

ENHANCEMENT OF SEISMIC RESISTANCE OF BUILDINGS

Claudiu-Sorin DRAGOMIR

Lecturer, Phd, U.A.S.V.M., Faculty of Land Reclamation and Environment Engineering in Bucharest, Department of Environment and Land Reclamation/Senior Researcher, N.I.R.D. URBAN-INCERC, INCERC Branch, Laboratory of Seismic Risk Assessment and Actions in Constructions, e-mail: claudiu.dragomir@fifim.ro, dragomircs@incd.ro.

Emil-Sever GEORGESCU

Scientific Director, National Institute for Research and Development URBAN-INCERC, e-mail: ssever@incd.ro, emilsevergeorgescu@gmail.com.

Adrian SIMION

Phd, Technical University of Civil Engineering, e-mail: simion_i_adrian@yahoo.com

Abstract. The objectives of the paper are both seismic instrumentation for damage assessment and enhancing of seismic resistance of buildings. In according with seismic design codes in force the buildings are designed to resist at seismic actions. Due to the time evolution of these design provisions, there are buildings that were designed decades ago, under the less stringent provisions. The conceptual conformation is nowadays provided in all Codes of seismic design. According to the Code of seismic design P100-1:2006 the asymmetric structures do not have an appropriate seismic configuration; they have disadvantageous distribution of volumes, mass and stiffness. Using results of temporary seismic instrumentation the safety condition of the building may be assessed in different phases of work. Based on this method, the strengthening solutions may be identified and the need of seismic joints may be emphasised. All the aforementioned ideas are illustrated through a case study. Therefore it will be analysed the dynamic parameter evolution of an educational building obtained in different periods. Also, structural intervention scenarios to enhance seismic resistance will be presented.

Key words: Vrancea earthquake, dynamic parameters, irregularities, seismic joints, building strengthening.

1. Introduction

Pour ingénieurs de génie civile, le terme de « monitorisation » a des connotations communes à celles ordinaires de surveillance, poursuite, et contrôle du comportement des constructions à l'emplacement. Dans la littérature de spécialité on utilise le

terme de « monitorisation de la santé structurale ».

Pour analyser le comportement des immeubles, des constructions, après chaque tremblement de terre fort, les autorités, les propriétaires, les spécialistes prennent pour terme de référence

l'amplitude du mouvement sismique à l'emplacement respectif. L'ingénierie structurale est étroitement attachée aux paramètres c'est pourquoi, une fois avec l'utilisation à grande échelle des sismographes résistent aux forts mouvements, dans les années '70, on a passé à l'instrumentation sismique, par des stations situées dans des constructions, barrages, ponts, etc.

Par le réseau sismique INCERC on a obtenu l'unique enregistrement d'intérêt de spécialité (des ingénieurs) de 4 mars 1977, au sous-sol du bâtiment de la Chaussée de Pantelimon, et, à l'aide d'autres appareils installés dans des constructions, on a obtenu un enregistrement partiel d'un immeuble du quartier Balta Alba. Aussi a-t-on obtenu de valeureux enregistrements aux tremblements de terre des années 1986, 1990 (Georgescu et Dobre, 2000).

La monitorisation par instrumentation sismique contribue directement à:

- L'élaboration des cartes des zones sismiques, l'établissement des critères de micro zones du territoire;
- Au perfectionnement des règles de construction parasismique et à la vérification des nouvelles des normatifs;
- L'étude de l'influence des conditions géologiques locales sur les effets sismiques, y inclus la caractérisation de la modalité d'interaction terrain-structure, de l'amortissement, dans des conditions spécifiques d'emplacement, corrélées aussi aux données enregistrées par les appareils en terrain libre, limitrophes;
- L'étude de la transmission et de la propagation des effets sismiques dans des structures à plusieurs étages, la vérification et la certification,

l'attestation des modèles dynamiques structuraux ou bien, des modèles mathématiques utilisés, la comparaison des critères de project et la réponse réelle et aux avaries;

- L'identification des caractéristiques structurales, de l'effet des modes supérieurs spécifiques d'oscillation, en comparaison aux données obtenues sous l'agitation micro sismique;
- La vérification des déplacements relatifs de niveau maximum, de la réponse de torsion (difficilement à maîtriser, spécialement pour les structures asymétriques);
- L'identification des nécessités de réparation et de consolidation, tout comme de l'efficacité de certaines mesures d'intervention précédentes.

2. Expérience et tendances de développement internationales

Dans les Etats-Unis, les prévoyances du plus connu normatif pour les ouvrages - Uniform Building Code, recommandent dans le cas des zones sismiques 3 et 4, l'installation d'accélérographes dans les nouveaux bâtiments hauts de plus de 6 étages, et ayant une superficie totale de minimum 5574 m². En général, on exige l'installation de minimum 3 équipements: a la base, au centre et au dernier niveau du bâtiment, équipements interconnectés pour le déclenchement simultané, l'échantillonnage et la base de temps communs. Pour les bâtiments qui ont plus de 10 niveaux, sans tenir compte de la superficie construite, l'instrumentation sismique est obligatoire et il faut prévoir minimum 3 accélérographes triaxiales.

Il y a quelques ans, aux Etats-Unis, il y avait instrumenté avec accélérographes plus de 1350 emplacements; en Californie, il y avait installé plus de 550 instruments en 135 bâtiments, 20 barrages, 25 ponts, etc.

L'instrumentation sismique des bâtiments a évolué en temps vers une instrumentation type «réseau» de capteurs, pour l'enregistrement du mouvement sismique, on bien d'autres paramètres mécaniques, emplacements en base d'une étude dynamique adéquate et connectés a une station d'enregistrement centrale, par des quelles on peut poursuivre les oscillations en temps réel, a partir de la perception des mouvements usuels, ordinaires, jusqu'aux mouvements sismiques qui peuvent produire des avaries. Ces références, ces données sont obtenues dans des conditions on la sismicité de fond est monitorisée par d'autres systèmes.

Ainsi, le Système d'information sismique pour réponse d'urgence CUBE (initié en 1990, par Caltech et USGS de Pasadena), transmet en quelques minutes des informations concernant la magnitude et l'épicentre d'un tremblement de terre aux agences de défense civile, aux autorités, aux campagnes privées, et le Système de monitorisation automatique des tremblements forts (AMOES) fournit par L'INTERNET des déterminations rapides d'accélération des mouvements sismiques forts (Georgescu et Borcia, 2005).

Au Japon, les réseaux sismologiques se sont développés et ont été dotés d'un grand nombre d'appareils des fonds du Ministère de Constructions, par le soin des instituts de recherches en constructions, premièrement pour les emplacements des grands ports, ponts, tunnels, bâtiments.

Après le tremblement de terre Kobe de 1995, on a réalisé un réseau d'enregistrement des mouvements sismiques forts K-NET (Kyoshin), basé sur 1000 stations sismique nouvelles, spécialement construites, ayant communication par INTERNET ; les sismographes K-NET 95, installés en terrain libre, à une distance moyenne de 25 km

peuvent enregistrer toute tremblement de terre de magnitude 7 du Japon.

L'agence de défense contre les incendies a initié un projet pour la croissance du nombre d'accéléromètres au niveau de chaque municipalité du Japon - au total 3255, y exdus les municipalités que en ont déjà. A présent, la télévision japonaise transmet immédiatement et également la carte de la zone où s'est produit un séisme et les intensités sismiques estimées pour le territoire adjacent. En Europe, le développement des réseaux sismiques a été plus lent encore, mais à présent on y a emplaced quelques milliers d'instruments ; récemment, on a connu un développement accentué et particulier les réseaux télématiques, pour la transmission des plusieurs catégories d'informations, par exemple, celles concernant l'environnement. Dans Fig. 1 - la carte sismique de l'Europe est représentée ; on y a mis en évidence la zone sismique de Vrancea (Giardini *et al.*, 2003).

En Italie, l'un des projets prioritaire du Service Sismique National est la Système d'observation sismique sur le bâtiments, que se propose également la création d'un réseau instrumentale de mesure et d'enregistrement de la réponse sismique pour un échantillon représentatif des bâtiments, et la création et l'actualisation des modèles numériques pour ceux-ci, toute en utilisant des techniques avancées.

En Turquie, le réseau d'enregistrements sismiques pour les mouvements forts, qui indut plus de 100 appareils, on a réalisé le système de motorisation de la résistance structurale et d'alarme immédiate en cas de tremblement de terre pour les ponts à grandes ouvertures. Un tel système est installé sur le nouveau pont suspendu sur le Bosphore.

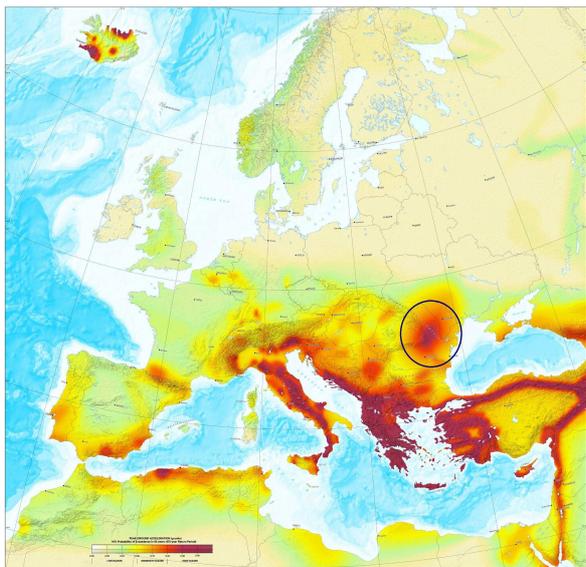


Fig. 1. La Carte Euro-méditerranéenne concernant hazard sismique

En Roumanie, le Code pour les projets d'ouvrages à réaliser dans les régions sujettes aux séismes, indicatif P100-1 :2006, prévoit dans l'annexe A, certains règlements à l'égard de l'instrumentation sismique, des constructions de Roumanie.

- Dans les zones sismiques pour lesquelles la valeur d'accélération de calcul a_g ayant $IMR \geq 100$ ans est $a_g \geq 0,24g$, les constructions étant de 50m de haut, ou bien, plus de 16 étages, ou une superficie plus de 7500m², seront instrumentées par un système d'acquisition digitale et minimum 4 senseurs triaxiaux pour l'accélération.
- Cette instrumentation minimale sera emplaced de la manière suivante : 1 senseur en terrain libre au voisinage de la construction, 1 senseur au sous-sol et 2 senseurs au plancher du dernier étage. Les instruments sont emplaced de sorte que l'accès aux appareils soit possible en tout moment.
- L'instrumentation, le soin et l'exploitation sont financé par le propriétaire de la construction et réalisées par des organisations autorisées.

- Les enregistrements obtenus pendant les tremblements de terre forts doivent être mis à la disposition des autorités compétentes et des institutions de spécialité en terme de 24 heures de la production du tremblement de terre.

Le coût du système d'acquisition des informations sismiques est réduit par rapport à la valeur totale d'un haut bâtiment moderne, ayant des installations et des équipements modernes, ou bien, par rapport à celle d'une investition industrielle, qui, autrement, serait mise à l'écart à l'attente d'une expertise traditionnelle. La compréhension correcte par l'ingénieur (qui fait des projets techniques) de l'importance et de l'influence des différents facteurs sur la réponse dynamique, structurale, tout comme leur corrélation aux objectifs d'intérêt pour le bénéficiaire, mène à un choix et à une distribution adéquate des parties composantes des systèmes de motorisation sismique dans le bâtiment.

3. Monitorisation des structures par l'instrumentation sismique

L'analyse du comportement au tremblement de terre des différents catégories de construction et l'appréciation des effets des tremblements sur celles-ci, au-delà d'une examination visuelle en détail de l'état de la construction et de l'enregistrement des avaries constatées, entraîne dans de nombreux cas, une série de déterminations et de recherches expérimentales d'autant plus pour dépister les défauts cachés, que pour préciser certains caractéristiques réelles des matériaux et des éléments de construction qui ont subi des avaries, y inclus du terrain de fondation, en vue de connaître la capacité réelle de résistance de la construction avariée et d'établir les

solutions de renforcement, de consolidation. Un élément important qui intervient dans le calcul des constructions subies aux forces sismique, le constitue la période propre de vibration des constructions, dont la valeur déterminée en base expérimentale, peut, offrir des indications sur la rigidité et le niveau de la capacité de résistance de ces constructions aux forces horizontales sismiques. Pendant le tremblement de terre, toutes les constructions sont sollicitées au-delà du domaine élastique, ce qui entraîne la modification de toutes les particularités dynamiques. Il est évident que, après la cessation de la sollicitation, la structure reste avec les particularités physiques et mécaniques bien modifiées. C'est ainsi que, à la suite des dégradations provoquées par le tremblement de terre, la rigidité de l'immeuble baisse, se réduit, et les périodes propres augmentent et le pourcentage de l'amortissement s'accroît. Donc, plus un bâtiment est avarié, plus ses périodes propres sont grandes critiques par rapport à celles initiales, du début, dès son livraison, son utilisation, son exploitation. Pourtant la rigidité et respectivement les valeurs des périodes propres, spécifiques d'une construction sont influencées non seulement par les dégradations visibles, mais par une série de déformations et de microfissures invisible qui s'accumulent, s'amassent dans la structure du bâtiment, et qui peuvent être importantes, elles aussi. De telles déformations amassées se manifestent quelquefois plus tarde, comme l'on a observé après le tremblement.

Ce phénomène, si caractéristique pour les séismes de grande intensité, peut se produire aussi comme suite des tremblements répétés et d'intensités réduites. Par conséquent, la rigidité des bâtiments peut être réduite

pendant l'exploitation dans des zones sismiques, même si dans la période respective, des tremblements de terre de grande intensité ne se sont pas produits an enregistrés.

A la suite des modifications effectuées dans la composition du bâtiment, soit concernant les éléments structuraux, soit non structuraux, et surtout par les travaux de consolidation des avaries produites par le tremblement, on par d'autres causes, la rigidité de l'immeuble subit d'importantes modifications, qui peuvent être mises en évidence par le mesurage des périodes propres.

Donc, le mesurage des périodes propres de vibration des constructions dans de différentes périodes, telles: après leur mise en exploitation, avant le tremblement, après l'action du tremblement qui a produit des avaries, des dégâts et en a diminué ou affaibli la résistance, la structure, ou bien, après avoir effectué des consolidations et, par conséquent, le renforcement de celle-ci, - ce mesurage permet une détermination des rigidités et, à la suite, une très utile appréciation sur le degré d'avarie et de la capacité de résistance des constructions.

Entre la période propre d'une construction déterminée dans des conditions d'agitation microsismique, et celle qui correspond aux conditions de sollicitation pendant un tremblement fort il y a une différence provoquée par le niveau de sollicitation, en général, la période mesurée dans des conditions des microséismes est plus réduite, plus petite que celle obtenue d'un tremblement fort.

Quelquefois les différences peuvent être très grades grâce à l'influence très importante de certains éléments nonstructuraux qui font accroître la rigidité « réelle » enregistrée à

l'agitation microsismique ordinaire, mais qui, au cas des tremblements forts cesse de travailler.

Dans les grandes lignes, le mesurage de la période de vibration peut mettre en évidence un grand nombre de dégâts structuraux, que la structure a subis jusqu'au moment du mesurage; le mesurage de cette dimension, avant et après le tremblement, représente une méthode globale d'appréciation de la variation de la rigidité d'une construction, à la suite de la sollicitation sismique; une seule observation: la rigidité, ainsi mise en évidence, correspond aux niveaux bas de sollicitation.

4. Instrumentation sismique des bâtiments. Etude de cas – le bâtiment F.I.F.I.M. de Bucarest

Le corps A de l'immeuble de la Faculté d'Améliorations Foncières et de l'Ingénierie de l'Environnement a la structure de résistance en cadres de béton armé, projetée dans les années '70, conformément au Normatif P13-70 (Fig. 2).

Bien que le régime de hauteur soit réduit ($H=20,33m$) et la forme en plan soit régulière, au tremblement de terre se sont produites des avaries, spécialement aux éléments nonstructuraux, grâce à la rigidité insuffisante pour la protection des éléments de compartimentation. Ultérieurement au tremblement du 30/31 août 1986, INCERC a effectué la détermination des particularités dynamique de ce bâtiment. Les travaux de consolidation ont été finalisés en 1990, ultérieurement au tremblement de 30 mai. Donc, on a effectué une nouvelle détermination expérimentale des modifications des particularités dynamiques du bâtiment, à la suite de l'effet cumulé des travaux de

consolidation et du tremblement du 30 mai 1990.

Les résultats de ces mesurages ont mis en évidence une croissance de la rigidité d'ensemble de 37% en section transversale, de 76% en section longitudinale et de 64% pour la torsion d'ensemble.



Fig. 2 Immeuble de la Faculté d'Améliorations Foncières et de l'Ingénierie de l'Environnement

Après la mise en usage du normatif P100-92, on a effectué de nouveaux travaux de consolidation de la structure, qui permettent que le bâtiment soit aux exigences de celui-ci à l'égard du niveau des déformations relatives de niveau maximum pour la protection des éléments nonstructuraux (Code P100:92).

Ces travaux de consolidation, exécutés jusqu'au niveau 4, sont capables de satisfaire ces exigences. Pour la vérification instrumentale de l'efficacité de ces travaux, L'Université de Sciences Agronomiques (d'Institut National Agronomique) et de Médecine Vétérinaire a sollicité d'effectuer la détermination des particularités dynamiques du corps A du bâtiment de la Faculté d'Amélioration Foncière et de l'Ingénierie de l'Environnement.

En vue d'identifier les caractéristiques dynamiques à un niveau plus élevé de sollicitation, on a effectué des mesurages à l'occasion de la démolition par implosion du bâtiment de l'ancien foyer des étudiants, situé à presque 50m distance du corps A, le 11 octobre 1996. Ces résultats, mais aussi ceux du niveau microsismique, effectués à la

même occasion, sont très utiles pour l'appréciation de l'effet des dernier travaux de consolidation réalisés en 1997.

Dans le tableau 1, on présente l'évolution an temps des périodes propres du Corps A de F.I.F.I.M (F.A.F.I.E) de Bucarest grâce aux enregistrements effectués par INCERC Bucarest entre 1986 - 1998.

On présente ci-joint les enregistrements effectués par l'appareil GeoSIG GBV 316 en 2009, dès la mise en fonction du Code P100-1:2006. Les enregistrements ont été faits à l'étage 4 du corps A du bâtiment F.I.F.I.M (F.A.F.I.E). Les remaniements ont été réalisés par le programme GeoDAS, et on a obtenu de cette manière-là, les déplacements, les vitesses, les accélérations, la variation des accélérations en temps (Fig. 3), et aussi les périodes fondamentales d'oscillation du bâtiment (Fig. 4).

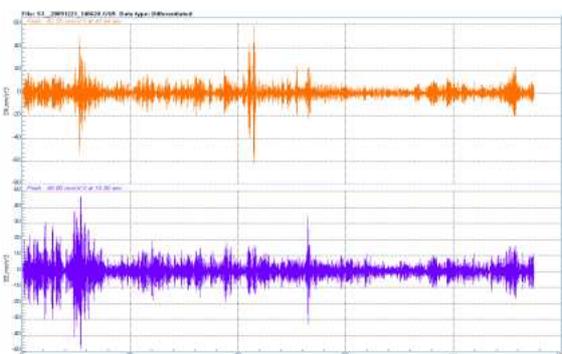


Fig. 3. Variation des accélérations en temps sur les 3 directions

Grâce aux déterminations des particularités dynamiques du corps A de la F.A.F.I.E du décembre 2009, on a

constaté que la période d'oscillation du bâtiment a été réduite approximativement de 19% par rapport aux valeurs déterminées en 1998.



Fig. 4. F.F.T. sur les 3 directions

On estime que cette réduction est due autant aux processus de travailler ensemble les différentes parties, anciennes et nouvelles, récentes, de la structure, qu'au tremblement de terre de magnitude $M_w = 6.0$, qui s'est produit le 27 octobre 2004, dans la zone sismique de Vrancea ; celui-ci a contribué - pense-t-on - au transfert d'efforts des 4 caissons en béton armé à la structure.

Dans Fig. 5, on présente les résultats obtenus à la suite du calcul structural réalisé par le programme Robot Millennium dans les 2 variantes structurales: avant et après la consolidation. Les résultats ont relevé une croissance de la rigidité globale de la structure d'un pourcentage de 73% de la rigidité initiale (Dragomir, 2006).

Tableau 1. Evolution an temps des périodes propres du Corps A de F.I.F.I.M (F.A.F.I.E) de Bucarest

| Période de temps | Type de l'excitation | Direction d'oscillation | |
|------------------|---|-------------------------|---------------|
| | | Transversale | Longitudinale |
| 3.12.1986 | Microséisme (après le tremblement de terre de 30/31 août 1986) | 0.62 | 0.57 |
| 19.11.1990 | Microséisme (après le tremblement de 30 mai 1990) | 0.53 | 0.43 |
| 11.10.1996 | Microséisme (avant l'explosion) | 0.50 | 0.44 |
| 11.10.1996 | Explosion - excitation maximale | 0.57 | 0.50 |
| 11.10.1996 | Explosion - variation libre | 0.53 | 0.44 |
| 13.02.1998 | Microséisme (après les travaux de consolidation de 1997) | 0.42...0.44 | 0.40...0.42 |
| 21.12.2009 | Microséisme (après la mise en usage, en fonction de code P100-1:2006) | 0.35 | 0.42 |

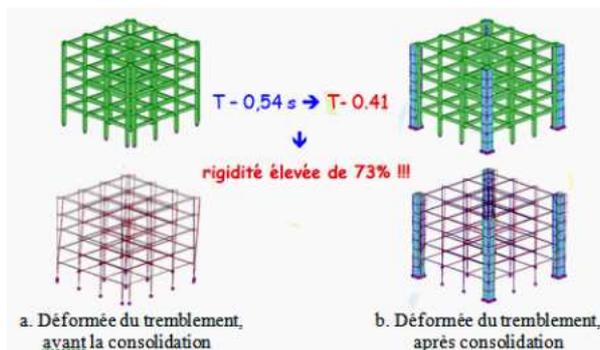


Fig. 5. Variation de la période fondamentale de la rigidité

Les valeurs obtenues par le calcul structural ont validé ainsi les valeurs résultées par direction transversale à la suite de l'instrumentation sismique avant et après la consolidation.

5. Conclusion

L'approche spatiale et temporelle concernant les mouvements sismiques, combinée avec la monitorisation instrumentale permet un nouveau point de vue sur la manière de transition du hasard au désastre, tout en utilisant un nouveau cadre de références conceptuelles et offre un nouveau format dans l'acquis des informations à l'égard du hasard, en augmentant la prédictibilité de hasards et de leur impact dans des scénarios de désastres combinés.

Les spécialistes de différentes disciplines peuvent collecter et faire échange d'informations, tenant compte d'une stratégie à long terme sur les conditions de l'habitat humain. En même temps, la monitorisation doit être comprise aussi comme un processus échelonné en temps par rapport au degré d'incidence de certains phénomènes naturels an actions, chaque étape ayant besoin d'objectifs et de moyens spécifiques. Le mesurage de la période propre de vibration peut mettre en évidence

nombre d'avaries structurales, que la structure a subies jusqu'au moment du mesurage; le mesurage de cette grandeur (ampleur), avant et après le tremblement, représente une méthode globale d'appréciation, d'estimation de la rigidité d'un bâtiment, à la suite de la sollicitation sismique, étant donné l'observation que la rigidité ainsi mise en relief, correspond aux niveaux bas de sollicitation.

Par conséquent, l'instrumentation sismique des bâtiments est une forme de monitorisation spécifique et représente un système moderne, complexe et à plusieurs voies d'obtention des informations sismiques, également concernant les particularités sismiques des emplacements et les particularités dynamiques de réponse des structures.

BIBLIOGRAPHIE

- MLPAT (1992), *Code P100-92, Seismic design of housing, social, cultural, industrial and agricultural construction* [in Romanian].
- MTCT (2006), *Code P100-1: 2006, Seismic design code, Part I - Provisions for buildings design* [in Romanian].
- Dragomir C. S., Alexe R., Calin A., Calin C., Nicolae M., Pop O., Slave C. (2006), *Post-seismic interventions to buildings and balancing their environment*, ICERA, Bucharest, Romania, 30 May 2006.
- Georgescu E. S., Borcia I. S. (2005), *Constructions assessment in seismic areas* [in Romanian], *Construction Journal* **1(9)**:106-110.
- Georgescu E. S., Dobre D. (2000), *Complex monitoring of the built environment in seismic areas* [in Romanian], International Conference on „Building behaviour in situ”, 13th edition, Iasi, September 2000.
- Giardini D., Jimenez M. J., Grunthal G. (2003), *European - Mediterranean Seismic Hazard Map*, International Geological Correlation Program, Project no. 382: SESAME.