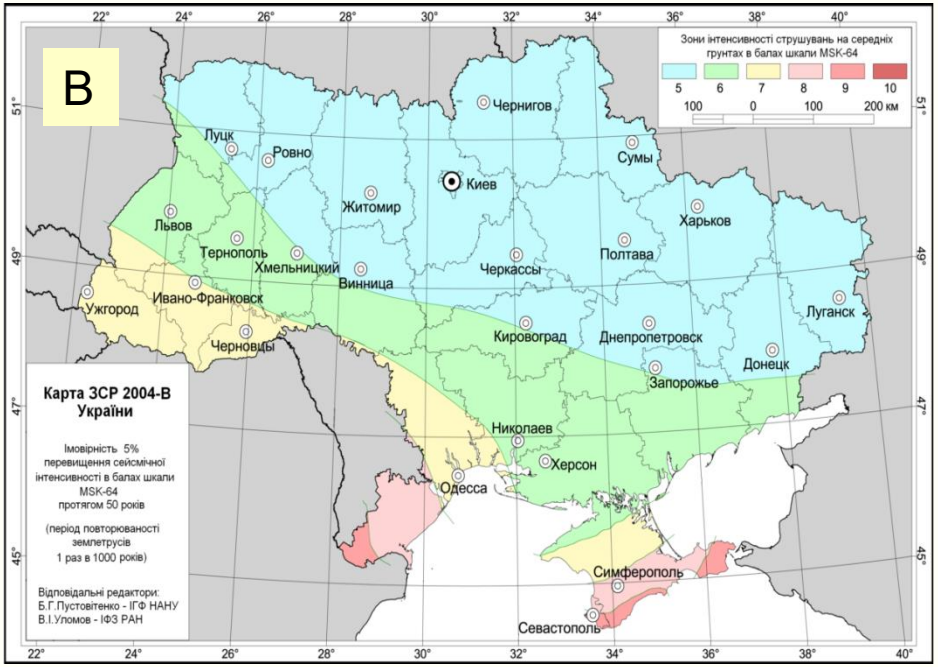
Зростаючі темпи і об’єми будівництва висотних будівель та потенційно небезпечних інженерних споруд вимагають освоєння нових територій, які за експертними оцінками часто характеризуються складними інженерно-геологічними умовами та погіршеними сейсмічними властивостями. Такі ґрунти мають суттєві нелінійні властивості, які будуть проявлятись по-різному, в залежності від інтенсивності і частотного складу сейсмічних впливів. З огляду на це, врахування нелінійних властивостей ґрунтів є необхідним. Зазначені фактори викликають необхідність удосконалення методики визначення частотних характеристик ґрунтової товщі з врахуванням її нелінійних властивостей для територій із високою і помірною інтенсивністю прогнозованих сейсмічних впливів, до яких відноситься значна частина території України, що обумовлює актуальність теми досліджень.

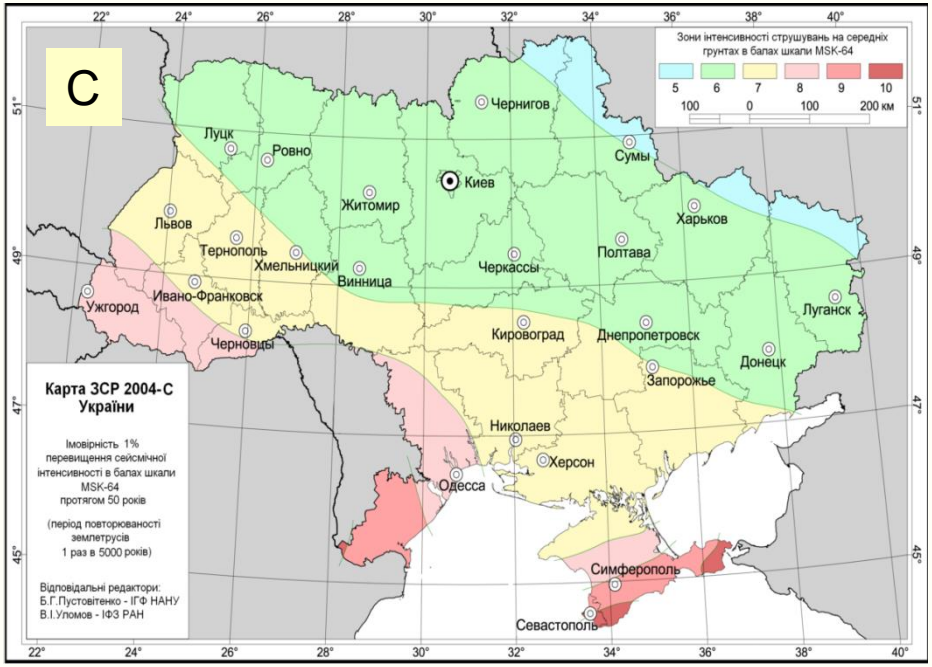
Карти загального сейсмічного районування



Фрагмент карти ЗСР Європи





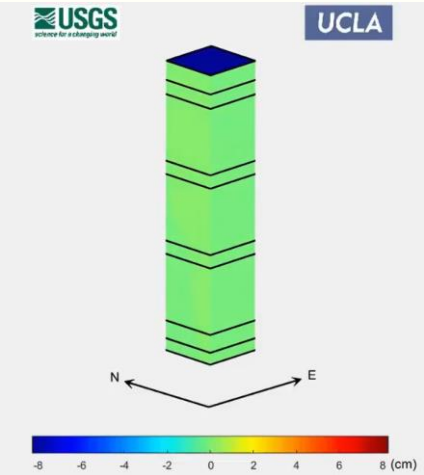


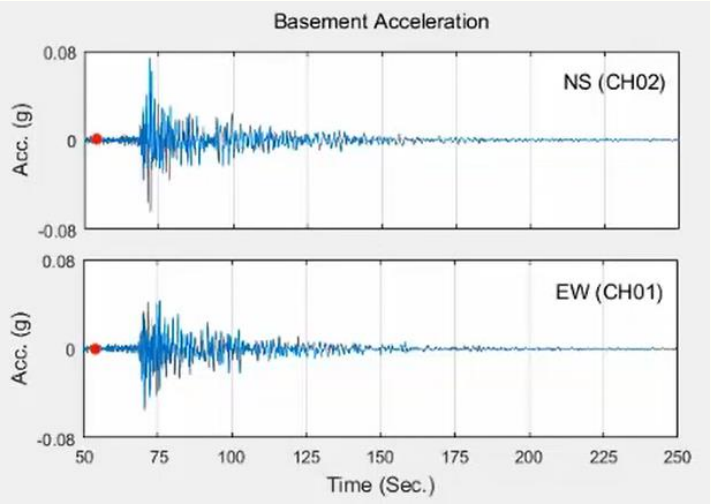
Згідно ДБН В.1.1-12:2014 розрахунки на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу:

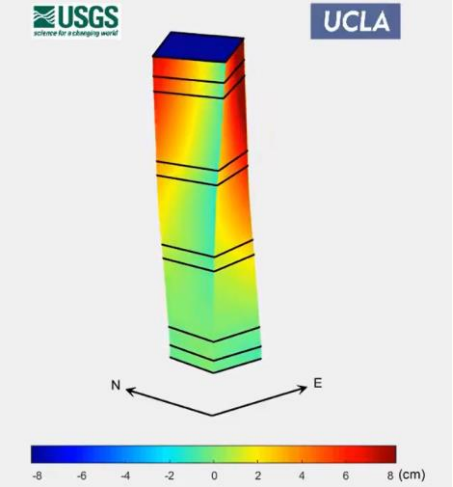
- спектральний метод;

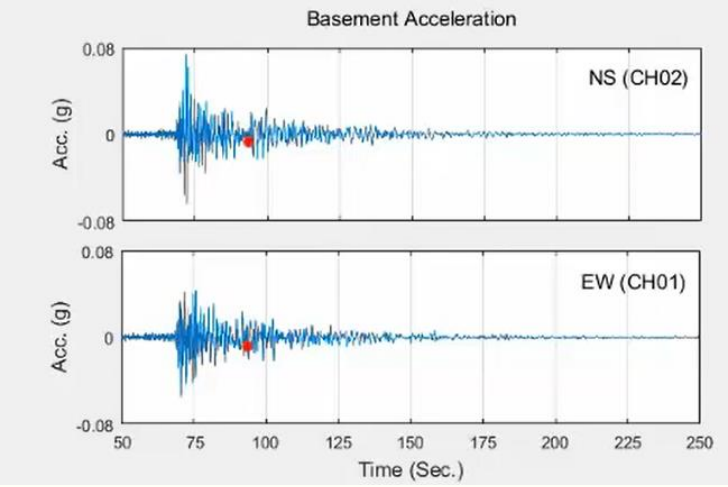
- прямого динамічний метод;

- нелінійний статичний розрахунок, що застосовується в якості спрощеної альтернативи нелінійного динамічного розрахунку реакції конструкцій на землетрус









Землетрус в Японії 11.03.2011 р.

*Сейсмічна інтенсивність **11 балів** за MSK-64 або 6,67 за японською семибальною макросейсмічною шкалою JMS.*

Максимальні прискорення досягали **2.9g** за даними сейсмічної станції «MYGO4»

http://www.emsc-csem.org/Page/index.php?id=196

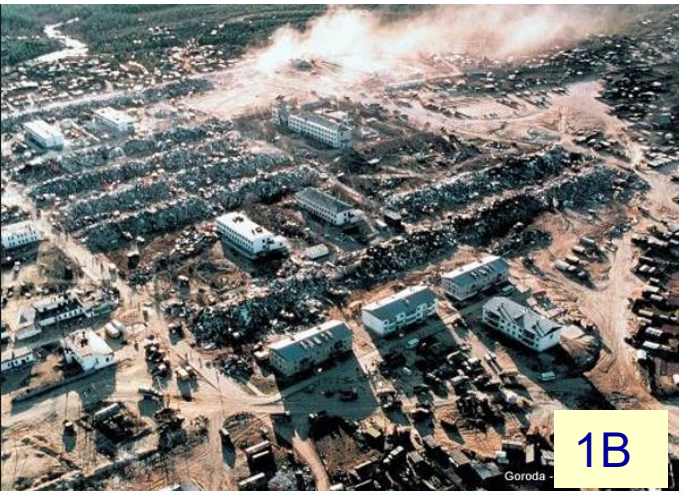
Cite as: F. De Luca, E. Chioccarelli, I. Iervolino (2011), *Preliminary study of the 2011 Japan earthquake ground motion record V1.01*, available at http://www.reluis.it.

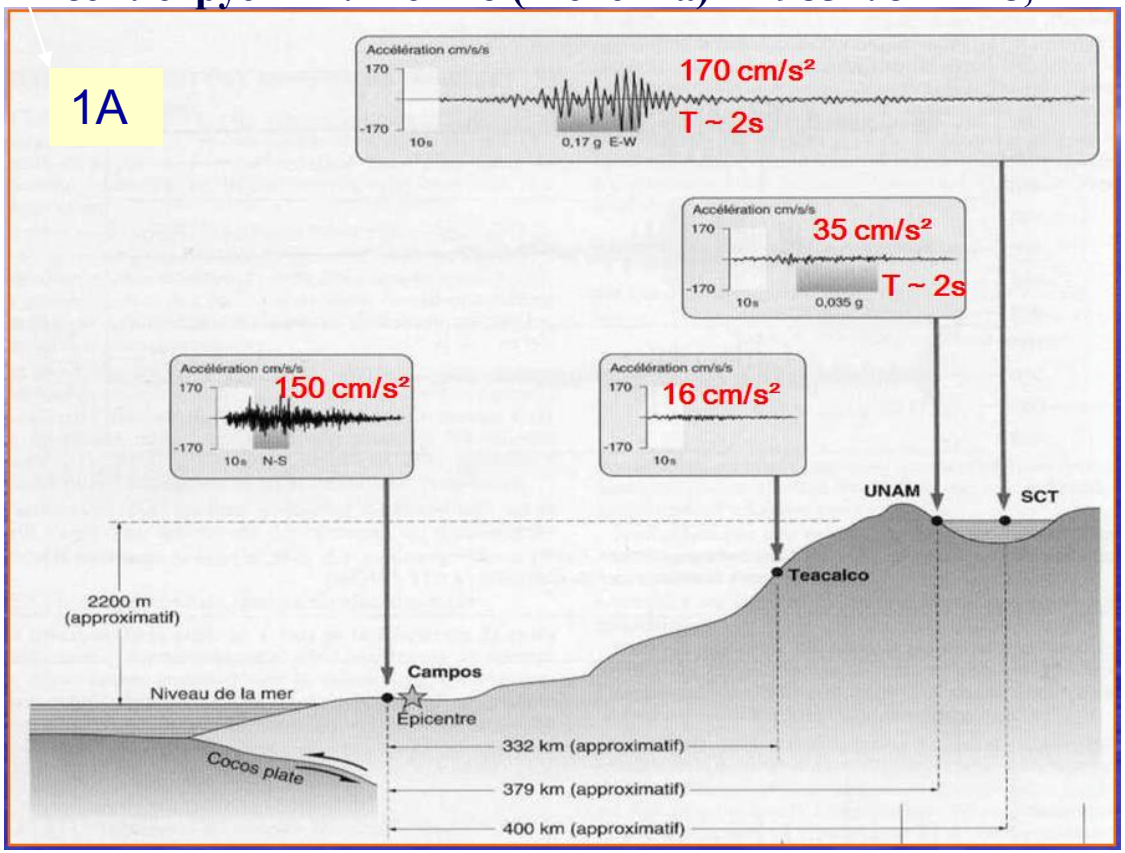
Table 6. K-Net stations: peak and cyclic parameters (corrected records)

Station Code	Dir	Level	Epicentral Distance	R_{jb} Distance	PGA	PGAr	PGV	IA	ID	Sd
			km	km	*g*	*cm/s²*	*cm/s*	*cm/s*		*s*
MYG004	NS	surface	169	63	2.908	2699.9	109.75	13113	26.2	80.9
IBR003	NS	surface	254	33	1.687	1597.6	65.03	4703.4	27.3	24.8
MYG012	NS	surface	169	51	0.681	758.4	33.38	1245.7	34.9	107.6
MYG013	NS	surface	175	57	1.463	1517.2	85.76	1803.4	9.1	89.7
MYG004	EW	surface	169	63	1.218	1268.5	47.97	3844.4	41.9	84.7
IBR003	EW	surface	254	33	1.226	1185.9	42.91	3239	39.2	35.5
MYG012	EW	surface	169	51	1.906	1969.2	51.44	2241.3	14.5	103.3
MYG013	EW	surface	175	57	0.943	982.3	46.64	1234.1	17.9	106.6
MYG004	UD	surface	169	63	1.948	1879.9	38.90	2106.1	17.7	64.0
IBR003	UD	surface	254	33	1.113	1165.7	26.61	1272.1	27.3	30.0
MYG012	UD	surface	169	51	0.491	500.8	21.01	723.24	44.6	110.3
MYG013	UD	surface	175	57	0.299	290.2	20.41	430.87	45.0	103.5

Така розбіжність обумовлена різноманіттям ґрунтових умов і особливостями поширення в них сейсмічної хвилі, тобто фільтруючими сейсмічними властивостями.

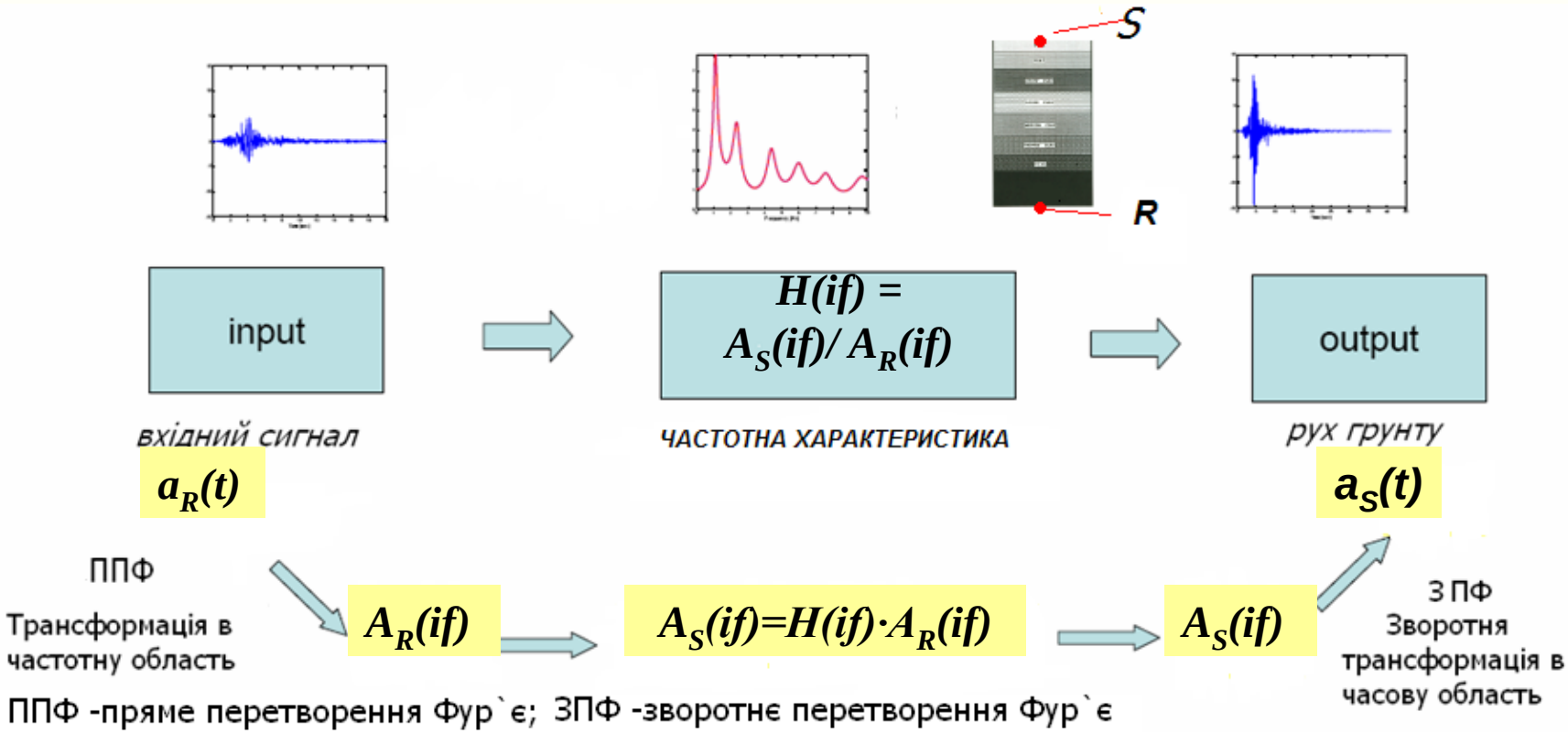
Резонансне збільшення амплітуди сейсмічних коливань за рахунок місцевих ґрунтово-морфологічних умов при землетрусі в м. Мехіко (Мексика) в 1985 г. з М = 8,1



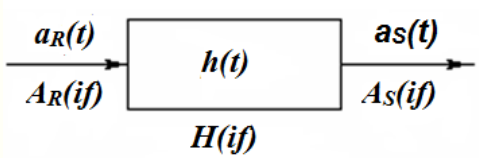


Землетрус в Італії 24.09.2016р. в Аркуата-дель-Тронто

Визначення частотних характеристик ґрунтової товщі під будівельним майданчиком



Амплітудно-частотна характеристику ґрунтової товщі розраховується шляхом ділення спектру коливань на поверхні на спектр коливань на підошві ґрунтової товщі.



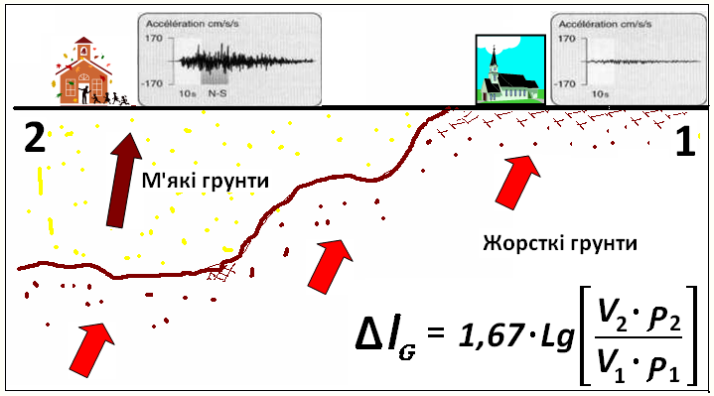
$$|H(iw)| = |A_1(iw)| / |A_N(iw)|; \ |\varphi_H(iw)| = |\varphi_1(iw)| - |\varphi_N(iw)|$$

Спектр коливань на поверхні може бути розрахований шляхом множення спектра коливань вхідного руху з корінних порід сейсмічної хвилі на частотну характеристику ґрунтової товщі .

Методи визначення резонансних частот підсилення сейсмічних коливань ґрунтів на майданчику згідно ДБН В.1.1-12:2014 ; РСН 65-87; РСН 60-86

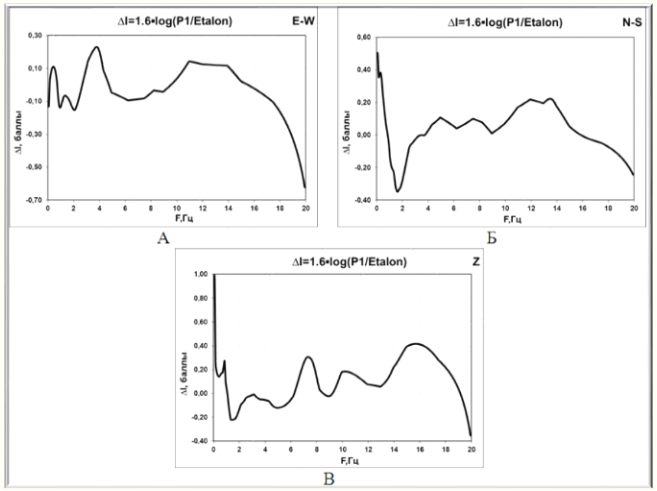
Метод СМР «Сейсмічної жорсткості»

1



3

Емпірична частотна характеристика ґрунтового середовища під будівельним майданчиком в м. Одесі на вул. Жаботинского за методом реєстрації мікросейсм



2

ДБН В.1.1-12:2014

ДОДАТОК В
(довідковий)

ЗНАЧЕННЯ ПЕРЕВАЖАЮЧОГО ПЕРІОДУ КОЛИВАНЬ НЕОДНОРІДНИХ ҐРУНТОВИХ ТОВЩ

В.1 Цей додаток рекомендується використовувати при визначенні значення переважаючого періоду коливань неоднорідних ґрунтових товщ, якщо характеристики різних шарів мало відрізняються один від одного.

В.2 Розраховуючи системи "основа -фундамент – наземна частина будівлі (споруди)", період власних коливань ґрунтової товщі за відсутності експериментальних даних допускається визначати за наступними формулами:

$$T_0 = 4H_s \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n} \rho_k \left[H_k + \frac{H_s}{\pi}\left(\sin\frac{\pi h_k}{H_s} - \sin\frac{\pi h_{k-1}}{H_s}\right)\right]}{\sum_{k=1}^{n} G_k \left[H_k + \frac{H_s}{\pi}\left(\sin\frac{\pi h_k}{H_s} - \sin\frac{\pi h_{k-1}}{H_s}\right)\right]}} \qquad (В.1)$$

або

$$T_0 = \frac{4H_s}{V_s^{cp}}; \quad V_s^{cp} = \frac{\sum_{k=1}^{n} H_k}{\sum_{k=1}^{n} \frac{H_k}{V_{sk}}}, \qquad (В.2)$$

де H_s – загальна потужність неоднорідної багатошарової товщі ґрунту (до корінних порід з $V_s > 800$ м/сек);

$H_k, \rho_k, G_k, V_{sk} = \sqrt{G_k / \rho_k}$ – відповідно потужність, щільність, модуль зсуву та швидкість розповсюдження поперечних хвиль k-го шару;

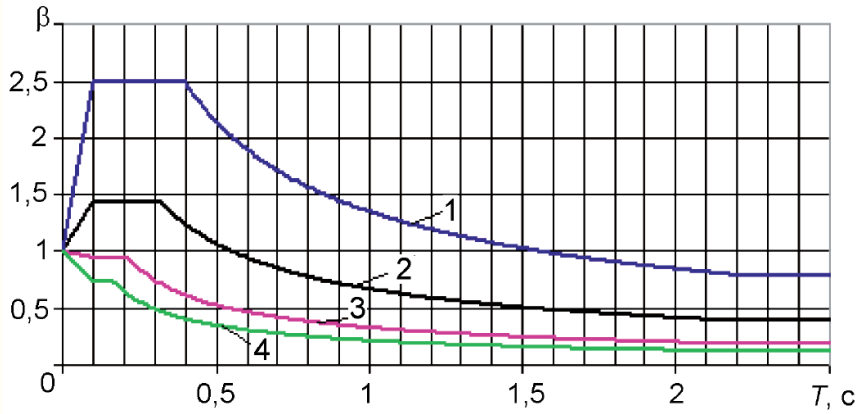
$h_k = \sum_{i=1}^{k} H_i \; (h_0 = 0,\ h_n = H_s)$;

n – кількість шарів.

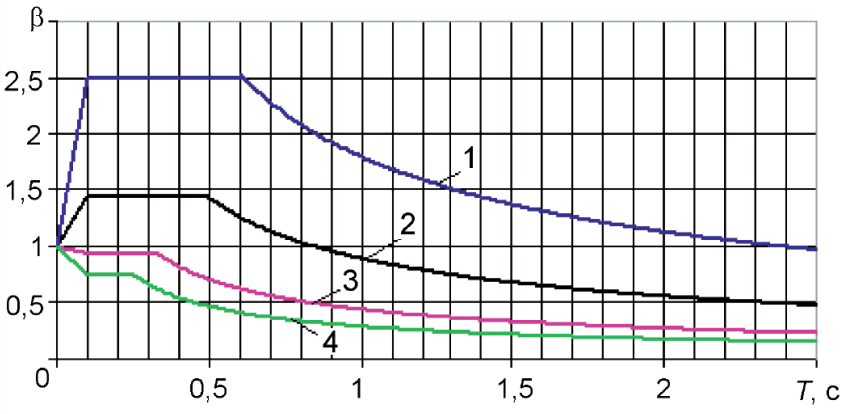
В якості розрахункового значення T_0 приймається найбільше з двох значень, обчислених за формулами (В.1) і (В.2).

ДОДАТОК Д
(довідковий)

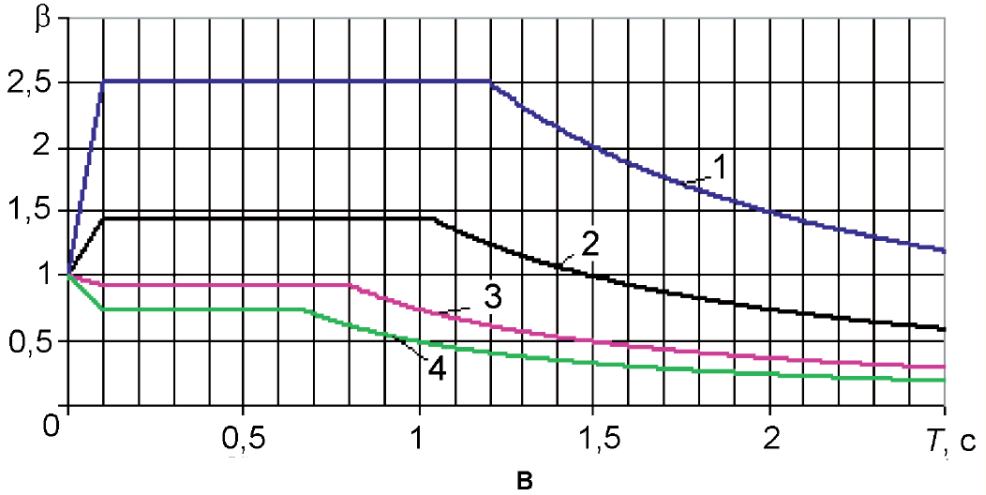
ГРАФІКИ НЕПРУЖНИХ СПЕКТРІВ РЕАКЦІЇ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД



а



б



в

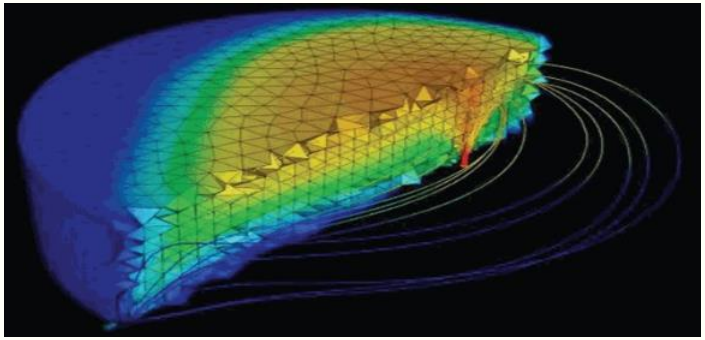
а – для першої (I), б – для другої (II), в – для третьої (III) категорій ґрунту за сейсмічними властивостями

Рисунок Д.1 – Залежності коефіцієнтів динамічності β від періодів власних коливань *T* і коефіцієнтів податливості μ = 1, 2, 4, 6 (відповідні графіки 1, 2, 3 і 4) будівлі (споруди)

Типи моделей ґрунтового середовища за розподілом зміни параметрів для розрахунку сейсмічних коливань

1. Модель ґрунтового середовища з довільними границями розділу: метод скінчених елементів, метод граничних елементів, променевий метод, метод Aki-Larner.

Ці методи дозволяють розраховувати коливання для середовищ з негоризонтальними границями але проблематичною є побудова їх надійних моделей

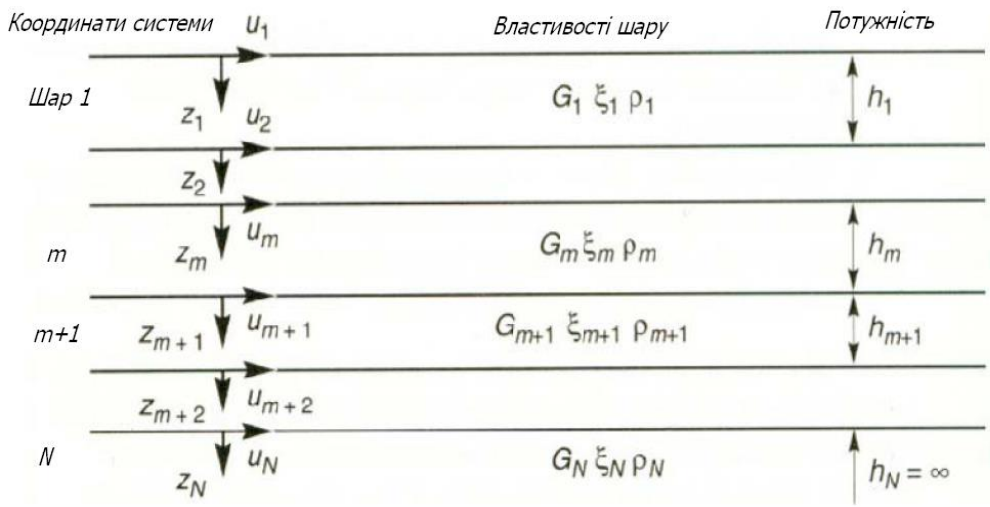


Багатошарова модель середовища; ґрунти з поглинанням на підстилаючому жорстоку на півпросторі

2. Модель з вертикальною неоднорідною шаруватою будовою:

Такі моделі дозволяють достатньо просто отримувати надійні амплітудно-частотні характеристики середовища, навіть, при мінімальних апріорних даних про геологічне середовище. Для розрахунків використовується матричний метод Томпсона-Хаскела (Акі, Річардс).

Розроблено багато програмних продуктів для вирішення цієї задачі: МТС (Ратникова 1973), Shake2000 і т.д.



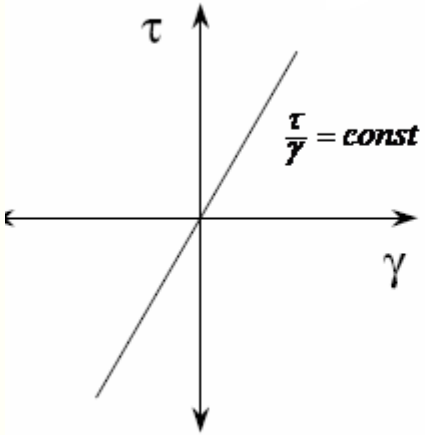
G - модуль зсуву визначається з формули $G = \rho V_s^2$

ξ *- коефіцієнт поглинання;*

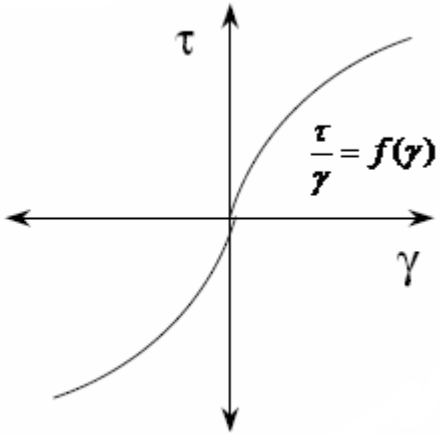
ρ *- густина* (Kramer, 1996)

Моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи:

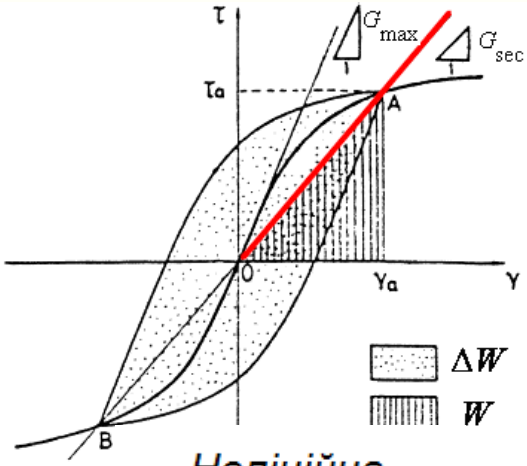
Класи моделей поведінки ґрунтів при сейсмічних впливах:



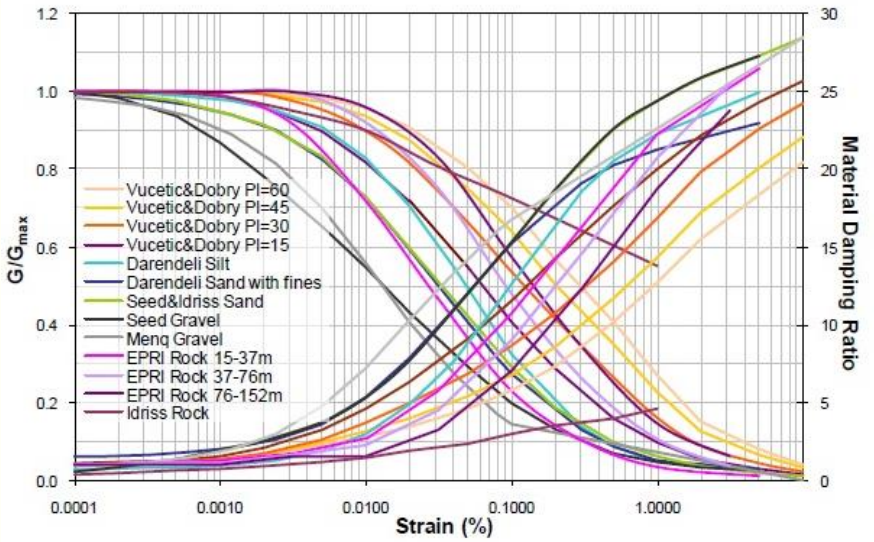
Лінійна



Еквівалентна лінійна



Нелінійна



$$\xi = \frac{1}{4\pi}\frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{2\pi}\frac{A_{loop}}{G\gamma^2}$$

ΔW - поглинута енергія

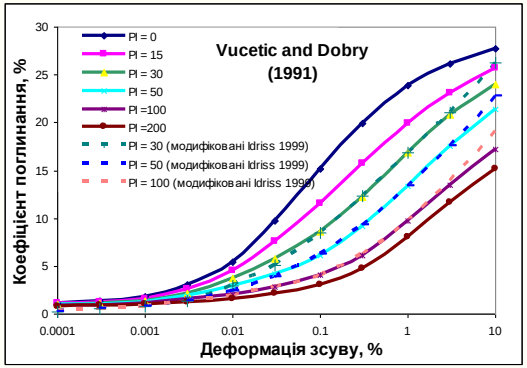
W - максимальна енергія деформації

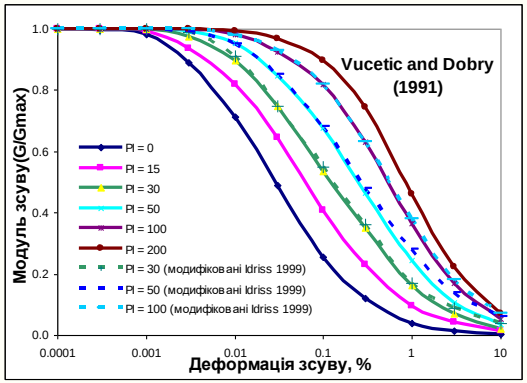
A_{loop} - площа всередині гістерезисної кривої

Нелінійні властивості ґрунтів

Залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від амплітуди зсувної деформації

Створено базу даних G(γ) і D(γ) для різних типів ґрунтів з різним складом та фізико-механічними властивостями, що дає змогу врахувати нелінійні властивості ґрунтів при моделюванні реакції ґрунтових умов на сейсмічні впливи різної інтенсивності

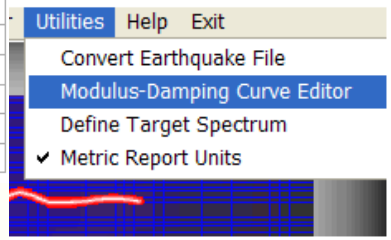




Деформація зсуву (%)	Коефіцієнт поглинання (%) для ґрунтів з різною пластичністю					
	PI=30 (з роботи Vucetic and Dobry, 1991	PI = 30 (з роботи Idriss, 1999)	PI=50 (з роботи Vucetic and Dobry, 1991)	PI = 50 (з роботи Idriss, 1999)	PI=100 (з роботи Vucetic and Dobry, 1991)	PI = 100 (з роботи Idriss, 1999)
0,0001	1,03	0,2	0,96	0,2	0,90	0,2
0,0003	1,13	0,5	1,04	0,5	0,95	0,5
0,001	1,41	0,8	1,27	0,8	1,14	0,8
0,003	2,15	1,4	1,93	1,4	1,56	1,2
0,01	3,74	3,0	2,95	2,4	2,08	1,9
0,03	5,80	5,1	4,20	3,9	2,82	2,8
0,1	8,64	8,5	6,15	6,2	4,03	4,0
0,3	12,25	12,3	9,17	9,3	6,08	6,2
1	16,86	16,9	13,41	13,4	9,68	9,7
3	20,80	21,1	17,57	17,6	13,46	13,9
10	24,00	26,3	21,35	22,8	17,20	19,1

В базі даних містяться результати польових та лабораторних досліджень 11 авторів та 119 залежностей

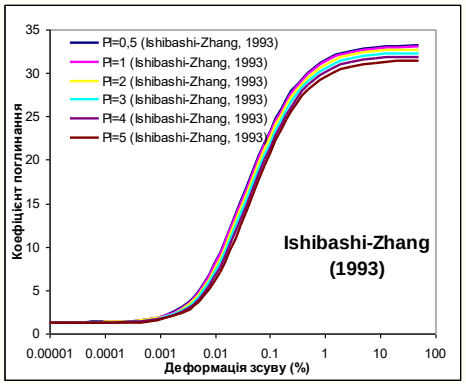
ProShake

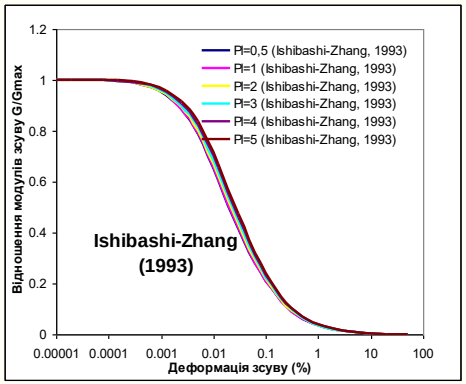


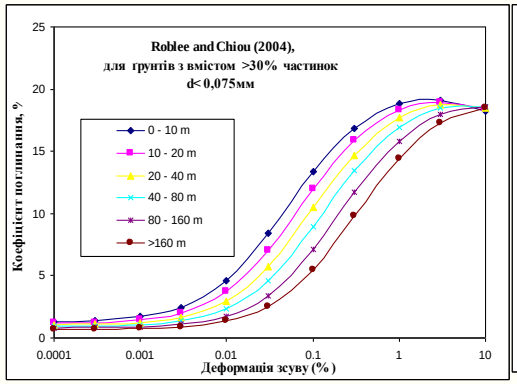
Основні фізико-механічні параметри при виборі кривих з бази даних:

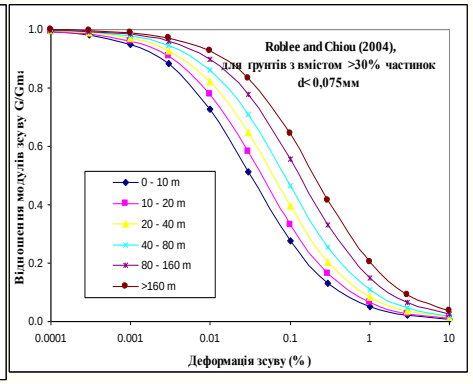
для глинистих порід: індекс пластичності PI, глибина залягання

для піщаних порід: розмір частинок, процентний вміст, глибина залягання









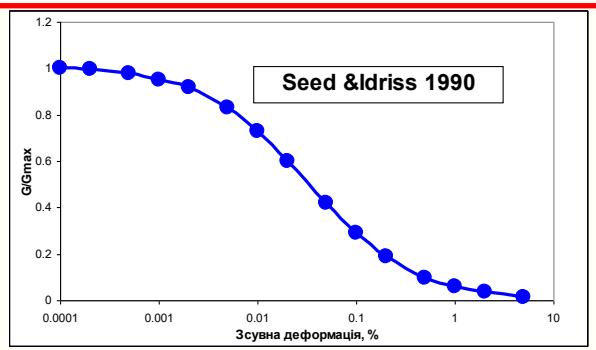
Основні параметри розрахункової сейсмогеологічної моделі середовища під будівельним майданчиком для лінійного моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи:

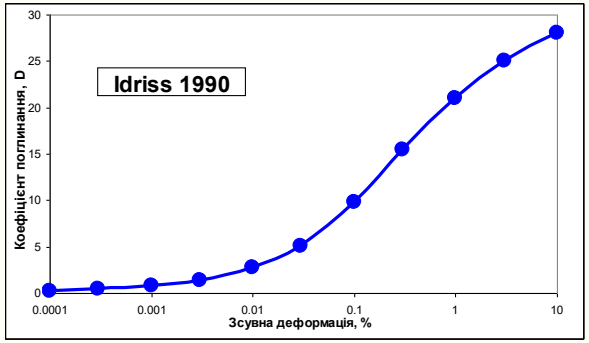
H – потужність кожного шару;

Vp, Vs – швидкість поздовжніх та поперечних хвиль;

ρ – густини порід;

v_p, v_s – декременти поглинання поздовжньої та поперечної хвилі;





Модель геологічного середовища під будівельним майданчиком по вул. Березняківській, 30

№№ п/п	Літологічний склад	Інтервал глибин H, м	Швидкість сейсмічних хвиль		Декременти поглинання сейсмічних хвиль		Густини порід ρ, г/см³
			Поздовжньої VP, м/сек	Поперечної VS, м/сек	Поздовжньої υP	Поперечної υS	
1	Насипний грунт: пісок дрібнозернистий, злежаний, слабо вологий з домішками будівельного сміття	0-0,8	380	180	1,6	1,4	1,6
2	Намивний грунт: пісок дрібнозернистий, слабо вологий, середньої щільності та щільний	0,8-5,0	690	260	1,3	1,2	1,77
3	Пісок мілкий та пісок пилуватий, середньої щільності та щільний, з лінзами піску пластичного супіску	5,0-27,2	640	240	1,2	0,9	2,09
4	Пісок глауконітовий мілкий, щільний, водонасичений з прошарками пластичного супіску	27,2-46	930	350	0,5	0,6	2,18
5*	Пісковик, кремнистий, мергель	46-66	1600	340	0,5	0,6	1,9
6*	Пісок каолінітовий водонасичений	66-86	2100	520	0,45	0,6	1,9
7*	Вапняк, мергель	86–180	2300	650	0,3	0,4	2,0
8*	Глина	180–240	2600	920	0,3	0,4	1,98
9*	Пісок, пісковик, алевроліт	240-295	2800	1300	0,15	0,2	1,94
10*	Граніт, діорит	295 - ∞	5200	2800	0,09	0,1	2,6

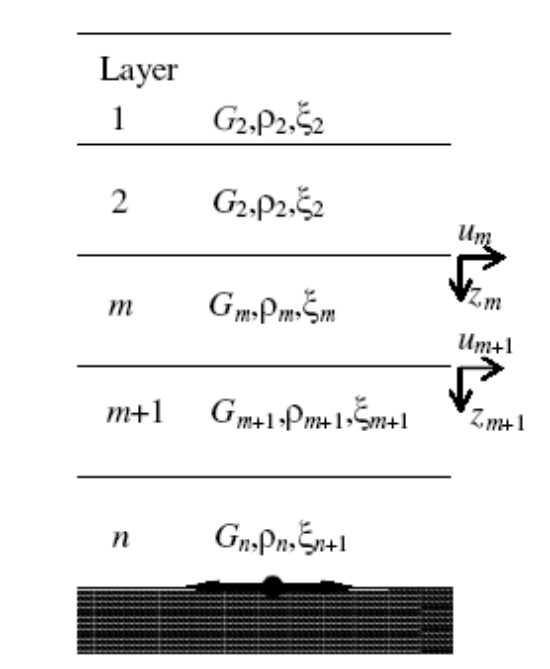
Потрібно замінити декременти поглинання на *G(γ)* і *D(γ)* для врахування нелінійних властивостей

Еквівалентне лінійне моделювання

Одномірне рівняння руху для вертикального (в z напрямку) поширення поперечних хвиль можна представити у вигляді:

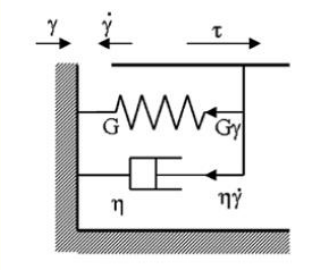
$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \qquad (1)$$

ρ - густина, T- напруження, ***z*** - глибина від поверхні



Поведінка ґрунтової товщі описується моделлю Кельвіна-Фойгта:

$$\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial \gamma}{\partial t} \qquad (2)$$



де ***G*** – модуль зсуву, ***γ*** - зсувна деформація, ***η*** - в'язкість

$$\boxed{\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t}} \qquad \textbf{(3)}$$

u=u (t, z) –горизонтальне зміщення, ***t*** - час

Еквівалентне лінійне моделювання

Розрахунки зводяться до розв'язку хвильового рівняння [Kanai, 1952] :

$$u(z,t) = U(z)e^{i\omega t}$$

$$U(z) = A\mathrm{e}^{ikz} + B\mathrm{e}^{-ikz}$$

$$k^2 = \frac{\rho\omega^2}{G + i\omega\eta} = \frac{\rho\omega^2}{G^*}$$

, ***k*** – комплексне хвильове число

t – час, ***A*** і ***B*** – амплітуди хвиль, що поширюються вгору і вниз по осі ***z***

$$u(x,t) = A\mathrm{e}^{i(kx+\omega t)} + B\mathrm{e}^{-i(kx-\omega t)}$$

$$u_j(z_j = 0) = (A_j + B_j)\mathrm{e}^{i\omega t}$$

$$u_j(z_j = h_j) = (A_j e^{ik_j h_j} + B_j e^{-ik_j h_j})e^{i\omega t}$$

$$\tau_j(z_j = 0) = ik_j G_j^*\left(A_j - B_j\right)\mathrm{e}^{i\omega t}$$

$$\tau_j(z_j = h_j) = ik_j G_j^*\left(A_j \mathrm{e}^{ik_j h_j} - B_j \mathrm{e}^{-ik_j h_j}\right)\mathrm{e}^{i\omega t}$$

$$A_{j+1} + B_{j+1} = A_j \mathrm{e}^{ik_j h_j} + B_j \mathrm{e}^{-ik_j h_j},$$

$$A_{j+1} - B_{j+1} = \alpha_j\left(A_j \mathrm{e}^{ik_j h_j} + B_j \mathrm{e}^{-ik_j h_j}\right)$$

$$\alpha_j = k_j G_j^* / k_{j+1} G_{j+1}^*$$

G* - комплексний модуль зсуву

$$G^* = G\left(1 - 2\xi^2 + i2\xi\sqrt{1-\xi^2}\right)$$

(Udaka, 1975)

$$G^* = G(1 - \xi^2 + i2\xi)$$

(Kramer, 1996)

$$G^* = G(1 + i2\xi)$$

(Kramer, 1996)

A і ***B*** пов'язані між собою рекурентними співвідношеннями:

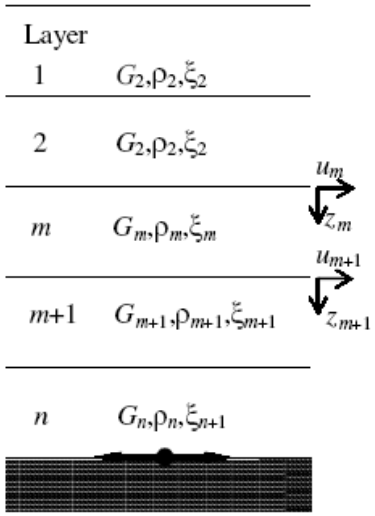
$$A_j = a_j(\omega)A_1$$

$$B_j = b_j(\omega)A_1$$

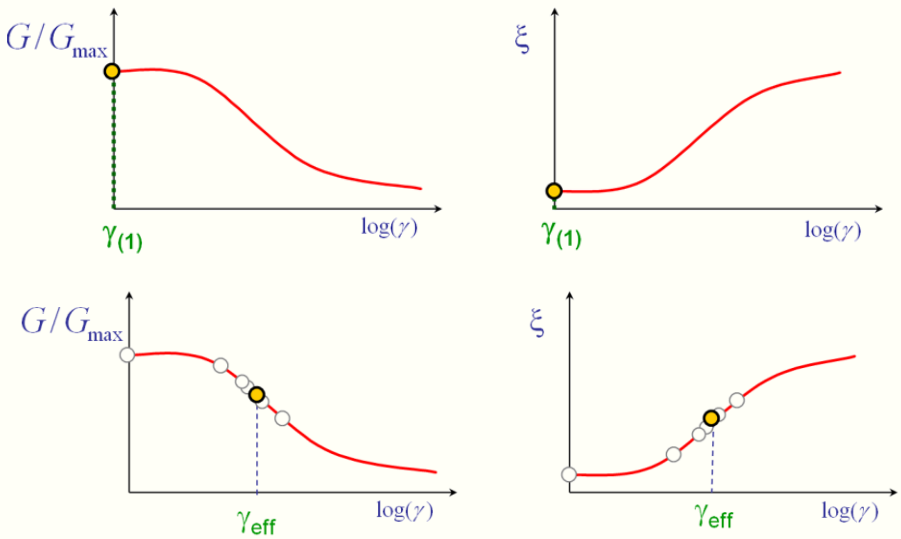
$$A_{j+1} = \frac{1}{2}A_j\left(1+\alpha_j\right)\mathrm{e}^{ik_j h_j} + \frac{1}{2}B_j\left(1-\alpha_j\right)\mathrm{e}^{-ik_j h_j},$$

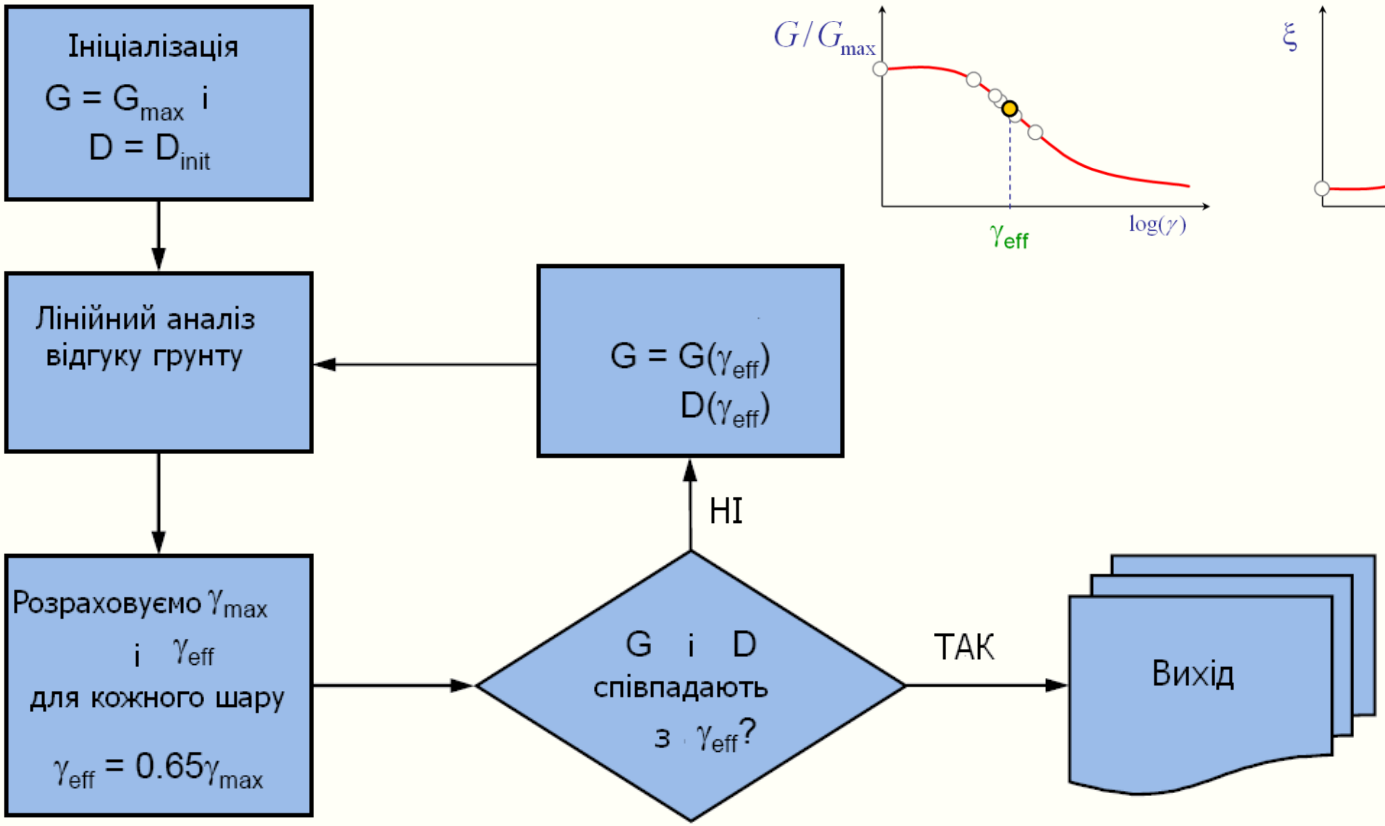
$$B_{j+1} = \frac{1}{2}A_j\left(1-\alpha_j\right)\mathrm{e}^{ik_j h_j} + \frac{1}{2}B_j\left(1+\alpha_j\right)\mathrm{e}^{-ik_j h_j}$$

$$|F_{ij}(i\omega)| = \frac{|u_i(w)|}{|u_j(w)|} = \frac{a_i(\omega) + b_i(\omega)}{a_j(\omega) + b_j(\omega)}$$



Алгоритм ітераційної процедури при еквівалентному лінійному моделюванні





Нелінійне моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи

У комп'ютерних програмах при одномірному моделюванні реакції ґрунту залежність напруження-деформація описується наступними циклічними нелінійними моделями:

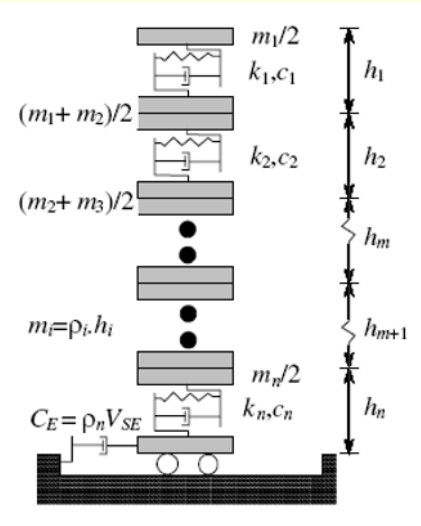
- **Ромберга – Осгуда** в програмі CHARSOIL [Streeter et al, 1974];
- **Айвена** – в програмі N0NLI3 [Joyner, Chen, 1975];
- **Мартіна – Давиденкова** в програмі MASH [Martin, Seed, 1978];
- гіперболічною моделлю в програмі DESRA [Lee, Finn, 1978], TARA [Finn et al., 1986; Finn et al., 1989];
- **Хардина – Дрневіча – Кундалла – Пайка** (HDCP) в програмі TESS1 [Pyke, 1985];
- **Айвена – Мроза** (IM – моделлю) в програмі NERA [Bardet, Tobita, 2001]
- модифікованою гіперболічною моделлю в програмі DeepSoil [Hashash, Park, 2001].

Нелінійне моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи

$$[\mathrm{M}]\{\ddot{u}\}+[\mathrm{C}]\{\dot{u}\}+[\mathrm{K}]\{u\}=P(t) \quad (1)$$

$$P(t)=-[\mathrm{M}]\{I\}\ddot{u}_g(t)$$ - вектор навантаження

[M] — матриця мас, **[C]** — матриця поглинання, **[K]** — матриця жорсткості



$$[C]=\begin{bmatrix} C_1 & 0 & & & \\ -C_1 & C_1+C_2 & -C_2 & & \\ & -C_2 & C_2+C_3 & -C_3 & \\ & & & & -C_{n-1} \\ & & & -C_{n-1} & C_{n-1} \end{bmatrix}$$

$$[K]=\begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & & & \\ -K_1 & K_1+K_2 & -K_2 & & \\ & -K_2 & K_2+K_3 & -K_3 & \\ & & & & -K_{n-1} \\ & & & -K_{n-1} & K_{n-1} \end{bmatrix}$$

$$[M]=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & & & 0 \\ 0 & & m_3 & & 0 \\ 0 & & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_n \end{bmatrix}$$

Метод Ньюмарка:

$$\dot{u}_{i+1}=\dot{u}_i+[(1-\gamma)\Delta t]\ddot{u}_i+(\gamma\Delta t)\ddot{u}_{i+1} \qquad u_{i+1}=u_i+(\Delta t)\dot{u}_i+[(0{,}5-\beta)(\Delta t)^2]\ddot{u}_i+[\beta(\Delta t)^2]\ddot{u}_{i+1}$$

β=0,5; γ=0,25 – параметри, що визначають точність і стійкість інтегрування

Модифікована гіперболічна модель в програмі DEEPSOIL [Hashash and Park, 2001]

$$\tau = \frac{G_{mo}\gamma}{1+\beta\left(\frac{G_{mo}}{\tau_{mo}}\gamma\right)^{s}} = \frac{G_{mo}\gamma}{1+\beta\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^{s}}$$

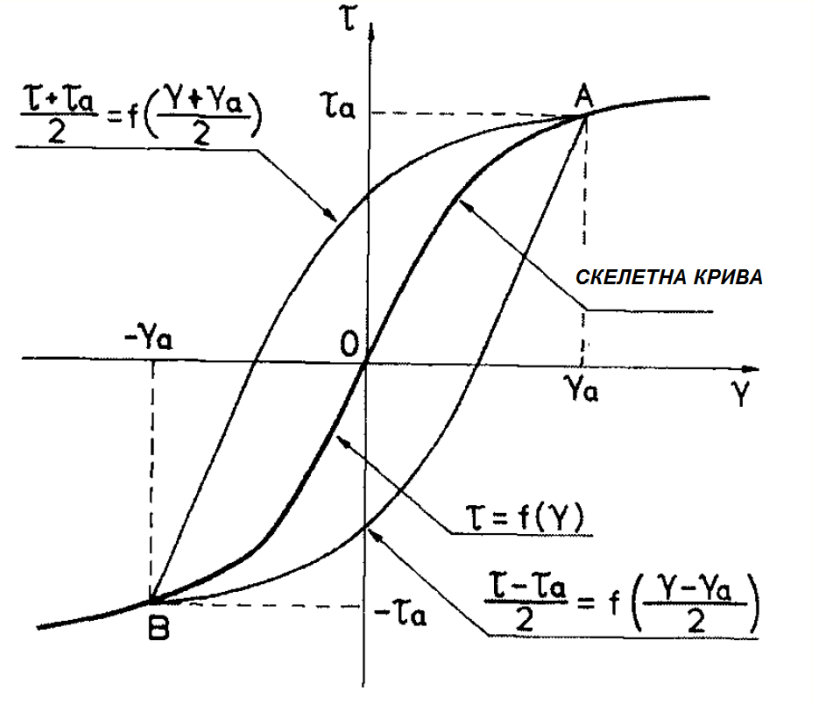
G_{mo} - *початковий модуль зсуву;*

τ_{mo} – *напруження, при деформації 1%;*

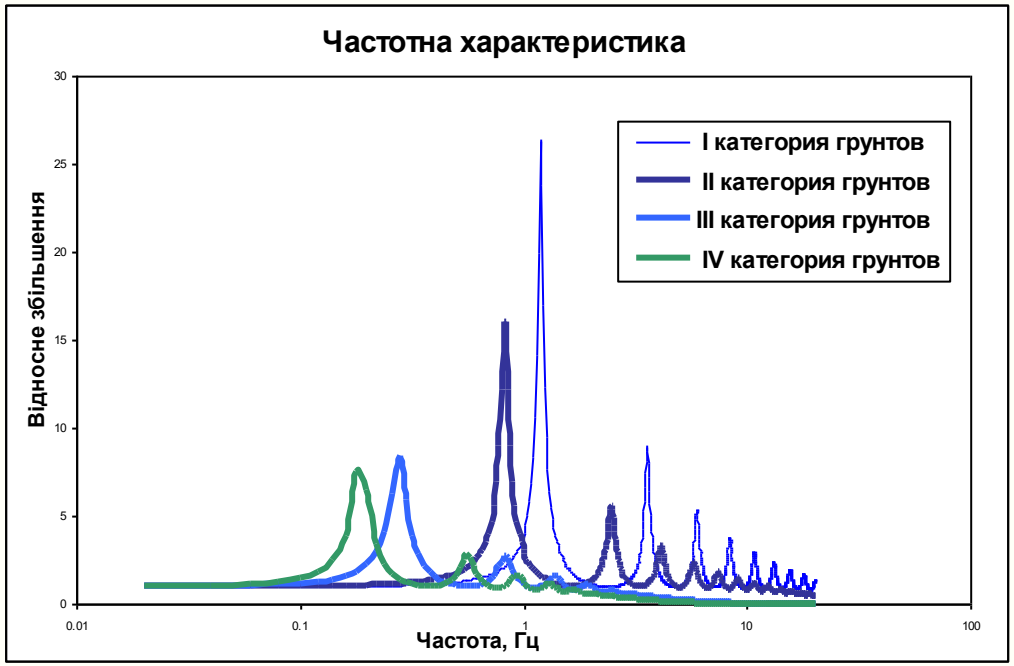
γ_r – *поріг міцності при зсувній деформації;*

β *і* S – *параметри, що регулюють форму кривої*

Правила Мейзінга для побудови гілок навантаження і розвантаження скелетної кривої:



Дослідження впливу категорії ґрунту за сейсмічними властивостями згідно [ДБН В.1.1-12: 2014, 2014] на частотні характеристики:



АЧХ одношарової моделі ґрунтів різних категорій за сейсмічними властивостями (по [ДБН В.1.1-12: 2014, 2014]) (ProShake)

З погіршенням сейсмічних властивостей ґрунтів по класифікації [ДБН В.1.1-12: 2014, 2014]:

– резонансні частоти ґрунтів зміщуються в бік низьких частот;

– підсилення амплітуди коливань зменшується

Зменшення коефіцієнта підсилення коливань в слабких за сейсмічними властивостями ґрунтах, в порівнянні з середніми або скельними ґрунтами, при великих амплітудах коливань пояснюється перевагою впливу поглинання над підсиленням коливань

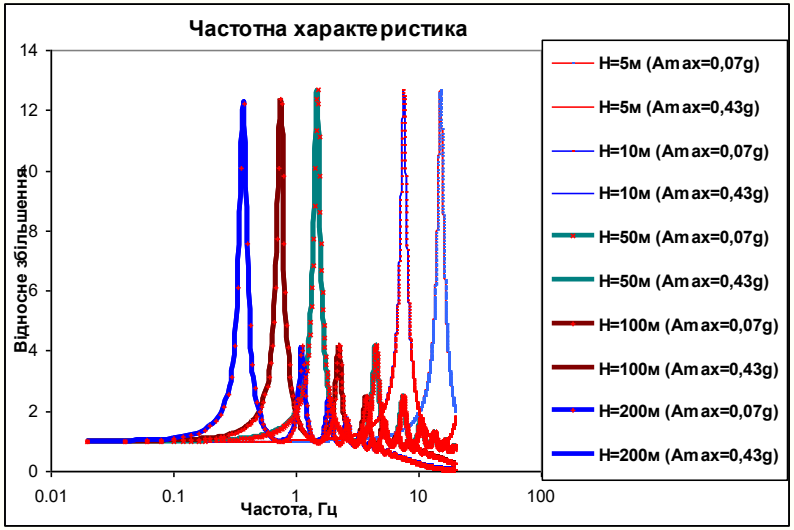
Землетруси з зони Вранча і висотні будівлі характеризуються низькочастотними коливаннями, тому ймовірність виникнення резонансних явищ на ґрунтах III IV категорії висока

Моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи без врахування їх нелінійних властивостей

Дослідження впливу потужності (Н) осадових відкладів на частотні характеристики:

Згідно ДБН В.1.1-12:2014 рекомендується досліджувати лише 10 м верхньої частини розрізу під будівельним майданчиком

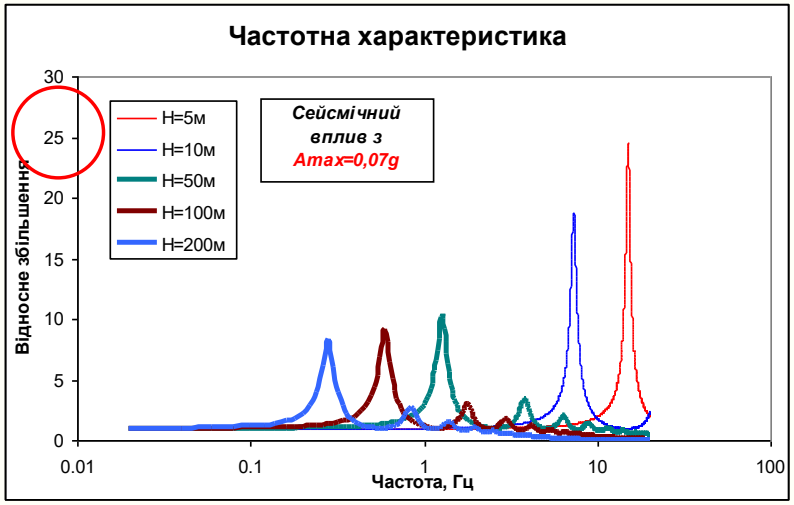
1



АЧХ ґрунтових комплексів різної потужності, розраховані для випадку падіння з нижнього півпростору сейсмічного сигналу з Amax = 0,07g та Amax = 0,43g з використанням лінійного моделювання (ProShake)

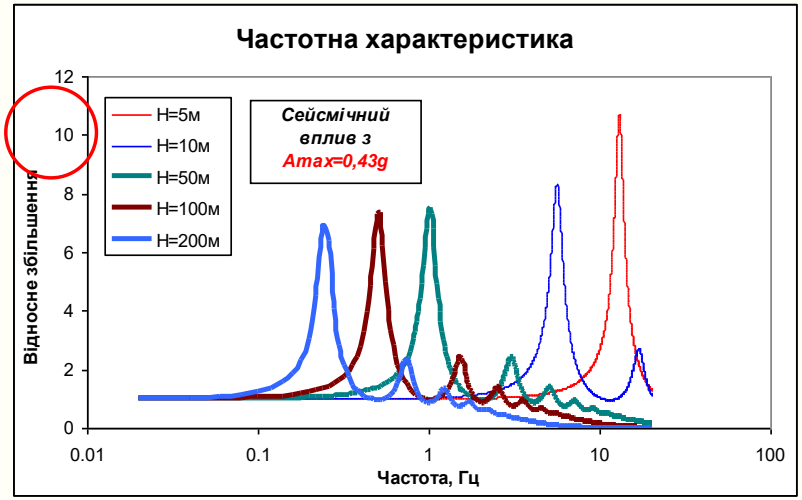
Моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи з врахуванням їх нелінійних властивостей

2



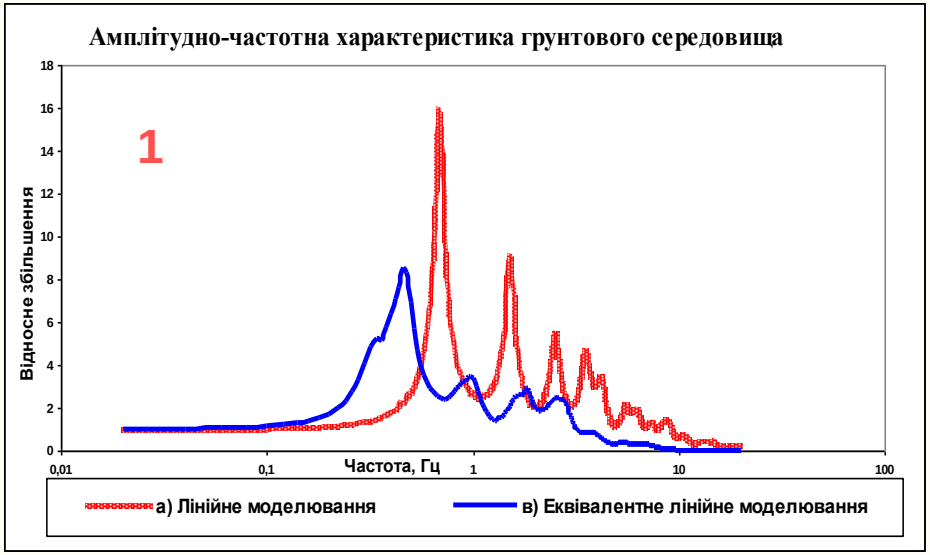
АЧХ ґрунтових комплексів різної потужності, розраховані для випадку падіння з нижнього півпростору сейсмічного сигналу з Amax = 0,07g з використанням ЕЛМ (ProShake)

3

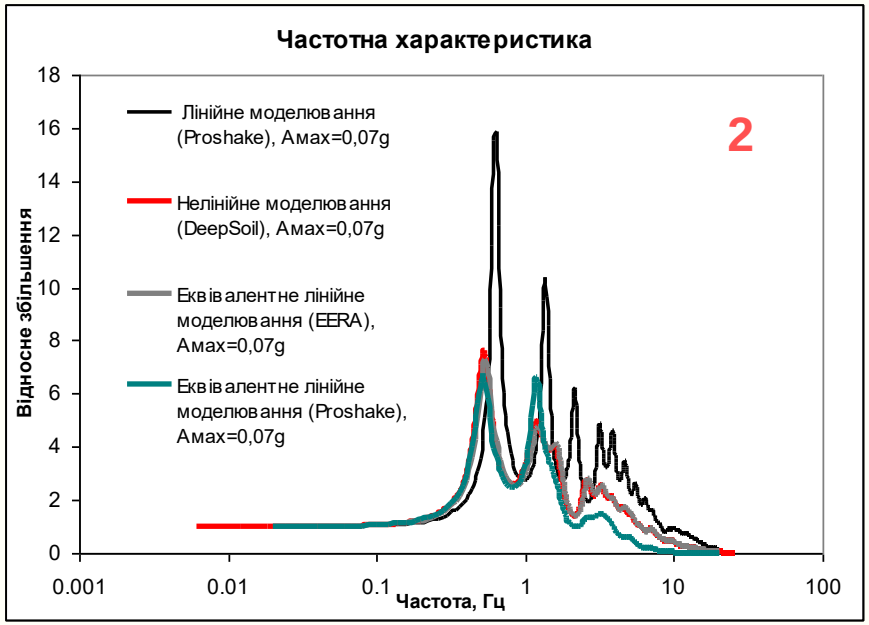


АЧХ ґрунтових комплексів різної потужності, розраховані для випадку падіння з нижнього півпростору сейсмічного сигналу з Amax = 0,43g з використанням ЕЛМ (ProShake)

Дослідження частотних характеристик реальних грунтових товщ розрахованих різними методами моделювання:



АЧХ ґрунтового середовища під будівельним майданчиком на перетині вулиць Червоногвардійської та Краківської в м. Києві отримана а) лінійним моделюванням, в) еквівалентним лінійним моделюванням з використанням програмного комплексу ProShake



АЧХ ґрунтового середовища під майданчиком будівництва багатоповерхового житлового будинку по вул. Глубочицька в м. Києві, розраховані з використанням Proshake, DeepSoil, EERA

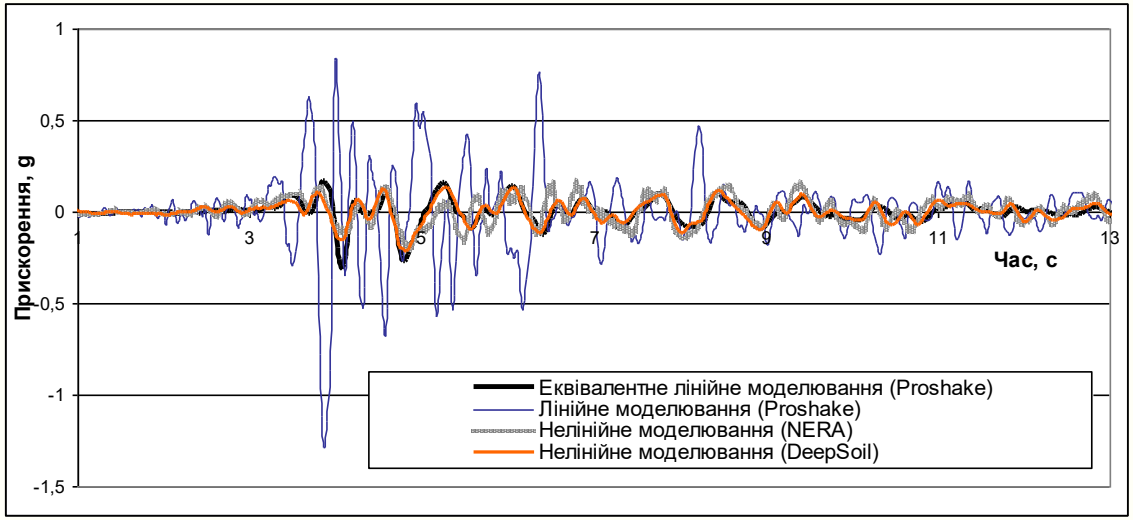
Врахування нелінійних властивостей ґрунтів:

– зменшення коефіцієнта підсилення сейсмічних коливань;

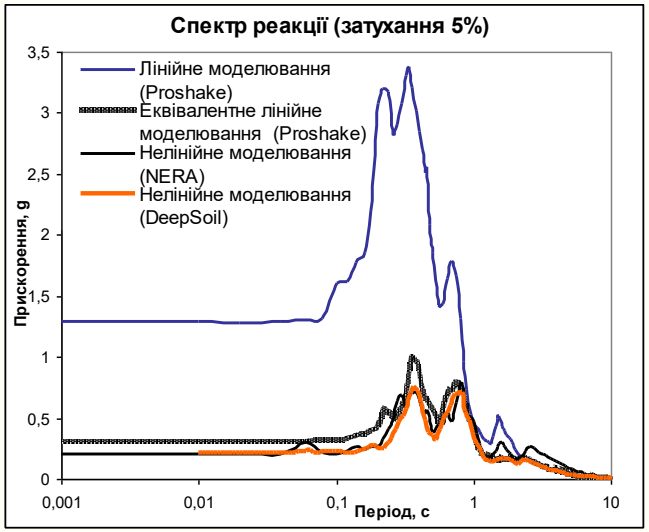
– зміщення резонансних частот в низькочастотну область

Пояснення:

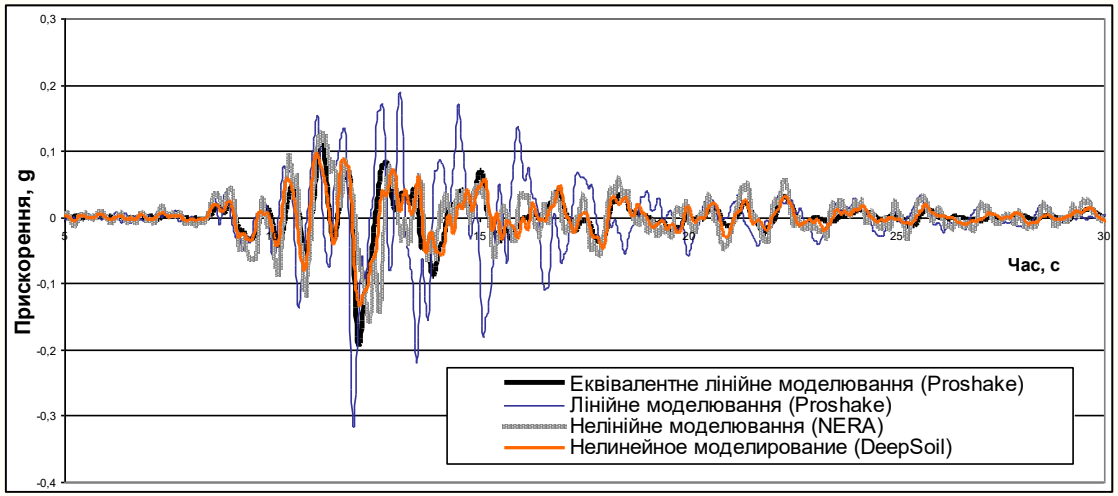
Нелінійні властивості ґрунтів (зменшення модуля зсуву *G* та збільшення коефіцієнта поглинання *D* зі збільшенням величини зсувної деформації) трансформують енергію з частот, відповідних частотному максимуму в високочастотну область, де вона інтенсивно поглинається. На низькі частоти поглинання діє відносно слабко, і вони не маючи відчутних енергетичних втрат поширюються в ґрунтовій товщі



Горизонтальна компонента розрахункової акселерограми, що моделює вплив землетрусу з Амах=0,43g



Спектр реакції, , що моделює вплив землетрусу з Амах =0,43g



Горизонтальна компонента розрахункової акселерограми, що моделює вплив землетрусу з Амах=0,07g

Спектр реакції, , що моделює вплив землетрусу з Амах =0,07g

На підставі аналізу результатів досліджень представлених в роботах [Saada, Bianchini, 1987, Midorikawa, 1993; Ishihara et al, 1992; Iai et al., 1995; Kramer, 1996; Arulanandan, Scott, 1994 и др.; Yoshida, Iai, 1998; Stewart et. al., 2008; Алешин, 2010] і власного досліду моделювання – сформульовано рекомендації щодо доцільності використання різних розрахункових методів: лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного – для моделювання реакції на сейсмічні впливи ґрунтової товщі під будівельними майданчиками України для цілей сейсмостійкого проектування:

1. При моделюванні реакції ґрунтової товщі складеної ґрунтами I категорії за сейсмічними властивостями можливе допущення лінійної залежності напруження-деформація в діапазоні сейсмічної очікуваної максимальної інтенсивності до **9 балів**, включно;

2. Для ґрунтової товщі складеної ґрунтами II категорії лінійне моделювання припустиме при максимальній очікуваній інтенсивності до **8 балів**;

3. Для ґрунтової товщі складеної ґрунтами III і IV категорії необхідно враховувати їх нелінійні властивості при очікуваній інтенсивності починаючи з 6 балів. Для будівельних майданчиків з очікуваною максимальною інтенсивністю **6 -7 балів** варто застосовувати еквівалентне лінійне моделювання, а для майданчиків з очікуваною максимальною інтенсивністю 8-9 балів необхідне застосування нелінійного моделювання.

Згідно карт ЗСР-2004 на більшій частині території України прогнозуються сейсмічні впливи, які не перевищують 6-7 балів.

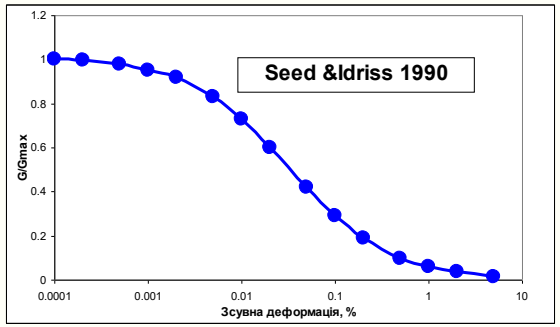
Основні параметри розрахункової сейсмогеологічної моделі середовища під будівельним майданчиком для нелінійного моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи:

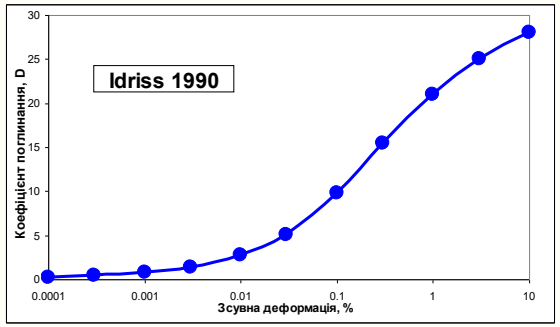
H – потужність кожного шару;

Vp, Vs – швидкість поздовжніх та поперечних хвиль;

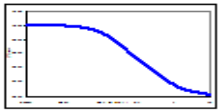
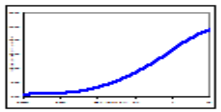
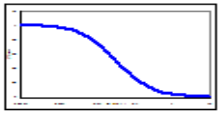
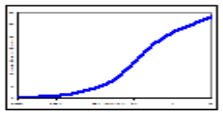
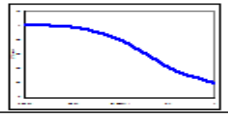
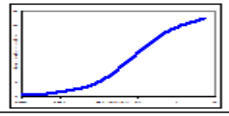
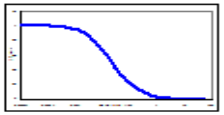
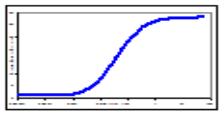
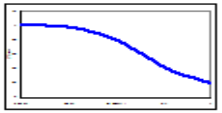
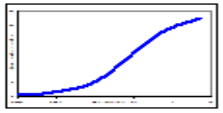
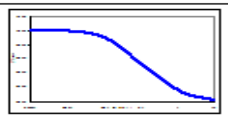
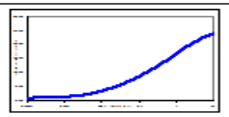
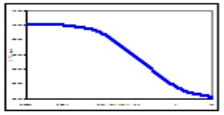
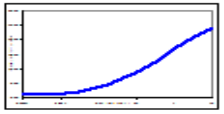
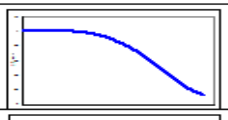
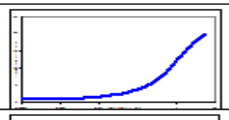
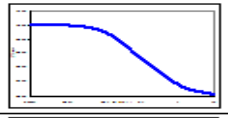
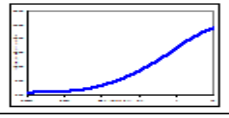
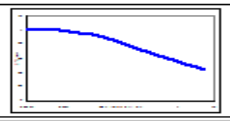
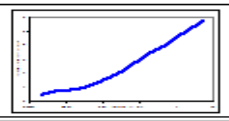
ρ – густини порід;

G(γ) і *D(γ)* – залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації





Приклад моделі геологічного середовища під будівельним майданчиком по вул. Березняківській, 30 для еквівалентного лінійного або нелінійного моделювання

№№ п/п	Літологічний склад	Інтервал глибин H, м	Швидкість сейсмічних хвиль		Густини порід ρ, г/см³	Параметри нелінійних властивостей	
			Поздовжньої VP, м/сек	Поперечної VS, м/сек		Залежність модуля зсуву від амплітуди деформації зсуву	Залежність коефіцієнта поглинання від амплітуди деформації зсуву
1	Насипний ґрунт: пісок дрібнозернистий, злежалий, слабо вологий з домішками будівельного сміття	0-0,8	380	180	1,6		
2	Насипний ґрунт: пісок дрібнозернистий, слабо вологий, середньої щільності та щільний	0,8-5,0	690	260	1,77		
3	Пісок мілкий та пісок пилуватий, середньої щільності та щільний, з лінзами піску пластичного супіску	5,0-27,2	640	240	2,09		
4	Пісок глауконітовий мілкий, щільний, ~~водонасичений~~ з прошарками пластичного супіску	27,2-46	930	350	2,18		
5*	Пісковик, ~~крейдяний~~, мергель	46-66	1600	340	1,9		
6*	Пісок каолінітовий ~~водонасичений~~	66-86	2100	520	1,9		
7*	Вапняк, мергель	86–180	2300	650	2,0		
8*	Глина	180–240	2600	920	1,98		
9*	Пісок, пісковик, алевроліт	240-295	2800	1300	1,94		
10*	Граніт, діорит	295 - ∞	5200	2800	2,6		

Приклад розрахункових акселерограм для ділянки 2 майданчика Ташлицької гідроакумулювальної електростанції

Таблиця 3.4. Параметри розрахункових акселерограм для моделювання ПЗ із місцевих потенційно сейсмоактивних зон на вільній поверхні таксонометричної ділянки № II

№ пп.	Назва файлу і складова вектора коливань	Компонента коливань	Макс. прискорення, a_m, в $см/с^2$	Переважаючі частоти, *Гц*		Тривалість коливань, $a \geq 0.9\ a_m$ в сек.	Тривалість коливань, $a \geq 0.5\ a_m$ в сек.	Кільк. відліків в акселерограмі	Дискретність акселерограми Δt в сек
				min	max				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	AAP10C_T	T	21.8	5.6	19.8	0.4	0.8	4096	0.01000
	AAP10C_R	R	19.2	6.1	19.8	0.4	0.8	4096	0.01000
	AAP10C_Z	Z	16.4	7.9	19.8	0.4	0.8	4096	0.01000
2	AAP11C_T	T	21.6	9.3	27.6	0.4	0.4	4096	0.01000
	AAP11C_R	R	19.7	6.1	27.6	0.4	1.7	4096	0.01000
	AAP11C_Z	Z	15.8	5.2	25.4	0.4	2.5	4096	0.01000
3	AAP12C_T	T	22.1	7.2	27.6	0.4	0.8	4096	0.01000
	AAP12C_R	R	18.6	6.7	19.8	0.4	1.2	4096	0.01000
	AAP12C_Z	Z	15.5	7.2	19.8	0.4	1.7	4096	0.01000

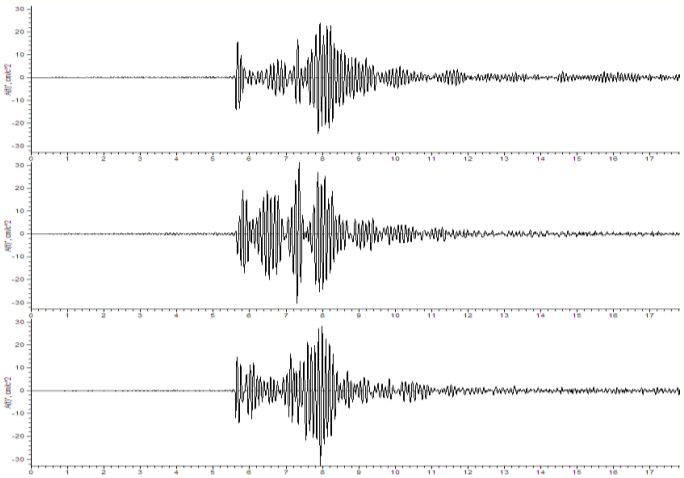
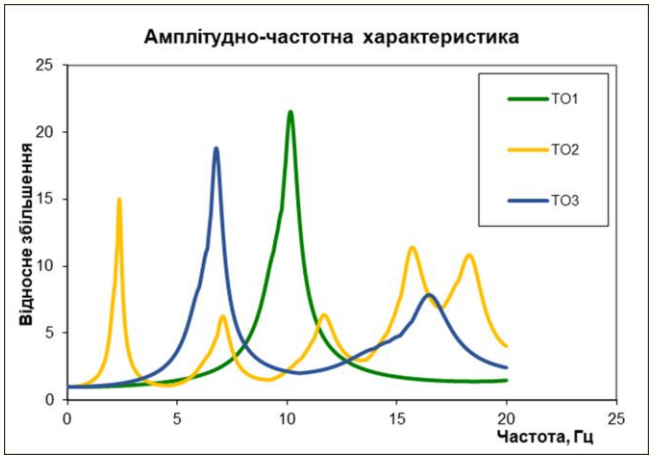


Рис. 3.4. Розташування сейсмостанцій при проведенні польових робіт за методом реєстрації мікросейсм (1 – інженерно-геологічні райони, 2 – точки мікросейсмічного зондування, 3 – межі інженерно-геологічних районів, 4 – межі проведення досліджень

Амплітудно-частотні характеристики моделей ґрунтового середовища території Ташлицької гідроакумулювальної електростанції

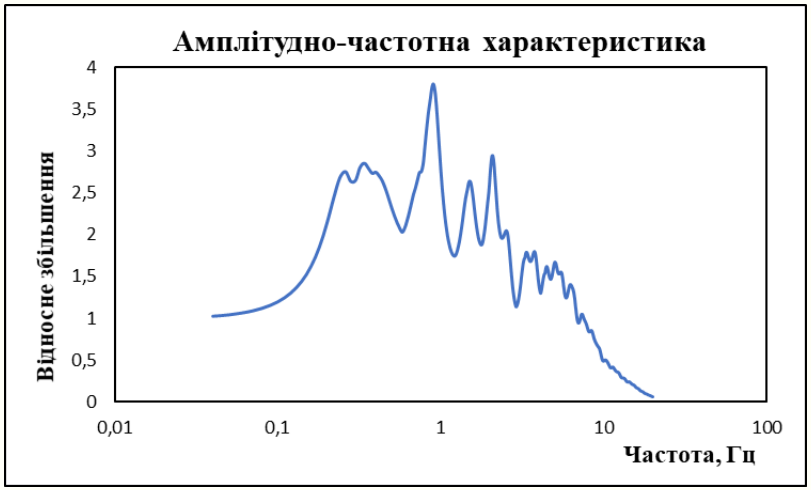


Компресорна станція «Яготин»

Київська область, Яготинський район, с. Ничипорівка, вул. Богдана Хмельницького, будинок 40/5

В межах території виділена
1 таксонометрична ділянка

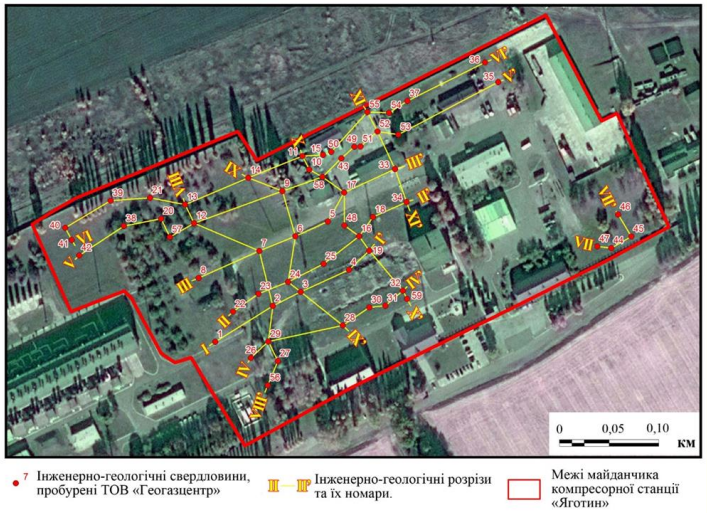
Частотна характеристика грунтової товщі майданчика компресорної станції «Яготин»



Широкий частотний діапазон можливого резонансного підсилення сейсмічних коливань, оскільки потужність осадової товщі майже 900м

АЧХ ґрунтового середовища під майданчиком компресорної станції «Яготин» характеризується частотним діапазоном резонансного підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами від 0,18 до 2,66 Гц з максимальним коефіцієнтом підсилення 3,8.

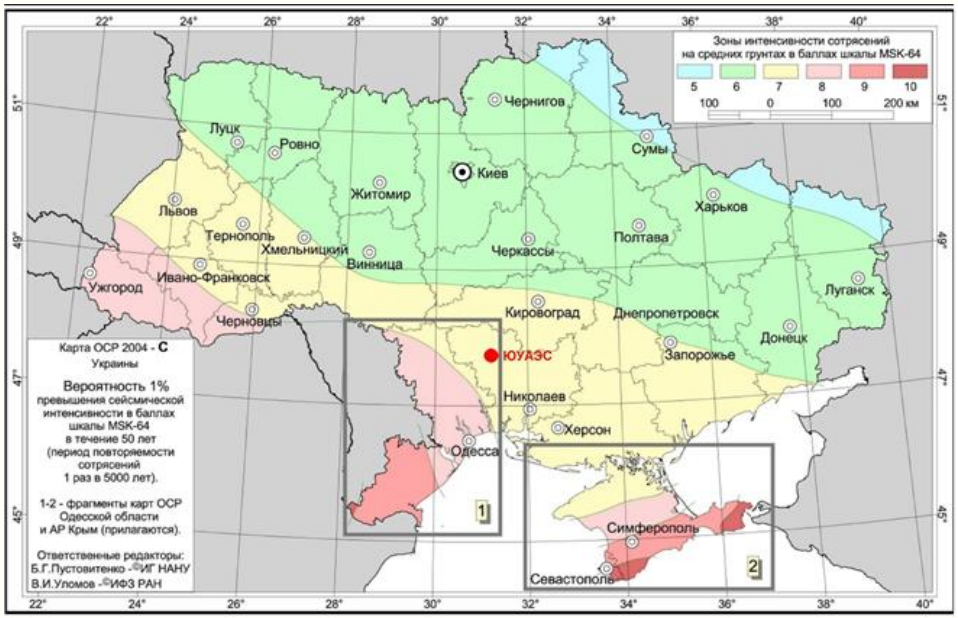
Схема розміщення свердловин і інженерно-геологічних розрізів майданчика компресорної станції «Яготин»

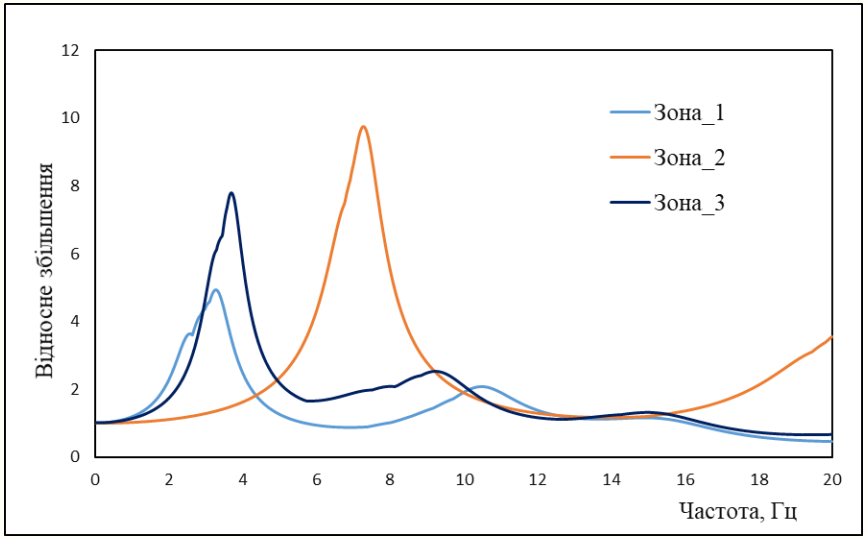


Параметри розрахункових акселерограм для моделювання 6-ти бальних землетрусів із зони Вранча на вільній поверхні майданчика компресорної станції «Яготин»

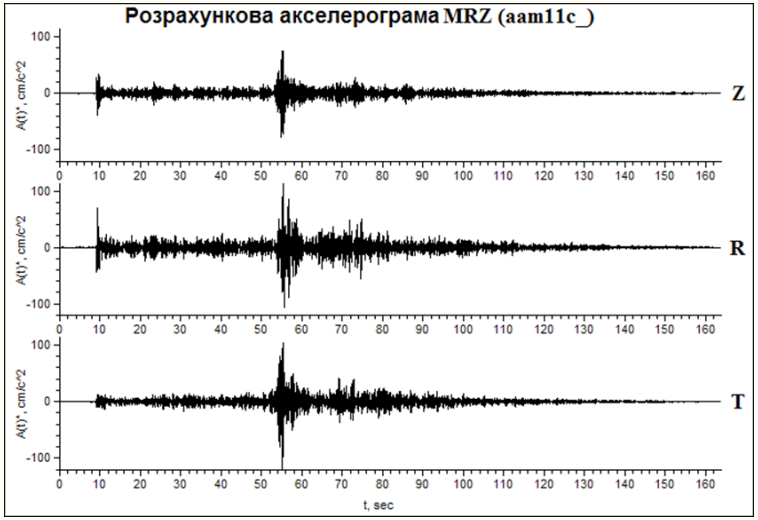
№ пп.	Назва файлу і складова вектора коливань	Компонента коливань	Макс. прискорення, a_m, в $см/с^2$	Переважаючі частоти, Гц		Тривалість коливань, $a \geq 0.9\ a_m$ в сек.	Тривалість коливань, $a \geq 0.5\ a_m$ в сек.	Кільк. відліків в акселерограмі	Дискретність акселерограми Δt в сек
				min	max				
1	AAP10C_T	T	67,8	0,3	4,9	4,1	37,2	16384	0,025
	AAP10C_R	R	63,7	0,6	5,4	8,3	41,4	16384	0,025
	AAP10C_Z	Z	43,4	0,8	5,9	4,1	29	16384	0,025
2	AAP11C_T	T	67,7	0,3	3,1	4,1	12,4	16384	0,025
	AAP11C_R	R	57,5	0,3	4,4	4,1	57,9	16384	0,025
	AAP11C_Z	Z	46,7	0,6	6,5	4,1	45,5	16384	0,025
3	AAP12C_T	T	67,5	0,4	4	4,1	41,4	16384	0,025
	AAP12C_R	R	56,0	0,5	4,9	4,1	45,5	16384	0,025
	AAP12C_Z	Z	46,6	0,6	6,5	4,1	49,6	16384	0,025
4	AAP13C_T	T	67,4	0,8	2,8	4,1	8,3	16384	0,025
	AAP13C_R	R	59,3	0,9	2,5	4,1	8,3	16384	0,025
	AAP13C_Z	Z	41,8	0,9	5,9	8,3	8,3	16384	0,025

Южно-Українська АЕС





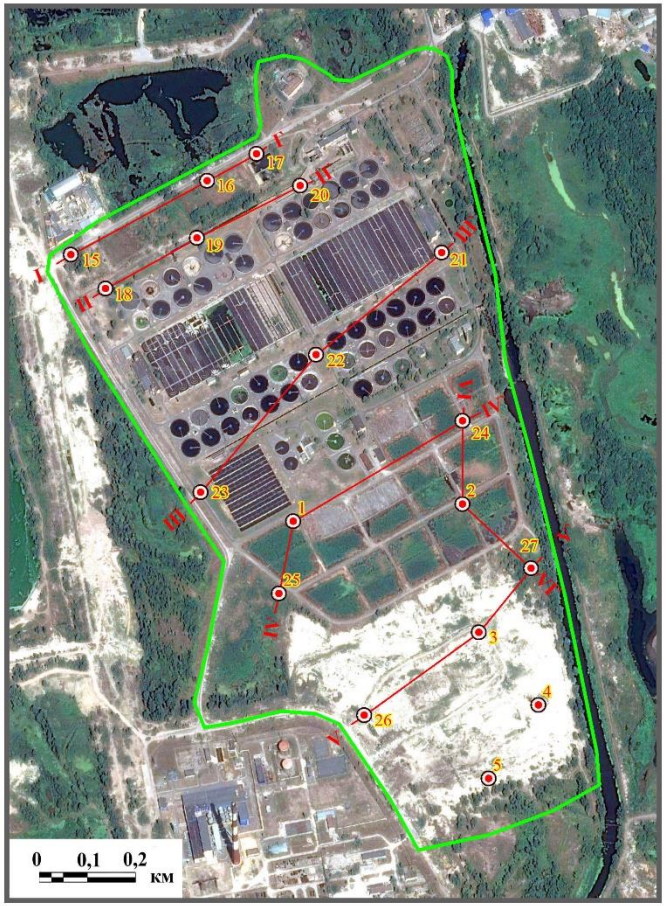
Частотні характеристики моделей ґрунтової товщі під досліджуваним майданчиком ВП «Южно-Українська АЕС»



Графік трикомпонентної розрахункової акселерограми для моделювання МРЗ із зони Вранча на таксонометричній ділянці Зона_1 на вільній поверхні ґрунту майданчика ВП «Южно-Українська АЕС»

Бортницька станція аерації

В межах території виділена
1 таксонометрична ділянка



22 Свердловини, пробурені ДП «Київгео» ПАТ «Київпроект»

V—V Інженерно-геологічні профілі та їх номери

Межа майданчика Бортницької станції аерації

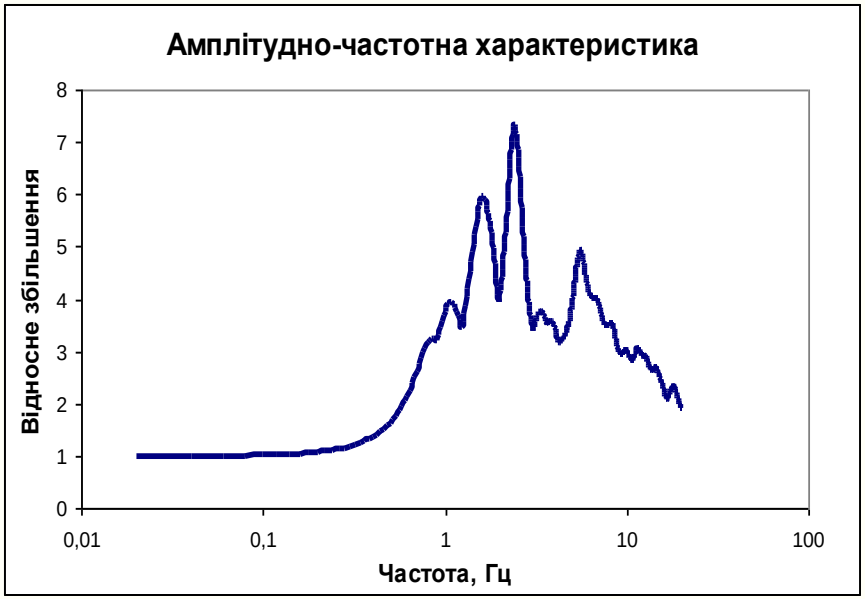
Амплітудно-частотна характеристика ґрунтового середовища території Бортницької станції аерації

АЧХ ґрунтового середовища території Бортницької станції аерації характеризується частотним діапазоном резонансного підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами від 0,22 до 0,96 Гц з максимальним коефіцієнтом підсилення 5,2.

Кременчуцька ГЕС

АЧХ ґрунтового середовища лівого та правого берегів мають схожу форму, але різні частотні діапазони підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами. Максимум АЧХ ґрунтової товщі правого берега Кременчуцької ГЕС знаходиться в частотному діапазоні від 1,1 до 3,4 Гц, а максимум АЧХ лівого берега - від 0,6 до 1,8 Гц.

Компресорна станція «Південнобузька» газопроводу «Кременчук – Ананів - Богородчани»



АЧХ характеризується широким частотним діапазоном резонансного підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами від 0,9 Гц до 10 Гц. В зазначеному частотному діапазоні спостерігаються три максимуми, з яких перші два мають досить великий коефіцієнт підсилення. Найбільші підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами компресорної станції «Південнобузька» газопроводу «Кременчук – Ананів – Богородчани» можуть спостерігатись в частотному діапазоні від 1,35 Гц до 2,8 Гц.

ВИСНОВКИ:

Результати досліджень розв’язують важливу наукову і практичну задачу визначення спектральних характеристик ґрунтів з врахуванням їх нелінійного деформування для забезпечення сейсмостійкості об’єктів атомної енергетики та інших потенційно небезпечних об‘єктів. Основні результати досліджень є наступними:

1. Розвинуто методику визначення частотних характеристик ґрунтів, яка враховує нелінійне деформування при сейсмічних впливах. В основі методики лежить аналітично-емпіричний підхід до розрахунку частотних характеристик ґрунтів.
2. Сформовано базу даних, яка в графічному і цифровому вигляді містить інформацію про залежність модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації для різних типів ґрунтів, характерних для ґрунтів в основі споруд об’єктів атомної енергетики та інших потенційно небезпечних об‘єктів. Запропоновано в якості індикаторних параметрів в алгоритмі підбору деформаційних характеристик для шарів ґрунту в розрахункових моделях використовувати: для глинистих порід - індекс пластичності та глибину залягання; для піщаних - розмір частинок, їх процентний вміст і глибину залягання.
3. Розроблено алгоритм побудови розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтової товщі з врахуванням нелінійних деформаційних характеристик кожного шару;
4. Для умов України встановлено межі використання методів лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного математичного моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи для майданчиків з різними категоріями ґрунтів за сейсмічними властивостями та різною величиною прогнозованої сейсмічної інтенсивності (бальності).
5. Встановлено граничні значення похибок у параметрах розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтів, при яких забезпечуються одержання стійких розв’язків задачі побудови амплітудно-частотних характеристик методом еквівалентного лінійного моделювання.

<u>Впровадження результатів.</u>

Розвинуту методику визначення спектральних характеристик ґрунтів впроваджено на ПрАТ «Укргідроенерго», НАЕК «Энергоатом», ДП НДІБВ, ДП «Сейсмобуд». За розробленою методикою розраховано спектральні характеристики ґрунтів з врахуванням нелінійного деформування в основі об’єктів Ташлицької ГАЕС, компресорної станції «Яготин», Южно-Української АЕС, Кременчуцької ГЕС, Бортницької станції аерації, компресорної станції «Південнобузька» газопроводу «Кременчук – Ананів - Богородчани» та ряду інших об‘єктів для забезпечення сейсмостійкості.

Дякую за увагу!