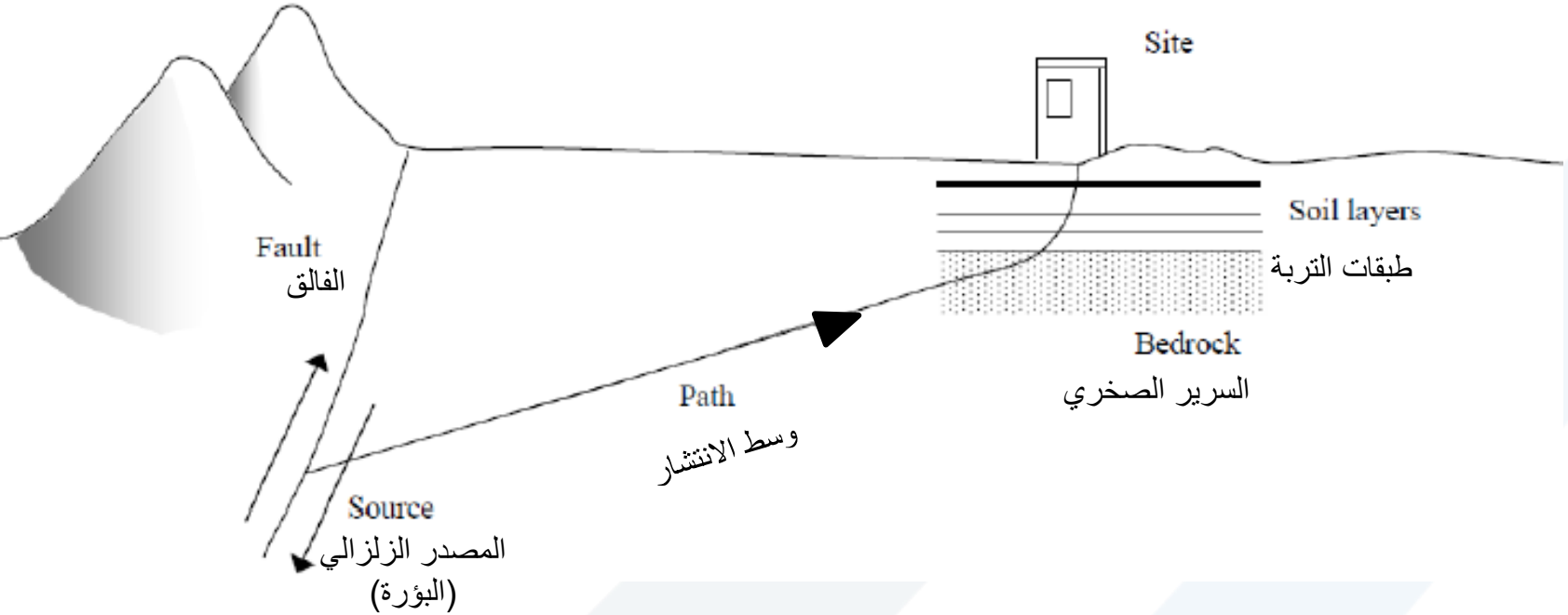
الفصل الرابع : استجابة التربة الزلزالية

4. 1 مقدمة

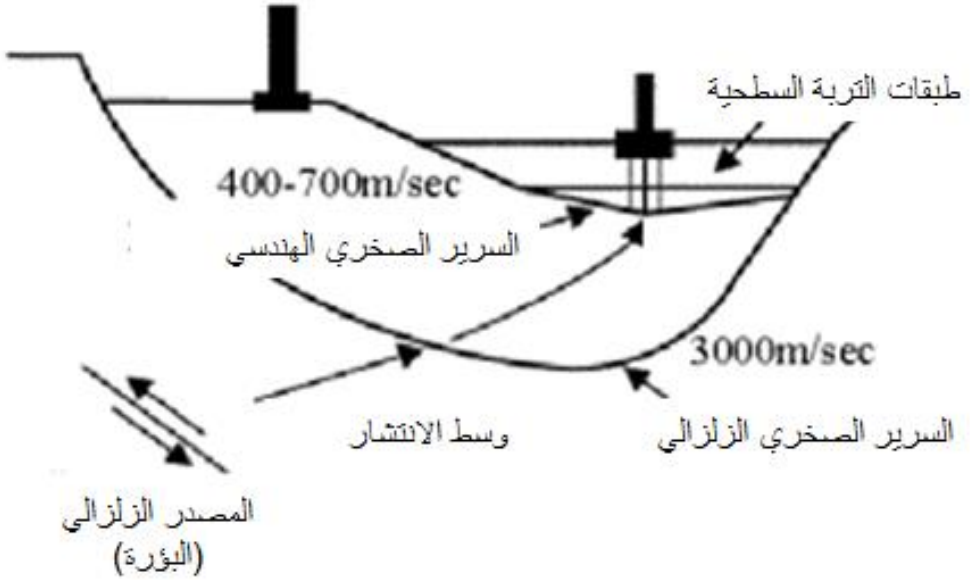
تتأثر حركة سطح الأرض الزلزالية (seismic ground motion) في موقع ما بشكل أساسي بـ :

- شدة الزلزال
- المسافة بين بؤرة الزلزال من جهة وموقع الدراسة من جهة أخرى
- خصائص تربة الموقع بسبب إمكانية تضخيم الموقع للموجات الزلزالية القادمة (الشكل).



من أجل تقييم وتقدير حركة الأرض بطريقة عملية فإنه يجب القيام بالخطوتين التاليتين :

- **تقدير الحركة الاهتزازية الزلزالية أعلى السرير الصخري :** يعرف السرير الصخري بأنه طبقة الصخر المستمر الذي تزيد فيه سرعة انتشار الأمواج القاصة عن 3000m/s. من الناحية العملية، يتم اعتبار السرير الصخري الهندسي بأنه أقل عمق تبلغ فيه سرعة انتشار الموجات القاصة 700m/s
- **دراسة سلوك طبقات التربة السطحية تحت تأثير حركة السرير الصخري** : تتطلب هذه الدراسة تحديد خواص طبقات التربة وتطبيق الشروط الطرفية المناسبة واستخدام قوانين سلوك المادة المناسبة

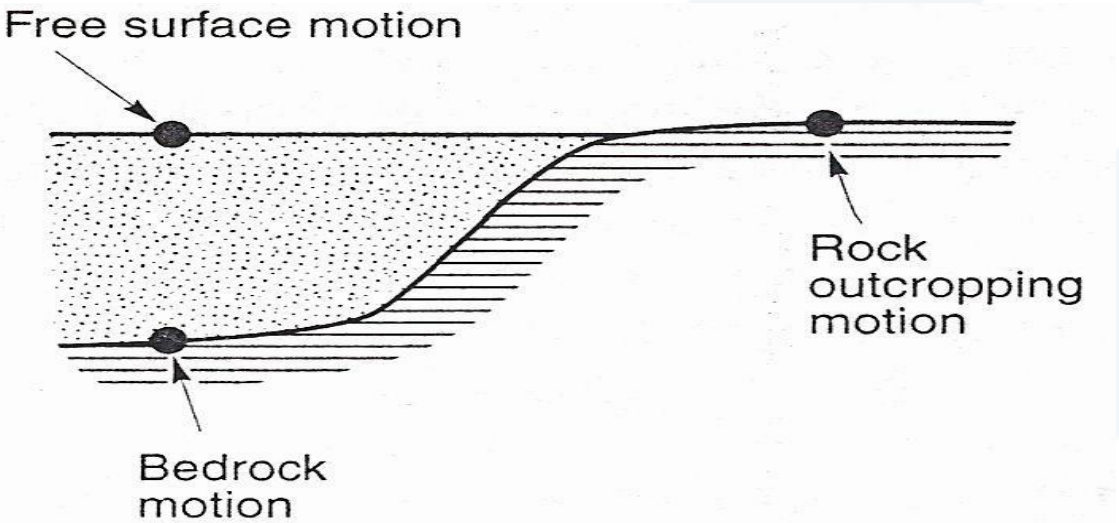


2 .4 تعاريف

حركة السطح الحر (Free surface motion) : هي الحركة على سطح التربة دون وجود منشأة أو أي تحميل لسطح التربة

حركة السرير الصخري (Bedrock motion) : هي الحركة عند قاعدة التربة (أعلى السرير الصخري)

حركة الصخر المتكشف (Rock outcropping motion) : هي الحركة على السطح مكان تكشف الصخر



رغم كون الأمواج الزلزالية تقطع عشرات الكيلومترات ضمن الصخور، ومسافة صغيرة لا تتجاوز عادة مائة متر ضمن التربة، فإن التربة تلعب دوراً هاماً في تحديد خواص الحركة على سطح الأرض وتقدير الأضرار الناتجة عن الزلزال وذلك بسبب عدم تجانس التربة بالقرب من السطح وتعرض الموجة الزلزالية في هذه المنطقة للعديد من عمليات الانعكاس والانكسار.

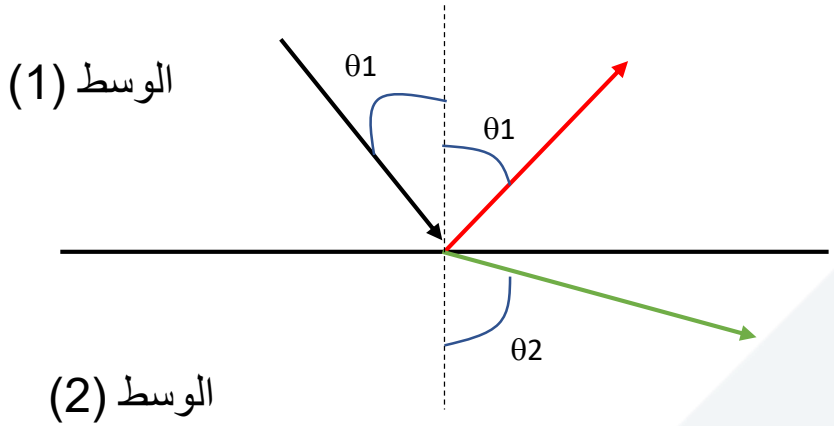
3 .4 انعكاس وانكسار الأمواج

تتأثر الأمواج الزلزالية خلال عبورها من بؤرة الزلزال حتى سطح الأرض بعوامل كثيرة منها ما يتعلق بخواص طبقات الصخور والترب التي تعبرها الأمواج ومنها ما يتعلق أيضاً بالظروف الطبوغرافية للموقع، فيحدث في بعض المواقع تضخيماً كبيراً للأمواج الزلزالية بينما يحدث تخامداً لهذه الأمواج في مواقع أخرى.
من أجل فهم هذه الظواهر سنتطرق في البداية إلى انتشار الأمواج الزلزالية في طبقات التربة السطحية وإلى الانعكاسات والانكسارات التي تتعرض لها أثناء انتشارها.
نتيجة لتباين خواص طبقات الأرض التي تعبرها الأمواج الزلزالية يحدث انعكاسات وانكسارات متعددة للأمواج الزلزالية فتتراكب الأمواج الزلزالية ويحدث تغيير في خواصها (المطال والتردد).

تخضع الأمواج المنعكسة والمنكسرة لقانون سنيل (Snell's law) الذي ينص على أنه عندما ترد موجة اهتزازية على سطح فاصل بين وسطتين متباينين في الخواص فإن جزءاً من هذه الموجة يرتد في نفس الوسط ويدعى بالموجة المنعكسة وجزءاً آخر يخترق الوسط الثاني ويدعى بالموجة المنكسرة، وتكون النسبة $\sin\theta_i/V_i$ لها نفس القيمة لكل من الأمواج الواردة والمنعكسة والمنكسرة، حيث تمثل θ الزاوية التي تصنعها الموجة مع الشاقول.

لنفرض لدينا موجة اهتزازية تنتشر في الوسط (1) بسرعة V_1 وترد على السطح االفاصل مع الوسط (2) بزاوية θ_1 (الشكل). ينعكس جزء من الموجة ضمن الوسط بنفس الزاوية ونفس السرعة وينكسر جزء آخر ضمن الوسط الثاني بسرعة V_2 وزاوية θ_2، وبحسب قانون Snell فإنه يمكن كتابة :

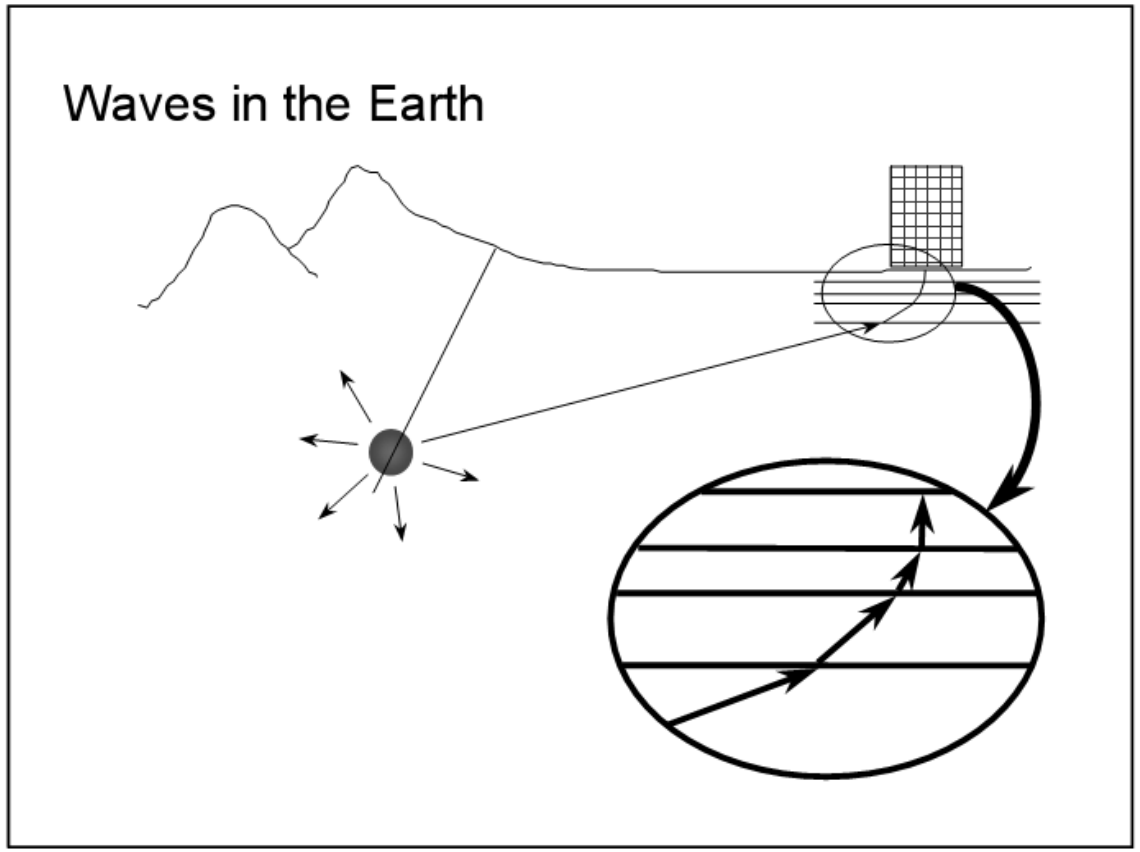
$$\frac{\sin\theta_1}{V_1}=\frac{\sin\theta_2}{V_2}=C^{te}$$



نستنتج مما سبق بأنه عندما تعبر موجة من وسط سرعة الأمواج فيه منخفضة إلى وسط سرعة الأمواج فيه أكبر(أي من وسط صلابته منخفضة إلى وسط صلابته مرتفعة) فإن زاوية ميل الموجة مع الشاقول تزداد، وعندما تعبر إلى وسط سرعة الموجة فيه أصغر (أي من وسط صلابته مرتفعة إلى وسط صلابته منخفضة) فإن زاوية الموجة مع الشاقول تنخفض، وبما أن سرعة انتشار الأمواج الزلزالية تنخفض كلما صعدت باتجاه سطح الأرض فإن زاوية الموجة مع الشاقول تنخفض ويصبح انتشار الموجة بشكل شاقولي تقريباً.

من ناحية أخرى، تتعلق نسبة كل من الأمواج المنعكسة والمنكسرة بفرق الصلابة بين الوسطين

فكلما كان فرق الصلابة بين الوسطين كبيراً كلما زادت نسبة الأمواج المنعكسة وانخفضت نسبة الأمواج المنكسرة، والعكس بالعكس، لذلك عندما يكون فرق الصلابة بين الوسطين كبير جداً فإن كامل الموجة تنعكس تقريباً وإذا كان الوسطان متقاربي الصلابة فإن كامل الموجة تنكسر تقريباً.



ملاحظات

1. الأمواج الزلزالية لا تنتشر في الهواء ولذلك فعندما تصل الأمواج إلى سطح الأرض فإنها تنعكس بكاملها في وسط التربة بنفس اتجاه اهتزاز جزيئات التربة (لا يوجد تغيير في إشارة الانتقال والسرعة والتسارع).
2. الأمواج المنعكسة على سطح فاصل بين طبقتي تربة تغير اتجاه اهتزاز جزيئات التربة (يوجد تغيير في إشارة الانتقال والسرعة والتسارع).
3. في الأوساط المتجانسة تنعكس الموجة مرة واحدة على سطح الأرض ثم تعود إلى باطن الأرض وتتخامد هندسياً.

يمكن دراسة استجابة التربة للحركة الزلزالية بعدة طرق، إما تحلياً باستخدام التحليل أحادي البعد الخطي والخطي المكافئ، أوبالطرق العددية الأكثر شمولاً .

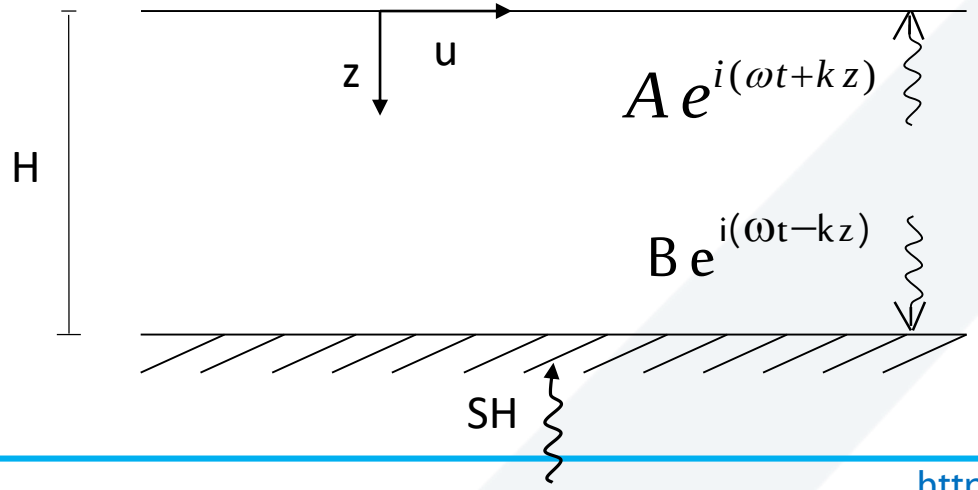
4. 4 دراسة استجابة التربة زلزالياً بالطرق التحليلية

يستند التحليل أحادي البعد على افتراض أن الموجة الزلزالية هي من نوع SH، تنتشر شاقولياً في التربة، وأن التربة والسرير الصخري يمتدان في الاتجاه الأفقي حتى اللانهاية، وأن سلوك التربة مرن خطياً

يتم في التحليل الخطي أحادي البعد تمثيل طبقة التربة **بجملة ذات درجة حرية واحدة**، ويستخدم عادة تابع التحويل (Transfer function) للتعبير عن مختلف بارامترات استجابة التربة كالانتقال والسرعة والتسارع والتشوه. يمثل تابع التحويل نسبة المطال الأعظمي لأي من تلك البارامترات عند منسوبين مختلفين من طبقة التربة. يتم عادة اختيار منسوب سطح التربة وأسفل طبقة التربة (السطح العلوي للسرير الصخري).

أ- حالة طبقة تربة منتظمة غير مخمدة تستند على سرير صخري قاسي

لنعتبر طبقة تربة متجانسة متماثلة الخواص وسلوكها مرن خطي تستند على طبقة سرير صخري قاسي. يخضع لحركة أفقية توافقية وهذا يولد موجة اهتزازية قاصة تنتشر شاقولياً ضمن طبقة التربة (الشكل).



تعطى المعادلة التفاضلية ذات المشتقات الجزئية لحركة الموجة ضمن التربة بالعلاقة :

$$\frac{\partial \tau}{\partial z}=\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2},\qquad \tau=G.\gamma=G.\frac{\partial u}{\partial z}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=V_s^2\frac{\partial^2 u}{\partial z^2},\quad V_s=\sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

بفرض السرير الصخري عالي القساوة، أي أن كامل طاقة الموجة يبقى محصورة ضمن طبقة التربة نتيجة لانعكاسها بالكامل على سطح السرير الصخري.
يمكن كتابة حل هذه المعادلة بدلالة التابع الأسي كما يلي:

$$u(z,t)=Ae^{i(\omega t+kz)}+Be^{i(\omega t-kz)}$$

u الانتقال الأفقي للتربة
ω التردد الزاوي لاهتزاز التربة
B مطال الموجة النازلة (باتجاه z الموجبة)
A مطال الموجة الصاعدة (باتجاه z السالبة)
k رقم الموجة (wave number)، ويساوي

$$k=\frac{\omega}{V_s}$$

عند سطح التربة $(z = 0)$، يكون الاجهاد المماسي معدوماً، أي أن :

$$\tau(0,t) = G.\gamma(0,t) = G.\frac{\partial u(0,t)}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial u(0,t)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left[Ae^{ikz} + Be^{-ikz}\right]e^{i\omega t} = i.k\left[Ae^{ik(0)} - Be^{-ik(0)}\right]e^{i\omega t} = i.k(A-B)e^{i\omega t}$$

$$\tau(0,t) = G.\frac{\partial u(0,t)}{\partial z} = G.i.k(A-B)e^{i\omega t} = 0$$

وهذا يتحقق عندما يكون $A = B$

بالتعويض في المعادلة u نحصل على:

$$u(z,t) = 2A\left(\frac{e^{ikz} + e^{-ikz}}{2}\right)e^{i\omega t} = 2A\cos kz\, e^{i\omega t}$$

وهي تمثل موجة مطالها $2Ae^{iwt}$ ناتجة عن تداخل الموجة الصاعدة والموجة النازلة.

تابع التحويل:

يمثل هنا نسبة مطال الانتقال لأي منسوبين مختلفين من طبقة التربة. لنختار سطح التربة وأسفل طبقة التربة (سطح السرير الصخري)، فيكون تابع التحويل:

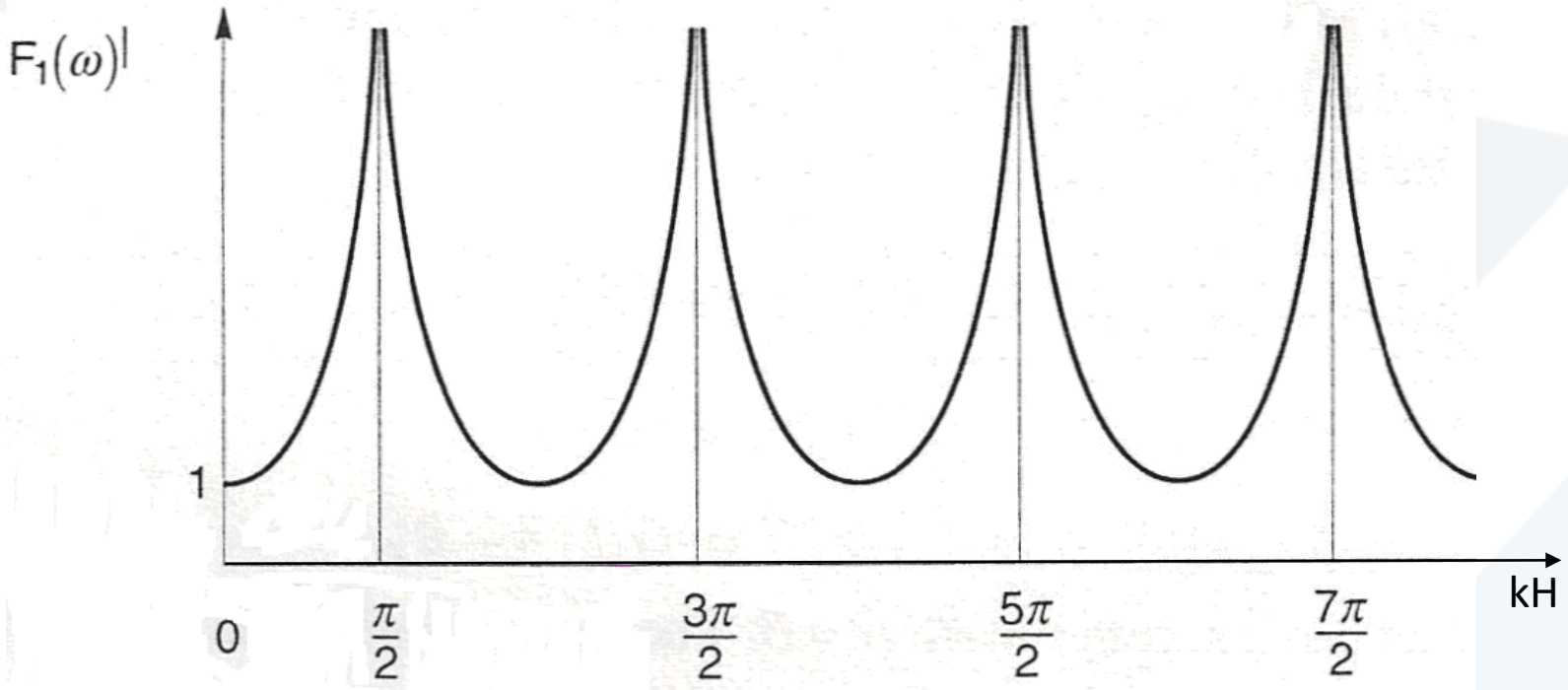
$$F_1(\omega)=\frac{u_{\max}(0,t)}{u_{\max}(H,t)}=\frac{2A.e^{i\omega t}}{2A.\cos kH\ e^{i\omega t}}=\frac{1}{\cos kH}$$

تدعى طويلة تابع التحويل بتابع التضخيم الذي يعطى بالعلاقة :

$$\left|F_1(\omega)\right|=\frac{1}{\left|\cos\ kH\right|}>1$$

ظاهرة الطنين

$$\text{if}\quad kH=\frac{\pi}{2}+n\pi\Rightarrow\left|F_1(\omega)\right|\to\infty$$



$$kH = \frac{\omega}{V_s} * H = \frac{2\pi f}{V_s} * H = \frac{2\pi f}{\frac{V_s}{H}}$$

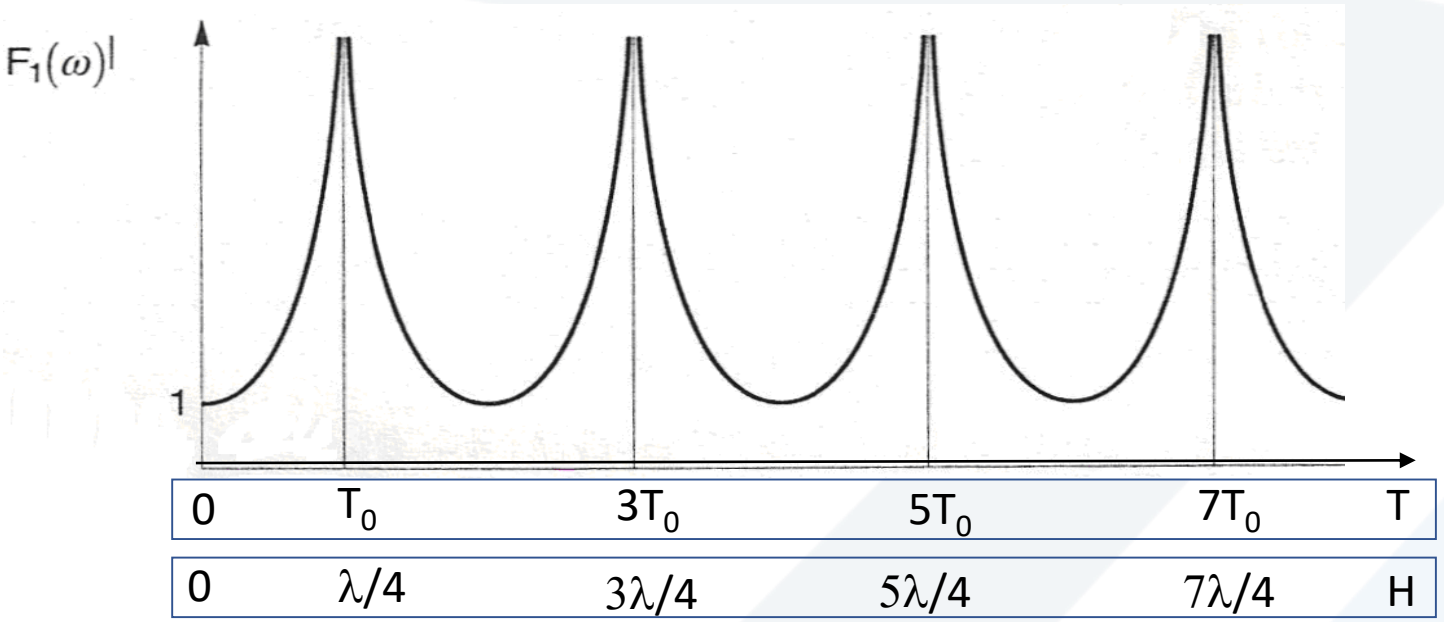
$$kH = \frac{\pi}{2} \Leftrightarrow \frac{2\pi f}{\frac{V_s}{H}} = \frac{\pi}{2} \Rightarrow f = \frac{V_s}{4H}$$

$$f = \frac{V_s}{4H} \Leftrightarrow T = \frac{4H}{V_s}$$

ظاهرة الطنين

H/Vs تمثل الزمن اللازم لعبور الموجة من السرير الصخري حتى سطح الأرض

تحدث ظاهرة الطنين عندما يكون دور الاهتزاز للموجة الاهتزازية التوافقية T يساوي أربعة أضعاف الزمن اللازم لعبور الموجة طبقة التربة ($4H/V_s$)، ويدعى المقدار $4H/V_s$ بالدور الأساسي لوسط التربة $T_0= 4H/V_s$ (أي أن ظاهرة الطنين تحدث عندما يتساوى دور الموجة الاهتزازية مع الدور الأساسي للوسط)



يعطى الدور الأساسي بالعلاقة:

$$T_0 = \frac{4H}{V_S} \Leftrightarrow \lambda = 4H \quad \text{or} \quad H = \frac{\lambda}{4}$$

ويعطى الدور الطبيعي رقم n لطبقة التربة بالعلاقة :

$$T_n = \frac{4H}{V_S}(2n+1) \qquad n = 0, 1, 2, \ldots \infty$$

ب- حالة طبقة تربة منتظمة مخمدة تستند على سرير صخري قاسي

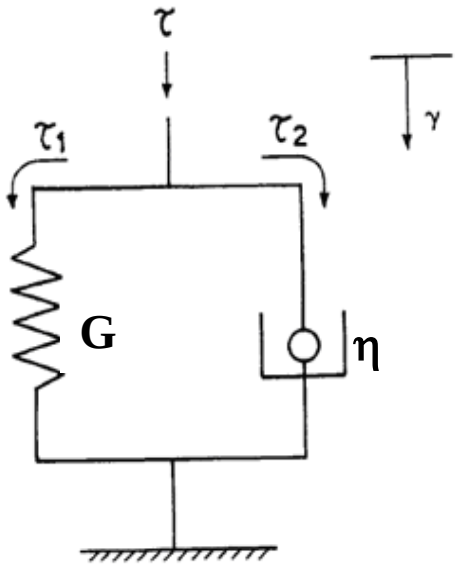
إن التضخيم الغير محدود الناتج عن الحالة السابقة لا يمكن أن يحدث من الناحية الفيزيائية لأن التخامد موجود في جميع المواد، لذلك سنحصل على نتائج أكثر واقعية إذا فرضنا وجود تخامد في طبقة التربة.

إذا فرضنا أن للتربة خصائص القص الخاصة بموديل كالڤن- ڤوي (الشكل) فإن معادلة حركة الموجة ضمن التربة تعطى بالعلاقة :

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\tau = G.\frac{\partial u}{\partial z} + \eta \frac{\partial u}{\partial t} \qquad \eta = \frac{2G}{\omega}\zeta$$

$$\Rightarrow \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t}$$



$$\left|F_2(\omega)\right| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 kH + (\zeta kH)^2}}$$

إذا أوجدنا تابع التحويل بنفس الطريقة التي اتبعناها في الحالة السابقة فإننا نحصل على:

وكما في حالة طبقة تربة غير مخمدة، يصل التضخيم إلى قيمته العظمى عندما تكون :

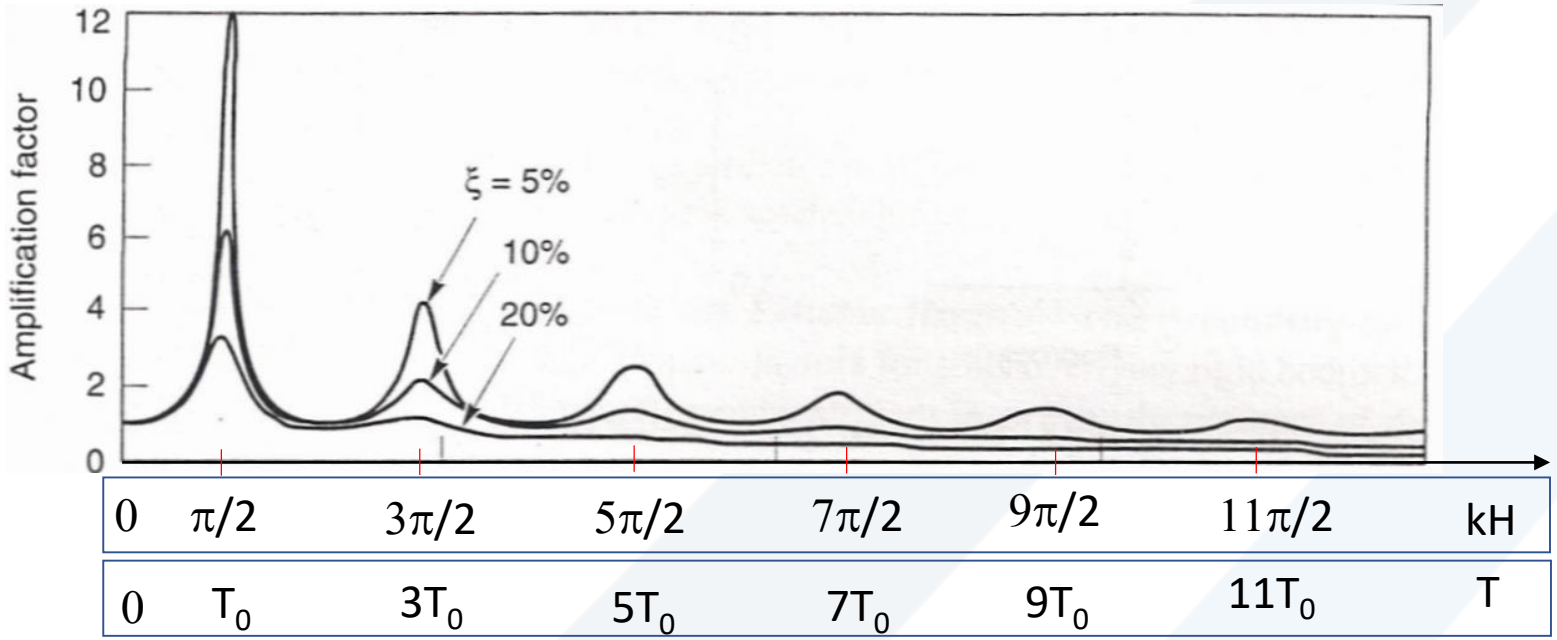
$$kH = \frac{\pi}{2} + n\pi$$

ويعطى التردد الطبيعي رقم n لطبقة التربة بالعلاقة :

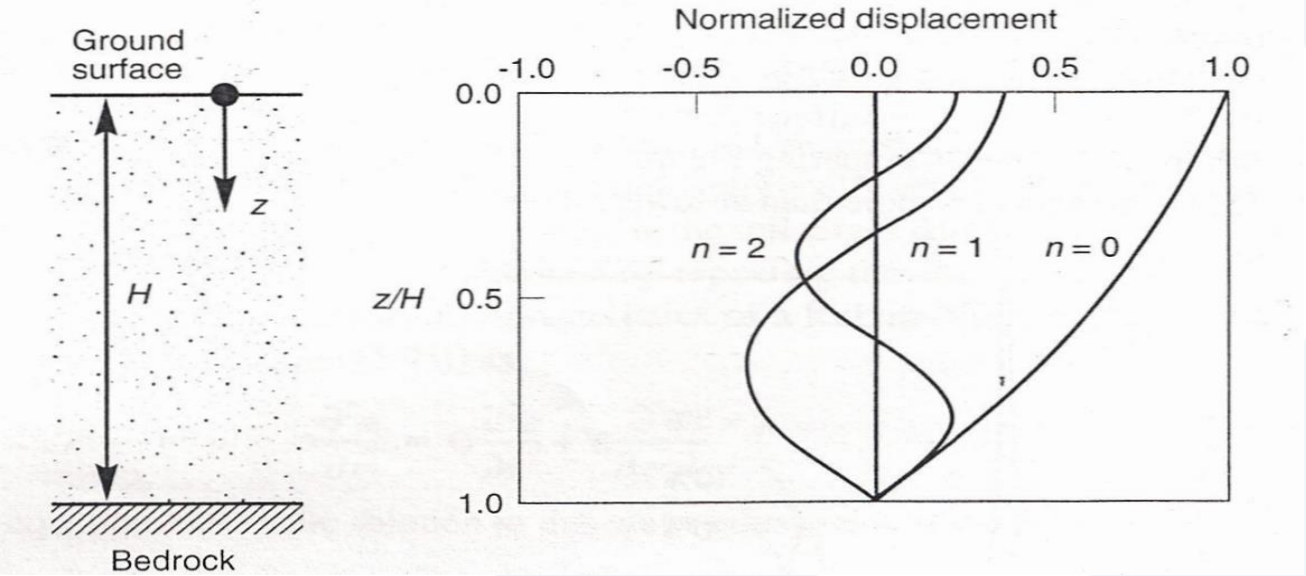
$$f_n = \frac{V_s}{4H}(2n+1) \qquad n = 0, 1, 2, \ldots \infty$$

ويعطى التردد الأساسي بالعلاقة:

$$f_0 = \frac{V_S}{4H} \quad \text{or} \quad T_0 = \frac{4H}{V_S}$$



عند كل تردد طبيعي تولد الأمواج في التربة نمط تشوه. يبين الشكل التالي الأنماط الثلاثة الأولى. نلاحظ أنه عند التردد الأساسي تكون انتقالات التربة في حالة توافق على كامل ارتفاع طبقة التربة، أما عند الترددات الأعلى من التردد الأساسي فإنه يمكن لجزء من طبقة التربة أن ينتقل في أحد الاتجاهات بينما ينتقل جزء آخر في الاتجاه الآخر.



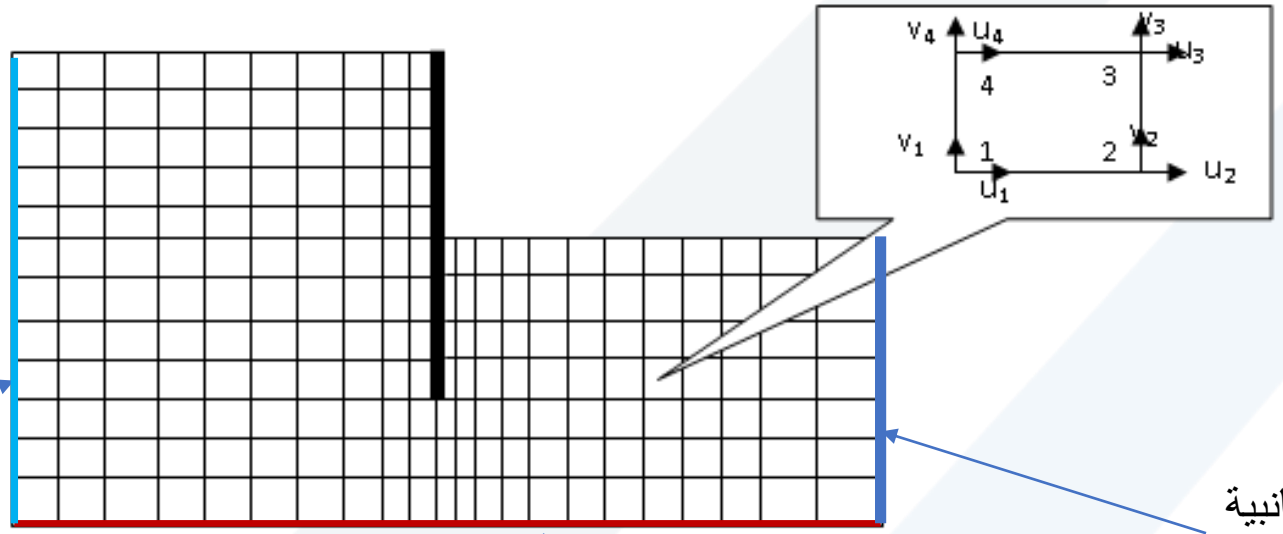
kH	F2
p/2	12.7324
3p/2	4.244132
5p/2	2.546479

الانتقالات الناتجة عن الأمواج من أجل كل من التردد الأساسي (n=0)، والتردد الطبيعي الثاني (n=1)، والتردد الطبيعي الثالث (n=2)
تم نسب الانتقالات إلى الانتقال الأعظمي عند التردد الأساسي.

5.4 دراسة استجابة التربة زلزالياً بالطرق العددية

تسمح الطرق العددية كطريقة العناصر المنتهية بدراسة المسائل أحادية و ثنائية و ثلاثية الأبعاد ومن أجل سلوك التربة الخطي واللاخطي

تعالج طريقة العناصر المنتهية الوسط المستمر كمجموع لعناصر منفصلة تعرف حدودها بواسطة نقاط تدعى بالعقد (الشكل).



الشروط الطرفية الجانبية
حدود خاصة لنمذجة الوسط الممتد حتى اللانهاية

الشروط الطرفية الجانبية
حدود خاصة لنمذجة الوسط الممتد حتى اللانهاية

الشروط الطرفية السفلية
حدود خاصة لنمذجة الحركة الزلزالية +الوسط الممتد حتى اللانهاية

يمكن كتابة المعادلة العامة للحركة بطريقة العناصر المنتهية على الشكل التالي :

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\{F(t)\}$$

4. 5. 1 اعتبارات خاصة بالتقسيمات

تتأثر استجابة الوسط بأبعاد العناصر سواء كان التحليل خطياً أو خطياً مكافئاً أو لاخطياً. إن استخدام عناصر ذات أبعاد كبيرة يمكن أن يسبب فلترة لمركبات الترددات المرتفعة. بالنتيجة, لا يمكن نمذجة الأمواج القصيرة باستخدام عناصر كبيرة الأبعاد, وقد اشترط البعض ألا يتجاوز البعد الأعظمي للعنصر عن (1/5-1/8) طول أقصر موجة.

4. 5. 2 الشروط الطرفية

من أجل فعالية التحليل, من المفضل تخفيض عدد العناصر, وبما أن الأبعاد الأعظمية المسموحة للعناصر مرتبطة بسرعة انتشار الأمواج وبالتردد فإن تخفيض عدد العناصر يتحول عادة إلى تخفيض حجم الوسط الذي نقوم بتقسيمه, وهذا يؤدي إلى زيادة تأثير الشروط الطرفية على نتائج التحليل.
في العديد من المسائل يكون السرير الصخري بعيداً عن المنطقة التي تهمنا في الدراسة. بالنتيجة, يمكن للطاقة التي تنتقل بعيداً عن تلك المنطقة أن تخرج باستمرار من الوسط وهذا يمثل نوعاً آخراً من التخامد يدعى بالتخامد الهندسي.

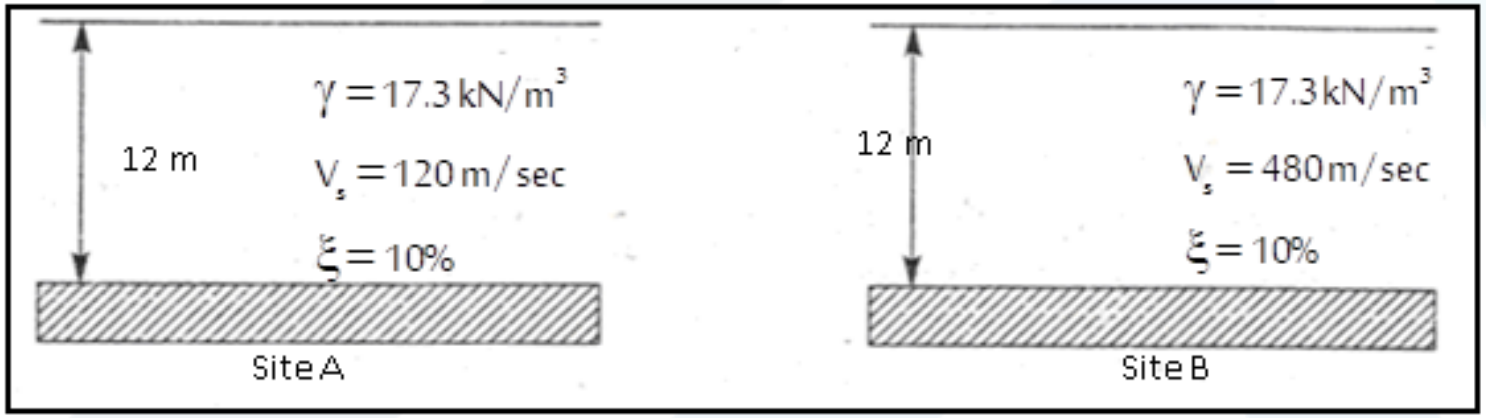
في التحليل الديناميكي بطريقة العناصر المنتهية, من المهم جداً نمذجة هذا النوع من التخامد, ويتم ذلك عادة عن طريق إضافة حدود خاصة على أطراف الوسط تقوم بامتصاص الأمواج الواردة إليها.

4. 6 تأثير الحالة الموضعية للموقع (Local site effect)

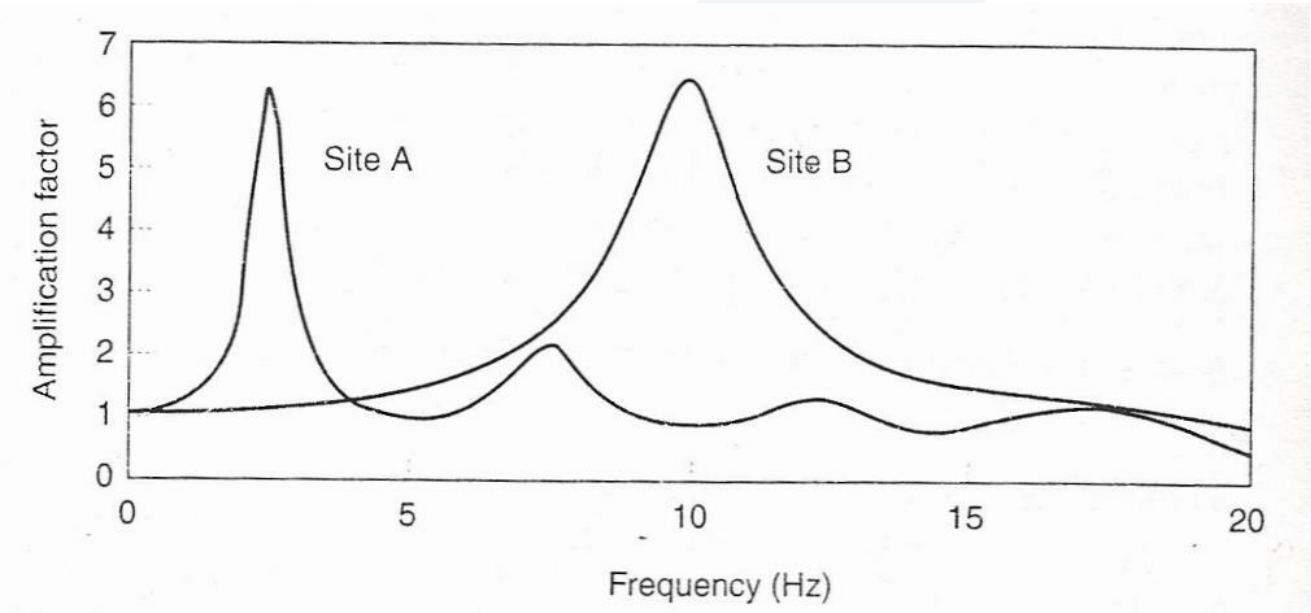
يمكن للحالة الموضعية للموقع أن تؤثر بشكل كبير على جميع الخصائص الهامة لحركة الأرض الزلزالية كالمطال والمحتوى الترددي والمدة. يتعلق مدى التأثير بطبوغرافية الموقع وخواص التربة وخواص السرير الصخري (صلابته) وحركة الدخل (الحركة على سطح السرير الصخري). يمكن إيضاح تأثير الشروط الموضعية للموقع بالطرق التالية:

4. 6. 1 تأثير خواص التربة

يمكن تفسير تأثير خواص التربة عن طريق الدراسة المبسطة لاستجابة التربة. لنفرض مثلاً مقطعي التربة المبينين بالشكل التالي والمتشابهين باستثناء أن تربة المقطع B أكثر صلابة من تربة المقطع A.



بفرض أن سلوك التربة في المقطعين مرن خطي، والقاعدة صلبة، ولندرس سلوك كل من الوسطين تحت تأثير سلسلة من الحمولات التوافقية ضمن مجال من الترددات (0–20) هرتز. يكون تابع التضخيم لكل مقطع كما هو مبين بالشكل التالي. نلاحظ بوضوح على الشكل أن الموقع الأكثر صلابة (الموقع B) يضخم حركات السرير الصخري ذات الترددات المرتفعة، بينما الموقع الأقل صلابة (الموقع A) يضخم الحركات ذات الترددات المنخفضة. بما أن الحركة الزلزالية الواصلة إلى السرير الصخري تحتوي على مجال من الترددات فإن بعض مركبات السرير الصخري سوف تتضخم أكثر من الأخرى.



توابع التضخيم للموقعين A و B

4. 6. 2 تأثير مقاومة السرير الصخري

تؤثر مقاومة السرير الصخري أيضاً على تضخيم حركة الأرض، فمن أجل نفس شروط التربة يسبب انخفاض صلابة السرير الصخري عادة إلى انخفاض عامل التضخيم وذلك بسبب انكسار جزء من الأمواج الزلزالية على السطح العلوي للسرير الصخري وانتشارها وتشتتها ضمن السرير الصخري (التخامد الهندسي) . لذلك فإن توصيف الحالة الموضعية للموقع يجب أن يتضمن أيضاً الوزن الحجمي وصلابة السرير الصخري واختيار طريقة الدراسة المناسبة والتي تسمح بأخذ الأمواج المنكسرة بعين الاعتبار.

كما رأينا في حالة السرير الصخري عالي الصلابة فإن عامد التضخيم يتعلق بعامل التخامد. على سبيل المثال، في حالة الوسط غير المتخامد يكون عامل التضخيم يساوي اللانهاية، ومن أجل عامل تخامد 0.05=ζ يكون عامل التضخيم حوالي 12.
أما في حالة الوسط المتجانس، يتعلق عامل التضخيم أيضاً بعامل التخامد ولكن قيمته أصغر بكثير من حالة السرير الصخري عالي الصلابة.
على سبيل المثال، في حالة الوسط غير المتخامد يكون عامل التضخيم يساوي 2 وذلك لأن الموجة تنعكس مرة واحدة على سطح الأرض دون تغيير الإشارة، أي أنها تتضاعف. أما في حالة الوسط المتخامد يكون عامل التضخيم أصغر من 2

4. 6. 3 تأثير طبوغرافية الموقع

إن دراسة تأثير طبوغرافية الموقع معقدة جداً نتيجة لتراكب الأمواج الذي يمكن أن يولد نموذجاً معقداً للتضخيم أو للتخامد. يمكن تقدير تأثير طبوغرافية الموقع الناتجة عن عدم انتظام السطح بشكل تقريبي اعتماداً على الحل المعطى من قبل (Aki, 1985) الذي يدرس حالة سطح أرض بشكل إسفين معرض لموجة قص تنتشر شاقولياً. وفقاً لهذا الحل فإن انتقال ذروة الإسفين ستتضخم بمقدار $2\pi/\phi$ حيث تمثل ϕ زاوية الإسفين (الشكل. a). يمكن استخدام هذا الحل من أجل دراسة تأثير طبوغرافية الموقع لعدة حالات كالتلال والوديان (الشكل.b).