

論文 沖縄における 13 年間の暴露実験による鉄筋コンクリートの塩害劣化に関する検討

松村 卓郎*1・西内 達雄*2

要旨: 沖縄県および関東地方の材料を使用した鉄筋コンクリートはり部材を沖縄県の海岸において 13 年間暴露し、塩化物イオン濃度、鉄筋の腐食量などを経年的に測定するとともに、載荷実験により耐荷性状を評価した。その結果、塩化物イオンの拡散係数に使用材料の相違の影響は認められず、また、はり部材の耐荷力は、使用材料に係わらず、経年的な鉄筋の腐食による断面欠損の増大に応じて低下し、引張鉄筋の本数の少ないはり部材の方が、低下の程度は大きかった。

キーワード: 塩害、鉄筋腐食、暴露実験、耐荷力、塩化物イオン、拡散係数

1. はじめに

沖縄地方は、鉄筋コンクリート構造物の塩害が生じやすい地域として知られている。このことには、高温多湿の気候、地形的に島全体に塩分が飛来し易い、台風の接近頻度が高いなど、いくつかの環境的な原因が指摘されている¹⁾。一方で、沖縄地方のコンクリート構造物には、現地で産出、製造される材料が使用されることが多く、これらの材料的な要因が塩害劣化を促進させている可能性も否定できない。また、近年、塩害に関する研究が数多く行われ²⁾、塩害による劣化の評価も可能になりつつあるが、鉄筋腐食の程度と耐荷性能の関係については、定量的な評価が難しいのが現状である。

本研究では、沖縄産材料（以降、沖縄材料）と関東地方産材料（以降、関東材料）を使用した鉄筋コンクリートはり試験体約 40 体他を最長 13 年間（沖縄材料は 12 年間）、沖縄の海岸付近に暴露した。コンクリートの強度特性、塩化物イオン濃度、鉄筋の腐食量などを経年的に測定するとともに、載荷実験により耐荷性状を評価した。また、使用材料の相違が鉄筋コンクリートの塩害の経年変化に与える影響も併せて検討した。

2. 暴露実験の概要

2.1 試験体および暴露場所

(1) 試験体の仕様

試験体は、はり試験体 A, B の 2 種類、圧縮強度試験体、割裂強度試験体、モニタリング試験体の計 5 種類である。はり試験体 A, B およびモニタリング試験体の形状、寸法を図-1 に示す。はり試験体 A は、曲げ破壊特性に及ぼす鉄筋腐食の影響を把握するための載荷実験に用いる。主筋は D13 鉄筋で、圧縮側および引張側に 2 本ずつ配置し、試験体中央 50cm 区間以外には、10cm 間隔で D6 鉄筋のせん断補強筋を配置した。かぶりは主鉄筋 15mm、せん断補強筋 9mm である。はり試験体 B は、試

験体のせん断区間に配置したせん断補強筋が鉄筋腐食を生じた場合、試験体の破壊形態に及ぼす影響を把握するための載荷実験に用いる。主筋は D13 鉄筋で、圧縮側に 2 本、引張側に 4 本配置し、試験体中央 29cm 区間以外には、18cm 間隔で D6 鉄筋のせん断補強筋を配置した。はり試験体の断面設計において、曲げ耐力がせん断耐力の約 90% となるように両者を近接させた。かぶりは主鉄筋 15mm、せん断補強筋 9mm である。圧縮強度試験体は、直径 100mm、高さ 200mm、割裂強度試験体は、直径 150mm、高さ 200mm の円柱である。モニタリング試験体は、コンクリート中に浸透した塩化物イオン量とコンクリートの中性化深さの測定に用いる。試験体両端部に

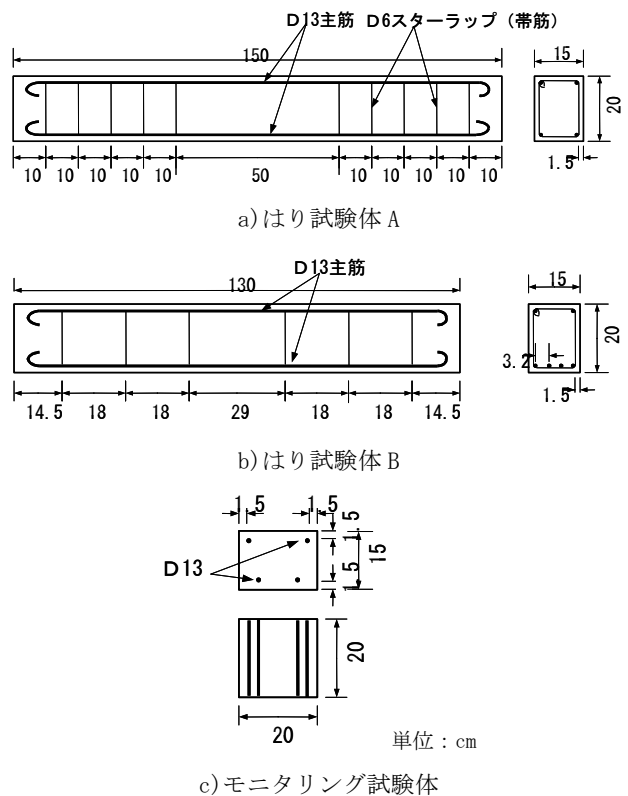


図-1 試験体の形状・寸法

*1 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 上席研究員 工博 (正会員)

*2 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 主任研究員 工博 (正会員)

表-1 試験体に用いたコンクリートの配合

	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単用量 (kg/m ³) ※混和剤は AE 減水剤				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
沖縄材料	13	10±2	4±1	54	42	179	330	739	1053	0.825
関東材料	13	10±2	4±1	54	42	179	330	737	1038	0.825

は塩化物イオンの浸透を遮断するようにタールエポキシが塗布されている。全ての試験体は、打設1日後に脱型し、4週間の水中養生(20℃)の後、4週間の湿空養生(室温)を行った。

(2) コンクリートの配合および使用材料

使用したコンクリートの配合を表-1に示す。水セメント比は54%、単位セメント量は330kgとした。沖縄材料のコンクリートおよび鉄筋は、沖縄県で一般流通、使用されている材料とした。セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。鉄筋は、SD295を使用した。沖縄材料の細骨材は、沖縄県新川産の海砂(粗粒率2.27)と沖縄県本部産の砕砂(石灰石、粗粒率3.30)を重量比で6:4に混合して使用した。混合後の細骨材の密度は2.62g/cm³、粗粒率は2.68である。沖縄材料の粗骨材は、沖縄県本部産の砕石(石灰石)を使用した。密度は2.70g/cm³である。関東材料の細骨材は利根川鹿島産の川砂を使用した。細骨材の密度は2.64g/cm³、粗粒率は2.64である。関東材料の粗骨材は、粗骨材は埼玉県秩父産の砕石を使用した。密度は2.69g/cm³である。

(3) 暴露場所

暴露場所は、沖縄県うるま市の火力発電所構内である。発電所は入り江の奥にあるため、通常の波浪は比較的小さい。暴露場所は護岸の内側であり、通常は直接海水には接しないが、台風などの接近時には波しぶきが掛かることがある。年平均気温、湿度(那覇)はそれぞれ約22℃、76%である。試験体の設置状況を図-2に、暴露場所の概要を図-3にそれぞれ示す。試験体の上下方向の向きは図-1と同じである。なお、沖縄材料の試験体については、試験体を室内に保管(以降、室内保管)した。

2.2 試験項目および方法

(1) コンクリートの強度試験

圧縮強度試験体、割裂強度試験体の荷重試験を行い、コンクリートの圧縮強度、ヤング係数、ならびに引張強度を測定した。

(2) 塩化物イオン濃度および中性化深さ測定

コンクリート中の塩化物イオン濃度の測定では、図-4に示すように、モニタリング試験体の中央部10cm区間を切り出し、その切り出した部分を表面から5mm厚さでスライスして分析用試料とした。測定は、「コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)」³⁾の「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易

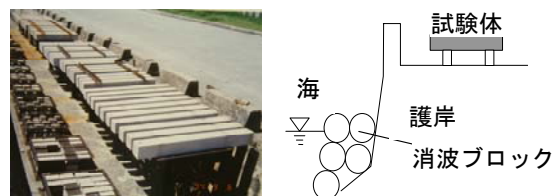


図-2 試験体の設置状況 図-3 暴露場所の概要

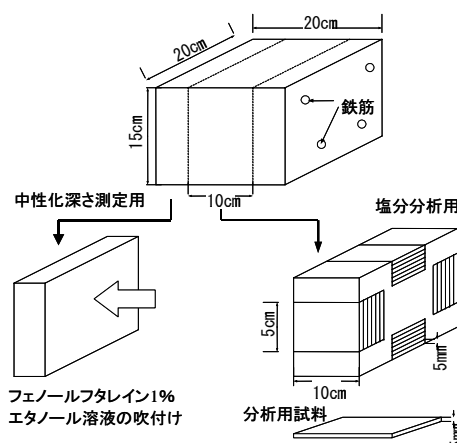


図-4 塩化物イオン濃度、中性化深さ測定の試料

分析方法(JCI-SC5)”に従って実施した。コンクリートの中性化深さの測定は、図-4に示すように、モニタリング試験体の中央部10cm区間を切断した後に除外し、残った試験片の切断面にフェノールフタレイン1%エタノール溶液を噴霧し、非変色深さを測定した。測定は各面に対して3点行い、その平均値を面の中性化深さとした。

(3) はり試験体の荷重試験

荷重は2点荷重とした。荷重および計測位置を図-5に示す。また、荷重試験の後には、試験体内部の鉄筋を取り出して腐食量を測定した。腐食量の測定方法は、「コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)」³⁾に準拠し、60℃のクエン酸二アンモニウム10%溶液に鉄筋を一昼夜浸漬して、質量減少を測定して求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの強度特性

コンクリートの強度特性値の経年変化を図-6に示す。沖縄材料および関東材料試験体とも、暴露材齢1年までは圧縮強度、引張強度、ヤング係数とも増大しているが、その後、増大傾向は緩やかとなり、暴露材齢12~13年ではほぼ一定値に収束する傾向が認められる。沖縄材料試験体の室内保管12年は、暴露材齢1年のものと比べ

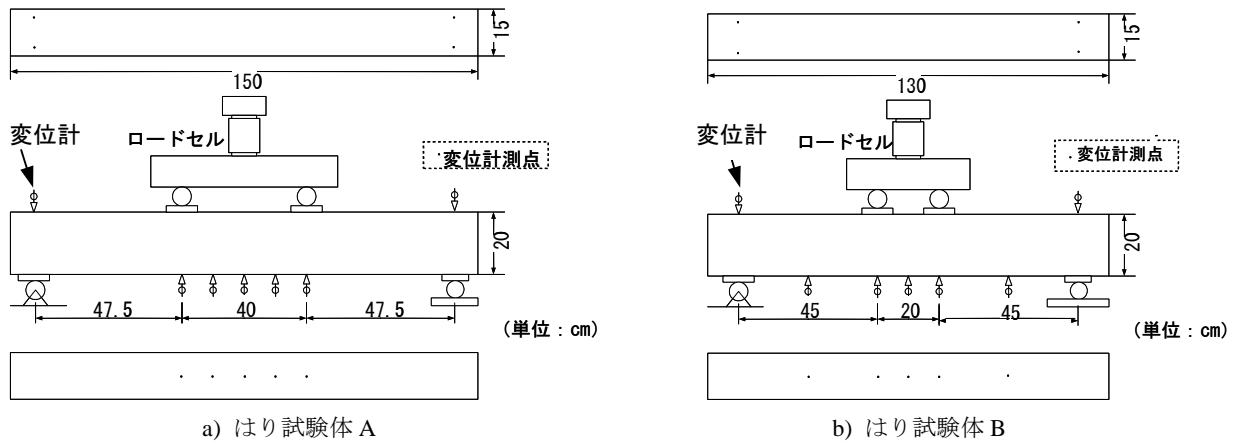


図-5 荷重および計測位置

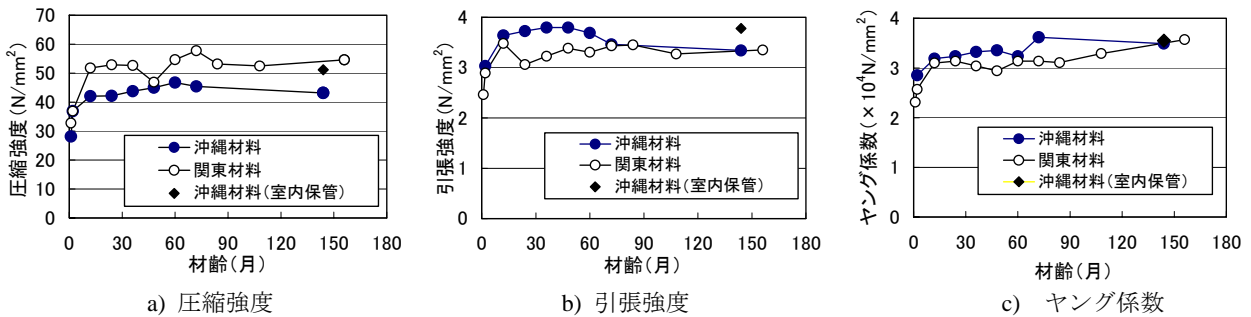


図-6 コンクリートの強度特性値の経年変化

て同等もしくは若干の増大が認められることから、室内保管では強度ならびにヤング係数の経年的な低下は生じないことがわかる。沖縄材料試験体で、暴露材齢 12 年と室内保管 12 年を比較した場合、ヤング係数に差は認められないが、圧縮強度と引張強度については、暴露していた試験体の方が室内保管のものに比べて約 20% 小さな値となっている。この差は、気温や湿度などの環境条件の差が影響していると考えられる。

3.2 塩化物イオン濃度および中性化深さ

塩化物イオン濃度の深さ方向分布の測定値を用いて、Fick の第 2 法則の解の式への最小自乗法による近似計算を行い、拡散係数および表面濃度を算出した。拡散係数と暴露材齢の関係を図-7 に示す。暴露材齢の影響は認められず、コンクリート標準示方書⁴⁾の拡散係数評価式がばらつきの大きいデータ⁵⁾から導出されている事実を踏まえると、沖縄材料と関東材料は同程度と見なせる。また、表面塩化物イオン濃度と暴露材齢の関係を図-8 に示す。暴露材齢の影響は認められず、関東材料と沖縄材料で大きな違いはない。コンクリート標準示方書⁴⁾によると、暴露場所は海岸からの距離が 0.1km 未満であり、表面塩化物イオン濃度は 4.5~9.0kg/m³ の範囲である。沖縄材料、関東材料ともに概ねこの範囲であり、両者に差異はないと考えられる。一方、中性化深さは最大で 6mm 程度であり、材料による違いは認められなかった。

3.3 はり試験体の耐荷性状

(1) ひび割れ性状

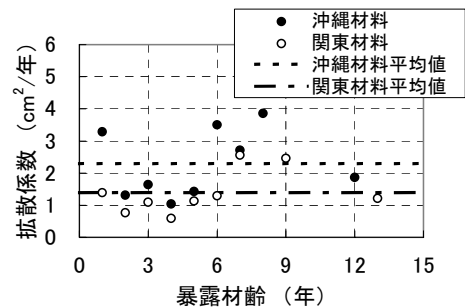


図-7 塩化物イオン拡散係数と暴露期間の関係

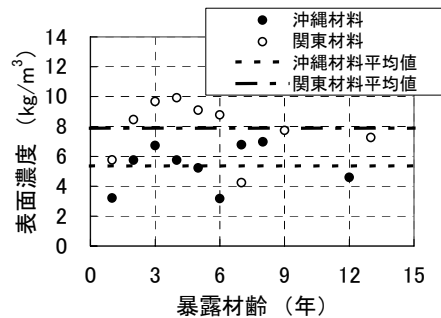


図-8 表面塩化物イオン濃度と暴露期間の関係

はり試験体 A とはり試験体 B の試験体側面の鉄筋腐食によるひび割れ状況例を荷重実験により生じたひび割れも含めて、それぞれ図-9 と図-10 に示す。鉄筋腐食に伴うひび割れが主鉄筋に沿う方向で試験体側面ならびに上下面に認められた。ひび割れ幅は、全般的に 1mm 前後のものが多く認められ、暴露材齢 12 年（関東材料では 13 年）において約 1.5mm であった。

荷重によるひび割れは、はり試験体 A では、暴露材齢 5 年以降、ひび割れの発生間隔が等間隔ではなくなっており、ひび割れ本数も、暴露材齢の短い試験体のもと比べて少なくなっていた。この原因として、暴露材齢 5 年以降では、鉄筋腐食に伴うひびわれが試験体引張縁近傍のコンクリート表面に顕著に認められ、引張側鉄筋の腐食に伴いコンクリートと鉄筋との付着性能が低下し、ひび割れの分散性が低下したと推測される。関東材料、沖縄材料ともに、同様の傾向が認められ、材料の違いによる差は認められなかった。

はり試験体 B では、試験体中央部には曲げひび割れが、支点と荷重点間のせん断区間には斜めひび割れが発生している。図には示していないが、はり試験体 A と同様に、暴露材齢 5 年以降、ひび割れの発生は不等間隔になる傾向が認められた。ひび割れ本数も、暴露材齢の短い試験体のもと比べて少なくなる傾向があった。暴露材齢 6 年の試験体は、せん断区間に発生した斜めひび割れの伸展により、最終的にせん断破壊を生じた。せん断補強筋が最大 11% の断面欠損を生じていたため、これらの影響によりせん断破壊が生じたものと考えられる。暴露材齢 6 年の試験体を除いて、最終的に試験体中央部の曲げひび割れがコンクリートの圧縮縁まで到達して、圧縮縁コンクリートが圧壊した。松尾らは、引張鉄筋が腐食して、鉄筋とコンクリートとの付着性能が低下すると、せん断スパン間で平面保持が保たれず、引張鉄筋より上部のコンクリートでアーチ機構を形成する可能性があることを報告している⁹⁾。この結果として、せん断耐力におけるコンクリート分担力が増加したことも一因であると考えられる。一方、室内保管 12 年のはり試験体 B のひび割れ性状は、暴露前の試験体のもとと大差ない。ただし、暴露材齢 6 年の試験体と同じくせん断破壊を生じた。この原因の一つとして、はり試験体 B の断面設計において、曲げ耐力とせん断耐力は近接しており、せん断耐力のバラツキの範囲に含まれたと考えられる。

(2) 鉄筋の腐食量

はり試験体 A の引張側と圧縮側の主筋 4 本の腐食量は、沖縄材料 12 年、関東材料 13 年でそれぞれ 173～448mg/cm²、41～539mg/cm²であり、ほぼ同程度であった。はり試験体 B の引張側と圧縮側の主筋 6 本の腐食量は、沖縄材料 12 年、関東材料 13 年で、それぞれ 200～334mg/cm²、121～430mg/cm²であり、せん断補強筋については、両者ともに 50～180mg/cm² の範囲の腐食量であり、同程度であった。また、腐食量の最大は等モーメント区間の引張側鉄筋で生じていた。この理由は明らかではないが、試験体の移動や設置時に微細な曲げひび割れが生じていた可能性も考えられる。

(3) はり試験体 A の変形状

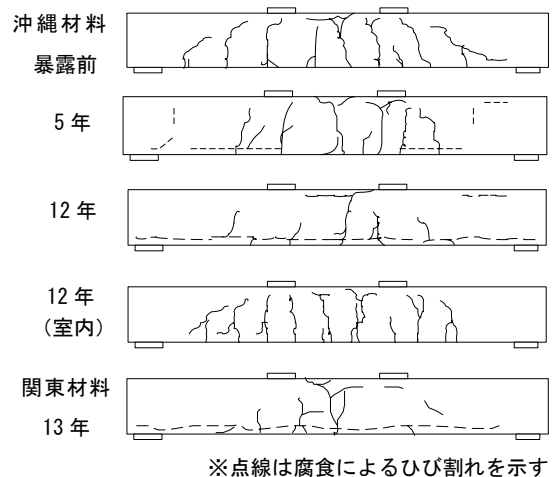


図-9 はり試験体 A のひび割れ状況の例

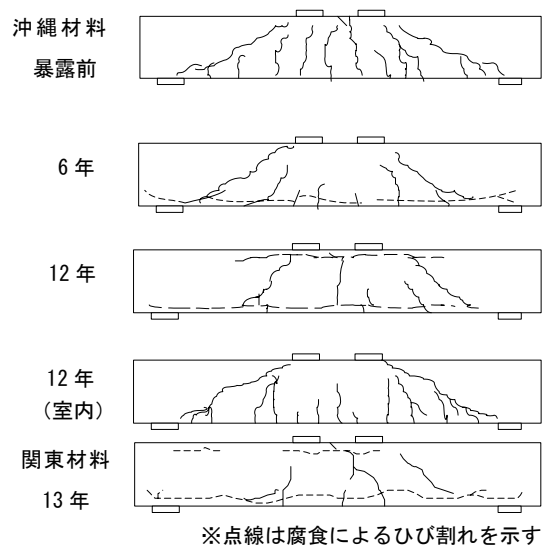


図-10 はり試験体 B のひび割れ状況の例

はり試験体 A の荷重実験から得られた、等モーメント区間内の曲げモーメントと曲率との関係を図-11 に示す。曲率は、試験体の荷重点間（等モーメント区間）下面で計測した変位を用いて、最小二乗法による近似で曲率半径を求め、その逆数としたものである。沖縄材料の試験体の曲げひび割れ発生までの初期剛性（全断面剛性）は、暴露材齢の経過に伴う変化は認められないが、降伏時の剛性（ひび割れ断面剛性）は、暴露材齢の経過に伴い若干低下する傾向を示した。このような傾向は、関東材料試験体においても同様に認められた。また、試験体の破壊が認められたのは、一部の暴露材齢での試験体を除いて曲率が $1000 \sim 1300 \times 10^{-6} (1/cm)$ の時であり、試験体の圧縮部でコンクリートの圧壊が確認された。圧壊時の曲率について、暴露前と室内保管 12 年では同じ値であることから、経年的な影響を受けていないと考えられる。関東材料試験体では、暴露材齢 13 年を除いて圧壊時の曲率は $1500 \sim 2700 \times 10^{-6} (1/cm)$ であり、沖縄材料試験体での破壊時の曲率よりも大きい。そして、暴露材齢

9年までは、経年的な破壊時の曲率の変化は認められないが、暴露材齢13年の曲率は、それ以前の暴露材齢のものよりも小さく、沖縄材料試験体の暴露12年の曲率と同程度の値であった。

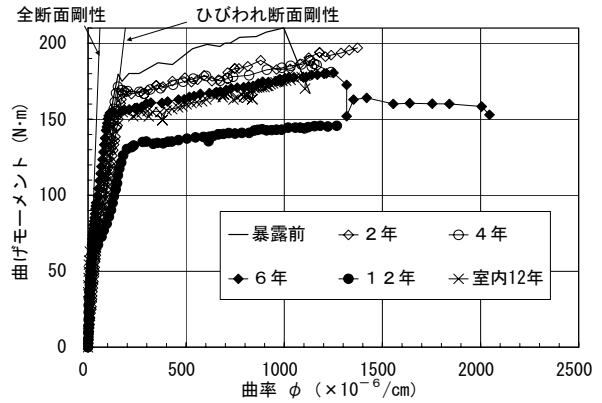
靱性率の経年変化を図-12に示す。靱性率の定義は図中に示したとおり、終局時の曲率と、降伏時の曲率の比率である。沖縄材料試験体の靱性率は、関東材料試験体のものよりも小さい傾向にある。はり試験体が曲げ引張破壊を起こす際の終局変位は、圧縮縁コンクリートのひずみ能力に依存することから、圧縮破壊時のひずみが関東材料に比較して沖縄材料の方が小さい可能性がある。沖縄材料試験体では、暴露材齢の経過に係わらず概ね6~10の値を示し、経年変化は認められない。しかし、関東材料試験体では、暴露材齢の経過と共に徐々に小さくなる傾向が認められる。コンクリートの強度とヤング係数には経年変化が認められていないことから、鉄筋腐食によるひび割れや鉄筋とコンクリートとの付着切れなどによる影響を受けたものと推測される。

(4) はり試験体Aの曲げ耐力

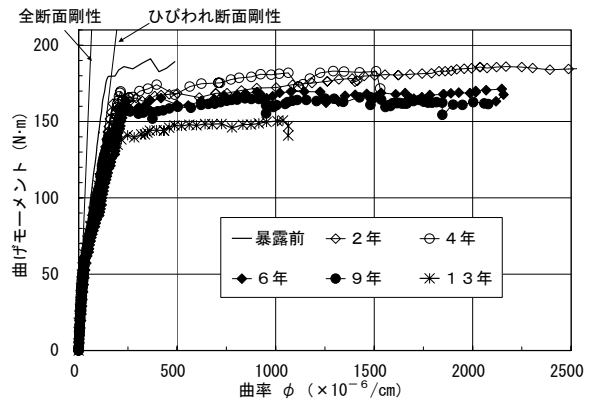
暴露前の健全な試験体の曲げモーメントに対する比率（曲げモーメント比と称す）を図-13に示す。図中には、鉄筋の断面欠損率の平均値と最大値をそれぞれ反映させた曲げモーメント比の算定値も併せて記した。降伏時および終局時の曲げモーメント比は、暴露材齢の経過に伴い低下する傾向が認められ、材料による違いは認められない。暴露材齢12年における沖縄材料試験体の曲げモーメント比は約25%低下した。沖縄材料試験体の室内保管12年では、曲げモーメント比の低下は約10%であり、鉄筋腐食の影響を受けない試験体においても、経年的な曲げモーメント比は若干低下する傾向にある。一方、鉄筋の断面欠損を考慮した曲げモーメント比の算定結果によると、暴露材齢12年における沖縄材料試験体の曲げモーメント比は約10~20%の低下となる。これに対して、試験結果では約25%の低下を示し、試験結果は算定値よりも大きく低下している。はり試験体Aの引張側鉄筋は2本配筋されており、鉄筋間で腐食による断面欠損のバラツキが生じた時に、耐荷性状はその影響を受けやすいことが考えられる。すなわち、断面欠損に伴う鉄筋の延性、破断の局所化と、それによる引張強度の低下などの影響が顕著に現れたためと考えられる。

(5) はり試験体Bの終局耐力

暴露材齢6年と室内保管12年の試験体はせん断破壊を生じたことから、全暴露材齢の試験体を同一に評価するため終局耐力で評価した。終局耐力は、はり試験体Aと同様に、曲げモーメント比として評価した。結果を図-14に示す。同図中には、鉄筋の断面欠損率の平均値あるいは最大値を反映させた曲げモーメント比の算定値



a) 沖縄材料の経年変化



b) 関東材料の経年変化

図-11 曲げモーメントと曲率の関係

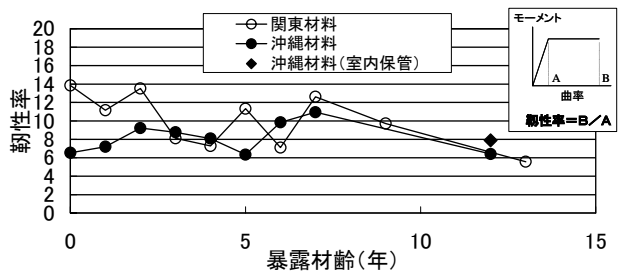


図-12 はり試験体Aの靱性率の経年変化

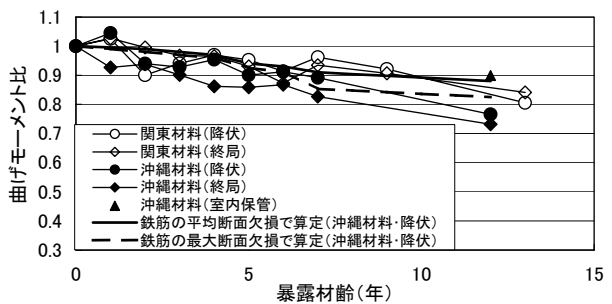


図-13 はり試験体Aの曲げモーメント比の経年変化

もそれぞれ示した。はり試験体Aと同様に、暴露材齢の経過に伴い、沖縄材料、関東材料試験体ともに終局時の曲げモーメント比は徐々に低下する傾向を示している。暴露材齢12年における沖縄材料試験体の曲げモーメント比は約10%の低下を示し、経年的な鉄筋の断面欠損を考慮した曲げモーメント比の算定結果と同程度である

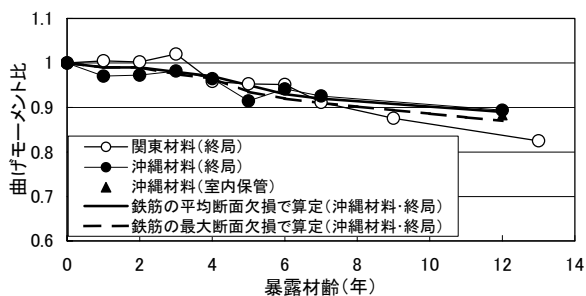


図-14 はり試験体 B の曲げモーメント比の経年変化

ことから、鉄筋の断面欠損に応じた耐力低下を生じていると考えられる。はり試験体 A と比べてはり試験体 B の耐力低下が小さい原因としては、はり試験体 B は引張側鉄筋の本数がはり試験体 A よりも多く、鉄筋間で腐食による断面欠損のバラツキが生じていても、その影響は全鉄筋で平均化されて小さくなっているためと考えられる。ここで、沖縄材料試験体で室内保管 12 年の曲げモーメント比は約 10% の低下を示し、同材料の暴露材齢 12 年のものと大差なく、鉄筋腐食による影響が現れていない。原因は明確でないが、鉄筋腐食の影響は試験値のバラツキの範囲内に含まれてしまったことが考えられる。

(6) 鉄筋の断面欠損と耐力の関係

はり試験体 A, B それぞれについて、等モーメント区間の引張側鉄筋の断面欠損率と耐力の関係を図-15 に示す。耐力は、暴露前の試験体の最大曲げモーメントを基準として、各暴露材齢における最大曲げモーメントの比率（以下、最大曲げモーメント比と称す）として示した。沖縄材料および関東材料のはり試験体 A, B とも、鉄筋の断面欠損率の増大と共に、最大曲げモーメント比は小さくなる傾向があり、材料の違いによる影響は小さい。傾向としては、はり試験体 A の方が、はり試験体 B よりも鉄筋の断面欠損率の増加に伴う最大曲げモーメント比の低下は大きい。図-15 に、はり試験体 A, B に対して、鉄筋の断面欠損率と最大曲げモーメント比の関係を線形回帰した結果を示す。これによれば、はり試験体 A では、鉄筋の断面欠損率 10% の低下に対して、最大曲げモーメント比は 23% 低下し、はり試験体 B では、鉄筋の断面欠損率 10% の低下に対して、最大曲げモーメント比は 12% 低下する結果となった。同図中には参考として、鉄筋の断面欠損を考慮した最大曲げモーメント比の低下曲線を示した。前述のとおり、はり試験体 B は鉄筋の断面欠損率にはほぼ応じた最大曲げモーメント比の低下となっているが、はり試験体 A は鉄筋の断面欠損率以上に最大曲げモーメント比は低下している。

4. まとめ

本研究で得られた知見は次のようにまとめられる。

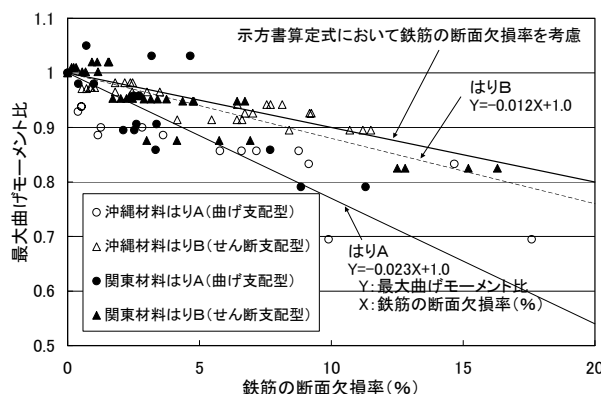


図-15 鉄筋の断面欠損率と耐力の関係

- (1) 沖縄材料のコンクリートの圧縮強度、引張強度、ヤング係数に経年的な低下傾向は認められなかったが、室内に保管したものと比較すると小さい場合があった。また、沖縄材料の塩化物イオンの拡散係数および表面濃度に、経年的な変化の傾向は認められなかった。関東材料もこれらの傾向は概ね同じであり、材料の相違による影響は認められなかった。
- (2) 沖縄材料のはり試験体の曲げ耐力は、腐食による経年的な鉄筋の断面欠損率の増大に応じて低下し、低下の度合いは、引張鉄筋の本数の少ない部材で大きい傾向にあった。関東材料もこれらの傾向は概ね同じであり、材料の相違による違いは無かった。引張鉄筋の本数の少ない部材で低下の度合いが大きい理由として、引張鉄筋の本数が少ない部材の方が、鉄筋間の腐食程度のバラツキの影響を受けやすいことが考えられた。

謝辞

本研究を実施するにあたり、沖縄電力（株）の方々には多大なるご協力を頂きました。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1) 小林茂敏：道路橋における被害の実態，コンクリート工学，Vol.25，No.11，pp.53-72，1987
- 2) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 40 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向（その 2），2000
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)，1987
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書「施工編」，2002
- 5) 土木学会：コンクリートライブラリー99 平成 11 年版コンクリート標準示方書「施工編」改訂資料，2000
- 6) 松尾豊史，酒井理哉，松村卓郎，金津努：鉄筋腐食した RC はり部材のせん断耐荷機構に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.15，No.2，pp.69-77，2004