ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԶԵԿՈՒՅՑՆԵՐ
ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

LXXIV 1982 2

УДК 624.042.80.03+15

ИНЖЕНЕРНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ

А. П. Кириллов, С. С. Дарбинян, А. В. Минасян

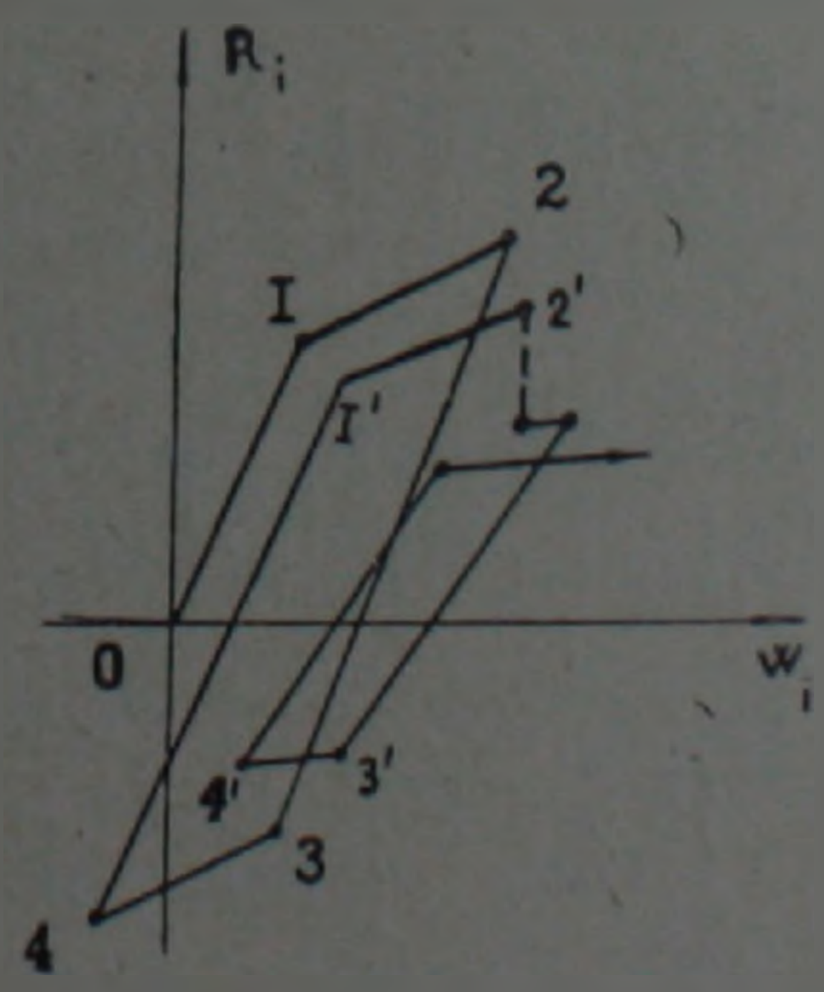
# Сейсмостойкость упруго-пластических систем с разрывными характеристиками

(Представлено академиком АН Армянской ССР А. Г. Назаровым 31/VIII 1981)

Данные о последствиях сильных землетрясений ([1-3]) свидетельствуют о том, что во многих случаях в сооружениях, перенесших сейсмические воздействия, развиваются зоны пластических шарниров и частичные разрушения. Согласно нормам ([4]) при расчете сооружений и конструкций допускаются напряжения, превышающие предел упругости элементов и не связанные с разрушением несущих каркасов. В связи с этим в области сейсмостойкого строительства имеются принципиально различные точки зрения на формирование сейсмических нагрузок, действующих на сооружения и конструкции с учетом работы системы за пределом упругости.

При изучении несущей способности системы основные трудности заключаются в том, что до настоящего времени не существует завершенных моделей сооружений и конструкций, которые могли бы полностью охарактеризовать весь колебательный процесс от микросейма до разрушительных землетрясений. По существу это объясняется многообразными механическими свойствами материалов и элементов сооружений.

В данной работе исследуется поведение сооружений с учетом накопления повреждаемости. Рассмотрим колебания сооружения, моделируемого как стержень, заделанный нижним концом и имеющий сосредоточенные массы. Учитываются как упруго-пластические течения, так и частичные разрушения. Нелинейная связь между восста-



навливающей силой и смещением заменяется линейным упрочнением (рисунок). Кусочно-линейная аппроксимация имеет важное значение для теории сейсмостойкости, так как она позволяет решать линейные дифференциальные уравнения.

Таким образом, примем для расчета диаграмму реакция—смещение с кусочно-линейным упрочнением на основе экспериментальных исследований ([8]).

Движение системы в лагранжевых координатах характеризуют обобщенные функции:

$$\vec{Q}_k = Q_k\{Q_1,\ Q_2,\ Q_3,\ \ldots,\ Q_{\bar{N}}\},$$

$$k = 1,\ 2,\ 3,\ \ldots,\ N.$$

Уравнение энергохарактеристики системы в исследуемых координатах преобразуем следующим образом:

$$\sum_{p=0}^{\bar{i}} \left\{ \sum_{l=1}^{N} \left\{ (\Phi_{ik}^{0})^2 M_i \left[ \frac{\partial}{\partial \xi_p} \dot{Q}_k(\xi_p) \right] \frac{\partial Q_k(\xi_p)}{\partial \xi_p} + \Phi_{lk}^{0} M_l \left[ \frac{\partial}{\partial \xi_p} \dot{Q}_0(\xi_p) \right] \frac{\partial Q_k(\xi_p)}{\partial \xi_0} - \right.\right.$$

$$\left. - \Phi_{ik}^{0} R_{ik}^{*} \frac{\partial Q_k(\xi_p)}{\partial \xi_p} \right\} \delta(\xi_p) + B_k^{*} Q_k(\xi_p) \delta Q_k(\xi_p) = \sum_{l=1}^{N} \left\{ (\Phi_{lk}^{0})^2 M_l \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi_p} \left[ \dot{Q}_k(\xi_p) + \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. + \dot{Q}_0(\xi_p) \right] \right\} \left[ \dot{Q}_k(\xi_p) + \dot{Q}_0(\xi_p) \right] \delta(\xi_p) + \Phi_{lk}^{0} M_l \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi_p} [\dot{Q}_k(\xi_p) + \dot{Q}_0(\xi_p)] \right\} [\dot{Q}_k(\xi_p) + \right.$$

$$\left. + \dot{Q}_0(\xi_p) \right\} \delta(\xi_p) + B_k^{*} Q_k(\xi_p) \delta Q_k(\xi_p) - \sum_{l=1}^{N} \left\{ (\Phi_{ik}^{0})^2 R_{ik}^{*} \frac{\partial Q_k(\xi_p)}{\partial \xi_p} + \right.$$

$$+ (\Phi_{ik}^{0})^2 M_i \left[ \frac{\partial}{\partial \xi_p} \dot{Q}_0(\xi_p) \right] \dot{Q}_k(\xi_p) + (\Phi_{ik}^{0})^2 M_l \left[ \frac{\partial}{\partial \xi_p} \dot{Q}_0(\xi_p) \right] \dot{Q}_0 +$$

$$+ (\Phi_{lk}^{0})^2 M_l \left[ \frac{\partial}{\partial \xi_p} \dot{Q}_k(\xi_p) \right] \dot{Q}_0(\xi_p) + \Phi_{lk}^{0} M_i \left[ \frac{\partial}{\partial \xi_p} \dot{Q}_k(\xi_p) \right] \dot{Q}_k(\xi_p) +$$

$$\left.\left. + \Phi_{lk}^{0} M_i \left[ \frac{\partial}{\partial \xi_p} \dot{Q}_k(\xi_p) \right] \dot{Q}_0(\xi_p) + \Phi_{lk}^{0} M_i \left[ \frac{\partial}{\partial \xi_p} \dot{Q}_0(\xi_p) \right] \dot{Q}_0(\xi_p) \right\} \right\} \delta(\xi_p). \qquad (1)$$

$M_i$ — масса; $\Phi_{ik}^{0}$ — собственные функции; $B_k^{*}$ — параметр жесткости; $R_{ik}^{*}$—параметр реакции; $\dot{Q}_0$—характеризует внешнее воздействие.

$$B_k^{*} = B_k \left( \sum_{l=1}^{N} \Phi_{lk}^{0\,2} M_l \right)^{-1};$$

$$R_{ik}^{*} = R_{ik} - R_{ik+1};$$

$$R_{\bar{i}k} = [\beta_{\bar{i}k} \lambda_k W_{k\bar{i}-1}^{**} - \beta_{\bar{i}k} \lambda_k W_{k\bar{i}}^{*} - (1 - \beta_{\bar{i}k}) \lambda_k W_{k\bar{i}}^{**}] B_k; \qquad (2)$$

$$R_{\bar{i}k+1} = [\beta_{\bar{i}k+1} \lambda_{k+1} W_{k+1,\bar{i}-1}^{**} - \beta_{\bar{i}k+1} \lambda_{k+1} W_{k+1}^{*} + (1 - \beta_{\bar{i}k+1} \lambda_{k+1} W_{\bar{i}k+1}^{**}] B_{k+1}; \qquad (3)$$

$$W_{k\bar{i}}^{*} = (-1)^{0.5(i^0-1)} (W_{k\bar{i}}^{*} - W_{k\bar{i}-1}^{**}); \quad \bar{i} = 1,\ 3,\ 5,\ \ldots;$$

$$W_{k\bar{i}}^{**} = \sum_{\bar{i}=1}^{i^0|2} (W_{k2\bar{i}}^{*} - W_{k2\bar{i}-1}^{*}); \quad \bar{i} = 2,\ 4,\ 6,\ \ldots$$

$$\beta_{kl} = \begin{cases} 0 \text{ в упругих участках диаграммы} \\ 1 \text{ в упруго-пластических участках диаграммы;} \end{cases}$$

$B_k$ — единичная реакция; $\iota_k$ — параметр упрочнения; $W^*_{kl}$ — величина деформации в нечетных точках диаграммы; $W^{**}_{kl}$ — накопление деформации после 0,5 $l^\circ$ цикла колебания.

Для системы, претерпевающей скачкообразное частичное разрушение с $\tau^*$ по $\tau^*+\delta\tau^*$, уравнение (1) примет вид

$$\sum_{p=0}^{\tau_1}\left\{\sum_{i=1}^{N}\left\{(\Phi^0_{ik})^2 M_i\left[\frac{\partial}{\partial\xi_p}\dot{Q}_k(\xi_p)\right]\frac{\partial Q_k(\xi_p)}{\partial\xi_p}+\Phi^0_{ik}M_i\left[\frac{\partial}{\partial\xi_p}\dot{Q}_0(\xi_p)\right]\frac{\partial\dot{Q}_k(\xi_p)}{\partial\xi_p}-\right.\right.$$

$$\left.\left.-\Phi^0_{ik}R^*_{ik}\frac{\partial\dot{Q}_k(\xi_p)}{\partial\xi_p}\right\}\right\}\delta(\xi_p)-B^*_k Q_k(\xi_p)\delta Q_k(\xi_p)=$$

$$\sum_{p=0}^{\tau}\left\{\sum_{i=1}^{N}\left\{(\Phi^0_{ik})^2 M_i\left\{\frac{\partial}{\partial\xi_p}[\dot{Q}_k(\xi_p)+\dot{Q}_0(\xi_p)]\right\}[\dot{Q}_k(\xi_p)+\dot{Q}_0(\xi_p)]+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\Phi^0_{ik}M_i\left\{\frac{\partial}{\partial\xi_p}[\dot{Q}_k(\xi_p)+\dot{Q}_0(\xi_p)]\right\}[\dot{Q}_k(\xi_p)+\dot{Q}_0(\xi_p)]\right\}\right\}\delta(\xi_p)+$$

$$+\sum_{p=\tau}^{\tau_1}\left\{\sum_{i=1}^{N}\left\{(\Phi^0_{ik})^2 M_i\left\{\frac{\partial}{\partial\xi_p}[\dot{Q}_k(\xi_p)+\dot{Q}_0(\xi_p)+\delta\dot{Q}_k(\xi_p)]\right\}\times\right.\right.$$

$$\times[\dot{Q}_k(\xi_p)+\dot{Q}_0(\xi_p)+\delta\dot{Q}_k(\xi_p)]+\Phi_{ik}M_i\left\{\frac{\partial}{\partial\xi_p}[\dot{Q}_k(\xi_p)+\right.$$

$$\left.\left.+\dot{Q}_0(\xi_p)+\delta\dot{Q}_k(\xi_p)]\right\}[\dot{Q}_k(\xi_p)+\dot{Q}_0(\xi_p)+\delta\dot{Q}_k(\xi_p)]\right\}\delta(\xi_p)+$$

$$+\sum_{p=0}^{\tau_1}\left\{B^*_k Q_k(\xi_p)\delta Q_k(\xi_p)-\left\{\sum_{i=1}^{N}\left\{(\Phi^0_{ik})^2 M_i\left[\frac{\partial}{\partial\xi_p}\dot{Q}_0(\xi_p)\right]\times\right.\right.\right.$$

$$\times\dot{Q}_k(\xi_p)+(\Phi^0_{ik})^2 M_i\left[\frac{\partial}{\partial\xi_p}\dot{Q}_0(\xi_p)\right]\dot{Q}_0(\xi_p)+$$

$$+(\Phi^0_{ik})^2 M_i\left[\frac{\partial}{\partial\xi_p}\dot{Q}_k(\xi_p)\right]\dot{Q}_0(\xi_p)+\Phi^0_{ik}M_i\left[\frac{\partial}{\partial\xi_p}\dot{Q}_k(\xi_p)\right]\dot{Q}_k(\xi_p)+$$

$$\left.\left.\left.+\Phi^0_{ik}M_i\left[\frac{\partial}{\partial\xi_p}\dot{Q}_k(\xi_p)\right]\dot{Q}_0(\xi_p)+\Phi^0_{ik}M_i\left[\frac{\partial}{\partial\xi_p}\dot{Q}_0(\xi_p)\right]\dot{Q}_0(\xi_p)\right\}\right\}\delta(\xi_p), \qquad (4)$$

где $\delta\dot{Q}_k(\xi_p)$ характеризует приращение скорости движения. Переходя к предельным состояниям, из (1) и (2) после некоторых преобразований и сокращения получаем

$$\delta\dot{Q}_k=\dot{Q}_k(\tau^*)\left\{\left\{1+\left[\left(\sum_{i=1}^{N}(\Phi^0_{ik})^2 M_i\right)(\dot{Q}_k(\tau^*))^2\right]^{-1}\times\right.\right.$$

$$\left.\left.\times[\delta R_{ik}Q_k(\tau^*)+\delta B^*_k[Q_k(\tau^*)]^2]\right\}^{1/2}-1\right\}. \qquad (5)$$

Дальнейшее поведение системы характеризуют изменяющиеся параметры, причем движение системы будет выражаться уравнением

$$\sum_{i=1}^{N} (\Phi_{ik}^{0})^2 M_i \frac{d^2 Q_k(\xi_p)}{d\xi_p^2} + \alpha_{k_1} \frac{dQ_k(\xi_p)}{d\xi_p} + B_k^* Q_k(\xi_p) =$$

$$= \frac{d^2 Q_0(\xi_p)}{d\xi_p^2} \sum_{i=1}^{N} \Phi_{ik} M_i + \sum_{i=1}^{N} \Phi_{ik} R_{ik}^*. \qquad (6)$$

Решение осуществляется с учетом начальных условий при

$$\bar{Q}_k(0) = Q_k; \quad Q_k'(0) = \bar{Q}_k'.$$

В уравнениях (4), вводя член неупругого сопротивления пропорционально скорости движения, решение получаем в следующем виде:

$$Q_k = \exp[-2^{-1}\alpha_k 2\pi T_k^{-1}(t_i - \xi_p)] \times [\bar{Q}_k \cos 2\pi T_k^{-1}(t_i - \xi_p) + 2\pi T_k^{-1} \times$$

$$\times (\alpha_k 2\pi T_k^{-1} \bar{Q}_k + \bar{Q}_k') \sin 2\pi T_k^{-1}(t_i - \xi_p)] + [2\pi T_k^{-2}(1+\alpha_k)^2)]^{-1} \times$$

$$\times \{\alpha_k \sin 2\pi T_k^{-1}(t_i - \xi_p) + \cos 2\pi T_k^{-1}(t_i - \xi_p)\} [1 - \exp[-2\pi T_k^{-1}\alpha_k (t_i - \xi_p)] \times$$

$$\times \sum_{i=1}^{N} \Phi_{ik}^{0} M_i R_{ik}^{**} \times \left(\sum_{i=1}^{N} (\Phi_{ik}^{0})^2 M_i\right)^{-1} - (2\pi T_k^{-1})^{-1} \left(\sum_{i=1}^{N} \Phi_{ik}^{0} M_i\right) \left(\sum_{i=1}^{N} (\Phi_{ik}^{0})^2 M_i\right) \times$$

$$\times \sum_{p=\tau}^{t_i} \ddot{Q}_0(\xi_p) \exp[2\pi T_k^{-1}(t_i - \xi_p)\alpha_k] \sin 2\pi T_k^{-1}(t_i - \xi_p) \delta\xi_p;$$

$$R_{\bar{i}k}^{**} = [\beta_{\bar{i}k}\lambda_k W_{k\bar{i}-1}^{**} - \beta_{\bar{i}k}\lambda_k W_{k\bar{i}-1}^{*} + (1-\beta_{k\bar{i}})\lambda_k W_{k\bar{i}}^{**}] B_k -$$

$$- [\beta_{\bar{i}k+1}\lambda_k W_{k+1,\bar{i}-1}^{**} - \beta_{k+1}\lambda_{k+1} W_{k+1\bar{i}}^{*} + (1-\beta_{k+1\bar{i}})\lambda_{k+1} W_{k+1}^{**}, \qquad (7)$$

где $\bar{Q}_k(\xi_p)$ и $\bar{Q}_k'(\xi_p)$ определяются следующим образом:

$$\bar{Q}_k(\xi_p)|_{p\tau_1=\tau_1^*} = \bar{Q}_k(\tau_1^*);$$

$$\bar{Q}_k'(\xi_p)|_{p\tau_1=\tau_1^*} = \bar{Q}_k'(\tau^*) + \delta\dot{Q}_k(\tau^*),$$

$$T_k = T^0(1-\alpha_k^2)^{1/2}, \quad \alpha_k = \alpha_{k_1}/2. \qquad (8)$$

Здесь $\alpha_k$ — характеристика диссипации.

Поперечные нагрузки определяются по уравнению

$$q_k = B_k^*[\beta_{ki}\lambda_k W_{ki}^{*} + (1-\beta_{ki}\lambda_k) W_k - \beta_{ki}\lambda_k W_{ki-1}^{**} - (1-\beta_{ki})\lambda_{ki} W_{ki}^{**}]. \qquad (8')$$

Приведем частный пример расчета 4-этажного каркасного здания (4) с учетом комбинационных повреждений. Задача решается с помощью ЭВМ поэтапно, при этом каждый раз определяются функции $\Phi^{0}_{ik}$. Для этой цели по участкам диаграммы находятся частоты $(2\pi T_k^{-1})$ из характеристического определителя. Затем определяются искомые функции согласно выражению аналогично (7).

Необходимо отметить, что в точках перехода зависимости „реакция—смещение" сохраняются условия неразрывности движения. Имея напряженно-деформационное состояние, сейсмические силы находим согласно (3—7). Предполагается, что в момент времени $\tau^*$, когда усилия, действующие на сооружения, принимают максимальные значения, происходит частичное разрушение. Процедура обращения к

характеристическому определителю при разрушении осуществляется аналогично упруго-пластическому случаю, т. е. следует заново определить собственные функции, обусловленные изменением параметров характеристического определителя. Для нахождения функции $Q_i$ согласно (7) учитываются условия (8).

| Этаж | Сейсмическая нагрузка ТС | | |
|---|---|---|---|
| | упругое решение | упр.-пласт. | учет разрушения |
| **I вариант** | | | |
| IV | 182,68 | 138,57 | 109,11 |
| III | 157,79 | 123,04 | 85,44 |
| II | 106,16 | 88,29 | 49,99 |
| I | 89,09 | 79,69 | 47,40 |
| **II вариант** | | | |
| IV | 212,85 | 161,46 | 130,20 |
| III | 173,16 | 144,38 | 94,36 |
| II | 124,42 | 106,27 | 62,88 |
| I | 102,32 | 81,26 | 46,07 |

В таблице приведены некоторые результаты расчета на сейсмостойкость четырехэтажного каркасного здания. Характеристики здания соответствуют примеру, приведенному в ([7]):

$$B_1 = 2270; \quad B_2 = B_3 = B_4 = 2300 \ (\text{ТС} \times \text{см}^{-1})$$

$$M_1 = 0{,}794; \ M_2 = M_3 = 0{,}743; \ M_4 = 0{,}729 \ \text{ТС. сек}^2 \times \text{см}^{-1}.$$

Для результатов, приведенных в таблице (I вариант), модуль диссипации равен 0,15; параметр, характеризующий максимальное смещение в долях упругой деформации, — 1,333; параметр упрочнения — 0,75. Для II варианта эти параметры соответственно равны 0,20; 2,0; 0,75. Изменения реакции после частичных разрушений равны 0,742 $B_2$ и 0,742 $B_1$, соответственно вариантам I и II.

Анализ числовых результатов показывает, что учет накопления повреждений, не представляющих опасности для людей и ценного оборудования, приводит к заметному снижению сейсмических сил. Следовательно, здания и сооружения, проектированные на сейсмические воздействия в соответствии с нормами, обладают резервами несущей способности, в 1,5—2 раза превышающими расчетные.

НИС Гидропроект
Институт геофизики
и инженерной сейсмологии Академии наук
Армянской ССР

Ա. Գ. ԿԻՐԻԼՈՎ, Ս. Ս. ԴԱՐԲԻՆՅԱՆ, Ա. Վ. ՄԻՆԱՍՅԱՆ

## Եզվող բնութագրերով առաձգա-պլաստիկ համակարգերի սեյսմակայունությունը

*Հոդվածում ուսումնասիրվում է առաձգա-պլաստիկ համակարգերի տատանումը և սեյսմակայունությունը։ Ենթադրվում է, որ դեֆորմացիաների սահմանային արժեքի դեպքում տեղի է ունենում կոշտության ակնթարթային փոփոխություն։*

*Ուժեղ երկրաշարժերի հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ շատ դեպքերում շենքերի և կոնստրուկցիաների էլեմենտներում սեյսմիկ ցնցումների հետևանքով առաջանում են պլաստիկ հոդակապեր և փխրուն քայքայման տեղամասեր։ Հետևաբար, կառուցվածքների կրողունակությունը պայմանավորված է կոմբինացիոն քայքայումներից՝ պլաստիկ հոսունությունից և փխրուն ակնթարթային քայքայումից։*

*Առաձգա-պլաստիկ համակարդերում էներգիայի վերաբաշխումը որոշելու համար ստացված է (5) բանաձևը։ Թվային հաշվարկները ցույց են տալիս, որ թույլատրելի սահմաններում կոմբինացիոն քայքայման հաշվառումով սեյսմիկ բեռները 1,5—2 անգամ փոքրանում է։*

### ЛИТЕРАТУРА—ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

[1] Инженерный анализ последствий землетрясений в Японии и США, Стройиздат, М., 1961. [2] Землетрясения в СССР, Изд. АН СССР, М., 1961. [3] *С. В. Поляков*, Сейсмостойкие конструкции зданий, Высш. школа, М., 1969. [4] СНиП П—А. 12—69* М., 1977. [5] *А. Г. Назаров*, Метод инженерного анализа сейсмических сил, Изд. АН АрмССР, Ереван, 1957. [6] *К. С. Завриев, А. Г. Назаров* и др., Руководство по проектированию сейсмостойких зданий и сооружений, т, 1—4, Стройиздат, М., 1969—1972. [7] *И. Л. Корчинский* и др., Основы проектирования зданий в сейсмических районах, Госстройиздат, М. 1961. [8] Non-Linear Response Analysis of Taal Buildings to strong Earthquake and its Application to Dynamic Design. SERAC REPORT № 1, 1962, № 3, 1963.