بررسی اثر زلزله بر روی ساختمانهای انعطافی و شکننده

از : دکتر محمد رضا حجازی

منظور از این مقاله اینستکه عکس‌العمل یك ساختمانرا درمقابل نیروی مخرب زلزلـه بـوسیله آزمایش یك نیروی خارجی برروی ساختمان‌مزبور ویا مدل آن مطالعه نموده ونیروی مخرب معادل را تعیین‌نمود تابتوان طرح ساختمان مزبور رادرمقابل زلزله تهیه نمود این‌مسئله بعوامل ذیل بستگی‌دارد :

۱ـ نیروهای مخرب کـه درپی ویـا سقف یك ساختمان اثر میگذارند .

۲ـ چگونگی پخش ایـن نیروها در سقف و ستونهای ساختمان .

نه‌تنها موارد فوق راباید مورد بررسی قرارداد بلکه عکس‌العملی که هریك‌از اجزاء ویا ملکولهای ساختمان دربرابر زلزله ویا نیروی خارجی از خود ابراز میدارند باید تعیین شده و مورد بررسی دقیق قرار گیرد .

اصولا یك زلزله را میتوان ازنظر موج آن و درنتیجه شتاب جابجائی آن موردنظر قرارداد،معادله یك‌شتاب جابجائی غیرمشخص بصورت ذیل میباشد .

$$x'' = f(t)$$

یعنی‌شتاب امواج زلزله‌طبق فرمول کلی‌تابعی از زمان میباشند .

جابجائی $= x$

شتاب $= x''$

واحدزمانی $= t$

این شتاب را میتوانیم از منحنی‌های آنالوگی نوارهای ضبط شده سایزموگرام که امواج زلزله را ثبت نموده‌اند بدست آوریم .

دو نوع ساختمان داریم :

۱ـ ساختمانهای شکننده یاغیرقابل انعطاف*

۲ـ ساختمانهای انعطافی

۱ـ ساختمانهای شکننده آنهائی هستند کـه فواصل نسبی‌بین دونقطه غیرمشخص آن دراثر نیروی خارجی ثابت باقی میمانند .

لذا محقق است که این نوع ساختمانها برای مقابله با زلزله ویا هرنوع نیروی خارجـی مناسب نیستند زیرا فواصل اجزاء آنها ثابت ودرنتیجه‌قسمت های‌مختلف پس‌از شکستن از یکدیگرجدا میشوند.

۲ـ درساختمانهای انعطافی‌فواصل بین اجزاء دراثر نیروهای خارجی کم وزیاد شده واین تغییرات بطوری است که نمیتوان نادیده گرفت کم وزیادشدن فواصل مزبور برای تعیین نیروی وارده به قسمت داخلی ساختمان بکار میرود.

این ساختمانها درصورتیکه طرح مناسب‌داشته باشند درمقابل شکنندگی تـوسط نیروهای خارجی مقاومت میکنند .

بدین معنی که جابجائی اجزاء آنها مناسب نیروهای وارده بوده ودر نتیجه پابرجا باقی میمانند

نوع سومی‌ازساختمانهاوجود دارد که ازانواع ساختمانهای قابل انعطاف بوده وبرای مطالعات آنها وقت بیشتری لازم‌دارد.

*ـ مقصود ازانعطاف این است‌که درمقابل نیروی خارجی شکسته نشده ووضع خود را نسبت به‌نیروی‌مزبور تغییر میدهد .

تغییر شکل ودرجه آزادی ساختمان

درجه آزادی یك ساختمان :

عبارت است ازعدد عواملی که میتوان وضع و موقعیت یك ساختمان ویا جزئی ازآنرا بطور مستقل در هر لحظه مشخص نمود

مثلا یك عمارت چهارطبقه را میتوان گفت که ازنوع درجه چهارم آزادی‌است

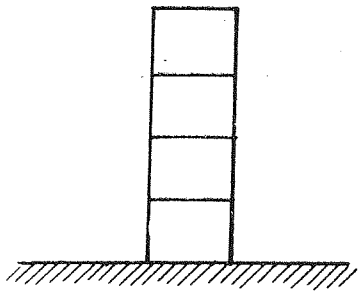
هرساختمان‌میتواند یکی‌از دونوع تغییرشکل ذیل را داشته باشد.

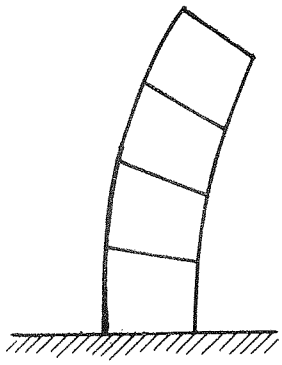
۱ـ تغییرشکل الاستیسیتی یعنی قابلیت‌انحناء داشتن مانند شکل (۱)

۲ـ تغییر شکل شکننده یعنی فاصله دو نقطه ثابت استودر نتیجه توسط شکافی ازهم‌جدامیگردند مانندشکل(۲)

درتغییرشکل‌نوع‌اول‌یعنی تغییر شکل‌انحنائی اجزاء مختلفه درهم فشرده شده ویامنبسط میگردند درهر صورت‌فشردگی یعنی انقباض‌یاانبساط بدوریك محور افقی وعمودی صورت میگیرد

درتغییر شکل نوع دوم سطوح افقی یا اجزاء





شکل (۱)

تغییر شکل انحنائی

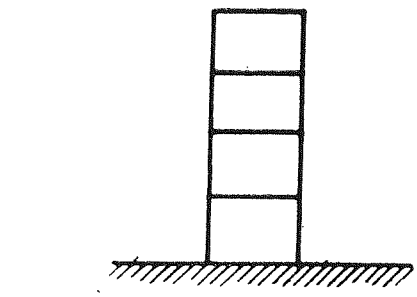
۱ـ اندازه‌قطعات‌پس‌ازتغییرشکل‌تغییرمینماید

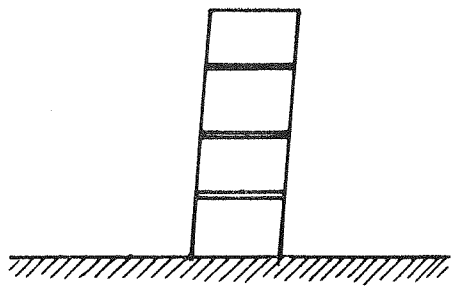
۲ ـ ستونها بصورت عمودی وافقی جابجا میشوند ولی‌قطعات ثابت هستند قطعات دور یك محور افقی‌فشرده یامنبسط میگردند

۳ـ شکسته نمیشوند

٤ـ قطعات انحناء پیدا می‌نمایند

۵ـ فاصله گرفتن اجزاء ازیکدیگرودرنتیجه انحنای ساختمان توسط نیروی مخرب‌صورت‌میگیرد





شکل (۲)

تغییر شکل شکننده

۱ـ فاصله قسمت‌ها پس از تغییر شکل ثابت است

۲ـ قطعات افقی بهمان صورت باقی میمانند

۳ـ شکسته میشوند واز هم جدا میگردند

٤ـ قطعات انحناء پیدا نمی‌نمایند

۵ـ نیروی‌مخرب باعث‌میگردد تافاصله‌اجزاء ازیکدیگر زیاد شده وباعث جدائی قطعات ودرنتیجه شکنندگی ایجاد میگردد

سیستم بهمان ترتیب افقی باقی میمانند وتغییرشکل نخواهند یافت درحالیکه‌مجموعه سطوح دراثر ایجاد فاصله بین‌دو نقطه‌ازهم‌جداشده‌وتغییرشکل کلی‌مییابند

شکل ۲ب دراین‌تغییرشکل سقف‌محکمتر است نسبت بستونها ولذا اگر ستونها جابجا گردند سقف جابجا نمیشود ولی‌باستونها فاصله‌میگیرد این‌جابجائی ستونهای‌عمودی نیروی‌مخرب را درخودنگاه میدارند

درهرنوع تغییرشکل میتوان ازمقدار جابجائی ستونها صرفنظر نمود وفقط جابجائی سقف را مـورد نظر وملاحظه قرار داد ـ ودرجه آزادی هرسیستم یا ساختمانی بستگی به‌عدد عـوامل مشخص شده سقف ساختمان دارد ـ یعنی بستگی بتعداد عواملی دارد که مستقلامیتوانند یك‌ساختمان‌راتوصیف ومشخص‌نمایند برای آشنائی بحرکت‌عکس‌العمل‌یك‌ساختمان انعطافی باید دوعامل ذیل را موردنظر قرار داد:

۱ـ ضریب سختی K

۲ ـ ضریب استهلاکی N

ضریب سختی K برای تعیین مجموعه‌نیروهای برگشتی بکار میرود که جسم تغییر شکل یافته را به وضع متعادل اولیه عودت میدهد ـ یعنی برای تعیین Strain بکار میرود ـ فرض مینمائیم که معادله‌مشخص این نیروها خطی باشند

بعبارت‌دیگر بین‌این نیروهای برگشت‌وتغییر شکل رابطه مستقیمی وجود داشته باشد یعنی‌نیروهای برگشت وتغییر شکل متناسب یکدیگر باشند .

درحالت عمومی متوان جسم را بصـورت یك فنروضریب سختی K را درحکم‌ضریب ثابت فنری* در نظر گرفت

---

*ـ ضریب ثابت فنری :
نیروئی است‌که لازم‌است تایك جسم به‌اندازه‌واحد طول جابجا گردد(طول آن اضافه ویاکم شود)

بیشتر انرژی درجائی قرار دارد که فرکانس عمومیت دارد.

وقتی نیروئی به‌جسمی وارد شود یکـی از سه حالت فوق اتفاق خواهد افتاد وجسم جابجا میشود.

۱ـ بنام Stable = Restoring Force
سیستم با حداقل انرژی بـوده است
ولذاجابجائی کوچك انرژی‌پتانسیل
را زیادتر مینماید

الف ـ توده‌یاجسم‌بحالت اول برمیگردد

ب ـ مجموعه نیروهای وارده بر جسم مخالف صفر است

ج ـ ممان‌جدیدی‌بطرف وضع‌اولیه جسم‌حاصل میشود

۲ـ Un Stable
یعنی‌حالت حداکثر انرژی راایجاد مینماید یعنی جابجائی زیادهم‌انرژی پتانسیل را زیاد نمیکند

الف ـ توده یاجسم‌درجهت جابجائی‌حرکت را ادامه میدهند

ب ـ ممان‌باعث یك‌جابجائی کوچك میگـردد که ممان‌آن برخلاف جهت اصلی است

وآنرا Negativ Restoring Force گویند

۳ـ Neutral

الف ـ دروضع جدیدی بطورثابت قرارمیگیرد

ب ـ مجموعه نیروهای وارده بـه جسم پس از جابجائی وممان‌های حاصله صفر است =

هر سیستمی که رستورینگ فـورث Force Restoring بامشخصات مخصـوص، حاصل نمایـد سیستم خطی Linear System گفته میشود .

1-Moment , or Unbalanced Force
ممان =

ضریب استهلاکی N برای تعیین نیروهائی است که دراثر اصطکاك حاصله توسط ارتعاش غیرمداوم واز بین رفته درزمان معینی حاصل میشود بکار میرود

درحالت عمومی اصطکاك مایعی را میتوان نام برد . که این نیروی اصطکاکی متناسب باسرعت موج میباشد یك مثال جامع آن Desk-Pot یاسدمحافظ آب میباشد

ساختمانهای شکننده : شکل ۳

در ساختمانهای شکننده یك ساختمان بصورت یك واحد جابجا گردیده واین تغییر وضع جزانتقال موازی چیز دیگری نمیباشد.

شتاب هر نقطه در هر لحظه ثابت است .

نیروهای اینرسی Inertia بصورت اندازه مطلق بطریق ذیل می باشند

$$F=\Sigma m X''=X''\Sigma m=X''M=X''\frac{p}{g}$$

مجموعه نیروی نقل ساختمان یاوزن کل ساختمان $P=$

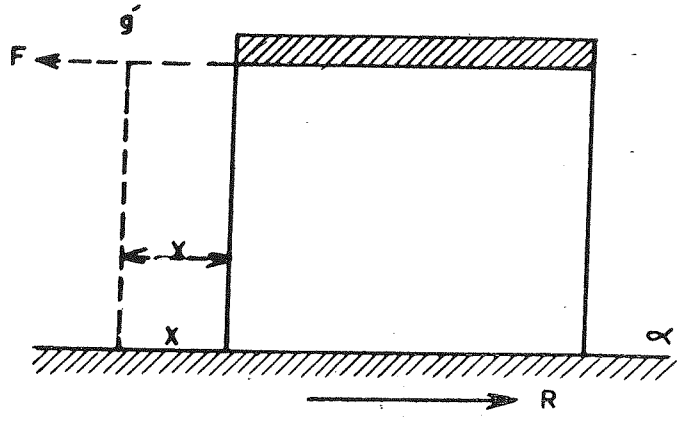
مجموعه توده ساختمان $M=$

$\Sigma m=M$

ولذا میتوان نوشت $M=p/g$

$R=X''_{max}\cdot p/g$

نیروی مخرب ساختمان $R=$



شکل (۳)

میتوانیم چنین بنویسیم

$$R=\frac{X''_{max}}{g}\cdot p$$

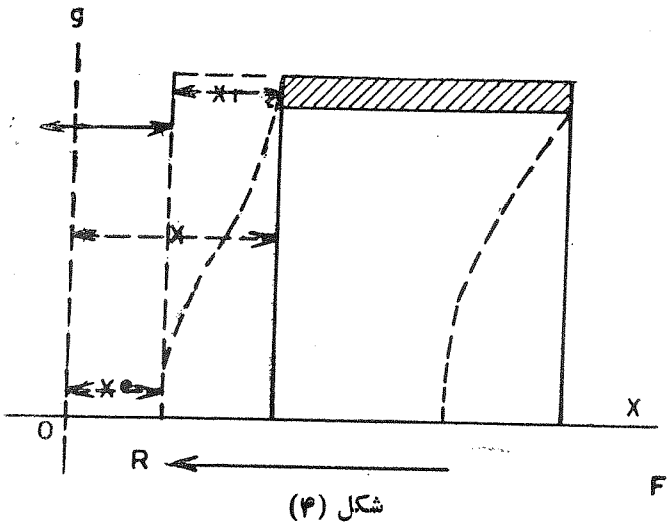
$$\alpha=\frac{X''_{max}}{g}$$

ولذا $R=\alpha\cdot p$ این فرمول بطور کلی برای ساختمانهای شکننده ضدزلزله بکار میرود

نیروهای خارجی به‌نسبت عکس توده اجزاء ساختمان تقسیم میشوند.

ساختمانهای انعطافی بایك درجه آزادی.

درشکل ٤ فرض میکنیم که تمام توده M ووزن ساختمان P درسطح بالائی ساختمان یعنی سقف متمرکز شده‌اند. دراثر یك زلزله یا حرکتی جابجائی مطلق سقف (X) حاصل میگردد این جابجائی ازدوقسمت حاصل شده است یکی جابجائی ساختمان (که سقف هم جزئی از آن است) x_e نسبت بحالت پایداری اولیه دوم جابجائی سقف ساختمان x_r نسبت بساختمان



شکل (۴)

یاپی ساختمان

جابجائی کل سقف ساختمان دراثر زلزله $x=$

جابجائی پی ساختمان $x_e=$

جابجائی نسبی = جابجائی سقف ساختمان نسبت به پی ساختمان $x_r=$

$$x=x_e+x_r$$

درجسم شکل ٤ نیروهای اولیه F متناسب شتاب مطلق X'' میباشند لذا طبق قانون کلی میتوان نوشت

$$F=M.X''$$

و چون $x=\frac{p}{g}$ است :

در نتیجه $F=\frac{p}{g}X''$

نیروی وارده بساختمان برای جابجائی $F=$

شتاب مطلق $X''=$

ساختمان شکل٤ درمقابل نیروی $F=\frac{P}{g}x''$ باندازه فاصله x جابجا میگردد وساختمان در مقابل این نیرو از خود عکس العمل یامقاومت نشان میدهد ضریب مقاومت ساختمان بستگی به فاصله جابجائی و ضریب نسبی مقاومتی ساختمان (K) دارد بهرصورت برطبق قانون دوم نیوتون این نیروی مخرب برابر با نیروی جابجائی درجهت مخالف میباشد.

$$F=-R$$

نیروی مخرب $R=$

ویا

$$F+R=o$$

$$\frac{P}{g}X''+K\cdot X_r=o$$

نیروی مخرب $=$ $R=K\cdot X_r$

ضریب نسبی یا نیروی مخرب برای واحد جابجائی $K=X_r$

$$\frac{P}{g}X''=-KX_r$$

K_r رامیتوان بوسیله محاسبات ساختمانی بدست آورد .

بنابراین $\frac{p}{g}X''+Kx_r=o$

ولی قبلا گفته شد که $X=X_e+X_r$

ولذا $X''=X''_e+X''_r$

حال اگر در فرمول ذیل بجای X'' مقادیر آنرا بگذاریم خواهیم داشت که:

$$\frac{P}{g}X''+K\cdot X_r=o$$

شتاب درنتیجه زلزله $=X''_e$

شتاب درنتیجه عکس العمل سقف نسبت به پی ساختمان $=X''_r$

$$\frac{P}{g}(x''_e+x''_r)+K\cdot X_r=o \quad \text{یا}$$

$$\frac{P}{g}x''_e+\frac{P}{g}x''_r+K\cdot X_r=o \quad \text{ویا}$$

واگر بخواهیم از لحاظ نیرو بررسی نمائیم میتوان نوشت که

$$F_e=\frac{P}{g}x''_r+K\cdot X_r=-\frac{P}{g}x''_e$$

نیروی F_e همان نیروئی است که برای جابجائی تمام ساختمان دراثرزلزله بکار میرودیا بعبارت دیگر نیروی F_e نیروئی است که برای جابجائی یك ساختمان شکننده باهمان توده مزبور در اثر زلزله اعمال میگردد.

$F_r=\frac{P}{g}x''_r$ نیروئی است که برای جابجائی نسبی سقف ساختمان نسبت به پی بکار میرود . باید توجه داشت دریك ساختمان مسکونی سقف یا سطح بالائی آن (سطحی که تمام وزن وتوده در آن متمرکز است) کاملا تحت تاثیر نیروی حاصله از زلزله (که یك توده شکننده یاتوده معادل وارد میشود) قرار میگیرد ولی نیروی عکس العملی آن دیگر F_e نمیباشد این نیروی مخرب یا عکس العملی متناسب با نیروی جابجائی میباشد .*

در ساختمان انعطافی نیروی F_e برای قسمتی از جابجائی سقف ساختمان بکار میرود. در حالی که در ساختمان شکننده نیروی جابجائی همان نیروی کل F میباشد .

اثر یك زلزله سینوسی

زلزله مشخص تابع سینوس ذیل مفروض است

---

* نیروی اولیه یا نیروی جابجائی = Force of Inertia یعنی نیروئی که به جسم وارد میشود تاجسم را دریك راستای مشخص حرکت داده ویاجسم را به حالت اولیه برگردانده و یاجسم را در حالت تعادل نگاه دارد .

نیروی مخرب = بفرانسه Effort Tranchant به انگلیسی Restoring Force یا تلاش نهائی

فرمول نیروی F_e بصورت ذیل خواهد بود

$$F_e = -\frac{P}{g} x''_{e.max} \cdot \sin\Omega t \qquad (۲)$$

$$(F_e = FO \sin\ \Omega t)$$

حداقل زمان یك نوسان یعنی زمانی یك حرکت خود را تکرار مینماید یا پریود T_t است

$$T_t = \frac{2\pi}{\Omega}$$

سرعت زاویه‌ای دریك تابع سینوسی برای هر حرکتی نماینده مشخصات آن حرکت خواهد بود. فرمول را میتوان در حالت کلی بصورت ذیل نوشت

$$F_e = \frac{P}{g} x''_r + K \cdot X_r + F_o \sin\ \Omega t$$

وپس از گرفتن تابع اولیه خواهیم داشت که

$$x = C_1 \sin\omega t + C_2 \cos\omega t + \frac{F_o g}{p(\Omega^2 - \omega^2)} \sin\Omega t$$

سرعت زاویه‌ای زمین‌لرزه $= \Omega$

$\omega = \sqrt{\frac{gk}{p}}$ مربوط به‌پریود اصلی سیستم ارتعاش میباشد .

شتاب ثقل $= g$ ودر نتیجه $T_p = \frac{۲\pi}{\omega}$

پریود اصلی سیستم ارتعاش $= T_p$

اگر زمان to باشد $x = o$ و $x' = o$

ودر نتیجه خواهیم داشت که:

$$x_m = \frac{F_o \cdot g}{P\omega^۲} \cdot \frac{۱}{۱ - \frac{\Omega^۲}{\omega}} (\sin\Omega t - \frac{\Omega}{\omega} \sin\omega t)$$

در فرمول فوق قسمت تابع حرکت آزاد یعنی $(-\frac{\Omega}{\omega}\sin\ \omega t)$ بسرعت مستهلك میگردد وتنها ترم اول یعنی $\sin\ \Omega t$ که مربوط به‌نیروی ارتعاشی است ادامه میابد

حداکثر آمپلیتود عبارت است ازحداکثر جابجائی یعنی

$$x_{max} = \frac{F_o g}{P\omega^۲} \frac{۱}{۱ - \frac{\Omega^۲}{\omega}} = \frac{F_o}{K} \frac{۱}{۱ - \frac{\Omega^۲}{\omega}}$$

$$x_{max} = \frac{F_o}{K} \frac{۱}{۱ - \frac{(T_t)^2}{T_p}} \qquad (۴)$$

$$K = \frac{\omega^۲ P}{g}$$

$$\frac{\Omega^۲}{\omega} = \frac{T_t^۲}{T_p}$$

سرعت زاویه‌ای ساختمان $\omega = \sqrt{\frac{gK}{p}}$ وپریود زمین لرزه T_t و سرعت زاویه‌ای زمین‌لرزه Ω وپریود اصلی سیستم ارتعاش ساختمان T_p میباشد:

$\frac{F_o}{K}$ عبارتست ازجابجائی استاتیك (استاتیك یعنی حال تعادل جهت برگرداندن جسم بحالت اولیه متعادل) که حداکثر نیروی زمین‌لرزه بوجود میاورد .

بواسطه ضریب $\frac{۱}{۱ - \frac{(T_t)^۲}{T_p}}$ آمپلیتود تابع مزبور بطور قابل‌ملاحظه‌ای برحسب اندازه نسبی پریود مطلق ساختمان وپریود زمین لرزه (زمینی) تغییر خواهد نمود .

درنتیجه میتوان نیروی مخرب R را بصورت ذیل نوشت

$$R = KX_{max} = F_o \frac{۱}{۱ - \frac{(T_t)^۲}{T_p}}$$

زیرا $X_{max} = \frac{F_o}{K} \frac{۱}{۱ - \frac{(T_t)^۲}{T_p}}$

$$R = K \cdot \frac{F_o}{K} \frac{۱}{۱ - \frac{(T_t)^۲}{T_p}} = F_o \frac{۱}{۱ - \frac{(T_t)^۲}{T_p}}$$

ازطرفی در فرمول (۲) داشتیم که

$$F_e = -\frac{P}{g} x''_{e.max} \sin\Omega t = F_o \sin\Omega t$$

در نتیجه

$$F_o = -\frac{P}{g} x''_{emax}$$

حال اگر بجای F_o در فرمول ۵ معادل آنرا بگذاریم خواهیم داشت که

$$R=\frac{P}{g}x''e_{max}\frac{1}{1-\frac{(T_t)^2}{Tp}}$$ (۵ضمیمه)

وقبلا داشتیم که $F_e=\frac{P}{g}x''e$

ودر اینصورت $Pe_{max}=\frac{P}{g}x''e_{max}$

Fe_{max} همان نیروی مخربی است که باعث جابجایی پایه یك ساختمان انعطافی و یا جابجائی یك ساختمان کامل شکننده یا توده معادل همان توده ساختمان مزبور میگردد.

اثر زمین لرزه غیر مشخص:

بعضی اوقات مشکل است که شتاب یك زلزله را مشابه یك تابع سینوس نسبت به زمان قرارداد در این موارد تابع ذیل بطور کلی حرکت و شتاب این نوع زمین لرزه‌ها را مشخص میسازد.

$$x''_e=f(t)$$

معادله حرکت بصورت تساوی ۲ بوده ولـذا میتوان سرعت زاویه آنرا به‌ترتیب ذیل نگاشت

$$\omega=\sqrt{\frac{gK}{P}}$$

$$\omega^2=\sqrt{(\frac{gK}{P})^2}=\frac{gK}{P}$$

دراینجا (x) همیشه جابجائی حرکت نسبی یك نقطه مفروض موردنظر به‌پی ساختمان میباشد ودر نتیجه نیروی بکار رفته برای ایـن جابجائی عبارت است ازهمان ضریب ساختمانی نسبت بطول x

$$F=x\sqrt{(\frac{gK}{p})^2}=x\omega^2$$

ودر نتیجه $x''+x\omega^2=f(t)$

$$\frac{d^2x}{dt^2}+\omega^2=f(t)$$ یا (٦)

اگر دوطرف تساوی (٦) رادر $sin\ \omega t$ ضرب نموده سپس مقدار $\omega t cos\omega t\frac{dx}{df}$ رایك مرتبه بقسمت اول اضافه نموده وسپس همان مقدار را کـم نمائیم خواهیم داشت که:

$$(\frac{d^2x}{dt^2}+\omega^2x)sin\omega t=sin\omega t\cdot f(t)$$

$$\frac{d^2x}{dt}sin\omega t+\omega^2x\cdot sin\omega t+\omega cos\omega t\frac{dx}{dt}-$$

$$\omega cos\omega t\frac{dx}{dt}=sin\omega t\cdot f(t)$$

$$(sin\omega t\ \frac{d^2x}{dt}+\omega cos\ \omega t\ \frac{dx}{dt})+$$

$$+(sin\omega t\cdot\omega^2x-\omega cos\omega t\frac{dx}{dt})=f(t)sin\omega t$$

$$\frac{d}{dt}(sin\ \omega t\cdot\frac{dx}{dt})+\frac{d}{dt}(-x\omega cos\omega t)=f(t)sin\omega t$$

توضیح اینکه در ریاضی برای گرفتن مشتق از فرمولهای ذیل استفاده مینمائیم

$$y=z\ x$$

$$dy=z\cdot dx+x\cdot dx$$

دراینجا درقسمت پرانتزاول $x=\frac{dx}{dt}$

$$z=sin\omega t$$

بنابراین $y=sin\omega t\frac{dt}{dt}$

$$dy=d[sin\omega t\cdot\frac{dx}{dt}]$$

$$\frac{dy}{dt}=\frac{d}{dt}[sin\ \omega t\frac{dx}{dt}]=$$

$$(sin\omega t\cdot\frac{d^2x}{dt^2}+\omega cos\omega t\cdot\frac{dx}{dt})$$

حال ازتابع فوق تابع اولیه میگیریم وچون تغییرات زمان بین صفر و t تغییر مینماید لذابجای متغیر t متغیر θ گذاشته وتغییرات بین صفر و θ را درباره تابع اولیه اعمال می‌نمائیم. حال مینویسیم

$$[sin\omega\theta\cdot\frac{dx}{dt}]_o^t-[x\omega cos\omega\theta]_o^t=$$

$$\int_o^t f(\theta)sin\omega\theta d\theta$$

واگر تغییرات صفر تا t را برای قسمت اول بگذاریم خواهیم داشت :

اگر $t=o$ باشد $x=o$

$x=o$

$x=o$ و $x'=o$ میباشد

ودر نتیجه مقادیر جابجائی برای $t=o$ صفر خواهد بود.

ولی اگر $\theta=t$ باشد دراینصورت:

$$\sin\omega t\frac{dx}{dt}-\omega x\cos\omega t=\int_o^t f(\theta)\sin\omega\theta.\,d\theta \quad (۷)$$

حال اگر این بارتساوی(٦) را بجای $\sin\omega t$ در $\cos\omega t$ ضرب نموده وسپس بقسمت چپ تساوی مقادیر $\omega\cos\omega t.\frac{dx}{dt}$ را (بجای $\omega\sin\omega t\frac{dx}{dt}$ مرتبه اول) یك مرتبه جمع وسپس تفریق نموده وتمام اعمالی را که برای تساوی (٤) انجام دادیم بامقادیر جدید انجام دهیم فرمول (٨) را بدست خواهیم آورد یعنی :

$$\cos\omega t\frac{dx}{dt}+\omega x\sin\pi t=\int_o^t f(\theta)\cos\omega\theta.d\theta \quad (۸)$$

حال اگر تساوی (٧) را درمقدار $\cos\omega t$ و تساوی (٨) را در $+\sin\omega t$ ضرب نموده سپس تساوی (٧) وهشت را که اکنون ٧ب و ٨ب نام دارند باهم بطریق ذیل جمع نمائیم خواهیم داشت :

$$-\cos\omega t.\sin\omega t.\frac{dx}{dt}+\omega x\cos^2\omega t=-\int_o^t f(\theta)\sin\omega\theta\cos\omega t.d\theta \quad (۷ب)$$

$$+\cos\omega t.\sin\omega t.\frac{dx}{dt}+\omega x\sin^2\omega t=\int_o^t f(\theta)\cos\omega\theta.\sin\omega t.d\theta \quad (۸ب)$$

$$۷ب+۸ب=\omega x(\cos^2\omega t+\sin^2\omega t)=\int_o^t f(\theta)(\sin\omega t\cos\omega\theta-\sin\omega\theta\cos\omega t)\,d\theta$$

$$\omega x=\int_o^t f(\theta)\sin\omega(t-\theta)d\theta$$

و داشتیم که $\omega=\frac{2\pi}{Tp}$

$$\frac{2\pi}{Tp}x=\int_o^t f(\theta)\sin\frac{2\pi}{Tp}(t-\theta\,.d\theta$$

$$x=\frac{Tp}{2\pi}\int_o^t f\,\theta)\sin\frac{2\pi}{Tp}(t-\theta).d\theta \quad (۹)$$

حد نیروی مخرب K برابر است با

$$R=K.x_{max}$$

درفرمول (٩) مقدار x ماکزیموم نیست ولی اگر x ماکزیموم گردد حداکثر نیروی مخرب برابرخواهدبود با:

$$R=K\frac{Tp}{2\pi}x_{max}=\int_o^t f(\theta)\sin\frac{2\pi}{Tp}(t-\theta).d\theta \quad (۱۰)$$

واگر بجای K مقدار معادل آنرا بگذاریم

$$K=(\frac{2\pi}{Tp})^2\frac{P}{g}$$

تلاش نهائی یا نیروی مخرب R برابر خواهد بود با

$$R=\frac{P}{g}\frac{2\pi}{Tp}\int_o^t f(\theta)\sin\frac{2\pi}{Tp}(t-\theta)d\theta$$

بامقایسه فرمولهای ۱۰ب و ۵ب خواهیم دیدکه مقادیر ضرب شده در $\frac{P}{g}$ قسمت راست تساویها حداکثر شتاب مطلق را نشان میدهد

حال‌ما میتوانیم بگوئیم که نیروی مخرب یك ساختمان را ازلحاظ تئوری شناخته‌ایم زیرا میتوانیم پریود طبیعی ساختمان وقوانین تغییرات شتاب زمین (زمین لرزه)را نسبت به‌زمان بدست آوریم واین‌البته موقعی‌است که منحنی‌های سیسموگرام را داشته‌باشیم ولذا :

با پریـود طبیعی ساختمان و شتاب و تغییرات زلزله وبوسیله نوار ضبط شده لرزه نگاری واحتمالا ماشینهای‌حساب الکترونی میتوان R را بدست‌آورد.

اگر سیستم ما استهلاکی باشد بهمین‌معادلات فوق ونتایج مذکور خواهیم رسید. البته بیشتر این معادلات مجهول (اکسپنانسیل منفی) خواهد بود.

اسپکترم یك‌زمین لرزه در یـك سیستم مرتعش (spectrum Response) :

برای بدست‌آوردن مقاومت ماکزیموم دراثر یك پریودطبیعی T کافی‌است که‌یکی‌ازماکزیمومهای ذیل را داشته باشیم

آمپلیتودماکزیموم

$$\text{ماکزیموم}\frac{T}{2\pi}\int_o^t f(\theta)\sin\frac{2\pi}{Tp}(t-\theta)\,d\theta=SA$$

شتاب مطلق ماکزیموم

$$\text{ماکزیموم}\frac{2\pi}{T}\int_o^t f(\theta)\sin\frac{2\pi}{Tp}\quad(t-\theta)d\theta=S_a$$

سرعت ماکزیموم

$\int_0^t f(\theta) \sin \frac{2\pi}{Tp} (t-\theta) d\theta = S_v$ ماکزیموم

SA وSaوSv را اسپکترم‌های آمپلیتودوشتاب وسرعت گویند .

نویسندگان مختلفه لرزه‌نگار طرحهای مختلفی درباره سیسموگرامها برحسب زلزله‌های مختلفه داده‌اند دراین طرحهااسپکترم سیسموگرامها شامل منحنی‌های مختلت ماکزیموم‌های فوق است این منحنی‌ها را برحسب تابع پریود (T) ضرایب مختلف استهلاکی آنان تعیین نموده‌اند .

هیچکدام ازاین مطالعات باهم شبیه نبوده‌اند ولی روی‌هم رفته میتوان گفت که ضریب استهلاکی درحدود ده تابیست درصد حداکثر ضریب‌استهلاکی نقطه عطف (کریتیکال) بوده‌اند

این منحنی‌ها رااصطلاحاً اسپکترم‌نسبی‌اجزاء مربوطه گویند . مانند اسپکترروم شتاب اسپکتروم سرعت ویا اسپکتروم آمپلیتود وغیره ....

بطور کلی میتوان گفت که اسپکتروم‌هامنحنی های تجربی پریودیاعوامل‌فوق‌نسبت بعوامل‌مشخص دیگر سیستم‌های مورد نظر میباشند .

منحنی‌های مزبور را میتوان بسادگی‌با روش ماشینهای حساب انالوگی ترسیم نمود .

بنظر میاید که اسپکتروم سرعت بافایده‌تر باشد زیرا علاوه برسادگی واجد منحنیهای منظم هستند

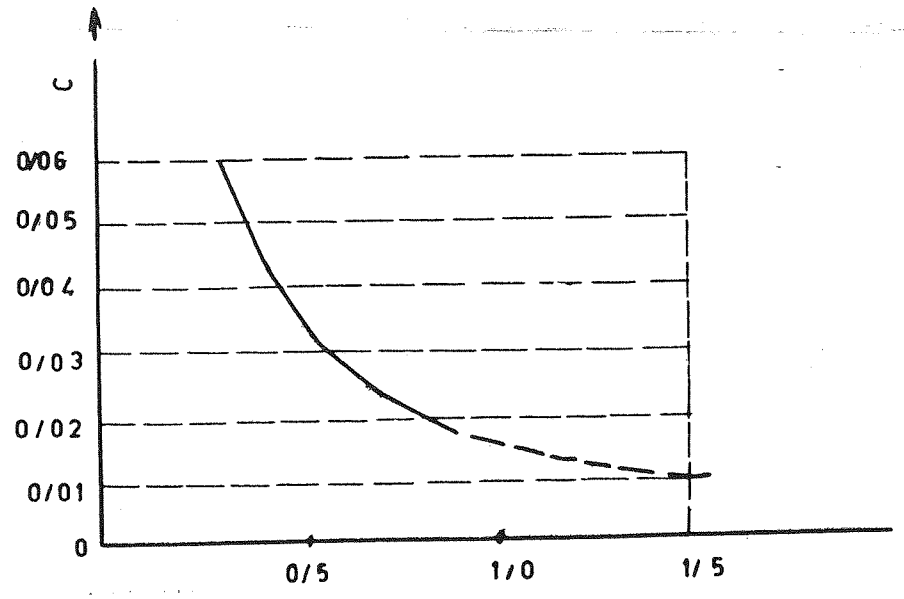
در بیشتز زلزله‌هائی که تاکنون مطالعه شده است منحنی‌ها مشخصات نزدیك بهم داشته‌اند

Biot یکی‌از سیسمولوژیست‌های فرانسوی اسپکتروم شتاب یك‌زلزله را بدست آورد منحنی‌های شتاب خیلی نزدیك به‌هم بودند .

بامراجعه ودقت درقسمت ثابت فرمول ب ۱۰ برای حساب نمودن نیروی وارده برساختمانی‌واجد پریود T کافی است که توده $\frac{P}{g}$ را درمشخصات عمودی های منحنی‌اسپکتروم ضرب نمود. شکل۵

مثلا اگر پریود چهارصد میلی ثانیه باشد نیروی ماکزیموم برابر با ۰/۵p خواهد بود اگر پریود هزار میلی ثانیه باشد نیروی ماکزیموم $\frac{2p}{10}$ میگردد

اندازه‌های بدست آمده کاملا با اندازه‌های حاصله ازتجربه تطبیق می‌نماید.



شکل (۵)

استثنا هم وجـود دارد کـه اغلب اوقات فاکتورهای چندی نشان‌داده است ولی اهمیت‌توابع نسبی پریود موارد استثنائی راجبران مینماید

باید در نظر داشت که هرچه ساختمان منعطف تر باشد ضریب‌ثابت‌ساختمانی K کمتر بوده ودر نتیجه پریودهای ساختمان طویل‌تر میگردند . با در نظـر گرفتن فرمول معمولی ذیل

$$T = ۲\sqrt{\frac{p}{kg}}$$

میتوان گفت که ماکزیموم‌های ایجاد شده در اثـر زلزله ضعیف میباشند. هنگامیکه T بزرگتر از دویسـ میلی ثانیه باشـد. ایـن نیروهای‌ماکزیموم بسیار ضعیف هستند.

اگر بجای استفاده ازاسپکترشتاب S_aاسپکتر سرعت S_v را بکاربرده بودیم ارزش اسپکتـر S_v را با همان پریودT داشتیم ودراین‌حالت نیروی‌مخرب برابر است با

$$R = \frac{P}{g} \cdot \frac{۲\pi}{T} \cdot S_v$$

ساختمانهای انعطاف پذیر بادرجات متعدد آزادی

یك سیستم با n درجه آزادی فقط واجد یك نوع ارتعاش با مشخصات پریـود طبیعی و انحصاری نمیباشد محققاً چنین سیستمی دارای n نوع ارتعاش است .

در هر یك از انـواع ارتعاشات مزبـور نقاط مختلفه سیستم بایك پریود ویك فازمرتعش میگردند. درنتیجه این‌سیستم بدون‌هیچگونه محدودیتی ازلحظهٔ حالت تعادل خود دومرتبه منحرف میگردد .

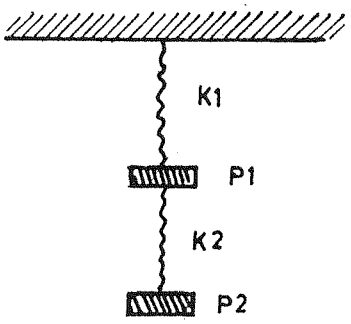
حالات مختلفه‌آزادی را برحسب‌نوع فرکانس هائی که عمومیت دارندبه طریقه دومینی‌وسومینی و n مینی تقسیم مینمایند

درشکل ٦ یك‌مثال ساده مـوضـوع را روشن خواهد نمود.

درشکل ٦ دووزنه P۱ و P۲ همیشه هماهنگ ودرحال‌ارتعاش‌هستند .

درطریقه اول First Mode توده‌های‌مزبور دریك جهت جابجا میگردند.

درحالیکه در طریقه دوم Second Mode



شکل (۶)

توده‌های مزبور پی‌درپی دریك وحله ازیکدیگر دور شده ودر وحله دیگر بهم نزدیك میگردند .

یك ارتعاش غیرمشخص عبارت است از قرار گـرفتن انواع ارتعاشات معمولی بـرروی ارتعاش مزبور واثری که این قرار گرفتن بوجود میآورد از خصوصیات عمل ارتعاش غیرمشخص میباشد .

مسائلیکه باید در مورد ساختمانهای با چنـد درجه آزادی موردنظر قرار گیرد عبارتنداز :

۱ـ تعیین پریود درهریك ازطرق معمولی آن (یعنی‌تعیـن‌پریوددرطریقه اول وطریقه دوم وغیرو .. بطور جداگانه)

۲ـتعیین تغییر شکل درهریك ازطرق‌معمولی سرعت های زاویه $\omega_n, \omega_۲, \omega_۱ \ldots$ ریشه های معادله همان درجه آزادی مربوطه میباشد.

البته فقط سیستم های تـا دودرجـه آزادی را میتوان بطریق ساده محاسبه نمود .

حالتی‌وجود دارد که مسئله رامیتوان‌بسادگی

حل نمود اگر درجه آزادی بی‌نهایت باشد . و این موضوع درباره یك‌ساختمان استوانه‌ای که در درون قالب محکمی قرار گرفته باشد صادق است . چنین ساختمانی درسیستمی واجد سختی و قابلیت انعطافی ثابت ارتعاش درجهت طولی استوانه خواهد داشت .

به‌این‌موضوع مخصوصادر نظریات‌علمی‌تجربی Timoshinko اشاره شده است

مثال ذیل این موضوع را روشن خواهد نمود:

این مثال‌ازنظریه تیموشنکو گرفته‌شده‌است : شکل۷

پریود اصلی (نوع اول) $T_1=\frac{2\pi}{3/515}\sqrt{\frac{\omega h^4}{MIg}}$

زمان یك‌نوسان پریود

یانوع دوم $T_2=0/160\,T_1$ متعاقب پریود اصلی

پریود متعاقب پریود دوم T_2 $T_3=0/056\,T_2$

یانوع سوم

ومعادله جابجائی آن عبارت خواهد بود از :

$$x=\frac{1}{2}[chK_n\,y-\cos K_n y-\frac{chK_n\cdot h+\cos K_n\cdot h}{shK_n\cdot h+sin K_n\cdot h}\times (shk_n y-sin\ k_n y)$$

ارتفاع ساختمان موردنظر $y=h$

جابجائی عرض $x=$

جابجائی انتهای ارتفاع کاملا آزاد سیستم $x_h=$

مشخصات نوع آزادی وریشه اصلی معادله $K_n=$

ریشه‌های‌تساویهای‌متعاقب‌ذیلاملاحظه‌میگردند

$K_1h=1/875$

$K_2h=4/694$

$K_3h+7/855$

در جابجائی کل جابجائی نوع اول یا اصلی ۶۱/۳ کل جابجائی است

» » » ۱۸/۸ نوع دوم

» » » ۷/٤ نوع‌سوم

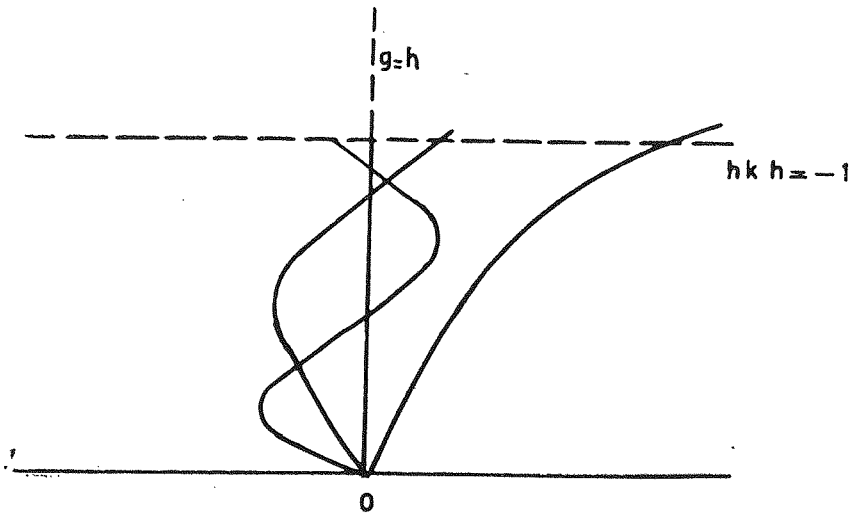
مسئله‌را ازروی‌اسپکترشتاب‌های S_A و S_a و S_v مربوطه به‌پریودهای T_n و $T_1, T_2, \ldots$ خوانده‌ونیروی مخرب سیستم را بدست میآوریم بطریق ذیل:

$$R=\frac{P}{g}(0/613Sa+0/188Sa_2+0/074Sa_3+\ldots)$$

نکته‌ای که‌بایدموردتوجه قرار گیرد این‌است که چگونه نیروی مخرب یانیروی منتجه R اثر مجددی سراسر طول یك‌قطعه برابر طرق دوم وسوم وغیره میگذارند.

بدیهی‌است‌هنگام انعطاف‌یك‌قطعه بارنیروهای تقسیم شده برابر بامشتق چهارم تساوی تغییر شکلی قطعه مزبور بوده و بنابر فرمولهای مقاومت مصالح ذیل میباشند

$$M''=P \qquad \text{و} \qquad y''=\frac{M}{EI}$$



شکل (۷)

این مشتق چهارم درحکم تساوی تقسیم باریا نیرو نسبت به تغییر شکل میباشد زیرا این طریقه اساسی است برای تقسیم نیروهای اصلی به نسبت تغییر شکل طریقه اول First Mode درنتیجه بواسطه تمرکز نیرو های اصلی درقسمت فوقانی میتوان بآسانی تقسیم و توزیع بار یا نیروهای وارده را محاسبه نمود .

از آنچه که درباره مطالب فوق میتوان نتیجه ای گرفت خلاصه آن ذیلا نگاشته میشود :

درساختمانهای مرتفع هنگام زمین لرزه مجموعه نیروهای وارده کمتر است از آنچه که بوسیله محاسبه نیرو و بار در ساختمانهای غیرقابل انعطاف حاصل میگردد . باید درنظر داشت که دراین ساختمانهای مرتفع تقسیم بار یا نیرو بدین کیفیت است که یک بار اضافی در قسمتهای فوقانی و یک کم باری درقسمت تحتانی مشاهده میگردد

تحمل یك ساختمان مسکونی لرزان دربرابر نیروهای وارده باتحمل یك ساختمان استوانه یا خیلی مرتفع فرق دارد بعلاوه تمرکز توده این ساختمان درسطح زیرین بوده واساسا تغییر شکلی ساختمان بعلت انعطاف عمومی نبوده بلکه مربوط به یك نوع جدائی میباشد که میتوان آنرا انعطاف عملی بین سطح زیرین هرستون با پی دانست

روش محاسبه تحمل ساختمان مزبور بهمان طریقی است که ضریب سختی را محاسبه می نمایند

درطبقات مختلفه یك ساختمان معمولا چهارعامل ذیل را محاسبه می نمایند :

۱- تحمل هرطبقه ساختمان یا نیروی مخرب (تلاش نهائی)

۲- پریود مخصوص هرطبقه به تنهائی

۳- توزیع و تقسیم توده ساختمان دردرجات تغییر شکلی

۴- تقسیم بار بین طبقات ساختمان به نسبت تغییر شکلی و توده نسبی هرطبقه

دربدست آوردن عوامل لازم برای آماده نمودن یك ساختمان دربرابر زلزله آنقدر که تجربه و آزمایش های علمی کمك مینماید محاسبات معمولی نمیتوانند مفید باشند معهذا درعصر ما مهندسینی و معمارانی وجود دارند که ساختمانهای مرتفع خود را طوری محاسبه نموده اند که نتایج آنها با نتایج حاصله ازتجارب و آزمایشات بعدی تطبیق می نموده است . برای مثال میگویم ،

مهندسین فرانسوی ومعماران امریکائی مطالعات زیادی نموده اند ویکی از مثالهای آنانرا در اینجا ذکر می نمائیم :

مهندس بلوم Blume ام. ریکائی ساختمان سیزده طبقه ای را در سانفرانسیسکو محاسبه نمود . سختی وتحمل ودیگر خواص مربوطه بزلزله بهمان اندازه و کیفیت بود که بعدا در اثر تجربه بوسیله نیروهای ارتعاش بدست آورد.

آقای بلوم با این یك مثال ثابت نمود که امکان دارد طرح ساختمانی را درمقابل زلزله مطالعه نموده ومحاسبات لازم را انجام داده موسسه ساختمانی تحقیقاتی ژاپن هم مطالعاتی دراین مورد دارد.

گرچه دانشمندان لرزه شناس ومهندسین مربوطه معتقد هستند که درنواحی زلزله خیز نباید فقط به محاسبات ضدزلزله اکتفا نمود وباید تجارب لازم را در مدلهای مناسب انجام داد وبعد درطرح ساختمانی پیاده نمود.

مهندسین فرانسوی ازتجربه های آقای بلوم استفاده نموده وطرح یك ساختمان پانزده طبقه مقاوم دربرابر زلزله را تهیه نمودند محاسبه این ساختمان نزدیك محاسبه ای بود که آقای بلوم انجام داده بود. درنتیجه درطرق تغییر شکلی مختلف این ساختمان پریودها (زمان یك نوسان ماکزیموم) بشرح ذیل بود:

۱- در تغییر شکلی طبقه اول

پریود برابر با ۱۴۰۰ میلی ثانیه

۲- در تغییر شکلی طریقه دوم

» » ۴۰۰ » » »

۳ـ درتغییر شکلی طریقه سوم

» » ۲۵۰ » » »

و به همین‌ترتیب درطبقات بالاتر و تغییر شکلی های بعدی پریود کمتر میگردد.

بعبارت دیگرهرچه‌طبقات بالاتر را درنظربگیریم فرکانس لرزه‌ای بیشتری دارا میباشند.

نظریات ضمیمه‌ای

نظریات محاسباتی وتجربی مذکور واجد دلایل تجربی ومنطقی همراه بااثبات و فرمولهای ریاضی است. معهذا نقاط ضعف کمی هم‌دارندو تا آنجا که ممکن است بشرح آن میپردازیم.

روی‌هم‌رفته‌میتوان گفت‌عوامل مربوطه بطرح ساختمانهای مقاوم دربرابر زلزله که توسط نظریه و منحصرا بوسیله محاسبه بدست میآیند بیشتر مورد قبول وحمایت مهندسین ومعماران ساختمانی است تا نتایج حاصله ازمشاهده تغییرات ساختمانها در برابر زلزله یا ارتعاشات تجربی ومحاسبات نتایج حاصله مهندسین مزبور بیشتر نظریات خود را بردلایل ذیل مبتنی میدانند.

۱ـ دراغلب موارد اتهلاك موج ویا لرزش بسیارمهم میباشد.حرکت‌وابسته یك‌قسمتی‌ازساختمان نسبت به‌پی وزمین وسایش‌های مختلفه آن دراثراین حرکت وجابجائی نشانه استهلاك زیادموج و انرژی بوده ودر نتیجه دلیل خوبی برای تضعیف نمودن نظریات تجربی میباشد زیرا درنظریات تجربی‌مقدار مطلق استهلاك تعیین نمیشود.

۲ـ درنظریات مزبور فرض براین است که تغییر شکلی‌ها عموما بطور ارتجاعی است. بعبارت دیگر قسمت‌بزرگی ازانرژی‌ذخیره شده برای‌تغییر شکل پلاستیکی مصالح ساختمان بکار رفته ویابرای ایجاد ترکها وخراشهای طبقه‌ای مصرف میگردند وجودترك‌های معمولی‌برای تعیین‌وتغییر کیفی‌پریود جداگانه هرطبقه یاطریقه تغییرشکلی مورد استفاده قرار میگیرد. البته درساختمانهای باقابلیت انعطافی زیاد این برش‌هاوجابجائیها نشانه کم‌تر شدن‌خطرات انتظاری آینده است

البته برای‌تصحیح نمودن این انتقادات صحیح‌در محاسبات وکارهای تجربی‌کوشش فراوانی بعمل آمده است. معهذا باید یادآوری نمودکه نظریه‌های تجربی و محاسباتی‌که درمورد آن تغیر لازم بعمل آمده است‌بیشتر از جهت‌کیفی مورد نظر قرارگرفته اند تا از جهت‌کمی (کیفیتی است جای‌کمیتی) مطالعه‌کیفی اطلاعات‌دقیق‌تری نسبت بساختمان‌بما میدهد البته مقدار وزن مطلق‌نیروها وعوامل را نمیتوان بآسانی بدست آورد.

کاملا مشهود است که محاسبات پیچیده وضع واحدی واجد بوده وبه جز دربعض ازموارد نمیتوان ازاین محاسبات درساختمان استفاده نمود. در مواقع عادی فقط چکیده نتایج ووضعیت عمومی محاسبات ساختمانی را موردنظر قرار میدهند.

برخی‌از متخصیصین ساختمانهای ضدزلزله عقایدی ابراز داشته‌اند که همراه با فرمولهای مفید وساده مطالعات مهندسی است.

با اطلاعاتی که‌دردست است دوطرح مهم مورد بررسی قرار میگیرد.

۱ـ طرحی که توسطدو گروه ازاعضای‌موسسه مهندسی آمریکا در سانفرانسیسکو

مؤسسه‌مهندسی ساختمان‌آمریکا S.A. C.E

ومؤسسه‌مهندسی کالیفرنیای‌شمالی S.E.N.C

تهیه شد شامل گزارشی درباره نیروهای وارده جانبی توسط زمین‌لرزه یاباد میباشد.

۲ـ طرح دوم فقط بوسیله موسسه مهندسی کالیمرنیای شمالی تهیه شده است S E·N.C این گزارش نظریه تکمیلی طرح اول میباشد.

دراینجا بطور خلاصه و مختصر از طرح اول صحبت میگردد البته باید بدانیم که طرح دوم‌کامل وجدیدتر میباشد.

$$R=C\cdot P$$

نیروی‌مخرب‌پایه‌وسطح زیرین ساختمان $=R$

مجموعه وزن ساختمان (وزن مرده باضافه بار اضافی ساختمان) = وزن مرده +۲۵% الی ۵۰% بارزنده = P

(وزن مرده ساختمان عبارت است ازوزن‌خود ساختمان بدون درنظر گرفتن وزن وسائل اضافی و وسائل زندگی ووزن مواد موقتی مانند برف وباران ویا آب وغیره)

ضریب پریود اصلی ساختمان به‌ثانیه = C

$$C=\frac{۰/۰۱۵}{T_p}$$

پریود طبیعی ساختمان = T_p

معمولا C بین ۰/۰۶ تا ۰/۰۲ تغییر مینماید.

بادرنظر گرفتن‌ضریب‌دقت‌محاسبه‌Tpرامیتوان بافرمول ذیل بدست آورد:

$$T=۰/۰۵\frac{H}{\sqrt{b}}$$

بلندی قسمت اصلی ساختمان ازبالای پی بر- حسب فوت = H

طول قسمت اصلی ساختمان درجهت منحنی موردنظر برحسب فوت = b

درفرمول نامتجانس فوق اگر Hوb به فوت باشند T به‌ثانیه خواهد بود.

این نیروهای جانبی در تمام طول ارتفاع ساختمان همانند تساوی ذیل تقسیم میگردند :

$$F_n=R\frac{P_n\cdot h_n}{\Sigma(P\cdot h)}$$

F_n نیروی‌وارده بهمان‌طبقه‌ای است که‌ارتفاع h_n ازسطح بالائی پی وتحمل وزنی P_n راداشته باشد

تحمل وزنی طبقه = P_n

ارتفاع طبقه ازپی = h_n

منابعی‌که مورد استفاده قرارگرفته‌اند :

1- J. Dularu,
Laboratoir public d'aessais et d'etude, 1960

2- Dynamics of Structure by Cheron Cherry, UNESCO Expert, 1967

3- Biot Analytical and Experimental methods in Enginecring Seismology A. S. C. E, 1943

4- Rine,
Earthquake design Criteria
A S. C. E., 1958
(Sanfrancisco American Society of Civil Engineering or A.S.C.E.)

5- Structural Engineering of North California. (S. E. N. C) 1962

6- Timoshenko , 1962