

論文 衝撃弾性波法による鉄筋コンクリート管の耐荷性能の非破壊評価方法に関する研究

浅野 雅則*1・鎌田 敏郎*2・熊本 宏次*3・井藤 元暢*4

要旨: 本研究では、下水道施設として多用されてきた鉄筋コンクリート管の劣化診断において衝撃弾性波法を用いた検討を行った。その結果、管の肉厚変化と衝撃弾性波法により得られる周波数分布を数値化した高周波成分比の間には良い相関が見出された。また、減肉管の破壊荷重値と高周波成分比の間にも良い相関が確認された。衝撃弾性波法により推定された肉厚および破壊荷重値から、埋設状態における管の耐荷性能が算定できることを明らかにした。また現場掘出し管における実証試験を行い、破壊荷重値推定の妥当性が確認された。

キーワード: 衝撃弾性波法, 非破壊検査, 下水道, 鉄筋コンクリート管, 耐荷性能

1. はじめに

わが国において下水道は重要なインフラ設備として整備され、快適で衛生的な国民生活を支えてきた。現在では、管路の総延長は44万kmに上る膨大なストックとなっている¹⁾。老朽化が進むと道路陥没の数量が増加することが指摘²⁾されており、適切な維持管理の重要性が認知されつつある。管路の点検調査については、特に人の入ることのできない小口径の管路(φ800未満)においてTVカメラを搭載した専用ロボットを用いた内面目視による方法が主に採用されている³⁾。このような方法は視覚情報を主体とすることから万人にわかりやすい反面で定量性を欠くことや管の耐荷性能評価に際して、必ずしも妥当な結果を与えないなどの課題も存在する⁴⁾。また近年では老朽管に対して管更生による機能改善が実施されるが、調査結果を基本情報とすることから、管の耐荷性能を簡易にかつ定量的に評価できる手法が求められるようになってきた。

このような課題を踏まえ、本研究では非破壊試験方法である衝撃弾性波法を用いた管の耐荷性能評価方法を実用化すべく検討を行った。ここでは人が入れない条件下における測定が必須であるため、専用の測定ロボットを用いることとした。

老朽化が懸念されている鉄筋コンクリート管を対象として、硫化水素等による腐食を想定した減肉管を作製し、衝撃弾性波法による減肉程度の評価可能性を確認した。調査の課題である管の耐荷性能については、減肉管の破壊試験により得られる破壊荷重値と衝撃弾性波法による結果との関係を明らかにしたうえで、埋設管の耐荷性能評価方法に準じた手法に則り対象管路の安全率評価方法

を提案した。最後に、提案する手法の妥当性を、現場掘出し管測定による推定結果と破壊試験結果との関係から考察した。

2. 衝撃弾性波法概要

2.1 測定方法

弾性波の入力・測定には図-1に示す専用の管内測定ロボットを用いた。打撃部にはインパルスハンマが搭載されており、受信部には加速度センサ(〜10kHzまでの周波数領域)が搭載されている。また各センサ近傍にはCCDカメラが搭載されており、打撃部および受信部の状況を確認できる。測定装置のサンプリングタイムは10μsecであり、測定データ数は2048点である。打撃部と受信部の間隔は2200mmとした。

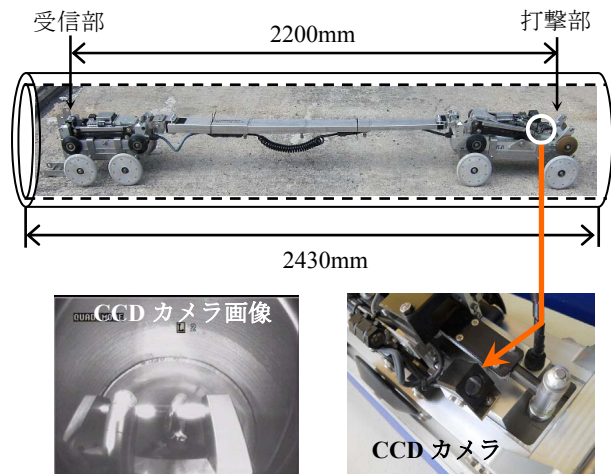


図-1 測定ロボットの概要






*1 積水化学工業株式会社 環境・ライフラインカンパニー 管路更生事業部 工博 (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻教授 工博 (正会員)

*3 積水化学工業株式会社 環境・ライフラインカンパニー 管路更生事業部

*4 財団法人下水道新技術推進機構 主任研究員

表-1 供試体一覧

目標	基準 (50mm)	6mm減 (44mm)	12mm減 (38mm)	18mm減 (32mm)	24mm減 (26mm)
写真					


2.2 測定データと数値化方法


本システムでは打撃により発生し伝搬した弾性波を時間-振幅関係として取得する。得られた波形についてFFT(高速フーリエ変換)を実施することにより周波数分布を求めた。

図-2 に周波数分布の模式図を示す。本研究では周波数分布を数値化した「高周波成分比」を周波数パラメータとして定義した。高周波成分比は式(1)により求めた。

$$F = S_2 / (S_1 + S_2) \times 100 \quad (1)$$

ここに、 F : 高周波成分比(%) ,

S_1 : 0.5~3.5kHz までの面積(図中の ) ,

S_2 : 3.5~7.0kHz までの面積(図中の )

である。

高周波成分比の計算において、低周波のノイズの影響を除去する目的で 0.5kHz 未満の領域を省くこととした。また高周波領域と低周波領域の境については、上限値 7.0kHz の中央値として 3.5kHz を採用した。

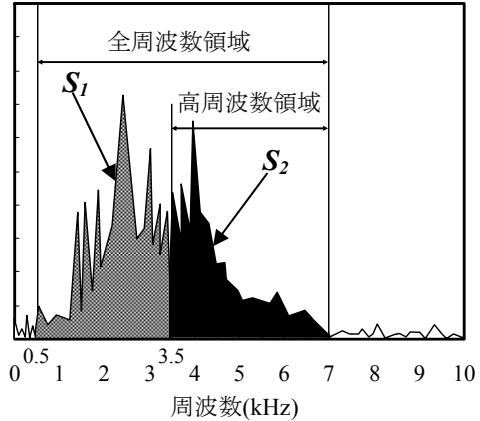


図-2 周波数分布の模式図

3. 供試体概要

3.1 管の種類

下水道用鉄筋コンクリート管(JSWAS A-1 外圧1種管)を対象とした。実験には内径 600mm, 長さ 2430mm の管を用いた。

3.2 供試体の詳細

今回の検討では、腐食による減肉を想定した管を作製した。管の作製については、JSWAS A-1 記載の方法に準拠した遠心力成型とした。表-1 に作製した供試体の種類を示す。コンクリートは普通ポルトランドセメントを用いて作製した。W/C : 37%, G_{max} : 15mm, 配合強度 : 53.4MPa である。補強鉄筋は線径 4mm(管円周方向)および 5mm(管軸方向)のものを用い、断面の中央に配筋した。

4. 管の破壊試験

減肉管の耐荷性能を確認するため、管を JSWAS A-1 に準拠した試験により破壊させ、荷重-管頂変位曲線を求めた。図-3 に試験状況を示す。管頂変位の測定には図-3 に示すようなダイヤルゲージを用いた。試験においては、管のひび割れ荷重値および破壊荷重値を記録するとともに、管に生じるひび割れ幅の測定も行った。

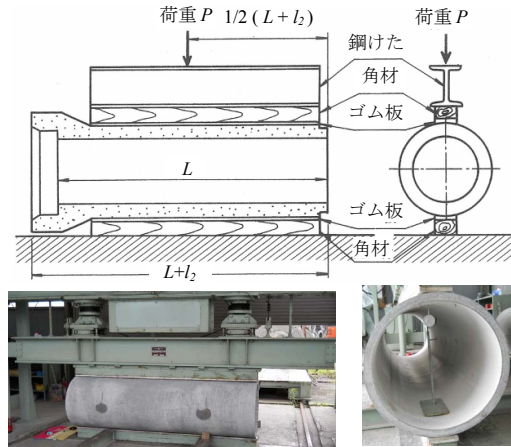


図-3 破壊試験概要 [JSWAS A-1]

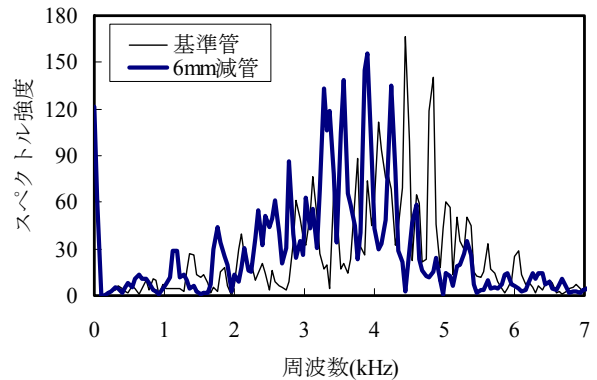


図-4 周波数分布の比較

5. 測定結果

5.1 減肉量と周波数分布の関係

衝撃弾性波法により得られた周波数分布および高周波

成分比と管肉厚との関係を図-4 に示す。基準管に比べて 6mm 減の管は、低周波数側に成分が移動している。これは、管厚の減少に伴う剛性低下の影響であると考えられる。

高周波成分比と管厚の関係を求めた。その結果、図-5 に示したように管厚みと高周波成分比には、管厚ごとに徐々に高周波成分比が小さくなる傾向にあり、両者には直線的な関係が確認される。これにより高周波成分比を用いた管厚程度の評価が可能であるものと考えられる。

5.2 管の破壊試験結果と高周波成分比の関係

各供試体における破壊試験結果を図-6 に示す。管厚が小さくなるに従い破壊荷重値が小さくなる傾向にあり、減肉事象は管の破壊荷重値に影響を与えることが明らかとなった。本例では、基準管より 6mm 低減した状態(減肉量約 12%)で規格の破壊荷重を下回るものであることが確認でき、減肉程度を把握することが重要であることがわかる。

図-7 に高周波成分比と破壊荷重値との関係を示す。破壊荷重値と高周波成分比は概ね直線的な関係にある。今回対象としたのは減肉事象であり断面の耐荷性能に直接結びつくものである。この結果より高周波成分比から管の破壊荷重値の推定が可能であることが確認できる。

6. 管の耐荷性能評価方法

衝撃弾性波法により得られる結果から、測定対象管の厚みと破壊荷重値が計算できる。これらの情報を活用して、管の埋設状態における安全性の検討を実施する。破壊荷重値が得られることから、管の破壊保証モーメントを用いた耐荷性能の計算を行う。以下に示す計算手法は JSWAS A-1 参考資料記載の方法を参考にした。管の耐荷力と埋設条件下で作用する荷重(死荷重と活荷重の合計)を比較することで管の安全率を求めるものである。

【管の破壊保証モーメント】

$$M_B = 0.25Sr + 0.165Wr \quad (2)$$

ここに、 M_B : 管の破壊保証モーメント(kN・m/m)、 S : 管の破壊荷重値(kN/m)、 r : 管の管厚中心半径(m)、 W : 管の自重(kN/m)である。

【管の耐荷力】

$$Q_B = M_B / kr^2 \quad (3)$$

ここに、 Q_B : 管の耐荷力(kN/m²)、 k : 支承係数(ここでは砂基礎 120° とし、0.275 を採用)である。

【死荷重(鉛直土圧)】

$$w = \gamma H \quad (4)$$

ここに、 w : 管に作用する土圧(kN/m²)、 γ : 埋め戻し土の単位体積重量(kN/m³)、 H : 土被り(m)である。

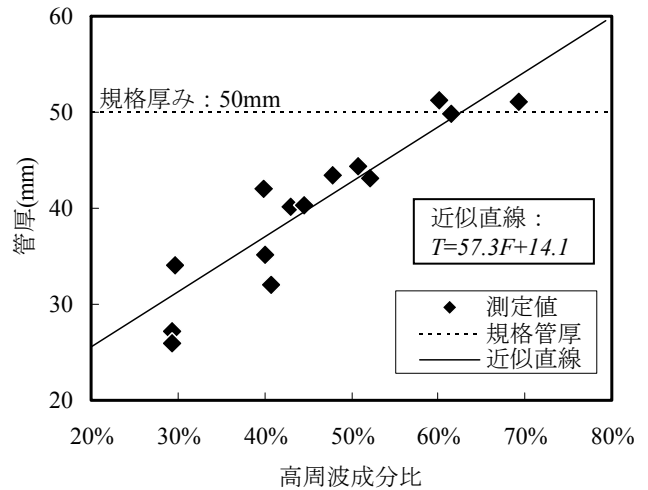


図-5 高周波成分比と管厚の関係〔地上実験〕

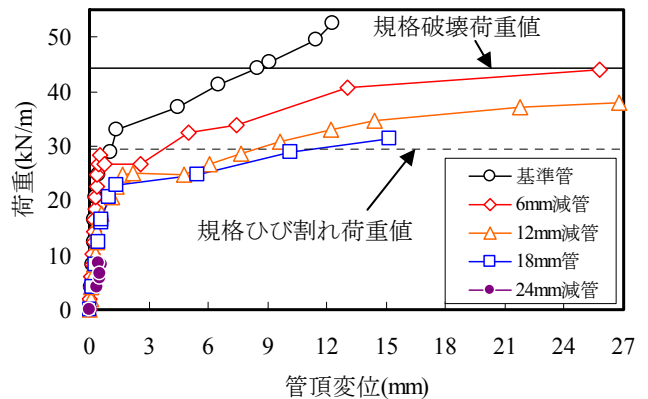


図-6 管の破壊試験結果

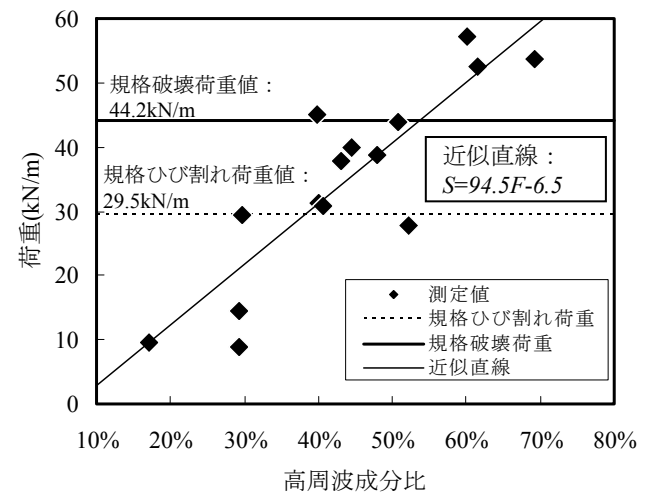


図-7 破壊荷重値と高周波成分比〔地上実験〕

【活荷重(交通荷重)】

$$p = \frac{2P(1+i)\beta}{C(a+2H \tan \theta)} \quad (5)$$

ここに、 p ：活荷重(kN/m²)、 P ：T 荷重(kN、ここでは100を採用)、 i ：衝撃係数、 β ：断面力低減係数(0.9を採用)、 C ：車体占有幅(m、2.75を採用)、 a ：車輪設置長さ(m、0.2を採用)、 θ ：分布角(45°)である。

【作用荷重】

$$Q = w + p \quad (6)$$

ここに、 Q ：作用荷重(kN/m²)である。

【管の安全率】

$$F_B = Q_B / Q \quad (7)$$

ここに、 F_B ：管の安全率である。

7. 埋設の影響

5.では、管が埋設されていない状態での測定結果であった。ここでは、埋設状態における周波数分布の変化を確認する。

図-8に管の埋設状況を示す。用いた管はφ600 鉄筋コンクリート管(新管)であり、埋め戻しとして山砂(密度：2.62g/cm³)を用いた。山砂は段階的に盛り、適宜、振動締め機により十分に固めた。

図-9に埋設前後における周波数分布を示す。埋設後の周波数分布図は埋設前のものに比べて成分が高い周波数領域へ移動していることが確認される。締め固められた土により管が拘束される影響により、中空の場合と比較して硬い応答になり、結果として高周波成分比が大きくなったものと考えられる。両者について式(1)により高周波成分比を計算した結果、埋設前：65.7%、埋設後：78.2%であり両者には12.5%の差異が存在する。この結果より、埋設条件下において高周波成分比が大きくなることを考慮する必要があることがわかった。



図-8 管の埋設状況

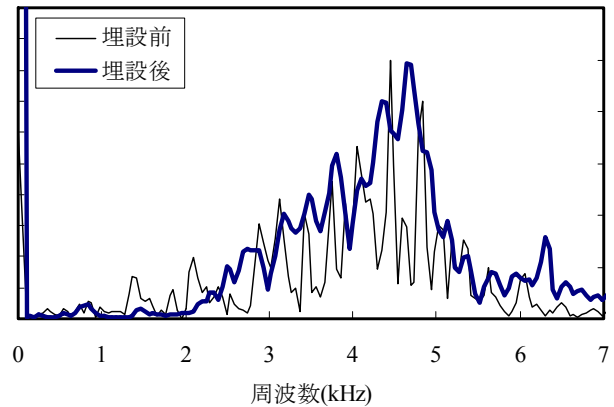


図-9 埋設前後の周波数分布

土被りが存在する場合には、土被りによる高周波成分比の増分(12.5%)を考慮した計算式を用いる必要がある。図-5および図-7に示された式は埋設されていない状態での近似式であるため、埋設を考慮した式(8)および式(9)により埋設状態での管厚および破壊荷重値を計算する。

$$T = 57.3F + 6.9 \quad (8)$$

ここに、 T ：管厚(mm)、 F ：高周波成分比である。

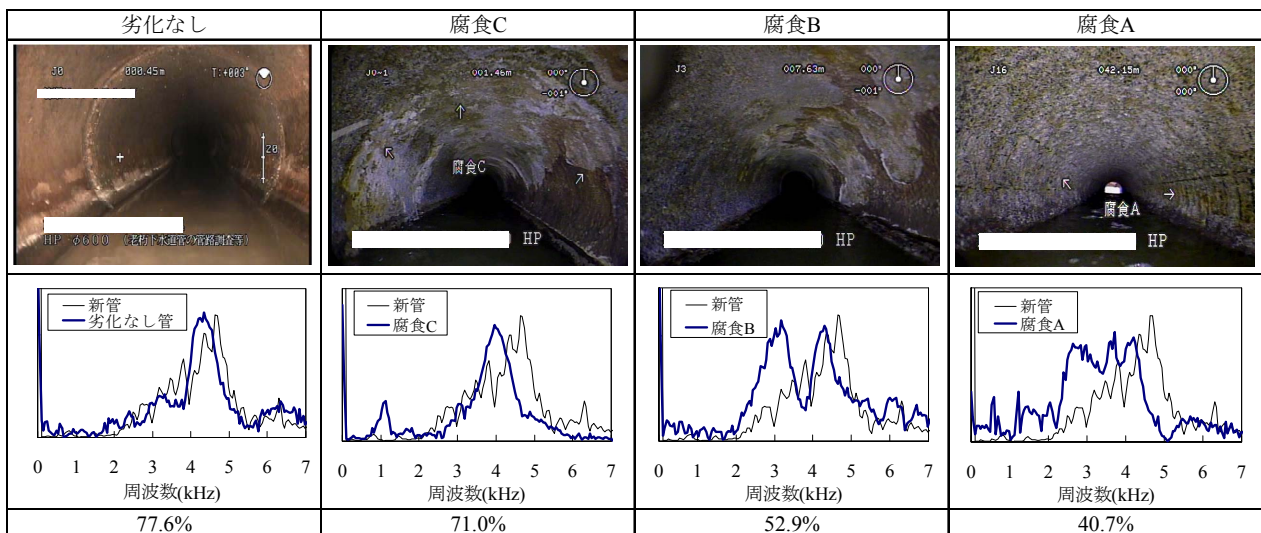


図-10 現場測定で得られた周波数分布と高周波成分比の代表例(φ600)

表-2 管の耐荷性能算定結果

本数	TVカメラ	高周波成分比 F	推定厚み [mm] T	規格厚み [mm]	推定破壊荷重値 [kN/m] S	規格破壊荷重値 [kN/m]	管の耐荷力 [kN/m ²] Q _B	作用荷重 [kN/m ²] Q	安全率 F _B
1	劣化なし	77.6%	50.0	50.0	52.8	44.2	158.9	58.7	2.71
2	腐食C	71.0%	47.6		48.8		140.4	58.7	2.39
3	腐食B	52.9%	37.2		31.7		90.1	58.7	1.54
4	腐食B	64.1%	43.6		42.2		120.9	58.7	2.06
5	腐食B	45.6%	33.0		24.8		70.5	58.7	1.20
6	腐食B	65.7%	44.5		43.8		125.4	58.7	2.14
7	腐食B	63.7%	43.4		41.9		119.9	58.7	2.04
8	腐食A	40.7%	30.2		20.1		57.3	58.7	0.98
9	腐食B	55.1%	38.5		33.7		96.1	58.7	1.64
10	腐食A	47.8%	34.3		26.8		76.3	58.7	1.30
11	腐食A	55.8%	38.9		34.4		98.1	58.7	1.67

$$S = 94.5F - 18.3 \quad (9)$$

ここに、S：破壊荷重値(kN/m)である。

8. 現場測定結果

実現現場で得られた周波数分布と高周波成分比を図-10に示す。図中には衝撃弾性波法による測定と同時に実施したTVカメラによる内面目視画像も記載した。

図より、内面に異常の見られなかった管の周波数分布は新管と同程度であることがわかる。劣化が生じた場合、周波数分布において低周波数領域に主な成分が移動することが確認でき、高周波成分比は小さくなる。この傾向は劣化が大きくなるほど顕著であり、実験で得られた傾向と一致する。このため、現場管について衝撃弾性波法による劣化評価は可能であることが明らかとなった。

次に、現場取得データから管の耐荷性能を算定した。その結果を表-2に示す。土被りを1.27mとして計算し、その他条件は式(2)~(7)にしたがった。

表-2 から、管の埋設状態における安全率が確認できる。本例では安全率1.0未満のものは1本である。新管と同等の管の場合安全率は2.7程度であることから、劣化が生じている管は全て性能が低下しているものと考えられる。なお腐食Cについては破壊荷重値が規格を上回るものであったが、新管と同等の管の破壊荷重値に比べて小さく計算されており、劣化の影響として反映されている。このような性能低下度合いの定量的判断は目視では困難であり、衝撃弾性波法の利点である。

衝撃弾性波法では高周波成分比による管の劣化程度評価に加え、破壊荷重値の算出や、現場条件を考慮した安全率の計算が可能であり、対策の優先順位や管更生実施の決定および工法の選定に活用可能であるものと考えられる。

9. 破壊荷重値の推定結果と実測結果の関係

耐荷性能等を計算する場合には、破壊荷重値の取得が必須となる。埋設された管に対して測定した結果から推



図-11 掘出し管の外観と破壊試験状況(φ250)

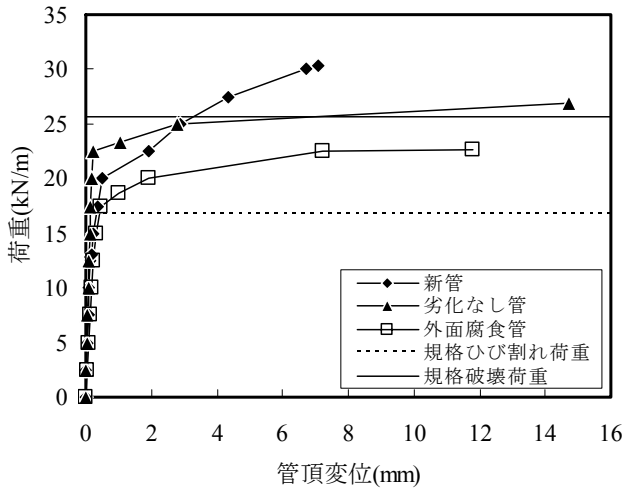


図-12 掘出し管の荷重-変位曲線の一つ例(φ250)

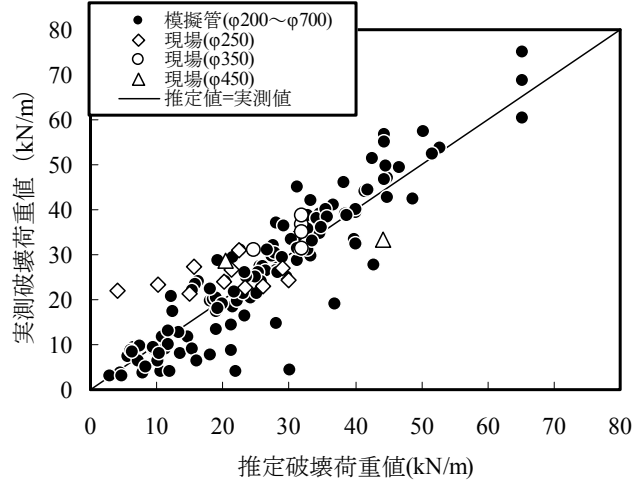


図-13 破壊荷重値の比較

定された破壊荷重値と、実際に管を掘出して破壊試験を行った結果について比較を行った。現場から取得できた管は全て鉄筋コンクリート管であり、φ250(11本)、φ350(5本)、φ450(2本)である。図-11に掘出し管(φ250)と破壊試験状況の一例を示す。

図-12にφ250について新管と掘出し管の荷重-変位曲線の一つ例を示す。外面腐食管は、新管に比べて破壊荷重値が小さくなっており、更に規格値よりも小さい値である。劣化なし管については新管より破壊荷重値は小さいものの、規格を上回るものであった。

図-13に全ての管で得られた破壊荷重値を示す。なお参考のため、φ200~φ700にて実験で得られた結果も記載した。

推定値は実測値に対して一定のばらつきを有している。経年管のデータについては、模擬管における傾向と概ね一致しており、ばらつきの範囲もほぼ同等であると考えられる。この結果から経年管について模擬管実験の結果が適用可能であるものと考えられる。

このことから、衝撃弾性波法により計算された推定破壊荷重値を用いた耐荷性能の計算には妥当性があるものと考えられる。

10. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 衝撃弾性波法を用いて下水道管の減肉評価を実施した結果、肉厚と高周波成分比には直線関係が確認された。この関係から管厚の推定が可能である。
- (2) 管を破壊試験により破壊させた結果、肉厚の小さい管ほど破壊荷重値が小さくなる傾向が確認された。
- (3) 高周波成分比と破壊荷重値の関係を求めた結果、両者は直線関係にあることが確認された。
- (4) 衝撃弾性波法から得られる管厚および破壊荷重値

を用いることで、管の耐荷性能が計算でき埋設状態における安全率が計算可能である。

- (5) 埋設状態の管に対して衝撃弾性波法を適用した結果、腐食の程度に従い高周波成分比が変化することが確認された。また安全率の計算結果より、目視で判断し難い定量的評価が可能であった。
- (6) 現場から取得した掘出し管について破壊試験を行い、衝撃弾性波法から推定された破壊荷重値と比較した結果、概ね実験で得られた傾向が確認され、衝撃弾性波法による推定の妥当性が確認できた。

現場データについては一部で推定値と実測値に乖離が見られたため、今後はこのような結果となる原因に対して模擬管および現場試験を通して更なる検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本下水道協会：平成22年度版下水道統計，p.61，2012
- 2) 新井智明：下水道施設のストックマネジメントと下水道長寿命化支援制度，下水道協会誌，Vol.47，No.568，pp.4-7，2010.2
- 3) 社団法人日本下水道協会：下水道管路施設の緊急点検実施マニュアル（案），2007.3
- 4) 社団法人日本下水道協会：管更の手引き（案），pp.50-51，2001.3

謝辞

本研究の一部は財団法人下水道新技術推進機構、積水化学工業㈱、ペンタフ㈱の共同研究として実施した。また現場については自治体に提供いただいた。協力いただいた関係各位に厚く御礼申し上げます。