

氏名	JOSHI NIRMAL RAJ
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記号番号	博理工甲第 1226 号
学位授与年月日	令和 3 年 9 月 22 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Study on mechanical deterioration and structural response due to internal swelling reactions of concrete (内部膨張反応によるコンクリートの力学的劣化と構造応答に関する研究)
論文審査委員	委員長 准教授 浅本 晋吾 委員 教授 牧 剛史 委員 教授 松本 泰尚 委員 教授 長田 昌彦

論文の内容の要旨

In many countries, various cases of deterioration of concrete by internal expansion related to alkali silica reaction (ASR) and delayed ettringite formation (DEF) have been reported. To understand the phenomena, many studies have been done which are mainly focused on the chemical and material aspects. Based on those studies, guidelines and codes have been prepared which are useful to prevent ASR/DEF in new construction but are of little use for the structural evaluation of existing structures, especially with DEF expansion. The infected infrastructures can have serious safety issues especially in places where uncertain load are expected such as in seismically active regions. To identify and prevent possible damage, it is necessary to predict the engineering behaviour of the infected concrete. In this dissertation, the mechanical behaviour of concrete with ASR/DEF expansion is studied. The study is focused to understand the impact of expansion on the plain and reinforced concrete. In addition, structural response of the structure with the expansion is investigated. The study mainly consists of two parts viz. experimental works and numerical simulation. These are described below.

Part A: Experimental works

In the first part of the study, experiments were carried out to understand the mechanical deterioration of concrete due to ASR/DEF expansion focusing on the structural response. The experimental study included the interaction between the expansive concrete and internal and external steel restraints, impact on the evolution of bond strength and analysis of crack propagation using an X-ray CT image analysis.

It was found that the free expansion caused by DEF+ASR (DA) was the largest and most rapid, however, when restrained internally or externally, DA and DEF specimens showed a similar expansion. In ASR, the

expansion was much low to be not convergent in the experiment for about 300 days. It was noticed that the expansion in the ASR specimen was not reduced in the restrained condition, which is a contradictory behaviour because in general, the expansion should be reduced. The reason for this behaviour is unclear, thus it needs to be confirmed or falsified by future studies.

The expansion of concrete could induce stress in the steel in the restrained cases. It was found that despite a larger free expansion, the stress instigated by the DA expansion was lower than that due to the DEF when the concrete was externally restrained. The stress in the restraining steel was calculated to be about 158.3 N/mm² and 95.4 N/mm² for DEF and DA cases, respectively. The stress in the embedded rebar measured by a strain gauge indicated that tensile stress could develop in the rebar when the expansion is low. After the expansion reached about 0.05%, the tensile stress was gradually reduced. This indicated a deterioration of interface between concrete and rebar. To study the effect on the steel-concrete interface, a pullout test was carried out. For a relative comparison of strength, a compressive strength test was also conducted.

In the pullout test, it was noticed that a large expansion deteriorated the bond strength to about 60% of the original. After an expansion of about 0.5%, there was no significant further drop in the bond strength. Meanwhile, the compressive strength gradually reduced to 20% of the original at the expansion of about 1.8%. Based on the result, it can be concluded that reduction in bond strength is not directly related to the reduction in compressive strength. Furthermore, it was found that a small expansion due to ASR can improve the compressive and bond strengths in confined condition. This was due to the pre-stressing effect provided by the surrounding stirrups and main steel rebars. In the compression test, it was noticed that the deteriorated concrete shows a large plastic strain. X-ray CT image revealed that the large plastic strain was due to the closing of pre-existing gaps. The failure of the highly expanded specimen was caused by the opening of cracks in the direction perpendicular to the loading.

The expansion also reduced the dynamic Young's modulus in all types of expansion including ASR specimens at low expansion. This shows that the structures affected with ASR expansion need careful attention because, even though there is an apparent increase in the compressive and bond strength, the stiffness of the structure could be reduced causing serviceability issue such as excessive deflection.

Part B: Numerical modelling for strength and serviceability evaluation

The second part of the dissertation was focused on development and verification of a numerical model for FEM analysis for ASR and DEF affected concrete. As noticed in the experiments, some features of deterioration due to the ASR/DEF expansion cannot be fully captured by the conventional constitutive models. For instance, the strength is increased at the low level of expansion even though the elasticity is reduced in ASR. Similarly, in DEF and DA, the plastic strain can become significantly large at the peak load, which are generally unaccounted by the conventional methods. To address these shortcomings, a numerical method was proposed.

The proposed model is a hybrid model that combines Mazar's model with the time-dependent expansion

model by Larvie. The expansion-dependent variables such as the peak strength and elastic modulus were treated as a Gaussian function. The numerical model was implemented in Code Aster developed by eDF in France to analyze sample specimens and a concrete beam. The model was fairly accurate at the lower expansion but at larger expansion, there was some deviation. The model needs to be further calibrated and fine-tuned to get a better result.

Next, a case study was conducted to evaluate the serviceability of a massive dam structure undergoing an expansive reaction. Based on a systematic analytical diagnosis and petrographic analysis of the concrete core, the dam was found to be undergoing a slow ASR. The accelerated test showed a residual expansion of about 0.15%. Using the environmental data, the long-term strain and stress development due to ASR were calculated. The model was calibrated based on the observed deflections. To account for the variation that could arise due to unknown parameters such as temperature, rate of reaction, etc. a probabilistic method was incorporated. The simulation predicted that, at the age of 100 years, the maximum deflection of the dam crest will be approximately 54–66 mm towards the upstream direction. The probabilistic analysis also gave a similar result with an upstream deflection of 61 mm and a standard deviation of 28 mm. The principal stress distribution in the dam showed that the dam is predominantly in compression and safe against cracking at the current rate of reaction.

In conclusion, this dissertation was dedicated to the study on the mechanical deterioration of expansive concrete by carrying out various experiments and numerical studies. The findings and understanding gained from the experiments were used to propose a new hybrid model for the structural analysis. This study is expected to serve as a guide to practising engineers to evaluate the affected structures with ASR/DEF expansion.

論文の審査結果の要旨

当学位論文審査委員会は、令和3年8月2日に論文発表会を開催し、論文内容の発表に続いて質疑と論文内容の審査を行った。以下に審査結果を要約する。

コンクリートの内部膨張反応の一つに、アルカリ骨材反応（Alkali Silica Reaction、以下 ASR）があり、アメリカでは、半世紀以上前から亀甲状ひび割れをもたらす劣化現象として調査、研究が進められている。日本でも、1980年代から実構造物で ASR によるひび割れが認知され、学協会を中心に要因分析、予防基準や補修対策などがガイドラインや示方書にまとめられている。初期の高温作用に起因する遅延エトリングイト生成（Delayed Ettringite Formation、以下 DEF）も内部膨張反応であり、ASR と同様にコンクリート表面に亀甲状の膨張ひび割れをもたらすが、国内ではプレキャストコンクリートを中心とした報告のみで、現場打ち実構造物での DEF 劣化の事例は未だ報告がない。しかしながら、フランスでは、マスコンクリートを中心とした実構造物での DEF ひび割れ事例が多数報告されており、近年、国内でも DEF による膨張ひび割れ防止の照査が日本コンクリート工学会のマスコンクリートのひび割れ制御指針に取り入れられた。DEF による膨張挙動は ASR に比べ、急激でかつ数%という過大な膨張を呈するため、温度履歴、化学成分、境界条件などに着目した発生メカニズムの研究が国内外で多数報告されているが、DEF 膨張が鉄筋コンクリートの力学的特性、構造物の応答に与える影響に関する検討は少ない。また、DEF は、反応性骨材を含んだ場合、ASR と相互作用し、暑中環境にある東南アジア諸国でのひび割れ事例では、複合劣化の可能性も指摘されている。DEF、さらには ASR との複合劣化の懸念がアジア内でも高まりつつあり、将来、コンクリートの過大な膨張が実構造物に発生した際に適切な対策を講じるためにも、鉄筋コンクリート構造物の性能に対する内部膨張反応の影響を把握することは重要と言える。

以上の背景のもと、本学位論文では、DEF、さらには、ASR との複合によるコンクリートの内部膨張反応に着目し、鉄筋や境界からの内外拘束における膨張挙動、膨張に伴う鉄筋の付着強度及びコンクリートの強度低下を実験的に検討し、さらには、これらの検討と既往の膨張モデルのもと、内部膨張反応を呈した構造物の構造耐力や使用性を数理解析によって把握することを目的とした。以下、学位論文の内容について、概説する。

第1章では、国内外での ASR、DEF の発生事例の変遷、関連研究の動向についてまとめた。これらの背景のもと、本研究の目的、論文の構成を示した。

第2章では、ASR、DEF に関するそれぞれの既往の研究について、反応機構まで含め、系統的にレビューした。各内部膨張反応がコンクリートの強度やヤング係数に与える影響については、既往のデータをまとめ、ASR、DEF それぞれで、膨張ひずみに伴う各力学的特性の経時変化のグラフを作成した。また、ASR と DEF の複合作用による膨張特性に関しても、数少ない既往の研究をもとに実構造物の複合劣化の可能性などをまとめ、各膨張の数値解析モデルについては、有限要素解析に適用可能なモデルを中心に既往の研究事例を紹介した。

第3章では、内部鉄筋による内部拘束が、ASR、DEF、さらにはその複合によるコンクリート膨張挙動

及び膨張ひび割れ進展に与える影響を検討した。無筋の自由膨張の場合、ASR と DEF の複合膨張は、DEF のみの膨張より 1.5 倍程度大きくなったが、内部鉄筋で拘束した場合、DEF のみと最終的な膨張量はさほど変わらなかった。鉄筋とコンクリート表面のひずみの経時変化から、500-600 μ 程度までコンクリートは鉄筋と一体に膨張するものの、さらなるコンクリートの膨張によって、鉄筋の付着滑りが起こったことが分かり、第 5 章の付着強度の検討を行うに至った。また、ひび割れについては、鉄筋で内部拘束した場合、無拘束より鉄筋長手方向を中心にひび割れが発生し、ひび割れ幅も小さくなった。鉄筋コンクリートの場合、内部拘束によって、無筋コンクリートの自由膨張で観察されるような大きな DEF 膨張ひび割れは抑制されることが分かった。

第 4 章では、プレストレストコンクリートや周辺の外部拘束を想定し、ASR、DEF、さらにはその複合によるコンクリート膨張を鋼製フレームで拘束し、外部拘束による膨張の異方性、拘束応力、ひび割れパターンについて検討した。外部拘束においても、第 3 章の内部拘束と同様に、DEF 単独、DEF と ASR の複合で拘束下での最終的な膨張量はほとんど変わらなかったが、膨張の拘束応力としては、DEF 単独の方が大きくなった。これは、複合劣化の場合、膨張ひび割れが多数観察され、コンクリートの剛性が低下し、拘束に必要な応力としては低下したためと推察した。膨張の異方性については、計測誤差が大きく、再度の検証は必要であるが、DEF 単独、ASR と DEF の複合で、大きな違いはみられなかった。外部拘束した場合のひび割れは、割裂方向のみのひび割れとなった。

第 5 章では、内部膨張反応が発生したときのコンクリートの鉄筋との付着強度について検討した。ASR 膨張のみ発生した場合、わずかの膨張では付着強度は増加し、既往の研究でも指摘されているように、鉄筋拘束に伴うコンクリート内のプレストレスト応力の影響が考えられた。一方で、DEF 単独、さらには ASR との複合での膨張が発生した場合、膨張が大きいこともあり、付着強度が増加することはなく、膨張とともに低下した。ただし、付着強度の低下は、8N/mm² で収束し、膨張が進行してもそれ以上の低下は見られなかった。この理由として、付着強度に関連する鉄筋の節とコンクリートのかみ合わせは、大きな膨張をもたらすマイクロクラックには影響しないためと考察した。

第 6 章では、DEF 膨張に起因するコンクリートの圧縮強度の機構について、様々な荷重パターンを与えたのち、X 線 CT で内部のひび割れ状態を可視化させることで、検討した。その結果、DEF 膨張で発生する粗骨材のモルタル部のギャップが、荷重直交方向に閉じることで、初期からの塑性ひずみの増大とそれに伴う剛性低下をもたらし、圧縮ピークひずみも大幅に増加させることが分かった。また、荷重応力が増大すると、ギャップからひび割れが進展し、粗骨材同士を連結されるため、大きな圧縮強度低下をもたらすことが分かった。

第 7 章では、第 6 章までに得られた実験結果、さらには既往の研究をもとに、内部膨張反応による膨張に応じたコンクリートの強度、剛性、付着強度といった力学的特性をモデル化し、鉄筋拘束下での膨張挙動や膨張量に応じた圧縮強度の低下といった実験の検証を行った。また、鉄筋コンクリート梁の膨張に伴う耐力の変化について感度解析を行った結果、曲げ先行型の破壊の場合、若干耐力は低下するものの、圧縮強度が膨張で低下しても圧縮ピークひずみが大きくなるため、靱性は低下しなかった。また、せん断先行型の破壊の場合は、膨張が大きくなるほど、脆性的な破壊をおこし、耐力が低下した。

第8章では、内部膨張反応を生じた構造物の使用性に着目し、ASR膨張を引き起こしたタイのダムのアーチ上部のたわみについて、様々な感度解析を実施した。膨張の速度や終局値を変動させても、100年後のたわみはせいぜい数cm程度のばらつきしかなく、主応力もひび割れを発生させるレベルでないことを確認した。実際、本ダムでは建設後60年経ってもひび割れは確認されておらず、今後、たわみ変形は持続しても安全性は確保されると推察された。

第9章では、本論文で得られた実験及び数理解析による知見をまとめ、今後の課題についてまとめた。

以上のように、本研究では、DEFを中心とした内部膨張反応が鉄筋コンクリートの力学的特性と構造性能に与える影響を、実験及び数理解析によって多角的に検討した。鉄筋の付着強度、コンクリートの圧縮強度の低下を膨張特性と結び付けた実験データは世界でも類例がなく、学術的に価値のある結果が得られたと言える。数値解析については梁試験体などで検証する必要があるが、膨張に伴う力学的特性の変化を包括的に取り込み、使用性、限界状態を定量的に検討できる本解析プラットフォームは、工学的意義が高い。学術的、工学的な貢献を踏まえ、当学位論文審査委員会は、本論文が博士（学術）の学位に相応しい内容であると判断した。

なお、本論文の内容で、第8章の解析結果は、国際学術雑誌 *Journal of Advanced Concrete Technology* (Vol.19, pp.181-195, 2021) に掲載され、第6章の実験結果は、国際学術雑誌 *Cement and Concrete Composites* に投稿し、現在、査読対応中である。