



ANALYSE CRITIQUE DES ESSAIS DE COMPRESSION DYNAMIQUE SUR LE BÉTON

CRITICAL ANALYSIS OF DYNAMIC COMPRESSION TESTS ON CONCRETE

Réception : 05/02/2020

Acceptation : 02/03/2020

Publication : 25/06/2020

BELAOURA Mebarek¹, BRARA Ahmed²¹Laboratoire de Recherche en Travaux Publics, Ingénierie de Transport et Environnement (TPiTE), ENSTP, belaoura@gmail.com²Centre National des Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB), brahm3258@yahoo.com

Résumé - La réponse du béton à de hautes vitesses de chargement en compression a été la plus largement étudiée, et ce à partir des années quarante et de manière plus extensive ces quatre dernières décennies. De nombreux essais à l'échelle du matériau ont été conduits concernant la détermination de la résistance du béton soumis à de grandes vitesses de chargement en compression. Pour la caractérisation du comportement dynamique du béton en compression - principale propriété d'usage dans le génie civil - divers moyens et techniques d'essai ont été utilisés, à savoir des machines universelles, masses tombantes et barres de Hopkinson. Dans cet article, il est entrepris une revue extensive des différentes techniques expérimentales employées de par le monde pour les essais sur le béton en configuration de compression uniaxiale aux grandes vitesses de chargement. Une évaluation critique des techniques expérimentales employées généralement pour l'essai en compression à hautes vitesses de déformation est ainsi présentée.

Mots - clés : Compression dynamique, béton, barre de Hopkinson, vitesse de chargement.

Abstract- The response of concrete to high compression loading rate has been the most widely studied, starting in the 1940s and more extensively over the past four decades. Numerous scale tests of the material have been carried out concerning the determination of the strength of concrete subjected to high loading rate in compression. For the characterization of the dynamic behavior of concrete in compression - the main usage property in civil engineering - various test means and techniques were used, namely universal machines, falling masses and Hopkinson bars. In this paper, an extensive review of the various experimental techniques used around the world for testing concrete in uniaxial compression configuration at high loading rate is undertaken. A critical evaluation of the experimental techniques generally used for compression testing at high strain rates is thus presented.

Keywords: Dynamic compression, concrete, Hopkinson bar, loading rate.

1-Introduction

Il est patent que certaines structures modernes (centrales nucléaires, plates-formes d'exploration, ouvrages stratégiques tels que les bâtiments névralgiques, les ponts...) sont susceptibles d'être soumises à des actions

accidentelles ou différées (attaques militaire ou terroriste). Ces actions peuvent être des chargements de séisme, d'impact ou d'explosion générant des chargements intenses et de courtes durées entraînant la ruine de la structure ciblée. La mise en charge brutale de la structure met en jeu des effets d'inertie

importants mais également donne naissance à des désordres à la surface d'application de la charge. Désordres résultants de diverses contraintes, notamment de traction due à des tensions appliquées, de la sollicitation de flexion et de cisaillement. La prédiction et l'évaluation de l'influence des effets dynamiques sur les matériaux en général et le béton en particulier revêtent un intérêt important pour la communauté scientifique. Dans le domaine du génie civil, dans lequel le béton (armé ou non) est largement utilisé, ce problème est de prime importance puisqu'il renvoie à l'élaboration d'une méthodologie de conception optimale des ouvrages. Si le comportement quasi-statique de ce matériau est bien connu, il l'est moins dans le domaine des grandes vitesses de chargement. Le comportement du béton sous des conditions extrêmes de chargements traité qualitativement ces quatre dernières décennies fait actuellement l'objet d'un traitement quantitatif.

2- Définition d'un chargement dynamique

L'action de mise en charge intense avec une durée de maintien de l'effort très brève peut être désignée de manière générique par «chargement impulsif», englobant ainsi les impacts, les explosions et les séismes. Le point fondamental de ce type de chargement est que le temps caractéristique de la variation du chargement τ est très faible devant la période propre de vibration T de la structure, voir Tableau 1.

Une autre façon de caractériser cette action est l'établissement d'une échelle de vitesses de déformation, Figure 1. Il est à noter que cette échelle se transposerait à celle des vitesses de chargement en la multipliant par le Module d'Young - considéré constant lors des essais dynamiques - du matériau testé. Par rapport à la gamme quasi-statique des tests conventionnels comprise entre 10^{-6} et 10^{-4} s^{-1} , les vitesses de déformation pour les chargements impulsifs sont au moins 1000 fois supérieures.

Tableau 1 : Classification des chargements

Table 1 : Loading class

| classification du chargement | τ / T | type de chargement |
|------------------------------|-------------|----------------------------|
| quasi-statique | > 4 | tests conventionnels |
| quasi- impact | ~ 1 | chargements transitoires |
| impulsionnel | < 0.25 | énergie cinétique, souffle |
| Chocs durs | $< 10^{-6}$ | explosions puissantes |

Physiquement, les vitesses de déformations allant de 10^{-5} à 10^{-3} s^{-1} correspondent aux chargements classiques de trafic et les impacts de véhicules sur les ouvrages. Les explosions puissantes, les séismes et les chocs qu'ils induisent tel que l'effet de martèlement de structures (hammering effect) peuvent générer des vitesses de déformations allant de 10^{-3} jusqu'à plus de 100 s^{-1} .

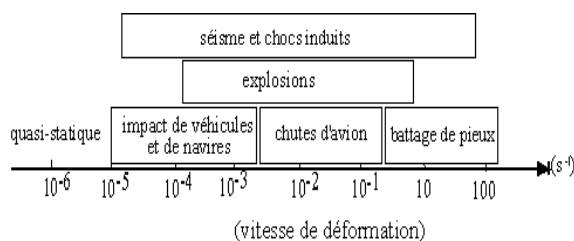


Figure 1 : Régimes de vitesses de déformation.

Figure 1 : strain rate regime

3- Techniques expérimentales

Les techniques expérimentales majeures en compression dynamique peuvent être catégorisées comme suit [1]:

3.1- Les machines hydrauliques

Les presses hydrauliques sont les outils d'essai par excellence du béton en compression notamment dans le domaine quasi-statique et celui des vitesses de déformations intermédiaires (après les améliorations techniques des machines), Figure 2.

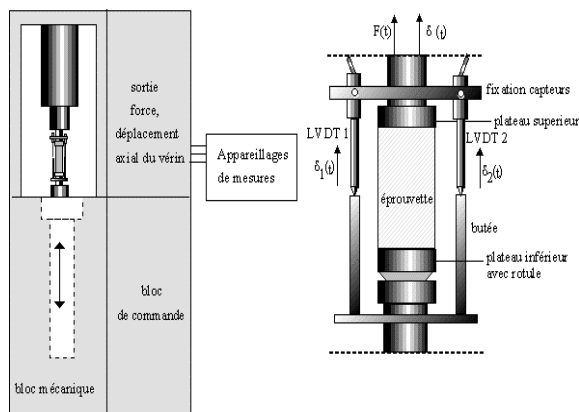


Figure 2 : Schéma d'une presse universelle pour les essais de compression.

Figure 2 : Universal press for compression tests.

Le principe de chargement des presses modernes consiste à charger en compression une éprouvette cylindrique ou prismatique par deux plaques dont les mouvements relatifs $\delta(t)$ et $\delta_2(t)$ sont mesurés par deux capteurs extérieurs de déplacements (LVDT). En outre, le déplacement $\delta(t)$ du vérin de la machine est mesuré par un capteur intérieur. Quant à la force $F(t)$, elle est mesurée par un capteur de force incorporé à la machine. Afin de minimiser le problème de contact entre les plaques et les faces de l'éprouvette, une rotule en acier est souvent incorporée à la plaque actionnée par le vérin. Cette rotule permet de rattraper les imperfections de planéité des faces de l'éprouvette et éviter ainsi des concentrations de contraintes et des flexions parasites. Le système de mesure est assuré par un bloc électronique comprenant un pont extensométrique conditionneur de signal, un oscilloscope à plusieurs voies pour la visualisation des signaux de déplacements et de forces et un PC pour l'enregistrement sous format numérique de ces derniers. L'ensemble est piloté par un bloc de commande. L'éprouvette est chargée en compression par les plaques dont les mouvements sont mesurés par les capteurs. Il est donc nécessaire de corriger les mesures de la rigidité du système pour une évaluation plus précise du déplacement des faces de l'éprouvette.

Les machines classiques permettent d'atteindre des vitesses de 10^{-5} s^{-1} ou 200 s de durée de chargement à la rupture. Mais avec l'utilisation des pompes rapides et des valves pour l'augmentation de la vitesse du flux

d'huile, la vitesse de déformation peut être portée jusqu'à 10^{-1} s^{-1} ou 20 ms de durée de chargement à la rupture [2].

Pour le chargement de ce type de machines très rigides, un contrôle électronique de la vitesse est souhaitable [3]. Enfin, l'utilisation d'un réservoir à gaz dans un système hydro-pneumatique permet d'atteindre une vitesse de 1 s^{-1} ou 2 ms de durée de chargement à la rupture [4].

3.2- Les essais de Charpy ou barre entaillée

Pour des vitesses de déformations plus élevées, le recours à la technique d'impact est incontournable, Figure 3. Traditionnellement, l'essai de Charpy ou l'essai de la barre entaillée est utilisé pour la mesure de la résistance au chargement d'impact pour un bon nombre de matériaux. Cette résistance est mesurée par la valeur de l'angle de chute d'un pendule percutant une éprouvette entaillée. La résistance à l'impact est ainsi déterminée à partir de l'énergie totale nécessaire à la rupture de l'éprouvette entaillée. Cette méthode, essentiellement qualitative, fournit quelques informations de base sur la réponse contrainte-déformation et les causes fondamentales de la rupture du matériau testé. Ceci malgré quelques améliorations apportées avec l'instrumentation de cet essai (l'essai d'Impact de Charpy Instrumenté ou *Instrumented Charpy Impact Testing*).



Figure 3 : Schéma de l'essai de Charpy

Figure 3 : Charpy test

3.3- Les masses tombantes

Beaucoup de travaux sur le comportement du béton sous un chargement d'impact utilisent des masses tombantes sur des cubes ou des prismes en béton [5], ou bien l'impact des cubes avec des pendules balistiques [6]. La résistance est mesurée en déterminant la hauteur pour laquelle un certain poids en tombant provoque une rupture de l'échantillon par un seul coup, ou par le nombre de coups exigés pour lesquels la rupture est atteinte avec une hauteur et un poids fixes. La technique des masses tombantes est utilisée pour le béton afin d'atteindre des vitesses de 10 s^{-1} équivalent à $250 \mu\text{s}$ de durée de chargement. L'inconvénient de cette méthode est la difficulté de contrôle de la charge avec de telles vitesses. Un lanceur à gaz est utilisé pour accélérer ces masses pour atteindre une vitesse de 50 et 100 s^{-1} avec $50 \mu\text{s}$ de durée de chargement [7].

3.4- Les barres de Hopkinson

Les très grandes vitesses de chargement n'ont été obtenues qu'avec l'utilisation de la technique des barres de Hopkinson. Cette technique dont la configuration est restée la même depuis Lindholm [8], est utilisée par pratiquement tous les expérimentateurs, Figure 4. Le principe de cette technique est résumé succinctement. Une onde incidente de compression est générée dans la barre entrante par l'impact d'un projectile, propulsé avec une certaine vitesse. Cette onde (ϵ_i) se propageant le long de la barre est partiellement réfléchiée (ϵ_r) à l'interface barre entrante-éprouvette. Ces deux ondes sont enregistrées au niveau de la jauge A. Une partie de l'onde de compression (ϵ_t) sollicitant l'éprouvette est à son tour transmise à la barre sortante et enregistrée par la jauge de résistance B. La contrainte et la déformation de l'éprouvette insérée entre les deux barres sont déduites des signaux mesurés par les deux jauges. La théorie utilisée est celle de la propagation unidimensionnelle des ondes planes longitudinales dans les milieux élastiques [9].

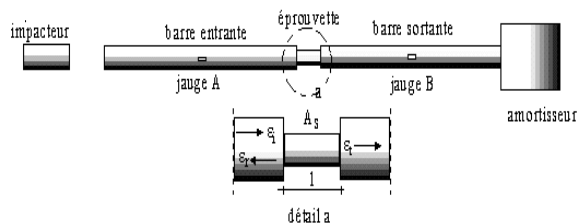


Figure4 : Schéma du dispositif d'essai aux barres de Hopkinson [8].

Figure 4 : Hopkinson bar test [8]

3.5- Les essais d'impact plaque-plaque

Enfin, des essais d'impact plaque sur plaque ont été réalisés pour obtenir la réponse en déformation uniaxiale du béton à de très grandes vitesses de déformation. La technique consiste à impacter avec une très grande vitesse une plaque mince de béton de forme circulaire par une plaque rigide en acier. L'impact de la plaque génère une impulsion d'onde de contrainte de compression intense et de très courte durée. Les plaques d'aciers sont propulsées généralement par un canon à gaz. L'amplitude de l'impulsion de compression transmise à l'éprouvette est déterminée par la mesure des ondes se propageant dans l'impacteur ou à l'arrière du disque cible en béton via des jauges de résistances ou des systèmes optiques.

4. Limitations techniques et difficultés d'interprétations des résultats

4.1- Les différentes définitions de la vitesse de chargement

Selon les techniques expérimentales utilisées, plusieurs définitions de la vitesse de chargement ont été proposées. Elle est définie comme le temps pris pour la rupture (qui est la durée de chargement), la vitesse instantanée de contrainte (c'est la pente de la réponse contrainte-temps) ou vitesse de déformation, la vitesse moyenne de contrainte ou vitesse de déformation ou parfois la vitesse de déplacement du piston. Les résultats présentés dans la littérature ne donnent pas la procédure de mesure de la vitesse de déformation, pour cela, les résultats sont rapportés et transformés

pour avoir une vitesse moyenne de déformation et ce pour des fins de comparaison. Le concept d'une vitesse de déformation constante sera considéré acceptable, si des changements non significatifs dans les propriétés du matériau sont observés lorsque la vitesse de chargement (déformation) n'augmente que par au moins un ordre de magnitude. Il est clair cependant que des variations significatives de la vitesse de déformations durant l'histoire de chargement peuvent influencer sur la réponse des matériaux testés.

4.2-Limitations de la mesure des contraintes à grandes vitesses de déformation

Une très grande dispersion caractérise les résultats d'essais de ces dernières décennies, amenant parfois à douter des techniques expérimentales utilisées en dynamique. Les résultats d'essais obtenus par différentes méthodes ne sont pas directement comparables, et des difficultés apparaissent dans leur analyse objective, car peu de détails sont donnés sur ces investigations. Le meilleur exemple de manque de cohérence et de contradiction dans l'interprétation des résultats est la conclusion sur la variation de la déformation critique en fonction de la vitesse de déformation. Dans ce qui suit, sont sériées les principales limitations grevant ces méthodes.

- Caractéristiques des machines d'essai

Pour une machine hydraulique, l'effet d'inertie est négligé pour des essais conduits à des vitesses de déformation inférieures à 0.1 s^{-1} . Cependant, la rigidité de la machine doit être nécessairement prise en compte car elle est susceptible d'influer sur la valeur de la vitesse de déformation de l'échantillon et de fausser la mesure de la déformation (déduite du déplacement du vérin). En effet, le déplacement du vérin ne résulte pas uniquement de la déformation de l'échantillon testé, mais aussi du déplacement du bâti de la machine, Figure 5. La valeur de cet effet dépend de la rigidité relative entre l'échantillon testé et la machine d'essai. L'influence de la rigidité relative échantillon-machine sur la vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}_s$ est donnée selon Goldsmith [10] par l'équation:

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{\frac{V_p}{L_0}}{1 + \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \left(\frac{A_0}{K_m} \right)} \quad (1)$$

où V_p est la vitesse du piston, L_0 et A_0 sont respectivement la longueur et l'aire de la section de l'éprouvette, $\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}$ représente le module tangent de l'éprouvette pour un niveau de contrainte spécifié et K_m la rigidité longitudinale de la machine d'essai. L'éq. (1) montre la nécessité d'utiliser des machines dotées de vérins ayant une plus grande rigidité que celle du matériau testé.

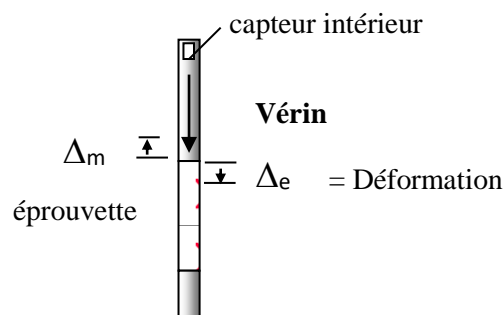


Figure 5 : Effet de la rigidité de la machine

Figure 5 : Effect of the rigidity of the machine.

- Inertie de l'éprouvette

Cet effet doit être déterminé et pris en compte lorsque la vitesse de déformation maximale développée par les machines hydrauliques est atteinte (soit environ 1 s^{-1}). L'effet d'inertie en réaction à la masse accélérée induit une augmentation de la charge mesurée au sommet de l'échantillon. La charge inertielle excédentaire P_1 peut aisément être déterminée en appliquant le second principe de Newton et le théorème des travaux virtuel. On obtient alors :

$$P_1 = \frac{\rho A h^3}{3} \ddot{\varepsilon}(t) \quad (2)$$

Dans cet équation, A , h et ρ représentent respectivement la section droite, la hauteur et la masse volumique de l'échantillon; $\ddot{\varepsilon}$ est l'accélération en déformation.

Cet effet se manifeste beaucoup plus dans les machines hydro-pneumatiques pour lesquelles il est difficile de contrôler la vitesse de déformation. Pour les machines à déformations contrôlées, le problème ne se pose pas (accélération en déformation nulle, i.e. $\ddot{\epsilon} = 0$). L'emplacement de la cellule de mesure de la charge à l'extrémité non chargée de l'échantillon permet de minimiser cet effet.

- Propagation de l'onde contrainte

L'effet de la propagation de l'onde contrainte affecte les résultats d'essais conduits avec une vitesse supérieure à 10 s^{-1} et doit être pris en considération dans l'interprétation des résultats [11]. Hughes et al. [12] ont conclu que la négligence de cet effet donne une surestimation de la résistance à la rupture. Cet effet qui se manifeste à l'interface cellule de charge-échantillon, siège de transmissions-réflexions d'ondes, est minimisé par la détermination des valeurs exactes des impédances dans cet endroit. La technique des barres de Hopkinson (Split Hopkinson Pressure Bar), initialement utilisée pour les aciers, n'a été adaptée que récemment pour le béton. Le problème qui se pose avec l'utilisation de cette technique pour l'étude de ce matériau est l'optimisation de dimensions convenables des éprouvettes afin d'éliminer les effets de bord tout en assurant une répartition uniforme des contraintes. Si le choix d'un rapport hauteur/largeur = 2.5 peut minimiser les effets de bord, l'uniformité de contraintes ne peut être assurée que pour des échantillons courts du béton (i.e. faible rapport hauteur/largeur). De plus, la localisation de la rupture au centre de l'éprouvette pose le problème de la répartition uniforme des contraintes. Des dispersions dans les signaux de déformation mesurés pour des échantillons de grands diamètres peuvent avoir lieu à cause des oscillations radiales, Malvern et al. [13]. Néanmoins, ces dispersions peuvent être supprimées du signal par une correction appropriée des composantes fréquentielles présentes dans le signal de déformation, Malvern et al. [9, 14].

4.3- Conditions aux limites

Les conditions aux bords peuvent affecter les résultats des essais dynamiques. Les zones frontières de l'échantillon sont dans un

état complexe de compression multiaxial causé par les contraintes de frottement des plaques de chargement. La présence de ces contraintes provoque une rupture par cisaillement apparent, avec la formation d'un cône aux bouts de l'échantillon [15]. Une rupture axiale est observée dans l'échantillon si on minimise ces contraintes [12]. Le rapport hauteur/largeur de l'échantillon affecte aussi la résistance et la déformation maximale à cause des effets de bords. Dans l'essai d'impact plaque-plaque, ce rapport est limité à 0.15, et ce pour assurer que la région centrale reste dans un état de déformation uniaxiale durant l'impact [16].

Enfin, d'autres facteurs liés aux conditions aux bords tels que l'axialité, l'alignement éprouvette-plateaux affectent de manière significative le comportement du matériau et doivent être pris en compte dans le cas de chargement dynamique.

4.4- Mesure et enregistrement de la réponse

Durant un chargement dynamique, la fréquence de la réponse du système de mesure doit être prise en considération. Les résultats pourront être sous-estimés si la fréquence de la réponse de l'amplificateur est trop basse [17]. Une fréquence minimale de 10 KHz est satisfaisante pour la mesure de la réponse dynamique. La méthode SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar Test) est caractérisée par un contenu riche en haute fréquence et nécessite une réponse en fréquences plus élevées [18]. De plus, le type et l'emplacement de l'appareil de mesure de déformation doivent être pris en considération. La conversion de l'analogique au numérique nécessite un choix de vitesse avec une fréquence double que celle de la réponse maximale. Autrement, les hautes fréquences analogiques sont identifiées incorrectement comme basses fréquences durant le processus de numérisation, ce qui affecte les résultats. Cet effet peut être minimisé par la filtration des hautes fréquences du signal original durant le processus de mesure avant numérisation.

5- Conclusion

Cette revue est une synthèse critique de l'expérimentation dynamique sur le matériau béton. Les méthodes expérimentales pour la caractérisation du comportement dynamique uniaxial du béton y sont décrites avec leurs limitations.

De cette rétrospective, il ressort clairement que l'expérimentation dynamique sur un matériau fragile et hétérogène tel que le béton présente énormément de difficultés techniques. Ceci aussi bien pour le contrôle des équipements que la maîtrise des conditions d'essai sur les éprouvettes. Pour une correcte interprétation des résultats d'essai, un certain nombre de paramètres doit être pris en compte notamment les caractéristiques des équipements utilisés, les conditions aux bords de l'essai, les effets inertiels et de propagation d'ondes, etc. La non-considération de ces paramètres dans l'analyse des résultats obtenus à l'aide des différentes techniques peut entraîner parfois des conclusions contradictoires.

6. Références bibliographiques

- [1] Belaoura, M., Brara, A., *Comportement mécanique du béton aux grandes vitesses de chargement*, CGS, Rapport de recherche sectoriel, 2002.
- [2] Bresler, B. And Bertero, V. V., *Influence of high strain rate and cyclic loading of unconfined and confined concrete in compression*, in Proceedings of 2nd Canadian Conference on Earthquake Engineering, Hamilton, Ontario, pp. 1-13, 1975.
- [3] Kotsovos, M. D., *Effect of testing technique on the post-ultimate behaviour of concrete in compression*, Mater. Struct. 16(91) 3-12, 1983.
- [4] Takeda, J. And Tachikawa, H., *The mechanical properties of several kinds of concrete at compressive, tensile, and flexural tests in high rates of loading* (in Japanese), trans. Architect, Ins. Jpn N°. 77 1-6 1962.
- [5] Bonzel, J. And Dahms, J., « Schlagfestigkeit von faserbewehrtem Beton » *Impact resistance of fibre-reinforced concrete*, Beton 31(3) 97-101 and 31(4) 136-142, 1981.
- [6] Hughes, B. P. And Gregory, R., *The impact strength of concrete using Green's ballistic pendulum*, ibid. 41 731-750, 1968.
- [7] Malvern, L. E. And Ross, C. A., *Dynamic response of concrete and concrete structures*, Second Annual Technical Report, AFOSR Contract N°. F49620-83-K007, 1985.
- [8] Lindholm, U. S., *High strain rate testing*, in « Techniques of Metals Research : Measurement of Mechanical Properties », edited by R. F. Bunshah, Vol. 5, Part 1 (Interscience, New York) pp. 199-271, 1971.
- [9] Brara A., *Etude expérimentale de la traction dynamique du béton par écaillage*, Thèse de Doctorat, Université de Metz, France, 1999.
- [10] Goldsmith, W., *Impact: The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids* (Arnold, London), 1960.
- [11] Zukas, J. A., Nicholas, T., Swift, H. F., Greszczuk, L. B. and Curran, D. R., *Impact Dynamics* (Wiley, New York), 1982.
- [12] Hughes, B. P and Watson, A. J., *Compressive strength and ultimate strain of concrete under impact loading*, ibid. 30(105) 189-199, 1978.
- [13] Malvern, L.E., Tang, T., Jenkins, D. A. and Gong, J. C., *Dynamic compressive strength of cementitious materials*, in « Cement-Based Composites: Strain Rate Effects on Fracture », edited by S. Mindess and S. P. Shah, Vol. 64 (Materials Research Society, Pittsburg) pp. 119-138, 1986.
- [14] Malvern, L. E., Jenkins, D. A., Tang, T. and Gong, J.C., *Dynamic testing of concrete with the split Hopkinson pressure bar*, in Proceedings of 4th Symposium on the Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures, Florida (US Dept. Defense) pp. 296-301, 1989.
- [15] Hughes, B. P. and Gregory, R., *Concrete subjected to high rates of loading in compression*, Mag. Concr. Res. 24(78) 25-36, 1972.
- [16] Gupta, Y. M. and Seaman, L., *Local response of reinforced concrete to missile*



impact, Final Report, EPRI NP-1217, Project 393-1 (Palo Alto), 1979.

[17] Frank, T., « Beeinflussung der prüfergebnisse durch die Messeinrichtung bei der Stossbeanspruchung von Beton » *The influence on test results by the measuring device used for impact tests of concrete*, Materialprüfung 26(4) 96-100, 1984.

[18] Hecker, R., « Messtechnische probleme bei der Erfassung der Dehnwellenform in längsgestossen Staben schlagend arbeitender Maschinen » *Problems of measurement to record the shape of the elastic wave in an axial body in percussive machines*, Technisches Messen 51(1) 29-32, 1984.