

*EXTENSIBILITY
OF CONCRETE
FOR LARGE DAMS*

EXTENSIBILITÉ
DES BÉTONS
POUR GRANDS BARRAGES



Report prepared on behalf of the Sub-Committee on Concrete of the British National Committee on Large Dams, by C.R. Lee and W. Lamb (Building Research Establishment, Department of the Environment).

Rapport préparé par C.R. Lee et W. Lamb (Building Research Establishment, Department of the Environment) au nom du Sous-Comité des Bétons du Comité National Britannique des Grands Barrages.

**EXTENSIBILITY
OF CONCRETE
FOR LARGE DAMS**

**EXTENSIBILITÉ
DES BÉTONS
POUR GRANDS BARRAGES**



FEBRUARY | FÉVRIER 1976

BULLETIN 25

AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:

Les informations, analyses et conclusions auxquelles cet ouvrage renvoie sont sous la seule responsabilité de leur(s) auteur(s) respectif(s) cité(s).

Les informations, analyses et conclusions contenues dans cet ouvrage n'ont pas force de Loi et ne doivent pas être considérées comme un substitut aux réglementations officielles imposées par la Loi. Elles sont uniquement destinées à un public de Professionnels Avertis, seuls aptes à en apprécier et à en déterminer la valeur et la portée et à en appliquer avec précision les recommandations à chaque cas particulier.

Malgré tout le soin apporté à la rédaction de cet ouvrage, compte tenu de l'évolution des techniques et de la science, nous ne pouvons en garantir l'exhaustivité.

Nous déclinons expressément toute responsabilité quant à l'interprétation et l'application éventuelles (y compris les dommages éventuels en résultant ou liés) du contenu de cet ouvrage.

En poursuivant la lecture de cet ouvrage, vous acceptez de façon expresse cette condition.

NOTICE – DISCLAIMER :

The information, analyses and conclusions referred to herein are the sole responsibility of the author(s) thereof.

The information, analyses and conclusions in this document have no legal force and must not be considered as substituting for legally-enforceable official regulations. They are intended for the use of experienced professionals who are alone equipped to judge their pertinence and applicability and to apply accurately the recommendations to any particular case.

This document has been drafted with the greatest care but, in view of the pace of change in science and technology, we cannot guarantee that it covers all aspects of the topics discussed.

We decline all responsibility whatsoever for how the information herein is interpreted and used and will accept no liability for any loss or damage arising therefrom.

Do not read on unless you accept this disclaimer without reservation.

INTRODUCTION

In 1970, at the Montreal meeting of the ICOLD Committee on Concrete, the British representative, Mr. C. M. Roberts, was asked to prepare a report on "the effects of various factors on the extensibility of concrete for large dams". The British Sub-Committee considered that this task would be much facilitated and a better report would result if each country would draw attention to its own publications and sources of information. A circular letter dated 19 April 1971 was accordingly addressed to the ICOLD representatives in the fifteen countries thought most likely to be interested inviting them each to provide a bibliography and brief review of publications dealing with the subject, primarily in their own country but also including information from the countries not included in the circulation of the letter. In the letter, it was pointed out that while the meaning of extensibility was usually well understood, an alternative definition might be tensile strain capacity up to failure taking account of creep and in relation to stress, shrinkage, etc.

At the Dubrovnik meeting in 1971 of the ICOLD Committee on Concrete, Mr. Roberts, the British representative, tabled a short report on the progress of the enquiry. The definition of extensibility as "strain to failure" was confirmed.

At the Canberra meeting in April 1972 of the Sub-Committee on Concrete of the new ICOLD Committee on Materials, "Dr Rosanov requested that the speed of applying load should be taken into account when compiling the report and that only tensile strain should be considered".

At the Madrid meeting in June 1973 of the Sub-Committee on Concrete of the ICOLD Committee on Materials, a first draft report was presented consisting of a commentary and seven appendices, containing the replies to the circular from Great Britain, Australia, France, Japan, Portugal, U.S.A. and U.S.S.R.

INTRODUCTION

En 1970, à la réunion de Montréal du Comité des Bétons de la C.I.G.B., il a été demandé au représentant britannique, Mr. C.M. Roberts, de préparer un rapport sur « les effets de différents facteurs sur l'extensibilité des bétons pour grands barrages ». Le Sous-comité britannique a estimé que ce travail serait grandement facilité et qu'un meilleur rapport pourrait en résulter, si chaque pays examinait ses propres publications et sources d'information. Une lettre circulaire, datée du 19 avril 1971, a été adressée dans ce sens aux représentants de la C.I.G.B. des 15 pays considérés comme les plus probablement intéressés. Cette circulaire invitait chacun d'eux à fournir une bibliographie et une brève énumération des publications traitant du sujet, d'abord dans leur propre pays mais également dans les pays non compris dans les destinataires de la circulaire. L'attention était attirée, dans cette lettre sur le fait que, alors que la signification du terme « extensibilité » était généralement bien connue, une autre définition pouvait être « capacité à supporter des déformations de traction avant rupture, en tenant compte du fluage et en fonction des contraintes, du retrait, etc. ».

A la réunion de Dubrovnik en 1971 du Comité des Bétons de la C.I.G.B., Mr. C.M. Roberts, le représentant britannique, fit un court exposé sur les progrès de l'enquête. La définition de « l'extensibilité » comme « déformation relative avant rupture » fut confirmée.

A la réunion de Canberra en avril 1972 du Sous-comité des Bétons du nouveau Comité des Matériaux de la C.I.G.B., le Dr Rosanov demandait de considérer, dans la préparation du rapport, la vitesse d'application de la charge et seulement la déformation de traction.

A la réunion de Madrid en juin 1973 du Sous-comité des Bétons du Comité des Matériaux de la C.I.G.B., a été présenté un premier rapport provisoire consistant en un commentaire et sept annexes comprenant les réponses à la circulaire de la Grande-Bretagne, l'Australie, la France, le Japon, le Portugal, les États-Unis et l'U.R.S.S.

Further useful comments were received from the U.S.A. representative both in Madrid and in later correspondence. The draft report was circulated for comment to the six countries other than Great Britain who had contributed to the appendices but no comments have been received.

Following approval by the Sub-Committee on Concrete a revised draft was presented to the Committee on Materials in Athens in 1974, who recommended publication. The draft was circulated to all National Committees under cover of Circular Letter 711 and publication was approved by the Executive Meeting in Tehran in 1975. A late comment by Dr Rosanov (U.S.S.R.) has been added as Appendix I.

The present report is a revision of the first draft with the original " British " bibliography expanded to include papers published in other countries, including some references given in the appendices to the first draft. This brief history may help to explain an apparent numerical bias in the bibliography in favour of British papers. It is hoped that the bibliography is now fully representative of the international literature.

In preparing the bibliography an attempt has been made to limit it strictly to the subject of extensibility defined as " tensile strain capacity to failure ". Priority has been given to papers giving quantitative information. Some papers without such information but which contribute to an understanding of extensibility have, however, been included. Papers dealing with such subjects as " creep ", " cracking ", etc., but without information on extensibility, as strictly defined, have generally been excluded.

The library search has been concentrated on papers published since 1950 although it has been recognised that such is the general paucity of quantitative information on extensibility reference might usefully be made to papers published before that date. For obvious reasons, the search has not been confined

D'autres commentaires utiles ont été faits par le représentant des États-Unis à Madrid et dans la correspondance qui a suivi. Le projet de rapport a été distribué aux 6 pays autres que la Grande-Bretagne qui avaient participé aux annexes mais aucun commentaire n'a été reçu.

A la suite de l'approbation du sous-comité des Bétons, un texte révisé a été présenté au comité des Matériaux à Athènes en 1974, qui en recommanda la publication. Le texte a été envoyé à tous les comités nationaux avec la lettre circulaire 711 et sa publication a été approuvée par la Réunion Exécutive à Téhéran en 1975. Un commentaire ultérieur du Dr Rosanov (U.R.S.S.) a été ajouté comme Annexe I.

Le présent rapport est une révision du premier projet avec la bibliographie « britannique » originale complétée par les documents publiés dans d'autres pays, y compris quelques références données dans les annexes du premier projet. Ce bref historique pourra aider à comprendre un apparent avantage numérique en faveur des documents britanniques dans la bibliographie. On espère que, maintenant, cette bibliographie est pleinement représentative de la littérature internationale.

Dans la préparation de cette bibliographie, on a pris garde de la limiter strictement au sujet de l'extensibilité définie comme « capacité de supporter une déformation de traction avant rupture ». Priorité a été donnée aux documents donnant des renseignements quantitatifs. Cependant quelques documents ne donnant pas de telles informations mais contribuant à la compréhension de l'extensibilité ont été inclus. Les documents traitant de sujets tels que le « fluage », la « fissuration », etc. mais sans renseignements sur l'« extensibilité » au sens strict de la définition ont été généralement exclus.

Les recherches ont été orientées sur les documents publiés depuis 1950 bien que la pauvreté des informations quantitatives sur l'extensibilité ait pu conduire à se référer utilement à des documents plus anciens. Pour des raisons évidentes, les recherches n'ont pas été limitées au seul domaine de

only to the field of dam construction. Also for obvious reasons, while papers dealing exclusively with effects in simple compression have generally been excluded, some papers dealing with complex states of stress have been held to qualify.

COMMENTARY

The extensibility of concrete is defined as " tensile strain capacity to failure ". The property has a particular application for concrete dams in that there has been considerable interest in changes in strain, such as those due to temperature, creep or shrinkage, and measurements of strains are far easier than measurements of stresses. There are thus considerable attractions in studying the possibility of cracking in terms of extensibility rather than in terms of tensile strength.

A study of the literature shows a considerable difference in quantitative values according to circumstances and it may be as important to consider the factors governing failure as it is to consider earlier creep. The literature illustrates the very considerable effect of control of the rate of increase in strain and the substantial difference between extensibility determined as the tensile strain reached before failure in a *direct* tensile test at progressively increasing stress (eg of the order of 100×10^{-6} strain) and the appreciably greater values of extensibility (eg generally of the order of 200×10^{-6} strain but sometimes much higher) which can be reached when the rate of increase in strain is controlled. Experimentally, control can be achieved in especially stiffened testing machines or by the presence of reinforcement so that as the strain increases part of the maximum load carried by the concrete can be shed. This leads to the determination of the so-called " complete " stress/strain curve incorporating a " falling " component in which the load decreases as the strain increases towards eventual failure. For similar reasons greater strains can be achieved in flexural tests than in direct tensile tests.

la construction des barrages. Pour des raisons également évidentes, alors que les documents traitant exclusivement des effets de compression simple ont généralement été exclus, quelques documents traitant d'états de contrainte complexes ont été retenus.

COMMENTAIRES

L'extensibilité du béton est définie comme « capacité de supporter une déformation de traction avant rupture ». Cette propriété a une application particulière pour les bétons des barrages car il y a eu beaucoup d'études des variations de déformations telles que celles qui résultent de la température, du fluage ou du retrait, et les mesures de déformations sont beaucoup plus faciles que celles des contraintes. Il est donc très utile d'étudier les possibilités de fissuration en termes d'extensibilité plutôt qu'en termes de résistance à la traction.

L'étude de la littérature montre une différence considérable entre les valeurs quantitatives suivant les circonstances, et il peut être aussi important de considérer les facteurs déterminant la rupture que le précédent fluage. La littérature montre l'influence considérable du contrôle de la vitesse de croissance de la déformation et la différence substantielle existant entre l'extensibilité déterminée comme la déformation relative de traction atteinte avant rupture dans un essai *direct* à la traction sous contrainte progressive (par exemple de l'ordre de 100×10^{-6}) et les valeurs d'extensibilité sensiblement plus élevées (généralement de l'ordre de 200×10^{-6} et quelquefois plus) qui peuvent être atteintes lorsque la vitesse de croissance de la déformation est contrôlée. Expérimentalement, le contrôle peut être effectué soit dans des machines d'essais spécialement raidies, soit en introduisant des armatures de façon que, lors de l'augmentation de la déformation, une partie de la charge supportée par le béton puisse être réduite. Ceci conduit à la détermination de la courbe dite « totale » contrainte/déformation comportant une partie de « réduction » dans laquelle la charge décroît lorsque la déformation augmente vers la rupture éventuelle. Pour des raisons semblables, des déformations plus élevées

Determinations with controlled rates of straining are very relevant to the conditions in dams where the effective rates of strain increase may be determined, for example, by the slow rates of temperature change and, in the case of surface cracking, by bond to large masses of unaffected interior concrete. In this concept it is, of course, not necessary that the concrete in question should actually change in dimensions. It can remain at constant or nearly constant size and an effective strain be imposed by temperature change or drying. Simulation of this condition forms the basis for the so-called " restrained " tests referred to in the bibliography (9, 22, 39, etc.).

With controlled rates of strain the precise stage at which failure occurs becomes less obvious and the study of extensibility merges into a study of the failure mechanism of concrete, eg of the development of micro-cracking within the concrete. Such cracking may exist well before any approach to failure, perhaps first between the paste and larger aggregate particles and may progressively extend across the paste to link up as failure is approached. Some of the more recent papers consider the application of the energy release concepts of fracture mechanics, a subject originally developed to explain by consideration of crack propagation the unexpectedly low tensile strengths of brittle elastic materials. The extension to concrete has not been without difficulty but the general interest in fracture and crack — arrest mechanisms has been helpful, eg in the development of fibrous concrete.

This view of the conditions under which cracking occurs in a dam and its important effect on the way in which the property of extensibility should be assessed has not been accepted by dam engineers everywhere even in recent years. There still remains a tendency to equate high creep at lower loads to high eventual extensibility disregarding the changing

peuvent être obtenues dans des essais à la flexion que dans des essais directs à la traction.

Les essais avec vitesses de croissance contrôlées des déformations sont très importants pour les barrages où les vitesses effectives d'augmentation des déformations peuvent être déterminées, par exemple, par la faible vitesse de changement de température et dans le cas de fissuration de surface, par les liaisons avec de grands volumes de béton intérieur non affectés. Dans ce concept, il n'est naturellement pas nécessaire que le béton en question change réellement de dimensions. Il peut rester à dimension constante ou presque et une déformation effective peut-être imposée par changement de température ou séchage. La simulation de ces conditions constitue la base des dits essais « contenus » auxquels on se réfère dans la bibliographie (9, 22, 39, etc.).

Avec le contrôle de vitesse de croissance des déformations, le moment exact où se produit la rupture devient moins évident et l'étude de l'extensibilité dévie vers l'étude du mécanisme de rupture du béton, par exemple de la micro-fissuration du béton. Une telle fissuration peut exister bien avant l'approche de la rupture, peut-être d'abord entre le mortier et les plus gros granulats et elle peut, ensuite, se développer à travers le mortier lorsque la rupture approche. Quelques-uns des documents les plus récents considèrent l'application des concepts de relâchement d'énergie par les mécanismes de fracture, sujet qui a été abordé à l'origine pour expliquer par la propagation des fissures les résistances à la traction anormalement basses des matériaux fragiles. L'extension au béton n'a pas été sans présenter des difficultés, mais l'intérêt général présenté par la fracture et par les mécanismes d'arrêt des fissures a été précieux, notamment dans le développement des bétons fibreux.

Ces vues sur les conditions dans lesquelles se produisent des fissures dans les barrages et sur leurs importants effets quant aux possibilités de prévoir les caractéristiques d'extensibilité n'ont pas été acceptées partout par les ingénieurs de barrages, même ces dernières années. Il existe encore une tendance à identifier un fluage important

internal conditions within the concrete which determine eventual failure.

The U.S. Corps of Engineers appear to have adopted a useful compromise when they compared the potential crack resistances of alternative concretes proposed for recent dams on the basis of very slow *flexural* tests on massive concrete beams under progressively increasing loads. Comparisons were based on "strain capacity", i.e. the surface strains extrapolated from internal strain gauge readings corresponding to 90 % of the eventual failing load which occurred typically at from 30 to 60 days. Although this approach to the problem appears to have been largely creep-orientated the slow flexural nature of the tests does ensure that the rate of straining is controlled, particularly in the surface layers where cracks may be initiated. It would be interesting to know what happens beyond the arbitrary 90 % of the failing load.

Another practical approach has been employed in the U.S.S.R. where concretes have been compared by the ratios of tensile strength (by splitting test) to the dynamic elastic modulus. Although this has proved a convenient way of performing a large number of tests, it is some way from being a simulation of practical conditions. The emphasis given to tensile strength rather than to creep, except even more indirectly, is very interesting.

Looking at the published literature, it becomes evident, as already noted, that by far the most important factor affecting the measurement of extensibility is the limitation of the rate of straining so as to employ more or all of the "complete" stress/strain curve. Differences in this respect make comparisons difficult between information from different sources and the applicability of some of the results to practical conditions questionable. An allied factor is the difference between flexural and direct tensile tests.

sous faible charge à une éventuelle extensibilité importante, sans considération pour les changements des conditions internes qui peuvent déterminer des ruptures.

L'« US Corps of Engineers » semble avoir adopté un compromis utile en comparant la résistance potentielle à la fissuration de divers bétons pour des barrages récents au moyen de très lents essais à la flexion sous des charges croissantes sur des poutres massives en béton. Les comparaisons étaient basées sur la « capacité de déformation », c'est-à-dire sur les déformations superficielles extrapolées à partir des lectures de jauges de déformation internes correspondant à 90 % de la charge éventuelle de rupture qui se produit de façon caractéristique entre 30 et 60 jours. Bien que cette approche du problème paraisse largement orientée vers le fluage, la nature de ces lents essais à la flexion assure que la vitesse d'application de la déformation est contrôlée, spécialement dans les couches de surface où les fissures peuvent se produire initialement. Il serait intéressant de savoir ce qui se produit au-delà des 90 % arbitraires de la charge de rupture.

Une autre approche pratique a été utilisée en U.R.S.S. où des bétons ont été comparés au moyen des rapports entre la résistance à la traction (par l'essai de fendage) et le module élastique dynamique. Bien que cette méthode se soit avérée convenable pour effectuer un grand nombre d'essais, elle est cependant assez loin de représenter les conditions pratiques. Cette importance donnée à la résistance à la traction plutôt qu'au fluage, sauf d'une manière plus indirecte, est très intéressante.

En examinant la littérature publiée, il devient évident, comme on l'a déjà noté, que le facteur de loin le plus important affectant les mesures d'extensibilité, est la limitation de la vitesse d'application de la déformation, de façon à utiliser plus ou le tout de la courbe « totale » contrainte/déformation. Les différences à ce sujet rendent difficiles les comparaisons entre les informations de différentes sources et la possibilité d'application de quelques-uns des résultats à des conditions pratiques. Un élément semblable est la diffé-

Another factor which might be expected to be critical but upon which evidence is scanty, is the moisture conditions of the concrete surface and interior. These might considerably affect micro-cracking through their effect on shrinkage and also affect other properties of the concrete. Ohno and Shibata's (20) results for immature concrete suggest a greater extensibility when wet than dry.

The rate of straining might also be expected to be important in assessing numerical values, whatever view is taken of extensibility. Ohno and Shibata (20) showed for immature concrete higher extensibility for lower rates of loading. Hansen (47) showed similar results in a study of the time of form removal. More direct confirmation for maturer concrete is given by the results of the U.S. Corps of Engineers tests already referred to (115, 116). It was found that the improvement in "strain capacity" at slower rates varied from about 8 % to nearly a 100 %.

Another factor to be taken into account when assessing the experimental results is that of "averaging". In direct "uncontrolled-strain" tests the specimen might fail as the result of a single flaw or continuous crack. This, of course, accounts for the variability of tensile *strength* tests in general. In "controlled-strain" tests there is the possibility of evening out the effects of individual micro-cracks. Even here, care must be taken that the measurement of strain is not made on an unduly short gauge length spanning a crack which is itself insufficient to cause failure (38, 98). Some of the freakishly high extensibilities reported, eg of the order 2000×10^{-6} strain or more, were probably associated with an exceptional juxtaposition of gauge length and crack. Flexural tests might be an impro-

rence entre les essais à la flexion et les essais directs à la traction.

Un autre facteur que l'on peut considérer comme critique mais sur lequel l'évidence est peu abondante, est celui des conditions d'humidité à la surface et à l'intérieur du béton. Elles peuvent influencer considérablement sur la micro-fissuration par leurs effets sur le retrait et sur d'autres propriétés du béton. Les résultats donnés par Ohno et Shibata (20) pour du béton encore évolutif suggèrent une extensibilité supérieure pour le béton humide que pour le béton sec.

La vitesse d'application de la déformation peut aussi être considérée comme importante pour la prévision de valeurs numériques quelles que soient les idées sur l'extensibilité. Ohno et Shibata (20) pour des bétons encore évolutifs donnent des extensibilités plus élevées pour des vitesses de charge plus faibles. Hansen (47) donne des résultats similaires dans une étude sur les délais de décoffrage. Des confirmations plus directes pour des bétons plus évolués sont données par les résultats des essais de l'« US Corps of Engineers » auxquels nous nous sommes déjà référés (115, 116). On a trouvé que l'amélioration de la « capacité de déformation » pour des vitesses plus faibles varie de 8 % à presque 100 %.

Un autre facteur qui doit être pris en considération pour l'examen des résultats expérimentaux est celui des « moyennes ». Dans les essais directs sous « déformations non contrôlées », l'échantillon peut se rompre à la suite d'une simple fissuration. Ceci, naturellement, tient compte de la diversité des essais de résistance à la traction en général. Dans les essais à « déformation contrôlée » on a la possibilité d'éliminer les effets des microfissures individuelles. Même dans ce cas, on doit prendre garde de ne pas effectuer la mesure de déformation sur une jauge de longueur anormalement courte englobant une fissure qui serait en elle-même incapable d'entraîner la rupture (38, 98). Quelques-unes des extensibilités extrêmement élevées rapportées, c'est-à-dire de l'ordre de 2000×10^{-6} ou plus, sont probablement le résultat de la juxtaposition exceptionnelle de la jauge et de la fissure. A ce titre, les essais de flexion

vement on direct tests in this respect but the effect needs watching.

The effects of other factors, such as the materials used and the mix proportions, tend to be rather smaller than the effects already noted and they are difficult to summarise in isolation from the conditions of test. The general picture however, emerges of a higher extensibility being associated with a lower water/cement ratio (94, 99, 115), and with aggregate of a smaller maximum size (94, 115), the aggregate being crushed (67, 99, 115) and of a rough texture (59, 115,). Less attractive to dam constructors are less definite suggestions that extensibility may be increased by a smaller proportion of coarse to fine aggregate (29) and a higher cement content (36, 57, 94, 99, 115). There is, however, some conflicting evidence on the latter point (77).

Very tentatively, it could be suggested that the effect of these factors is compatible with a view of extensibility determined at least partly by the bond between paste and the larger aggregate particles. This places the emphasis rather differently than in a view expressed by the U.S. Corps of Engineers (115) that a higher "strain capacity" goes with an aggregate of a lower E value.

Other support for the "bond" or "micro-cracking" view is the mention of the possible importance of bond by Stolnikov (99) in explaining the improvement gained from the use of limestone sand. He considered that the type and grain size of the sand has a great influence on his measure of extensibility. The results by the U.S. Corps of Engineers (115) showed great improvements in "strain capacity" when all the aggregate, including sand, was manufactured (crushed or milled).

Johnston (94) found differences between various aggregates in tests at uncontrolled strain suggesting an improvement in extensi-

pourraient apporter une amélioration aux essais directs, mais il faut faire attention aux effets secondaires.

Les effets d'autres facteurs, tels que la nature des matériaux utilisés et les proportions du mélange, sont généralement plus faibles que les effets déjà signalés et il est difficile d'en parler sans définir les conditions d'essais. L'allure générale qui se dégage cependant est une extensibilité plus élevée associée à un plus faible rapport eau/ciment (94, 99, 115), à des granulats de petite taille (94, 115), aux granulats concassés (67, 99, 115) et de surface rugueuse (59, 115). Moins intéressantes pour les constructeurs de barrage sont les tendances suivantes, qui sont moins nettes, à savoir : que l'extensibilité peut être augmentée par une proportion plus faible de granulats grossiers aux granulats fins (29) et par un dosage plus élevé en ciment (36, 57, 94, 99, 115). Il existe cependant quelques contradictions sur ce dernier point (77).

Très provisoirement, on peut suggérer que l'effet de ces facteurs est compatible avec l'idée que l'extensibilité est déterminée, au moins partiellement, par les liaisons entre la pâte de ciment et les plus gros granulats. Ceci met l'accent sur une considération quelque peu différente de celle exprimée par l'« U.S. Corps of Engineers » (115), qu'une plus grande « capacité de déformation » va de pair avec des granulats de plus faible valeur de E.

Un autre élément en faveur des vues sur les « liaisons » et « la microfissuration » est apporté par Stolnikov (99) sur l'importance possible des liaisons lorsqu'il explique l'amélioration apportée par les sables calcaires. Il considère que la nature et la dimension des grains du sable a une grande importance sur sa mesure de l'extensibilité. Les résultats donnés par l'« U.S. Corps of Engineers » (115) montrent l'amélioration importante de la « capacité de déformation » quand tous les granulats, y compris les sables, sont manufacturés (concassés ou broyés).

Johnston (94) trouve des différences entre divers granulats dans les essais à déformations non contrôlées, suggérant une amélioration

bility in the ascending order of merit basalt, limestone, gravel, granite, sandstone. The two latter were consistently first and second in merit even when the w/c ratio and aggregate size were varied. Kaplan (29) also found little difference between limestone and gravel but found an improved extensibility as the amount of coarse aggregate was reduced.

Houk, Paxton and Houghton (100) reported that "strain capacity" increased with age, a result consistent with a view of extensibility as related to bond strength providing no drying occurs. Hansen (47), on the other hand, reported that in tests related to the time of form removal, extensibility decreased with age.

Hughes and Ash (77, 95) found that the effect of anisotropy due to the direction of casting a specimen was significant.

An interesting result was reported by McDonald, Bombich and Sullivan (116) in describing tests for Trumbull Dam for U.S. Corps of Engineers. Here, when comparing two possible concretes, a greater increase in "strain capacity" with decrease in speed of loading was shown by the concrete with the lower creep. The authors considered the result anomalous but it could be that the effect of differences in creep are less important than they thought. Their results also indicated that the substitution of flyash for part of the cement decreased "strain capacity" while it increased creep.

In this study an attempt has been made to concentrate on the subject of extensibility and not to widen the study to the subject of cracking in dams. This is because there are, in most cases, other factors affecting the strains which lead to cracking, eg the differences in heat evolution due to different types of cement, differences in temperature change or drying, etc. It is worth noting, however, since strains in the different dams may not be seriously involved, that the U.S. Corps of Engineers

de l'extensibilité dans l'ordre croissant des mérites pour les basaltes, calcaires, graviers, granites, grès. Les deux derniers sont toujours premier et second quant à leurs mérites, même quand la teneur en e/c et la dimension des granulats varient. Kaplan (29) trouve également peu de différence entre le gravier et le calcaire mais trouve que l'extensibilité augmente quand on réduit la quantité de gros granulats.

Houk, Paxton et Houghton (100) rapportent que la « capacité de déformation » augmente avec l'âge, ce qui est cohérent avec l'idée que l'extensibilité est liée à la résistance de liaison à condition qu'il n'y ait pas dessiccation. Hansen (47), au contraire, rapporte, à l'occasion d'essais sur les délais de décoffrage, que l'extensibilité décroît avec l'âge.

Hughes et Ash (77, 95) trouvent que l'anisotropie résultant de la direction dans laquelle sont coulées les éprouvettes a un effet significatif.

Un résultat intéressant est signalé par McDonald, Bombich et Sullivan (116) dans leur description des essais effectués par l'« U.S. Corps of Engineers » pour le barrage de Trumbull. La comparaison de deux bétons possibles a montré une plus grande augmentation de la « capacité de déformation » avec la diminution de la vitesse d'application de la charge pour le béton ayant le fluage le plus faible. Les auteurs considèrent ce résultat comme anormal, mais il est possible que l'effet des différences de fluage soit moins important qu'ils le pensent. Leurs résultats montrent aussi que la substitution de cendres volantes à une partie du ciment diminue la « capacité de déformation » alors qu'elle augmente le fluage.

Dans cette étude, nous nous sommes efforcés de nous en tenir au problème de l'extensibilité sans nous étendre au problème de la fissuration des barrages. Ceci parce que, dans la plupart des cas, il y a d'autres facteurs qui affectent les déformations conduisant à la fissuration, par exemple les différences d'évolution de la chaleur due à différents types de ciment, les différences dans les changements de température ou le séchage, etc. Il faut cependant noter, bien que les

reported (115) a lower cracking incidence in dams in their North Pacific Division made with totally " manufactured " aggregate, a result which correlates with their " strain capacity " comparisons referred to above.

RECOMMENDATION

It is recommended that comparative tests should continue on the factors determining the extensibility of concrete defined as " tensile strain capacity to failure " and that special attention should be paid in the tests to a condition of controlled strain simulating that in a dam and to the conditions within the concrete determining the stage at which visible cracking commences. Slow rates of loading should be employed and regard should be paid to the moisture condition of the concrete.

BIBLIOGRAPHY ON EXTENSIBILITY OF CONCRETE FOR LARGE DAMS

- e. indicates paper containing quantitative information on extensibility defined as " strain capacity to failure ".
- c. indicates paper from U.S. Corps of Engineers containing information on strain capacity up to 90 % of failing load in slow flexural tests;
- a. indicates paper from U.S.S.R. with indirect methods of determination.

Other papers contain discussions relevant to extensibility.

1. THOMAS F. G., *Cracking in reinforced concrete*. Structural Engineer, 1936, 14, 298-320.
2. RAO K. L., Struct Engr 1942, 20, 44 and 68 (Discussion of paper by Marshall W. T. and Tembe N.R., *Experiments on plain and reinforced concrete in torsion*. Struct. Engr, 1941, 19, 177-191, Discussion, *Ibid*, 20, 38-44, 68-69).
3. SQUIRE R. H., *Some important aspects of the elastic modulus of concrete*. Struct Engr. 1943, 21, 211-239.
4. RAO K. L., *Prestressed beams under direct sustained loading*. Struct. Engr. 1944, 22, 425-454

déformations dans les différents barrages ne puissent être sérieusement mises en cause, que l' « U.S. Corps of Engineers » (115) signale pour les barrages de leur Division « North Pacific » réalisés avec des granulats entièrement manufacturés, une plus faible tendance à la fissuration, résultat qui est en harmonie avec les comparaisons de « capacité de déformation » évoquées plus haut.

RECOMMANDATIONS,

Il est recommandé de poursuivre les essais comparatifs sur les facteurs déterminant l'extensibilité des bétons définie comme « capacité de déformation de traction avant rupture », et d'attacher une attention spéciale, dans les essais, aux conditions de contrôle des déformations simulant celles qui se produisent dans un barrage, et aux conditions internes du béton déterminant le moment d'apparition de fissures visibles. De faibles vitesses d'application de la charge doivent être utilisées et l'on doit veiller aux conditions d'humidité du béton.

BIBLIOGRAPHIE SUR L'EXTENSIBILITÉ DES BÉTONS POUR GRANDS BARRAGES

- e. indique les documents contenant des indications quantitatives sur l'extensibilité définie comme « capacité de déformation relative avant rupture ».
- c. indique les documents de l' « U.S. Corps of Engineers » contenant des informations sur la capacité de déformation jusqu'à 90 % de la charge de rupture dans les essais de flexion lents;
- a. indique les documents d'U.R.S.S. sur les méthodes indirectes de détermination.

Les autres documents contiennent des discussions se rapportant à l'extensibilité.

- 5e. EVANS R. H., *Extensibility and modulus of rupture of concrete*. Struct. Engr, 1946, 24, 636-659.
6. RAMALEY D. and McHENRY D., *Stress-strain curves for concrete strained beyond the ultimate load*. U.S. Dept of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering and Geological Control and Research Division, Lab. Report N° Sp-12, 1947.
- 7e. GRASSAM N. S. J. and FISHER D., *Tests on concrete with electrical-resistance strain gauges*. Engineering, 1951, 172, 356-358.
- 8e. RAO K. L., *Extensibility and cracking in concrete*. International Commission on Large Dams, 4th Congress, New Delhi, 1951, Proc. 3, 249-269.
9. LEE C. R., *Creep and shrinkage in restrained concrete*. Int. Comm. Large Dams. 4th Congress, New Delhi, 1951, Report R 46.
10. ROBERTS C. M., *Cement variations as affecting cracking in large dams*. Int. Comm Large Dams, 4th Congress, New Delhi, 1951, Proc. 3, 129-153.
- 11e. BLAKEY F. A., *Mechanism of fracture of concrete*. Nature, 1952, 170 1120.
12. BLAKEY F. A. and BERESFORD F. D., *Tensile strains in concrete*. C.S.R.I.O., Melbourne, Reports C 2, 2-1, 1953 and C 2, 2-2, 1955.
- 13e. BLAKEY F. A. and BERESFORD F. D., *A note on strain distribution in concrete beams*. Civ Eng and P. W. Rev., 1955, 50 (586), 415-416.
- 14e. TODD J. D., *The determination of tensile stress-strain curves for concrete*. Proc Inst CE, 1955, Part 1 4, 201-211.
15. SAEMANN J. C., WARREN C. and WASHA G. W., *Effect of curing on the properties affecting shrinking and cracking of concrete block*. American Concrete Inst. J, 1955, Proc 51 (9), 833-852.
- 16e. BLAKEY F.A., *Some considerations of the cracking or fracture of concrete*. Civ Eng and P. W. Rev., 1957, 52 (615), 1000-1003.
17. JONES R. and KAPLAN M. F., *The effect of coarse aggregate on the mode of failure of concrete in compression and flexure*. Mag Concrete Res. 1957, 9 (26), 89-94.
- 18e. BLAKEY F. A., *Influence of water — cement ratio on mortar in which shrinkage is restrained*. American Concrete Inst J, 1958, Proc 55 (5), 591-604.
- 19e. BLACKMAN J. S., SMITH G. M. and YOUNG L. E., *Stress distribution affects ultimate tensile strength*. American Concrete Inst J, 1958, Proc 55 (6) 679-684.
Discussion by Bredsdorff P. K. and Kierkegaard-Hansen P., *Ibid*, 1421-1426.
- 20e. OHNO K. and SHIBATA T., *On extensibility of fresh concrete under slowly increasing tensile load*. R.I.L.E.M. Bulletin, 1959, (4), 24-31.
21. NEVILLE A. M., *Some aspects of the strength of concrete*. Civ. Eng. and P. W. Rev. 1959, 54, 1153-1156, 1308-1310, 1435-1439.
22. BLAKEY F. A. and LEWIS R. K., *The deformation and cracking of hardened cement paste when shrinkage is restrained*. Civ. Eng. and P. W. Rev. 1959, 54, 577-579, 759-762.
23. BLAKEY F. A. and BERESFORD F. D., *Cracking of concrete*. Constructional Review, 1959, 32 (2), 24-28.
24. WAUGH W. R. and RHODES J. A., *Control of cracking in concrete gravity dams*. American Soc of Civil Engineering Proc, J of Power Div, 1959, 85 (P 05), 1-19.
- 25e. HATANO T., *Dynamical behaviour of concrete under impulsive tensile load*. Technical Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry, Tokyo, Technical Report : C-6002, Nov. 5, 1960.

26. JONES R., *The development of microcracks in concrete*. R.I.L.E.M. Bulletin 1960, (9), 110-114.
27. BLAKEY F. A. and LEWIS R. K., *Effect of sand characteristics on the cracking of small bars of mortar in which shrinkage is restrained*. Civ. Eng. and P. W. Rev., 1960, 55, 389-393.
28. BLAKEY F. A. and LEWIS R. K., *The effect of curing on the cracking of small bars of mortar in which shrinkage is restrained*. Civ. Eng. and P. W. Rev., 1961, 56 (657), 473-477, (658), 639-643.
- 29e. KAPLAN M. F., *Strains and stresses of concrete at initiation of cracking and near failure*. American Concrete Inst J, 1963, Proc 60 (7), 853-880.
Discussion by Abeles P. W., *Ibid*, 1963, 61, 1937-1943.
- 30e. RUSCH and HILSDORF H., *Verformungseigenschaften von beton unter zentrischen zugspannungen*. (Deformation properties of concrete under concentric tensile stresses) Teil 1, Bericht Nr 44, des Material-prufungsamtes fur das Bauwesen der Technischen Hochschule Munchen, May, 1963.
- 31e. NAMIKI M., KIUCHI A. and OSHIO A., *On the elongation of concrete in the local rupture region*. Review of the 17th General Meeting of the Japan Cement Engineering Association, Tokyo, May 1963, 195-198.
32. HSU T. T. C., SLATE F. O., STURMAN G. M. and WINTER G., *Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve*. American Concrete Inst J, 1963, Proc 60 (2), 209-224.
Discussion by 13 contributors and closure by authors, *Ibid*, 1787-1824.
33. ROMUALDI J. P. and BATSON G. B., *Mechanics of crack arrest in concrete*. American Soc of Civil Engineers Proc, J of Engineering Mechanics Div., 1963, 89 (EM 3), 147-168.
Discussion by Broms B. B., Shah S. P. and Abeles P. W., *Ibid*, 1964, 90 (EM 1), 167-173.
34. GLUCKLICH J., *Fracture of plain concrete*. American Soc of Civil Engineers Proc, J of Engineering Mechanics Div., 1963, 89 (EM 6), 127-138.
- 35e. EVANS R. H. and KONG F. K., *The extensibility and microcracking of the in-situ concrete in composite prestressed beams*. Struct Engr., 1964, 42 (6), 181-189.
- 36e. OLADAPO I. O., *Cracking and failure in plain concrete beams*. Mag. Concrete Res., 1964, 16 (47), 103-113.
- 37e. OLADAPO I. O., *Extensibility and modulus of rupture of concrete*. Technical University of Denmark, Structural Research Lab. Bulletin N° 18, 1964.
- 38e. MAMIKI M., KIUCHI A. and OSHIO A., *Tensile deformation of concrete*. The Journal of Research of the Onoda Cement Co (in Japanese with summary in English)
— 1963, 15 (55), (On the tensile performance of green concrete)
— 1963, 15 (57), (On the elongation of concrete in the local region for rupture)
— 1963, 15 (58), (On the relation between strength and localised plastic strain of concrete)
— 1964, 16. (59), (On the stability of cracks in concrete)
— 1964, 16 (60), (On the microscopic theory of compressive failure of concrete)
— 1964, 16 (61), (Theory of creep deformation)
— 1964, 16 (62), (Crack formation due to restraint of drying shrinkage).
- 39e. MAMIKI M. and OSHIO A., *On the meanings and utility of restrained drying shrinkage test of concrete*. Review of the 18th General Meeting of the Japan Cement Association, Tokyo, May 1964, 156-163.
40. LEE C. R., *Temperature and other factors influencing the cracking of concrete in a dam*. Int Comm Large Dams, 8th Congress, Edinburgh 1964, Proc 3, 179-191.

41. NEWMAN K., *The structure and engineering properties of concrete*. Int. Symp. on Theory of Arch Dams, Southampton Univ, April 1964. (Proc. published by Pergamon Press, 1965, 683-712).
42. ROBINSON G. S., *The influence of microcracking and state of stress on the elastic behaviour and discontinuity of concrete*. *Ibid*, 713-721.
43. COUTINHO A. de S., *The influence of the type of cement on its cracking tendency*. Ministério das Obras Públicas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Technical Paper No 216, Lisbon, 1964.
44. COUTINHO A. de S., *A fissurabilidade dos cimentos, argamassas e betões por efeito da sua contracção*. (Cracking tendency in cements, mortars and concretes due to shrinkage) Ministério das Obras Públicas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Publicacao No 57, Lisbon, 1964 (Summary in English 119-122).
- 45e. ILLSTON J. M., *The creep of concrete under uniaxial tension*. *Mag. Concrete Res.* 1965, 17 (51), 77-84.
- 46e. JONES, R., *Cracking and failure of concrete test specimens under uniaxial quasi-static loading*. Int. Conf. on Structure of Concrete, London 1965, Paper B 5. (Proc. published by C and C.A. 1968, pages 125-130).
- 47e. HANSEN T. C., *Surface cracking of mass concrete structures at early form removal*. R.I.L.E.M. Bulletin, 1965, (28) 145-153.
- 48e. STURMAN G. M., SHAH S. P. and WINTER G., *Effects of flexural strain gradients on micro-cracking and stress — strain behaviour of concrete*. *American Concrete Inst. J.*, 1965, Proc. 62, 805-822.
Discussion by Swamy N., *Ibid*, 1966, 63, 1717-1719.
49. SHAH S. P. and SLATE F. O., *Internal microcracking, mortar-aggregate bond and the stress-strain curve of concrete*. Int. Conf. on the Structure of Concrete, London, 1965. (Proc. published by C and C.A. 1968, pages 82-92).
50. KAPLAN M. F., *The application of fracture mechanics to concrete*. *Ibid*, pages 169-175.
51. ROMUALDI J. P., *The static cracking strength and fatigue strength of concrete reinforced with short pieces of thin steel wire*. *Ibid*, pages 190-201.
52. NEWMAN, K., *Criteria for the behaviour of plain concrete under complex states of stress*. *Ibid*, pages 255-274.
53. VILE G. W. D., *The strength of concrete under short-term static biaxial stress*. *Ibid*, pages 275-288.
54. MARSHALL A. L., *Review of some of the problems involved in the early-age cracking of concrete*. *Civ. Eng. and P. W. Rev.*, 1965, 60 (709). 1169-1175.
55. ALEXANDER S., *A single equation for the stress-strain curve of concrete*. *Indian Concrete J.*, 1965, 39 (7), 274-277.
56. YERLICI V. A., *Behaviour of plain concrete under axial tension*. *American Concrete Inst J.*, 1965, Proc 62 (8), 987-992.
- 57e. WELCH G. B., *Tensile strains in unreinforced concrete beams*. *Mag. Concrete Res.*, 1966, 18 (54), 9-18.
- 58e. HUGHES B. P. and CHAPMAN G. P., *The deformation of concrete and micro-concrete in compression and tension with particular reference to aggregate size*. *Mag Concrete Res.*, 1966, 18 (54), 19-24.

- 59e. HUGHES B. P. and CHAPMAN G. P., *The complete stress-strain curve for concrete in direct tension*. R.I.L.E.M. Bulletin, 1966, (30), 95-97.
60. BECKER G. and WEIGLER H., *Investigations on the failure and deformation of concrete under combined biaxial stresses*. Translation by Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Melbourne, Translation No 7282, 1966.
- 61e. DAVIES J. D. and NATH P., *Complete load-deformation curves for plain concrete beams*. Building Science, 1967, 2 (3), 215-221.
- 62e. HEILMAN H. G., HILSDORF H. and FINSTERWALDER K., *Festigkeit und Verformung Beton unter Zugspannungen*. (Strength and deformation of concrete under tensile stress) Materialprüfungsamt für das Bauwesen der Technischen Hochschule München 1967, Bericht Nr 64. (Same title — Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 1969, Heft 203).
- 63e. KOMLOS K., *The determination of the tensile strength of concrete*. Indian Concrete J, 1967, 41 (11), 429-436; 1968, 42 (2), 68-76; 1968, 42 (11), 473-478, 482; 1969, 43 (2), 42-49, 54.
64. CLARK L. E., GESTLE K. H. and TULIN L. G., *Effect of strain gradient on the stress-strain curve of mortar and concrete*. American Concrete Inst. J, 1967, Proc 64 (9), 580-586.
65. MEYERS B. L., *Time dependent strains and microcracking of plain concrete*. PhD Thesis, Cornell Univ, 1967.
66. BARASHIKOV A. Y. A., *Creep of concrete under cyclic deformations*. Beton i Zhelezobeton, 1967, 13 (12), 28-30 (in Russian).
- 67e. HAROUN W. A., *Uniaxial tensile creep and failure of concrete*. PhD Thesis, University College, London, 1968.
- 68e. EVANS R. H. and MARATHE P. S., *Microcracking and stress-strain curves for concrete in tension*. Matériaux et Constructions (R.I.L.E.M.), 1968, 1 (1), 61-64.
- 69e. HUGHES B. P. and ASH J. E., *Short-term loading and deformation of concrete in uniaxial tension and pure torsion*. Mag. Concrete Res, 1968, 20 (64), 145-154.
- 70e. ISENBERG J., *Properties of concrete change when microcracking occurs*. American Concrete Inst. Special Publication S. P. 20, 1968, 28-41.
71. ILLSTON J. M., *Components of creep in mature concrete*. American Concrete Inst. J., 1968, Proc 65, (3), 219-227.
72. MITZEL A., *The hypothesis of equal creep deformation in compression and in tension, and the principle of superposition of creep and shrinkage*. Ann. Inst. Batim, 1968, 21 (214), 96-100. (In French).
73. SHAH S. P. and CHANDRA S., *Critical stress, volume change and microcracking of concrete*. American Concrete Inst. J., 1968, Proc 65 (9), 770-781. Discussion by Sidenbladh T, *Ibid*, 1969, 66, 227-229.
74. SHAH S. P. and WINTER G., *Inelastic behaviour and fracture of concrete*. American Concrete Inst Special Publication SP 20, 1968, 5-28.
75. ORR D.M.F., *A note on the ductility of concrete in tension*. Constructional Review, 1968, 41 (6), 22-24.
76. WELCH G. B. and HAISMAN B., *The application of fracture mechanics to concrete*. Univ of New South Wales, U.N.I.C.I.V. Report 1.12, 1968, also similar title in Matériaux et Constructions (R.I.L.E.M.), 1969, 2 (9), 171-177.

- 77e. HUGHES B. P. and ASH J. E., *The effect of water gain on the behaviour of concrete in tension, torsion and compression*. The Concrete Society, Technical Paper PCS 54, November 1969.
- 78e. FACAOARU I., TANNENBAUM M. and STANCULESOU G., *Studies on the deformation and cracking of concrete under uniaxial stress fields*. Int. Conf. on Structure, Solid Mechanics and Engineering Design, Southampton University 1969. (Proc. published by John Wiley 1971, Part I, pages 653-666).
- 79e. JOHNSON R. P. and LOWE P. G., *Behaviour of concrete under biaxial and triaxial stress*. *Ibid*, Part II, pages 1039-1051.
- 80e. WARD M. A. and COOK D. J., *The development of a uniaxial test for concrete and similar brittle materials*. Materials Research and Standards, 1969, 9 (5), 16-20.
- 81e. CARVALHO FRANCA G. de and PINCUS G., *The distribution of concrete strains in the split cylinder test*. J of Materials, 1969, 4 (2), 393-407.
- 82e. KUPFER H. and HILSDORF H. K., *Behaviour of concrete under biaxial stresses*. American Concrete Inst J. 1969, Proc 66, 656-666.
Discussion by Pandit G. S. and Zimmerman R. M., *Ibid*, 1970, 67 194-197.
- 83c. HOUGHTON D. L., *Concrete volume change for Dworshak Dam*. American Soc. of Civil Engineers Proc, J of Power Division, 1969, 95, (PO 2), 153-166.
84. WARD M. A. and COOK D. J., *The mechanism of tensile creep in concrete*. Mag. Concrete Res., 1969, 21 (68), 151-158.
85. FRANKLIN R. E., *The effect of weather on early strains in concrete slabs*. 1969, R.R.L. Report No LR 266.
86. McCREATH D. R., NEWMAN J. B. and MEWMAN K., *The influence of aggregate particles on the local strain distribution and fracture mechanism of cement paste during drying shrinkage and loading to failure*. Matériaux et Constructions (R.I.L.E.M.), 1969, 2, 73-84.
87. GRIMER F. J. and HEWITT R. E., *The form of the stress-strain curve of concrete interpreted with a diphasic concept of material behaviour*. Proc. Inter Conf. on Structure, Solid Mechanics and Engineering Design, Southampton University, 1969.
88. HATANO T., *Failure of concrete and similar brittle solids on the basis of strain*. International J of Fracture Mechanics, 1969, 5, 73-79.
89. MOAVENZADEH F. and KUGUEL R., *Fracture of concrete*. J of Materials, 1969, 4 497-519.
90. POPOVICS S., *Fracture mechanics in concrete. How much do we know?*. American Soc. of Civil Engineers Proc, J of Engineering Mechanics Div, 1969, 95 (EM 3), 531-544.
Discussion by Marathe M. S., Chandra S., Cowan H. J. and Cook D. J., *Ibid*, 1970, 96 (EM 1), 95-102.
91. BÉRES L., *Relaxation of stresses in concrete*. Bauplanung Bautechnik, 1969, 23 (6), 286-288. (in German)
92. WELCH G. B. and HAISMAN B., *Fracture toughness measurements of concrete*. Univ. of New South Wales, U.N.I.C.I.V. Report R 42, 1969.
93. NAUS D. J. and LOTT K. L., *Fracture toughness of Portland cement concretes*. American Concrete Inst J, 1969, 66 (6), 481-489.
- 94e. JOHNSTON C. D., *Strength and deformation of concrete in uniaxial tension and compression*. Mag Concrete Res, 1970, 22 (70), 5-16.

- 95e. HUGHES B. P. and ASH J. E., *Anisotropy and failure criteria for concrete*. Matériaux et Constructions (R.I.L.E.M.) 1970, 3 (18), 371-373.
- 96e. IMBERT I. D. C., *The effect of holes on tensile deformations in plain concrete*. Highway Research Record, 1970, (324), 54-65.
- 97e. CHEN W. F., *Extensibility of concrete and theorems of limit analysis*. American Society of Civil Engineers Proc., J of Engineering Mechanics. Div., 1970, 96 (EM 3), 341-352.
- 98e. RAJU N. K., *Strain distribution and microcracking in concrete prisms with a circular hole under uniaxial compression*. J of Materials, 1970, 5 (4), 901-908.
- 99a. STOLNIKOV V. V. and LITVINOVA R. E., *Factors influencing crack resistance of concrete for large dams*. Communication by Soviet National Committee to 10th Congress on Large Dams, Montreal, 1970, 45-76.
(see also contribution without quantitative data on extensibility : Stolnikov V. V. Discussion on question 38, 10th Congress on Large Dams, Montreal 1970, Proceedings 6, 719-721).
- 100c. HOUK I. E., PAXTON J. A. and HOUGHTON D. L., *Prediction of thermal stresses and strain capacity of concrete by tests on small beams*. American Concrete Inst J, 1970, 67 (3), 253-261.
- 101e. JOHNSTON C. D., *Deformation of concrete and its constituent materials in uniaxial tension*. Highway Research Record, 1970, (324), 66-76.
102. *Strain capacity of mass concrete*. Dept of the Army, Office of Chief of Engineers, Washington, Engineer Technical Letter No 1110-2-89, April 1970.
103. VENUAT M., *Deformation of hardened concrete under load*. Revue des Matériaux de Construction, 1970, (655), 87-97. (656), 121-134. (657-8), 167-196. (in French)
104. CAMPBELL-ALLEN D, and HOLFORD J. G., *Stress and cracking in concrete due to shrinkage*. Institution of Engineers Australia, Civil Engineering Transactions, 1970, CE 12 (1), 33-39.
105. POPOVICS S., *A review of stress-strain relationships for concrete*. American Concrete Inst J., 1970, Proc. 67 (3), 243-248.
- 106e. HUNT J. G., *A laboratory study of early-age thermal cracking of concrete*. Cement and Concrete Assoc, Technical Report 42.457, London, 1971.
- 107e. BIRKIMER D. L. and LINDEMANN R., *Dynamic tensile strength of concrete materials*, American Concrete Inst. J, 1971, Proc 68 (1), 47-49 and supplement N° 68-8.
- 108e. CHEN W. F. and CARSON J. L., *Stress-strain properties of random wire reinforced concrete*. American Concrete Inst. J, 1971, Proc 68 (12), 933-936.
109. MARSHALL A. L., *The nature of early age cracking in concrete*. Sunderland Polytechnic, May 1971, Report No CR/1.
110. BUYUKOZTURK O., NILSON A. H. and SLATE F. O., *Stress-strain response and fracture of a concrete model in biaxial loading*. American Concrete Inst J, 1971, Proc 68 (8), 590-599.
111. COOK D. J., *Factors affecting the tensile creep of concrete*. Univ. of New South Wales, School of Engineering, U.N.I.C.I.V. Report R-64. April 1971.
112. YERLICI V. A., *Stresses and cracking in reinforced concrete members under axial tension*. Matériaux et Constructions (R.I.L.E.M.), 1971, (23), 313-322.
113. SHAH S. P. and McGARRY F. J., *Griffith fracture criterion and concrete*. American Soc. of Civil Engineers Proc, J of Engineering Mechanics Div., 1971, 97 (EM 6), 1663-1676.
Discussion by Brown E. T. and Hudson J. A., Marathe M. S., *Ibid*, 1972, 98 (EM 5), 1310-1313.

114. MAGNAS J. P. and AUDIBERT A., *Criteria for the strength of concrete subjected to multiaxial strains*. Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, 1971, (287), 21-43.
- 115c. HOUGHTON D. L., *Concrete strain capacity tests - their economic implications*. Conf. on Economical Construction of Concrete Dams, Proc. of the Engineering Foundation Conference, Asilomar Conf. Grounds, Pacific Grove, California, May 1972. (Proc. published by American Soc. of Civil Engineers).
- 116c. McDONALD J. E., BOMBICH A. A. and SULLIVAN B. R., *Ultimate strain capacity and temperature rise studies, Trumbull Pond Dam*. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Vicksburg, Miss, Miscellaneous Paper C-72-20, August 1972.
117. BROWN J. H., *Measuring the fracture toughness of concrete paste and mortar*. Mag Concrete Res, 1972, 24 (81), 185-196.
118. A. C. I. COMMITTEE 224, *Control of cracking in concrete structures*. American Concrete Inst J, 1972, Proc 69 (12), 717-753.
119. LIU T. C. Y. NILSON P. H. and SLATE F. O., *Stress-strain response and fracture of concrete in uniaxial and biaxial compression*. American Concrete Inst J, 1972, Proc 69 (5), 291-295.
Discussion by Selvam V. K. M., Aldridge W. W and Hsu C. T., *Ibid* 1972, 69(11), 710-712.
120. COOK D. J., *Some aspects of the mechanism of tensile creep in concrete*. Univ of New South Wales, U.N.I.C.I.V. Report No R 97, November 1972.
- 121e. SWAMY R. N., *Fibre reinforced concrete is here to stay*. Civil Engineering and Public Works Review, 1973, 68 (809), 1075-1081. This paper is a review of the First International Symposium on Fibre Reinforced concrete, Ottawa, Oct. 1973, sponsored by the American Concrete Institute.
- 122c. McDONALD J. E., *Ultimate strain capacity tests, Clarence Cannon Dam, St Louis District*. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss, Miscellaneous Paper C-73-5, March 1973.
123. A. C. I. Committee 207, *Effect of restraint, volume change and reinforcement on cracking of massive concrete*. American Concrete Int J, 1973, Proc 70 (7), 445-470.
124. ROSTAM S. and BYSKOV E., *Cracks in concrete structures : a fracture mechanics approach*. Danmarks Tekniske Hojskole, Afdelingen for Baerende Konstruktioner, Rapport Nr R 34, 1973.
125. NAUS D. J., *Fracture mechanics applicability to Portland cement concrete*. Army Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, Illinois, Technical manuscript M 42, March 1973.
126. Third International Congress on Fracture, Munich, April 1973. Thirteen papers concerning fracture of concrete given at the Congress form a special issue of Cement and Concrete Research, 1973, 3 (4), 343-494.
127. RADJY F. and HANSEN T. C., *Fracture of hardened cement paste and concrete*. *Ibid*, 343-361.
128. ZAITSEV J. W. and WITTMANN F. H., *Fracture of porous viscoelastic materials under multiaxial state of stress*. *Ibid*, 389-395.
129. SWAMY R. N. and KAMESWARA RAO C. V. S., *Fracture mechanism in concrete systems under uniaxial loading*. *Ibid*, 413-427.
130. BROWN J. H. and POMEROY C. D., *Fracture toughness of cement paste and mortars*. *Ibid*, 475-480.

APPENDIX I

Dr ROSANOV (U.S.S.R.) has commented :

“ The procedure for the comparative evaluation of the extensibility of concrete using the dynamic elasticity modulus and the tensile strength at splitting is but one of several approaches used in the U.S.S.R. for this purpose. Moreover in a number of studies under way in the U.S.S.R. on the extensibility of concrete in particular to obtain complete stress-strain diagrams the moving boundary method or similar approaches are used. Information on those methods and on data received when applying them is available in the communication by A. A. Borovoi, K. A. Maltsov, and N. S. Rosanov, which was distributed at the XI ICOLD Congress, Madrid, 1973 (131).

It is an accepted practice in the U.S.S.R. to subdivide the complete stress-strain diagram into a number of sections with different physical characteristics of the materials when tested at a prescribed deformation speed. In investigating the effect of different factors on the extensibility of concrete, not only the variation in the general shape of the diagram is studied, but also that of the individual sections and the distribution of the points representative for the transition of the material from one state into another. Such an approach seems to us to be the most appropriate and promising one.

In enumerating the characteristics and parameters of the concrete which affect its extensibility it should be pointed out that according to the experimental research conducted in the U.S.S.R. one of the major factors is the type of rock used for the coarse aggregate. Namely, concretes with carbonate aggregate possess, as a rule greater extensibility than those with igneous aggregate.

We consider it expedient to emphasize in the recommendations adduced in the paper not only the necessity of developing procedures for the estimation of the extensibility of concrete for large dams fitting the actual service conditions of the structures, but also the need to clearly define the state of the material corresponding to different sections of the complete stress-strain diagram. The latter is required for the substantiation of employing the experimental findings in question in engineering design and in solving problems encountered in engineering practice while constructing large dams. ”

Additional reference :

131a. BOROVOI A. A., MALTISOV K. A. and ROSANOV S. N., “ Critères de sécurité des barrages en béton ” Communication by Soviet National Committee to 11th Congress on Large Dams, Madrid, 1973.

ANNEXE I

Dr ROSANOV (U.R.S.S.) remarque :

« Le procédé pour l'évaluation comparative de l'extensibilité du béton utilisant le module d'élasticité dynamique et la résistance à la traction par fendage n'est qu'une des méthodes utilisées en U.R.S.S. dans ce but. D'autre part, dans un nombre d'études en cours en U.R.S.S. sur l'extensibilité du béton, en particulier en vue d'obtenir les « courbes totales contraintes-déformations », on utilise la méthode de la limite mobile ou une méthode semblable. Des renseignements sur ces méthodes et sur les résultats obtenus lors de leur emploi sont contenus dans la communication de A.-A. Borovoi, K.-A. Maltsov et N.-S. Rosanov qui a été distribuée au XI^e Congrès de la C.I.G.B., Madrid, 1973 (131).

C'est une pratique admise en U.R.S.S. de diviser la courbe totale contrainte-déformation en un nombre de portions indiquant les différentes caractéristiques physiques des matériaux soumis à des essais à une vitesse prescrite de déformation. Dans l'étude de l'effet des différents facteurs sur l'extensibilité du béton, non seulement étudie-t-on la variation de la forme générale de la courbe, mais aussi celle des portions individuelles ainsi que la répartition des points représentatifs indiquant la transition du matériau d'un état à l'autre. Une telle méthode nous semble être la plus appropriée et la plus pleine de promesses.

Dans la liste des caractéristiques et des paramètres du béton qui affectent son extensibilité, on devrait faire remarquer que d'après la recherche expérimentale conduite en U.R.S.S., l'un des facteurs importants est le type de roche utilisée comme agrégats grossiers. Par exemple, les bétons à agrégats de carbonate possèdent en général une extensibilité plus grande que ceux à agrégats ignés.

Nous estimons qu'il est désirable de souligner dans les recommandations faites dans ce rapport, non seulement la nécessité de développer des méthodes pour l'estimation de l'extensibilité du béton pour grands barrages qui soient appropriées aux conditions réelles de service des ouvrages, mais aussi le besoin de définir clairement l'état du matériau correspondant aux différentes portions de la courbe totale contrainte-déformation. Cette dernière est requise pour justifier l'emploi des résultats expérimentaux dans les bureaux de dessin et pour résoudre les problèmes rencontrés sur les chantiers lors de la construction des grands barrages ».

Référence supplémentaire :

131a. BOROVOI A.-A., MALTISOV K.-A. et ROSANOV S.-N., « Critères de sécurité des barrages en béton » Rapport du Comité National Soviétique au XI^e Congrès des Grands Barrages, Madrid, 1973.

IMPRIMERIE LOUIS-JEAN

Publications scientifiques et littéraires

TYPO - OFFSET

05002 GAP - Téléphone 51 35 23 -

Dépôt légal 66- 1981

Copyright © ICOLD - CIGB

Archives informatisées en ligne  *Computerized Archives on line*

The General Secretary / Le Secrétaire Général :
André Bergeret - 2004



International Commission on Large Dams
Commission Internationale des Grands Barrages
151 Bd Haussmann -PARIS -75008
<http://www.icold-cigb.net> ; <http://www.icold-cigb.org>