

論文 AE法を用いた既設セメント系配管材の損傷度評価に関する実験的研究

伊藤 久也*1・鈴木 哲也*2・河野 英一*3・千代田 淳*4

要旨：既設パイプラインに用いられている配管材は、道路下などの常に外力を受ける条件下に埋設されることが多い。これらの配管材は、材質として様々なものがあるがセメント系配管材については、管材が不とう性管であり鋼管等のとう性管と比較して損傷特性が異なる。本論では、セメント系配管材の特徴を製造規格の変遷から概観し、材料損傷を含めた物性評価の問題点と課題を明らかにし、それらを既存の送水パイプラインから採取した石綿セメント管の破壊試験に AE 計測を導入し、実験的検討を行った結果を報告する。検討の結果、AEパラメータである Load 比と Calm 比の関係から材料損傷を評価できる可能性が示唆された。

キーワード：セメント系配管材、弾性波、AE、パイプライン損傷度、AEパラメータ

1. はじめに

ライフライン施設の維持管理の重要性が見直されることに伴いパイプライン等配管施設の構造的特性を踏まえた非破壊検査技術の開発が急務な課題となっている。送水系パイプラインの構築には、材質の異なる各種管材が埋設に関わる供用条件、使用内水圧および建設に関わる工事費を検討した上で選定・適用されてきた。本論の対象であるセメント系配管材は、配管構造と埋設環境、材料特性が密接に関連しており、近年機能低下が各地で確認されている¹⁾。

既設パイプラインの構造的特徴は、配管システムが道路や耕地等の地中に埋設され、目視が困難なことにある。特に上水道や農業用水の場合、一般車道下に埋設されていることが多く、長期間にわたり衝撃荷重を受けている。セメント系配管材は、金属材料と比較して靱性や延性が低く、破壊エネルギーが低い段階でも脆性破壊を引き起こすことから、既設パイプラインの安全性を評価する場合、供用中の配管材に関する損傷度を定量的に評価する必要がある。筆者らは、弾性波を利用した材料損傷の定量化と配管内流況の評価技術の開発を試みており、近年までに、AE(Acoustic Emission : AE)法を用いて配管材の材料損傷の定量化と漏水現象を含む流況評価、補修後水密性能評価法の開発を行っている^{2),3),4),5)}。

本論では、セメント系配管材の特徴を製造規格の変遷から概観し、材料損傷を含めた物性評価の問題点と課題を明らかにし、それらを既存の送水パイプラインから採取した石綿セメント管の破壊試験に AE 計測を導入し、実験的検討を行った結果を報告する。

本論の構成は、第2節でセメント系配管材の損傷実態

とその評価手法を管種別に概観し、現状の問題点と課題を明らかにする。第3節では、既存施設より採取した石綿セメント管を用いて AE パラメータによる損傷度評価を試みた結果を報告し、第4節では、第2節と第3節で明らかになった課題を検討する。以上のまとめを第5節とする。

2. セメント系配管材の損傷実態と評価

2.1 セメント系配管材の種類と規格の変遷

セメント系配管材には、水道用石綿セメント管(ACP)、遠心力鉄筋コンクリート管(RC管)、コア式プレストレストコンクリート管(PC管)が挙げられる。本項では、各管種の製造方法と損傷特性を概観し、その評価診断の現状における課題を明らかにした。

(1) 水道用石綿セメント管(ACP)

石綿繊維とセメント及び微粉の硅砂を原料とし、製造はこれに適量の水を加えて十分攪拌し製管機にかけて製造したものであり、構造は均等緻密で高圧に耐えるが衝撃による外圧に弱い特徴がある。1932年に国内で製造が開始され、高度成長期の1955年～1965年頃をピークに使用された。その後、強度の問題から順次布設替が進められ、全国的な需要の減少により1985年に製造が停止されている。

(2) 遠心力鉄筋コンクリート管(RC管)

製造方法は、鉄筋かごを入れた鋼製型枠を成型機の上で回転させ、コンクリートを遠心力によって型枠内面に圧着し管が成形される。構造は、コンクリート自身の引張強度を利用したもので材料特性上、強度は他管種と比べて小さく、管厚を厚くしない限り鉄筋を増しても外圧

*1 (株)日本水工コンサルタント 名古屋事務所技術部長 (正会員)

*2 日本大学 生物資源科学部 生物環境工学科専任講師 博士(工学) (正会員)

*3 日本大学 生物資源科学部 生物環境工学科教授 農博

*4 (株)日本水工コンサルタント 本社技術部課長

強度は、あまり上がらないので外圧荷重が大きいところではコンクリート巻立てを施して使用されている。圧力管としては比較的、低圧なものに限られている。歴史は古くすでに半世紀に渡って使用され続けており、1950～1960年代においては圧力管として発展してきたが現在では、下水道を始めとする一般排水路の需要が主体となっている。

(3) コア式プレストレストコンクリート管(PC管)

1960年ごろから国内で生産され、主に内圧管は農業用水、工業用水の圧送管として、外圧管は高速道路や林道などの高盛土下の排水管として使用されている。構造はプレストレストコンクリートの理論をパイプに応用したものでPC鋼線の高張力と高品質のコンクリートの圧縮強度を巧みに組み合わせた合理的な管である。製造工程はパイプの主体であるコンクリートコア製造とコアのプレストレスングおよびカバーコーティングの2段階に分かれる。成形されたコアパイプはPC鋼線を円周方向に一定の張力で所定の間隔で巻き付け、その外周面に一様の厚さにモルタルを吹き付けた後、養生され完成となる。

2.2 主な損傷の現状と評価方法

(1) 共通要因と評価方法

主な損傷要因としては、設計荷重に対する外力の増加が要因と推察されると共に、構造特性としてセメント系配管材では、たわみを許容しない不とう性管であるため、外力の変化による影響が継手部に生じやすく、継手部の漏水が多く見られる。また、劣化に関しては天然ゴムを使用した止水ゴムがバクテリア食害や経年劣化によるゴムの硬化による水密性の低下が挙げられる。管体面の劣化としては、酸性土壌や遊離炭酸の多い地下水の影響により中性化し管厚の減少による強度の低下が見られ、この評価には中性化試験(JISK8001)が採用されている⁶⁾。

(2) 管種別要因と評価方法

水道用石綿セメント管の主な劣化としては、共通要因にある埋設条件を要因とした中性化に加えて比重の低下による強度の低下が考えられる。損傷に関しては、外力の変化による荷重増や繰り返し荷重によるマイクロクラックの発生・増加による強度の低下が考えられる。これらの評価には管体強度試験として曲げ試験(旧JISK5301)、水圧破裂試験(JISK6742)、環片圧壊試験(旧JISK5301)があり、その他に中性化試験のほか比重及び吸水率試験(JISA1110)、が行われている⁶⁾。

遠心力鉄筋コンクリート管の主な損傷としては、設計荷重に対する外力の増加が主要因と推察される、ひび割れの損傷がある。これらの評価には外圧試験(JISA5372、JISA5373)、内圧試験(JISA5372、JISA5373)があり、埋設環境により中性化が進展した劣化による鉄筋腐食調査

等がある。

コア式プレストレストコンクリート管の主な損傷としては外力の変化による影響が継手部に生じやすく、継手部からの漏水によりカバーコートが洗掘されPC鋼線がむき出しとなりPC鋼線の腐食から破断に至り管体が損傷を受ける(写真-1)。また、化学的要因としては、カバーコートモルタルが腐食性を有する土壌や地下水により、直接化学腐食を受けPC鋼線の腐食から破断に至り管体が損傷を受ける。これらの評価には管体強度試験として遠心力コンクリート管と同様な外圧試験、内圧試験がある。管体が置かれている環境として水質・土壌調査、試掘調査によるカバーコートモルタルをはつての中性化試験、PC鋼線腐食調査等がある。

2.3 問題点と課題

前節でも述べたが既設パイプラインの構造的特徴は、配管システムが道路や耕地等に埋設されて目視が困難なことにある。直接目視するには、内面の場合は管内排水が伴い、外面の場合は、掘削作業となり、特に費用負担が嵩む調査となっている。また、目視ができない場合も多く、パイプラインの有効な調査が求められており、近年ではPC管において、新たに非破壊調査手法を含めた調査・診断手法が提案されている⁷⁾。

セメント系配管材は、たわみを許容しないため外力の変化に弱い。試験では水圧試験や曲げ試験等で所要の強度確保を目的としている。筆者らは、施設の安全性を評価する場合は、破壊に至るまでの損傷度を定量的に評価する必要があると考え、次項に示すAE法による損傷度評価を試みた。

3. 実験概要および既設配管材の損傷度評価

第2節での検討を踏まえ、現状の調査診断法では、配管材の損傷を定量評価する問題が残されていると考えられる。そこで、既存施設として供用後32年経過した石綿セメント管を供試管として採取した。各破壊試験には、AE計測を導入し損傷度評価を試みた。



写真-1 漏水事故状況



写真-2 供試管採取状況



写真-3 曲げ载荷試験

3.1 実験対象・方法

(1) 実験対象施設

実験対象施設は、施工後 32 年供用された石綿セメント管 $\phi 600\text{mm}$ である(写真-2)。供試管の埋設条件としては、舗装された道路下で土被り 1.1m の位置に埋設されており、水理条件としては内水圧が管体に作用している条件下で使用されていた。実験は、全長 4.0m(管厚:30mm)の石綿セメント管を環片圧壊試験用 $L=1.0\text{m}$ 、曲げ試験用 $L=2.0\text{m}$ として分割したものをを用いた。試験に用いた供試管数は、環片圧壊試験 4 本および曲げ試験 2 本である。

(2) 破壊試験時の AE 計測方法

AE 計測は、石綿セメント管内面に共振型 AE センサを

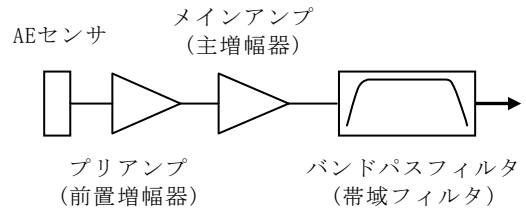


図-1 AE計測システム

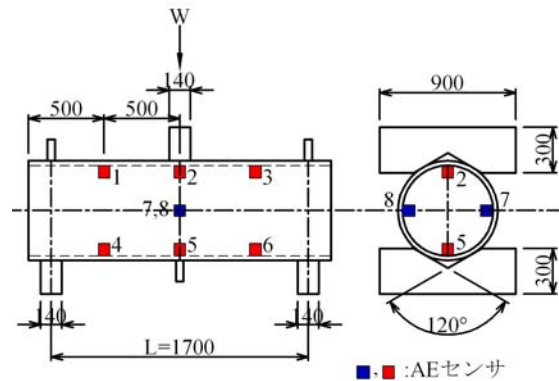


図-2 曲げ試験供試管でのAEセンサ設置状況

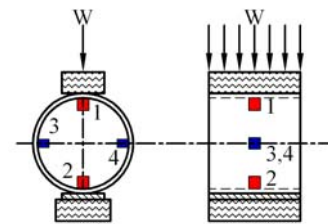


図-3 環片圧壊試験でのAEセンサ設置状況

設置し、環片圧壊試験で 4 箇所、曲げ試験で 8 箇所設置して行った(写真-3, 図-1~図-3)。計測装置は DISP-AE システム(PAC 社製)である。検出された AE 信号は、プリアンプ 40dB、メインアンプ 20dB の計 60dB で増幅した。計測結果の処理は、次項に示す NDIS2421(2000)⁸⁾を用いて検討した。

(3) NDIS2421(2000)⁸⁾

材料に応力を与え AE を発生させた後、除荷・再負荷した場合、これまで受けた応力に達するまで AE は、ほとんど観察されない。この不可逆現象をカイザー効果という。カイザー効果の定量化方法には、先行荷重 P_{1st} 、次回の载荷過程で AE が頻発し始めた荷重を P_{AE} としたとき式(1)により評価することができる。

$$\text{Felicity Ratio}(\text{FR}) = \frac{P_{AE}}{P_{1st}} \quad (1)$$

カイザー効果が存在する荷重レベルでは $\text{FR} \approx 1.0$ であり、内部が不安定な状態では $\text{FR} < 1.0$ となる。カイザー効果の存在は、構造材内部のクラックが進展する際にこれまで受けてきた荷重レベル以上の応力レベルから再進展

表-1 比重および吸水率試験の結果

項目	サンプルNo.1[上流側]-サンプルNo.2[下流側]平均値											
	管頂部	右頂部	右壁部	右底部	管底部	左底部	左壁部	左頂部	最小値	最大値	平均値	標準偏差
吸水重量:W _s [g]	75.15	70.41	69.68	71.16	67.24	66.66	63.05	73.74	58.97	83.80	69.64	3.93
水中重量:W _w [g]	39.39	37.24	36.66	37.71	35.49	34.89	33.39	38.67	31.52	44.35	36.68	2.00
乾燥重量:W _D [g]	65.69	61.81	61.15	63.43	59.50	58.05	55.86	64.61	52.50	74.37	61.26	3.35
表乾比重:D _s	2.10	2.11	2.12	2.13	2.12	2.10	2.13	2.10	2.08	2.15	2.11	0.01
絶乾比重:D _D	1.84	1.86	1.85	1.90	1.88	1.83	1.89	1.84	1.79	1.91	1.86	0.03
吸水率:Q [%]	14.39	13.91	13.92	12.20	13.01	14.83	12.84	14.38	11.84	16.08	13.69	0.91

が確認されることを意味している。よって、損傷が無く健全な部材では FR>1.0 となり、逆に損傷が進行した部材では FR<1.0 となることが推察される。カイザー効果の実構造物への適用には、既設橋梁などの例があり、その有効性は確認されている⁹⁾。NDIS2421(2000)⁸⁾では、カイザー効果を考慮した AE パラメータである Load 比と Calm 比が提案されており、Load 比の算定式は式(2)であり、Calm 比は式(3)のとおりである。この 2 つのパラメータを組み合わせることにより図-4 に示す損傷度評価が可能となる。

$$\text{Load比} = \frac{A}{B} \quad (2)$$

$$\text{Calm比} = \frac{C}{D} \quad (3)$$

- A: 漸増繰り返し載荷のサイクル中に AE 発生が観測された荷重
- B: それ以前の履歴荷重
- C: 除荷時に計数された AE 発生数
- D: 履歴のサイクル中に計数された AE 発生数

3.2 結果および考察

(1) 物性値評価

供試管の物性値は、強度試験に加えて、比重・吸水率試験および中性化試験(1%フェノールフタレイン溶液)を行った。その結果、供試管の中性化深さは、管厚 26~31.5mm に対して 0.0~4.0mm(中性化率 0~13.3%)であった。比重・吸水率試験は、JIS A 1110(粗骨材の比重および吸水率試験方法)に準じて実施した。その結果、表乾比重 2.08~2.15、絶乾比重 1.79~1.91 および吸水率 11.84

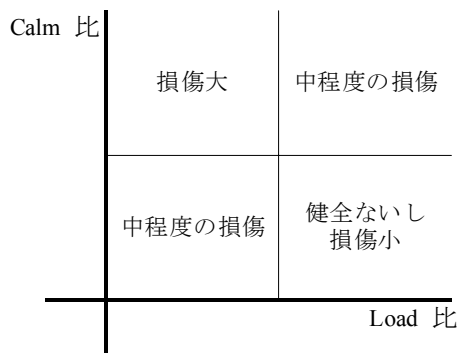


図-4 Load 比と Calm 比の関係⁸⁾

~16.08%を示した(表-1)。

供試管の力学特性は、環片圧壊試験において最大荷重 25.6~72.2kN と試験値に相違が顕著になり、平均値 55.4kN が確認された。強度特性の観点からは、少数の供試管数による試験結果であることに加えて試験値の偏差が平均値の 54%と大きいことから、単純に損傷度を評価することは困難である。曲げ試験では、環片圧壊試験とは異なり 201~227kN を示し、試験値は類似値となった。そこで、本論では最大荷重の試験値が類似した曲げ試験結果を用いて AE パラメータによる評価を試みた。

(2) AE パラメータを用いた損傷度評価

供試管の破壊過程における AE 発生挙動は、破壊面近傍とそれ以外の部位とは、明らかに異なる傾向が確認された。図-5 および図-6 は、曲げ試験における応力-時間曲線と AE 発生挙動との関係を示したものである。AE 発生挙動の部位による相違は、試験方法(環片圧壊

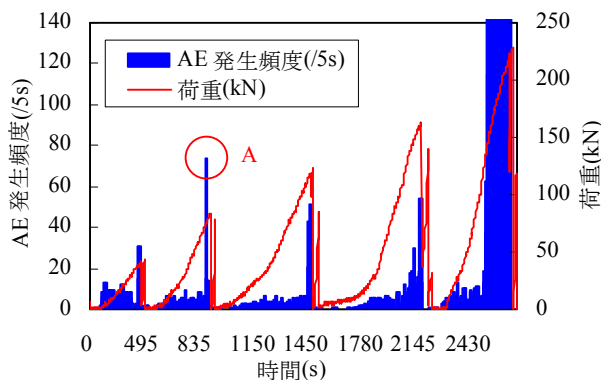


図-5 繰り返し曲げ載荷試験における AE 発生挙動

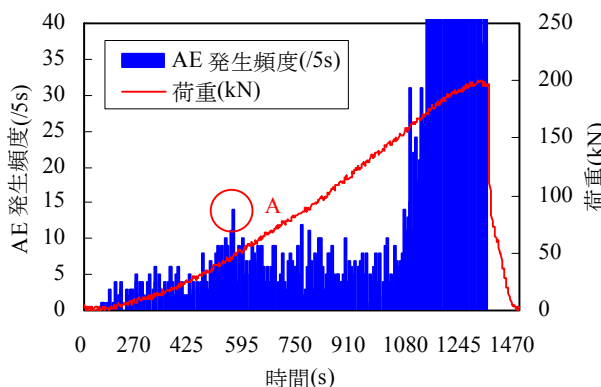


図-6 単純曲げ載荷試験における AE 発生挙動

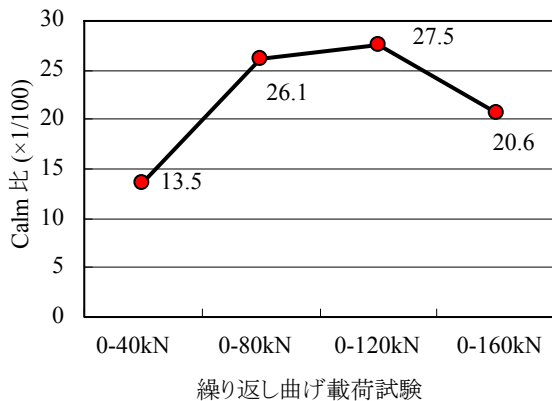


図-7 Calm比(繰返し曲げ载荷試験)

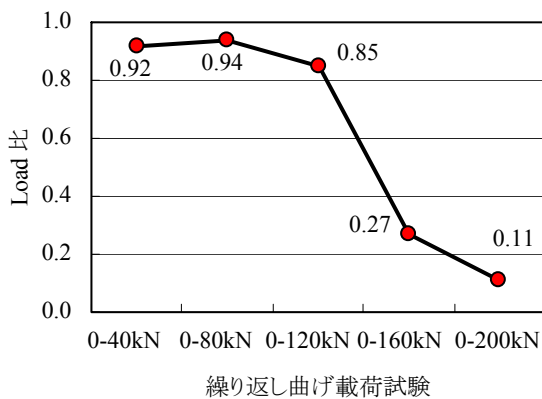


図-8 Load比(繰返し曲げ载荷試験)

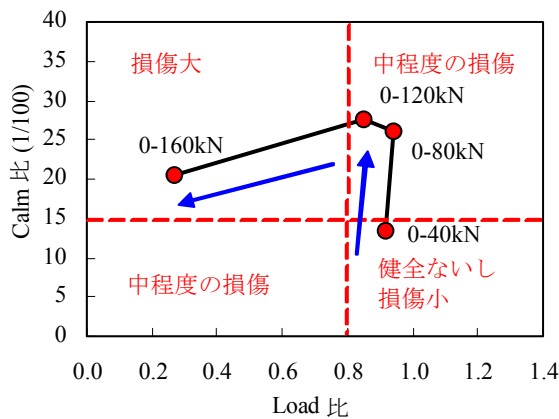


図-9 Load比とCalm比の関係

試験、曲げ試験)や载荷サイクル(単純载荷、繰返し载荷)に関わらず、いずれの試験においても明確に確認された。AE 発生挙動のみでは、既往のコンクリートコアによる破壊過程と類似な傾向が確認された¹⁰⁾。曲げ試験の破壊挙動は、せん断破壊が顕在化し、単純载荷においては44.5kNで高頻度のAEを確認した(図-6:A点)。繰返し载荷試験においても約40kN付近(=35.4N/mm²:曲げ強度)でAEの頻発を確認した(図-5:A点)。

(3) Load比とCalm比の関係に基づく損傷度評価

本論では、NDIS2421(2000)⁸⁾に規定されているLoad比とCalm比との関係を用いて供試管の損傷度評価を試みた。繰返し载荷とCalm比の関係を図-7に示す。これによりCalm比は、評価値が高いほど損傷が蓄積されていることを示し、Calm比が変化せずに荷重レベルのみが増加する場合は供試管のカイザー効果の安定性が低下していることを示す。繰返し载荷による曲げ試験の結果、0~80kN载荷と0~120kN载荷にCalm比の相違が無いことから、供試管は100kN(T-25自動車後輪荷重相当)程度でカイザー効果が消失しているものと考えられる。

Load比は、1.0未満であれば損傷の蓄積が予想され、Load比が変化せずに荷重レベルのみが増加する場合は供試管のカイザー効果が不安定になっていることを示す。Load比についてもCalm比同様の傾向が確認された。図-8からCalm比同様、Load比においても平均100kN程度でLoad比の急落が確認できることから、供試管は最大荷重の約50%(=100kN/214kN)平均値(=0.467)においてカイザー効果が消失したものと考えられる。

加えて、Load比とCalm比の関係からも損傷の蓄積が示唆されたことから、本論で実験対象とした石綿セメント管は、中程度の損傷が蓄積されているとともに、荷重レベルの増加に伴う損傷の進行がカイザー効果の消失の観点から示唆されたものと考えられる(図-9)。

4. セメント系配管材に関する損傷度評価の問題と課題

4.1 既存試験法

一般のコンクリート構造物と配管材との相違点は、その形状にある。既設配管材の残存耐力やひび割れ、剥離、空洞等の損傷度評価手法は、管体強度を求める破壊試験と弾性波や電磁波を用いる非破壊試験とに分けることができる。セメント系配管材の強度特性は、外圧試験や内圧試験により評価されるが、一般的なコンクリート構造物に適用されているコア強度や反発度法による強度推定、局部破壊試験は配管材の形状的特性から適用は困難である。非破壊試験による損傷度評価は、強度試験とは異なり、弾性波を用いる超音波法、衝撃弾性波法、打音法や赤外線によるサーモグラフィ法、電磁波を用いる電磁波レーダー法など一般のコンクリート構造物と同様の手法により評価診断が可能である。本論で用いているAE法は弾性波法の一部である。

4.2 試験方法における課題

破壊試験および非破壊試験の計測精度は、計測対象の形状や外力を加えた際の応答特性に依存する。管材形状は円形・中空であり、その破壊挙動はコンクリートコアの圧縮強度試験等とは破壊までの応力状態が管材形状に依存したものとなる。このことから、管材の強度特性

は、セメント系材料一般の議論に形状的特殊性を考慮したものとなる。損傷度評価においても同様であり、その破壊挙動を考慮する必要がある。

本論では、セメント系配管材の一つである石綿セメント管を対象にその破壊挙動を AE 法によりモニタリングし、AE 発生挙動から損傷度評価を試みた。AE 法の特徴は、材料破壊の際に発生する弾性波がカイザー効果として既往载荷履歴を反映したものになることである。AE 法以外の弾性波法や電磁波法、電気化学的手法では既往载荷履歴の評価は困難であるが、既設構造物を対象とした場合、既往载荷履歴と構造損傷、強度特性の間には相互に関係性が認められるのが一般的であり、より効果的な損傷度評価には構造物が受けてきた荷重履歴を考慮できる評価診断法の構築が不可欠であるものと考えられる。このような観点から、AE 法はこのような観点から既設配管材の損傷度を評価する際に有効な試験法であると考えられる。

5. おわりに

本論では、セメント系配管材の製造方法と損傷特性を概観すると共に実験対象とした石綿セメント管 φ600(4種)について、AE 計測を伴う外圧試験(環片圧壊試験、曲げ試験)を実施し、管材の損傷度を評価した。この供試管の物性値は、中性化深さ 0.0~4.0mm(中性化率 0~13.3%)、表乾比重 2.08~2.15、絶乾比重 1.79~1.91 および吸水率 11.8~16.1%であった。力学特性は、環片圧壊試験において最大荷重 25.6~72.2kN と試験値の相違が顕著で有ったと共に試験値の偏差が平均値の 54%と大きいことから、単純に損傷度を評価することは困難であった。曲げ試験では、環片圧壊試験とは異なり 201~227kN を示し、試験値は類似な値となった。

そこで最大荷重の試験値が類似した曲げ試験結果を用いて AE パラメータである Load 比と Calm 比による評価を試みた。繰返し载荷による曲げ試験の結果、0~80kN 载荷と 0~120kN 载荷に Calm 比の相違が無いことから、供試管は 100kN 程度でカイザー効果が消失しているものと推察される。また、Load 比においても平均 100kN 程度で Load 比の急落が確認できることから、供試管は最大荷重の約 50%(=100kN/214kN)においてカイザー効果が消失したものと推察される。この結果、供試管は 32 年間の長期間供用に伴い損傷の蓄積(Load 比<1.0;損傷あり)が示唆された。損傷度は、Load 比と Calm 比の関係から、中~大の損傷の蓄積が示唆された。

このことから、一般的に行われている外圧試験のみでは、配管材の損傷度評価は困難であったが、破壊時の AE 現象を利用することにより推定可能であることが供用後 32 年経過した既設石綿セメント管で確認された。パ

イプラインは設計上、道路下埋設が基本であることから、長期供用に伴い繰返し载荷を強く受けていることが予想される。よって、パイプラインのように常時目視で状態の確認が困難な施設の安全性については、AE 法を用いてどの程度の損傷を蓄積しているか確認可能であり、計測の結果を元に設計上想定された荷重強度を超えている施設については補強若しくは高強度の施設としての更新が必要である事が判断可能になるものと考えられる。このことから、AE パラメータを有効に利用した配管材の損傷度評価は既設配管材の有効な評価法であると考えられる。

参考文献

- 1) 名和則夫, 園田和記, 岩田博文, 鈴木哲也: 老朽化した管路施設の機能調査評価, 農業土木学会誌, 70 巻 12 号, pp.1109-1113, 2002
- 2) 鈴木哲也, 大津政康, 青木正雄, 中村良太: 老朽化 PC 管路の非破壊モニタリングに基づく漏水現象評価, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.766-773, 2007
- 3) 鈴木哲也, 伊藤久也, 藤田茂: 配管施設の通水シグナルの検出による補修効果の定量的評価, 農業農村工学会誌, 75 巻 10 号, pp.907-910, 2007
- 4) 伊藤久也, 鈴木哲也, 藤田茂, 青木正雄: 弾性波検出による補修パイプラインの水密性能照査に関する研究, 平成 20 年度農業農村工学会講演会要旨集, pp.922-923, 2008
- 5) 伊藤久也, 鈴木哲也, 藤田茂, 青木正雄, 千代田淳: 内水圧条件における漏水起源弾性波の非破壊同定, 平成 21 年度農業農村工学会講演会要旨集, pp.524-524, 2009
- 6) 財団法人水道管路技術センター: 水道用石綿セメント管診断マニュアル, pp.20~29, 1989
- 7) 水島淑博, 伊藤保裕, 辻本昌弘, 小泉和弘, 毛利栄征: 劣化 PC 管の調査・診断手法の検討, 水土の知, 76(3), pp.35-39, 2008
- 8) 日本非破壊検査協会: NDIS2421-2000 コンクリート構造物のアコースティック・エミッション試験方法, 日本非破壊検査協会, 2000
- 9) 重石光弘, 中島猛, 大津政康: 鉄筋コンクリート道路橋主桁の繰返し曲げ载荷における Calm 比と Load 比について, 第 14 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp.165-168, 2003
- 10) Suzuki, T., Ohtsu, M. and Shigeishi, M.: Relative damage evaluation of concrete in a road bridge by AE rate-process analysis, Materials and Structures, Vol.40, No.2, pp.221-227, 2007