

論文

[1184] 持続荷重および ASR の影響下にある RC はりの内部応力
に及ぼす表面被覆の効果

浜田秀則*1・R. N. S w a m y *2・谷川伸*3

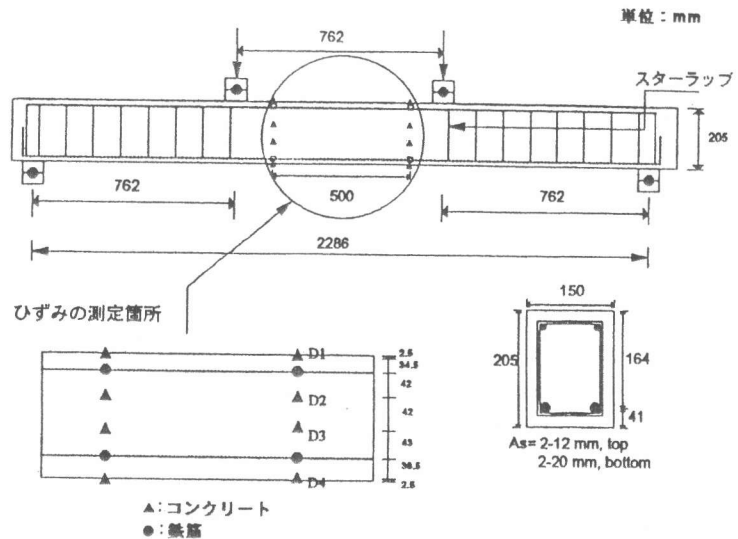
1. 序論

アルカリ骨材反応に関しては、これまでに多くの研究データが蓄積されてきており、その基礎的知識はコンクリート技術者の共有するところとなってきた。しかし、この問題のいくつかの領域に関しては現時点で必ずしも研究が十分であるとは言いがたい。その一つとして、アルカリ骨材反応が生じた RC 部材の構造的評価が挙げられる。アルカリ骨材反応が生じた RC 部材の終局耐力に関しては比較的多くの研究成果が報告されている[1][2]。これらの研究結果によると、アルカリ骨材反応が生じた RC 部材の場合、0～20%程度の耐力の低下が報告されている。しかし、持続荷重下における RC 部材の内部応力の特性については、これまでにほとんど研究報告がなされていない。また、コンクリートの表面被覆のアルカリ骨材反応抑制効果は、無筋コンクリートの膨張量という観点から論じられていることが多く、構造的な観点から表面被覆の効果を論じた例はほとんどない。以上の点に鑑み、本研究はアルカリ骨材反応により劣化した RC はりの持続荷重下における内部応力の特性ならびにコンクリートの表面被覆がそれら内部応力の状況にどのような影響を及ぼすのかを実験的に検討したものである。

2. 実験の概要

2. 1 供試体の概要

図一 1 に供試体の形状および寸法を示す。断面寸法が150×205mm、長さが2438mmのはり供試体である。引張補強としてφ20mmの異形鉄筋、圧縮補強としてφ12mmの異形鉄筋を配置した。鉄筋の弾性係数は196 kN/mm²である。また、左右両側のせん断区間には100mm間隔でスターラップ(φ6mmの異形鉄筋)を配置した。表一 1 に供試体の種別を示す。供試体は4体あり、そのうち2体に表面被覆を施した。



図一 1 供試体の形状・寸法、載荷方法
およびひずみの測定箇所

2. 2 コンクリート用材料

セメントは普通ポルトランドセメント (ASTM Type I、等価Na₂O=0.92%) を使用した。粗骨材は碎石(最大寸法10mm、比重2.62)、細骨材は天然砂(比重2.60)を使用した。反応性骨材として非晶質fused silicaを使用し、全骨材に対して15%(重量)に相当する量を細骨材に置換した。練りませ水として水道水を使用した。コンクリートの配合および材令28日の圧縮強度(6本平均値)を表一 2 に示す。強度試験用供試体(100mm立方体)の養生ははり供

*1 運輸省港湾技術研究所 構造部 工修 (正会員)
*2 Professor of the University of Sheffield, U.K. PhD.
*3 東亜合成化学工業(株) 製品研究所 工修 (正会員)

表一 供試体の種別

供試体	コンクリートの表面被覆	養生の状態
B1	なし	乾燥状態を継続
B2	載荷、暴露開始前に実施（全面塗装）	NaCl ドリッピング
B3	なし	NaCl ドリッピング
B4	載荷、暴露中に実施（上面は非塗装）	NaCl ドリッピング

表二 コンクリートの配合および圧縮強度

セメント	水	粗骨材	細骨材	非晶質fused silica	σ_{28}
350	210	1250	314	276	45.3

試体と同一である。コンクリート中の総アルカリ量はNa₂O換算で3.43kg/m³ (0.14%)である。反応性骨材として非晶質fused silicaを用いた場合のコンクリートの諸物性については既に報告されており[3][4]、無筋コンクリートの最終膨張量は、38℃の水中養生の場合で約0.8%、20℃の湿潤養生(96% R.H.)の場合で約0.5%である。

表三 コンクリート表面被覆材料

	主成分	塗布量 (kg/m ²)	形成膜厚 (μ)
下塗り材	合成樹脂系	0.3	30
中塗り材	アクリル系	1.7	900
上塗り材	アクリル系	0.3	100

2.3 コンクリート表面被覆材料

使用した被覆材の仕様を表一に示す。表に示されるとおり、被覆膜は3層構造となっており、全膜厚は約1mmである。主膜を構成する中塗り材はアクリルゴム系の材料であり、その組成は54% (重量) がアクリルゴム、残りの46%が無機系フィラーおよび顔料である。

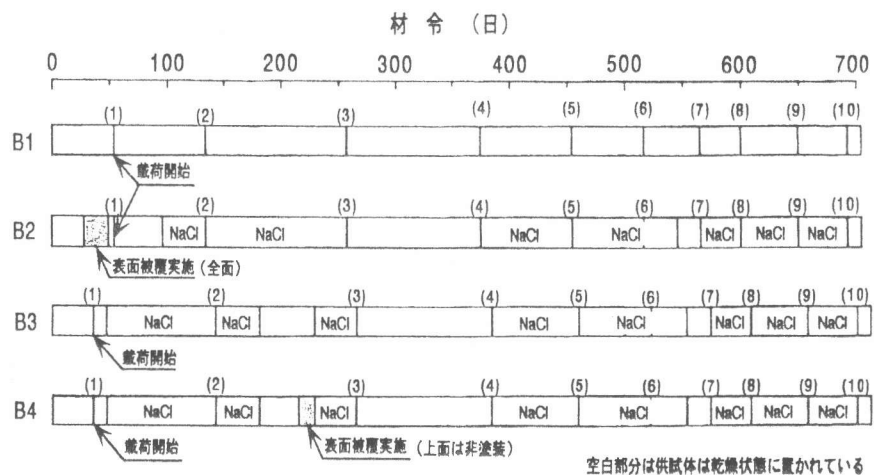
2.4 供試体の履歴

打設後24時間で脱型し、その直後にひずみ測定用端子を所定の位置に装着した。装着後にひずみ測定用端子の端子間距離の初期値を計測した後、材令7日までポリエチレンシートを覆った湿潤養生を行い、その後気中養生に移行した。供試体の履歴を図一に示す。このうち、供試体B2においては材令28日から材令49日にかけて供試体の6面全部に表面被覆を施した。B1およびB2は材令54日、B3およびB4は材令36日において載荷を開始した。その後、供試体は持続載荷の状態を保持した。図一に示すとおり、B1は常時乾燥状態にあり、B2、B3およびB4はNaClドリッピングの状態に置いた。NaClドリッピングとは、40℃のNaCl 4%溶液を供試体表面に絶えず供給し、表面を湿潤状態に保持するものである。

また、B4においては、材令215日から230日にかけて表面被覆を実施した。この場合はB2とは異なり供試体の上面（載荷面）を除く5面に表面被覆を施した。表面被覆を施した時点で引張側コンクリートひずみは2000μに達していた。

2.5 持続載荷方法

図一に載荷点の位置を示すが、載荷点間距離が762mm、支店間距離が2286mmの3等分点載荷で



図一 供試体の履歴

ある。鋼製治具により、B1とB2、およびB3とB4を2体1組として固定し持続載荷状態とした。持続載荷時の荷重はBS(British Standard)8110に従って算出した終局曲げ耐力の50%とし、持続荷重時の最大曲げモーメントが15783kN-mmとなるように $P = 41.4\text{kN}$ と設定した。

2. 6 計測項目およびその方法

定期的に供試体中央部の曲げ区間でのコンクリートひずみおよび鉄筋ひずみを計測した。いずれもスパン500mmのダイヤルゲージ式ひずみ計を使用した。図-1にひずみの計測箇所を示す。黒三角印(▲)で示すD1~D4がコンクリートひずみの測定箇所を示しており、黒丸印(●)の2ヶ所が鉄筋ひずみ(各々、引張鉄筋および圧縮鉄筋)の測定箇所を示している。なお、これらのひずみの測定ははりの両側面において実施し、その平均値を測定値として取り扱った。

3. 実験の結果

3. 1 初期弾性変形

図-3に中立軸から圧縮領域にかけての初期弾性ひずみ(載荷により生じたひずみ)を示す。図中の8本の線のうち4本は実測値(B1、B2、B3、B4)であり、他の4本は計算値である。計算はひずみの平面保持を仮定し、かつコンクリートの引張応力を零と仮定して行った。4つの計算値は用いたコンクリートの弾性係数(E_c)が

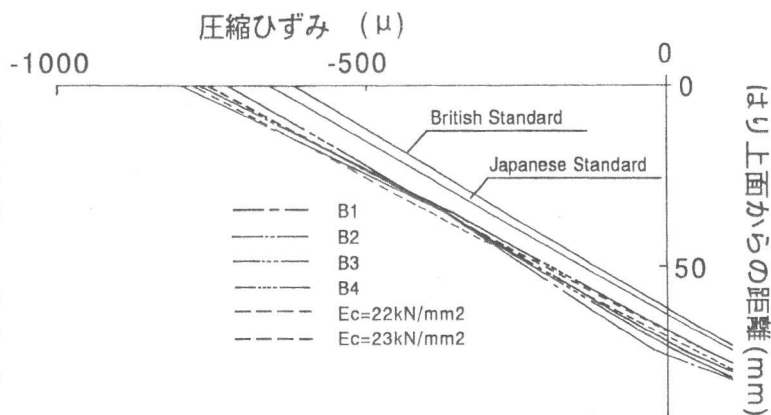


図-3 初期弾性変形

それぞれ異なっている。材令28日でのコンクリートの圧縮強度よりBS(British Standard)およびJS(土木学会コンクリート標準示方書)[5]に従って弾性係数を算出すると、 $E_c = 29\text{kN/mm}^2$ (BS)、 $E_c = 32\text{kN/mm}^2$ (JS)となる。この両値を用いてひずみを計算すると、図よりわかるとおり、実験値に比べてひずみが小さくなる。これより、実際の供試体の E_c は計算値より小さいことが推定される。 $E_c = 29\text{kN/mm}^2$ 以下の範囲で、コンクリートひずみを試算したところ $E_c = 22 \sim 23\text{kN/mm}^2$ の時の計算値と実験値がよく一致した。図-3に $E_c = 22\text{kN/mm}^2$ および $E_c = 23\text{kN/mm}^2$ を用いて算出したひずみを示しているが、実験値とほぼ一致していることがわかる。本実験と同様の反応性骨材を用いた同配合のコンクリートによる既往の結果[4]によると、 20°C 、96% R. H.の養生下において、コンクリートの動弾性係数は約15~20%の低下を示している。これより、載荷に入る時点(B1およびB2の場合材令54日、B3およびB4の場合36日)でコンクリートは既にASRの影響を受けてその弾性係数は22~23kN/mm²まで低下していたことが推察される。なお、4つの供試体間で初期弾性変形の性状には大きな差は認められない。

3. 2 コンクリートおよび鉄筋のひずみの経時変化

図-4にコンクリートおよび鉄筋のひずみの経時変化を示す。暴露期間を示す(1)、(3)、(6)、(10)は図-2中に示す数字と対応している。この図より、B1の圧縮ひずみは他の3つの供試体のそれに比べて大きく、引張ひずみは小さいことがわかる。これは、B1が常に乾燥状態に置かれているため、コンクリートに乾燥収縮が生じていること、ならびにASRによる膨張がB2、B3、B4に比べて小さくなっていることに起因する。また、この図よりわかるもう一つの特徴はB3とB4のひずみ量はほぼ同程度であるが、B2のそれはB3、B4に比べて引張ひずみが小さくなっている点である。B2は比較的初期の材令(暴露開始以前、載荷前)で表面被覆を実施しており、この効果が引張ひずみの抑制という形で出てきたものと考えられる。同様に引張側鉄筋のひずみもB3、B4に比べて小さくなっており、したがって発生している内部応力も小さい。一方、B4の場合ASRによる膨張がかなり進んだ時点で表面被覆を実施していることと、上面が非塗装であるために膨張ひずみの抑

制にはその効果を認めることはできない。また、上述のひずみ分布より明らかなおおりに、ASRの影響を大きく受けているはりは影響の小さなはりに比べて持続荷重下において中立軸の位置が圧縮側に存在する。

3. 3 コンクリート表面のひびわれの状況

ひびわれの発生はおおまかに3段階に分けられる。まず、曲げ荷重を実施した時点で最大曲げモーメント区間に曲げひびわれが発生した。ひびわれ幅は最大で約0.2mmである。その後、時間の経過とともにASRによるひびわれがはり軸方向かつ埋設鉄筋に沿った位置に発生した。ひびわれ幅は約0.3mmである。その後さらに材令100日を過ぎた時点で、方向性のない無数のひびわれがコンクリート全面に発生した。常時乾燥状態にあるB1においてもB3、B4に比べて本数は少ないものの同様のひびわれが発生した。また、B2およびB4の表面被覆材にはひびわれは生じなかった。

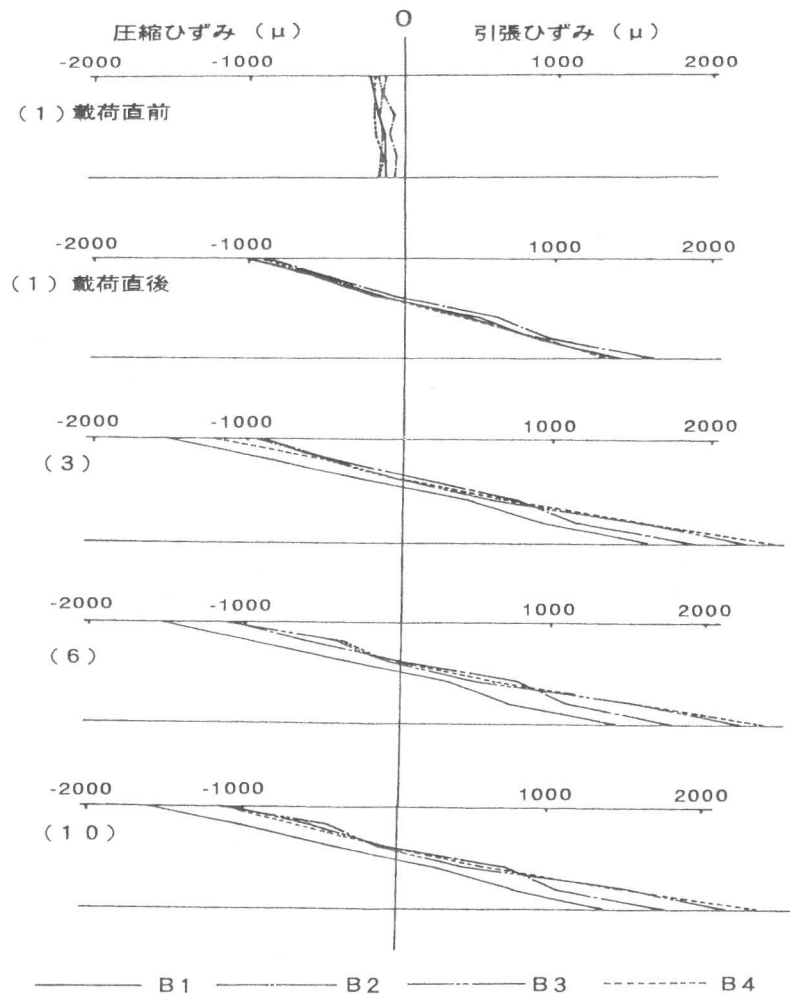


図-4 コンクリートおよび鉄筋のひずみの経時変化

4. 結果の解析

4. 1 解析のモデルおよび計算手順

図-4よりわかるとおり、持続荷重を受けている状態でコンクリートのひずみは圧縮端から引張鉄筋の位置までは平面保持則をほぼ満足している。このことを考慮し、図-5に示すようなモデルを設定し解析を行った。図に示すように、全ひずみは、初期弾性ひずみ、クリープひずみおよびASRによるひずみが加算されたものと仮定した。なお、B1の場合のようにASRよりも乾燥収縮が卓越する場合は、ASRによる膨張ひずみが負値として算出されることになる。また、応力の計算に際してはコンクリートの引張応力は零と仮定した。また、ASRにより断面中央にはり軸方向の仮想的な集中荷

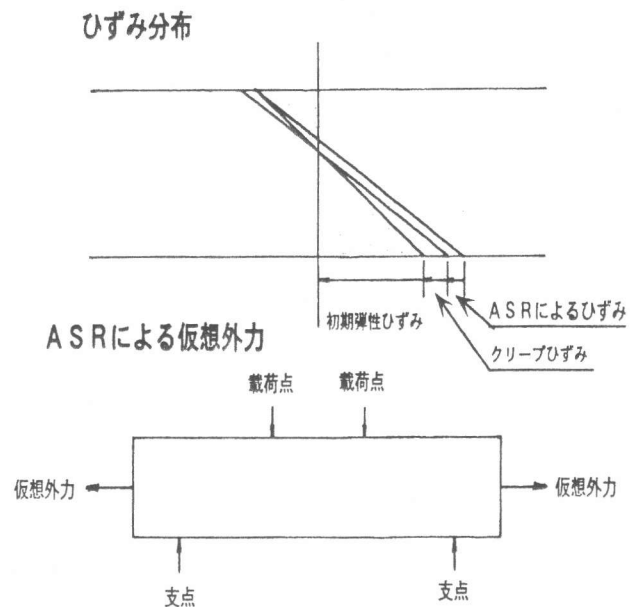


図-5 解析モデル

重が作用するものと仮定した。以後、この集中荷重を仮想外力と称する。なお、B1の場合は乾燥収縮による仮想圧縮力が作用するものとする。このモデルを仮定し、断面中心高さにおけるモーメントのつり合いより E_c （コンクリートの弾性係数）を計算し、それをもとにクリープ係数を求めた。なお、クリープ係数の算出にあたっては、 E_c の初期値として 23kN/mm^2 を用いた。次に、断面の軸方向力のつり合いより仮想外力を求め、さらにB1の場合は乾燥収縮ひずみを計算した。

4. 2 クリープ係数

図-6にクリープ係数の経時変化を示す。図中の暴露期間を示す(1)~(10)は図-2に示す番号と対応している。図中には、BS-8110および土木学会標準示方書[5]に従って計算した結果も併せて示す。なお、計算の際のB1の環境相対湿度を70% R.H.とし、B2、B3、B4の環境相対湿度を90% R.H.とした。図-6よりわかるとおり、クリープ係数はB1で2.0程度、B2で1.0程度となり、この両供試体はBSおよびJSにより算出した計算値とよく一致している。一方、B3およびB4の場合2.0~2.5となり計算値からも大きくかけ離れている。これより、B3およびB4においてはASRの影響によりコンクリートの弾性係数が大きく低下していること、一方、B2の場合表面被覆の効果によりASRによる弾性係数の低下が抑えられていることがわかる。

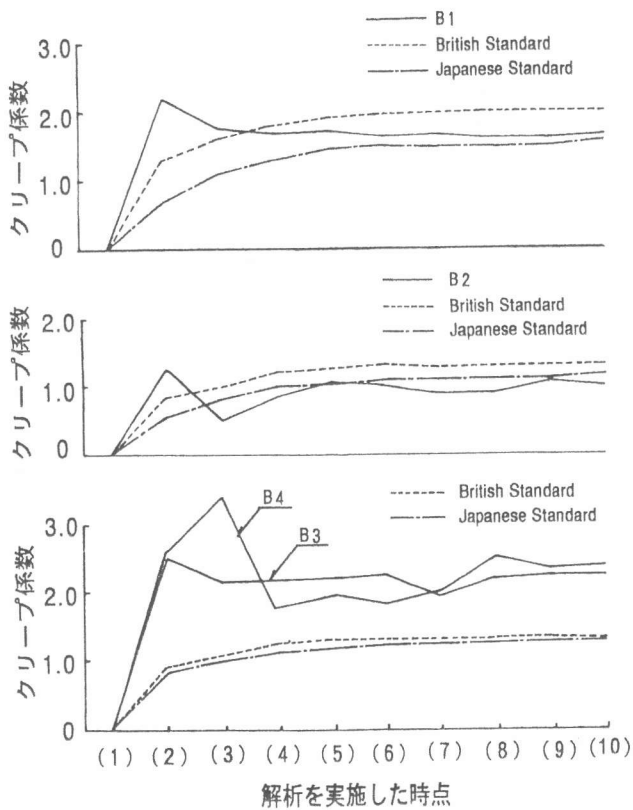


図-6 クリープ係数の経時変化

4. 3 乾燥収縮

図-7にB1の乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。BS-8110およびJS（標準示方書）による計算値も併せて示す。JSの場合は鉄筋拘束が考慮されているがBSでは考慮されていない。従って、BSによる計算値の方がJSのそれよりも値は大きくなっている。図よりわかるとおり、B1の収縮ひずみはこの両

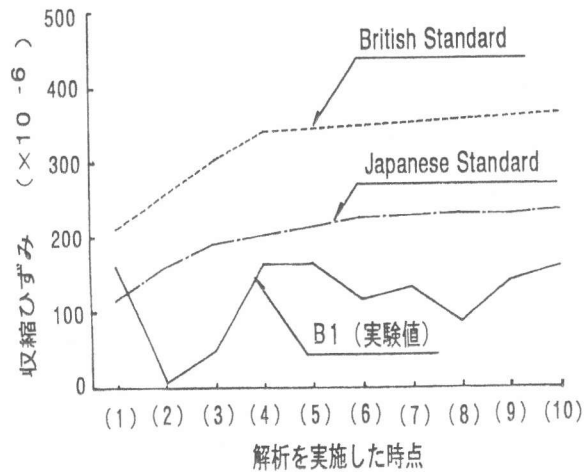


図-7 乾燥収縮ひずみの経時変化

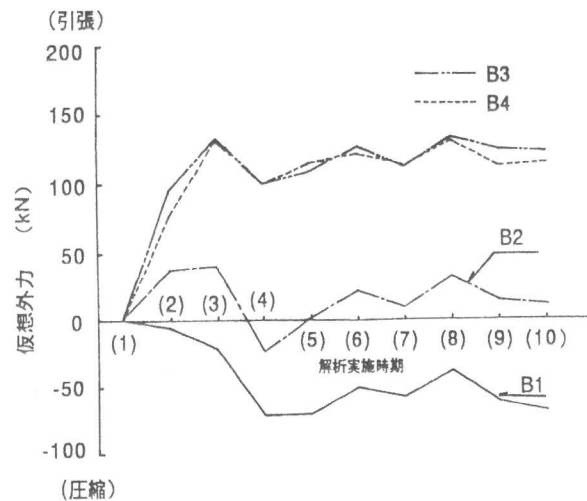


図-8 仮想外力の経時変化

計算値よりも小さくなっている。これは、B1が常時乾燥状態にあるものの、ASRの影響は皆無ではないためであり供試体内部ではASRによる膨張が生じているためである。

4. 4 仮想外力

図-8に仮想外力の経時変化を示す。外力の方向は、B2、B3、B4では引張方向、B1では圧縮方向である。B3、B4はほとんど等しい大きさの引張力となっており、B4に施された表面被覆の効果は全く認められない。これは、表面被覆を実施した時期が遅かったこと、ならびに供試体上面は被覆されておらずNaCl溶液の浸透を完全に止めることができなかつたことに起因する。一方、B2の場合引張方向外力が示されているものの、B3、B4に比べるとその大きさは極めて小さく表面被覆の効果を明確に認めることができる。

5. 結論

上記の実験より得られた結論を以下に示す。

1. ASRの影響を受けているコンクリートでは、比較的初期の材令時（この場合50日前後）において既に弾性係数が低下していることがある。
2. 曲げ載荷時のRCはりにおいてASRが発生するとコンクリートの引張ひずみおよび引張鉄筋のひずみが増大し、中立軸が圧縮側にシフトする。
3. ASRが生じたコンクリートにおいては、弾性係数の低下（クリープ係数の増大）が生じる。また、はり軸方向に引張仮想外力が発生する。
4. 早期材令でコンクリートに表面被覆を施すことによりASRの影響を抑制することができる。具体的には、コンクリートの弾性係数の低下（クリープ係数の増大）を抑制し、かつ仮想外力を低レベルに抑制する。
5. 同一の材料を用いてコンクリートの表面被覆を実施しても、その時期、あるいは方法（全面被覆あるいは部分被覆、等）が異なるとASRの抑制効果も異なる。
6. コンクリートが常時乾燥環境下（70%R. H.）にある場合でも内部においてはASRが発生し膨張ひずみが生じている。その大きさは、コンクリートが湿潤環境下にある場合よりも小さい。

6. 謝辞

本研究を実施するに際し、N. Morton氏、A. Smart氏（Sheffield大学技術員）の多大なるご協力を得ました。また、本研究の取りかかりはJaw-Chang Laiw氏（交通部台湾区国道新建工程局）によるものであり、材令10ヶ月以降著者の一人が実験業務を引き継ぎました。従って、本文中のデータの一部は氏の博士論文[6]と重複していることをここに明記して、氏に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、山田昌郎・魚本健人：アルカリ骨材反応が生じた鉄筋コンクリート梁の変形と耐荷重性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、12-1、1993
- 2) 例えば、小柳洽・六郷恵哲・内田裕市・長瀬道雄：著しいAAR損傷を生じたRCはりの挙動、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 1、1993
- 3) R. Narayan Swamy and M. M. Al-Asali : Expansion of Concrete Due to Alkali-silica Reaction, ACI Materials Journal / January-February 1988
- 4) R. N. Swamy and M. M. Al-Asali : Engineering Properties of Concrete Affected by Alkali Silica Reaction, ACI Materials Journal / September-October 1988
- 5) コンクリート標準示方書（設計編）、土木学会、昭和61年
- 6) Jaw-Chang Laiw : Structural Integrity and Protection of Concrete Related to Chloride Penetration and ASR, Thesis submitted to the University of Sheffield for the Degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering, August 1992