

衝撃弾性波検査法の活用と管路のストックマネジメント

(公財) 日本下水道新技術機構
研究第二部長 下村常雄



Japan Institute of Wastewater Engineering and Technology

2. スtockマネジメント



Japan Institute of Wastewater Engineering and Technology

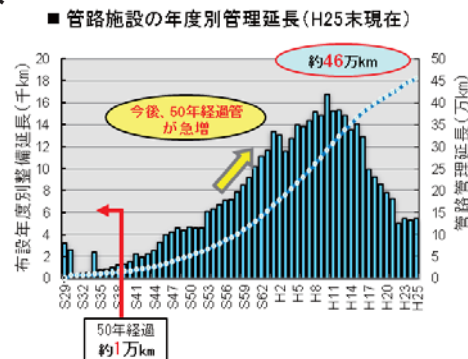
- 下水道の普及→管路延長は46万km
- 老朽化の進行→陥没事故
- 維持管理費の減少



- 予防保全
- 効率的な維持管理・改築
- 予算の平準化



- ストックマネジメントの導入実践



1. はじめに

ストックマネジメントへの衝撃弾性波検査法の活用

(1) 事故の予防保全の徹底

(2) コスト縮減

(3) 長期的な改築計画策定

1

手引き(案)策定の目的



Japan Institute of Wastewater Engineering and Technology

- 老朽化する下水道ストックを、将来にわたって適切に維持管理・改築・修繕していくため、下水道管理者が**ストックマネジメントを導入・実践**し、これを踏まえながら、長寿命化支援制度に定める**長寿命化計画を策定し、実施**することを目的とする。

課題

膨大なストックは、日々劣化し、**維持管理や改築・修繕のコスト増加**を招くとともに、最悪の場合、**機能不全**に陥るリスクもはらんでいる。

施設の管理に熟練した技術職員が大量に退職時期を迎え、**適切な技術継承ができず**、結果として施設の**適正な管理が困難**になることが懸念される。

社会資本に求められる役割は多様化しており、人口減少やライフスタイルの変化も踏まえて、適切に機能を発揮できるようにしておく必要がある。

ストックマネジメントの導入・実践

対応

ストックマネジメントを導入し、下水道施設全体を俯瞰して、**将来にわたる改築需要を勘案しつつ、維持管理・改築・修繕の一体的な最適化**を図り、計画的に改築(更新・長寿命化対策)を実施。

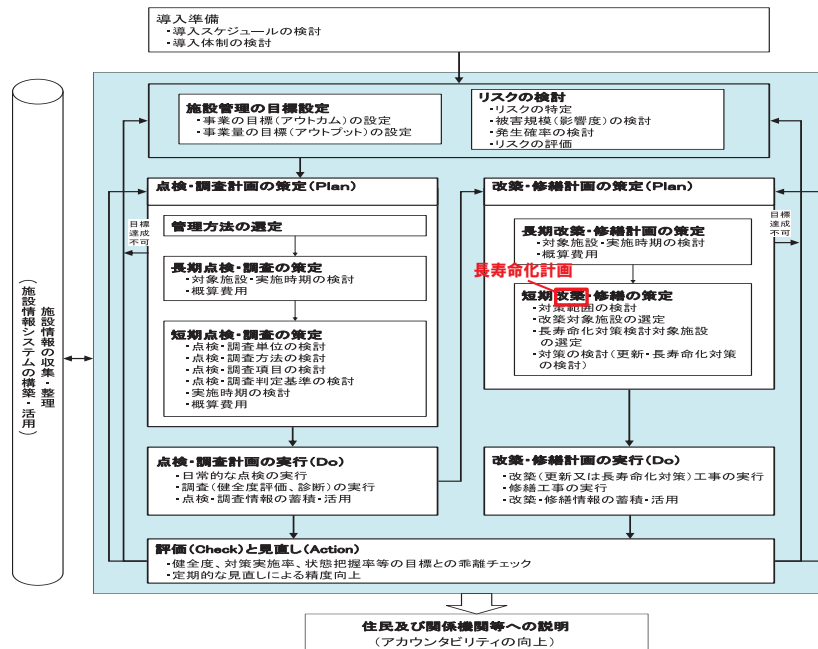
手引き(案)の主な記載事項

下水道事業におけるストックマネジメントの一層の普及促進を図るため、主に以下の事項を記載。

- ①ストックマネジメントに基づく施設管理(特に点検・調査及び改築・修繕)の基本的な考え方
- ②ストックマネジメントを踏まえた長寿命化計画の策定手法

2

3



4

(管に)軽い衝撃を与えることにより発生する振動を加速度センサ等により計測を行い、得られた波形や周波数特性等から対象物の状態を評価

《簡単な原理の説明》

対象物に軽い衝撃を与えて内部の様子を探る(診る)方法

すいかたたき



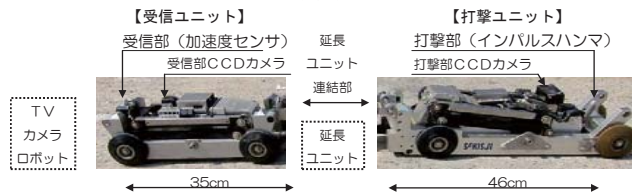
トンネルの点検



(ある程度の不確実さは含むものの)
振動や音を適切に計測評価できれば構造物の状態を適切に把握可能

5

- 調査対象 呼び径200～700の鉄筋コンクリート管
- 調査機器 衝撃弾性波検査ロボット



弾性波の検査ロボットは、自走できないため、従来のTVカメラロボットで牽引する。

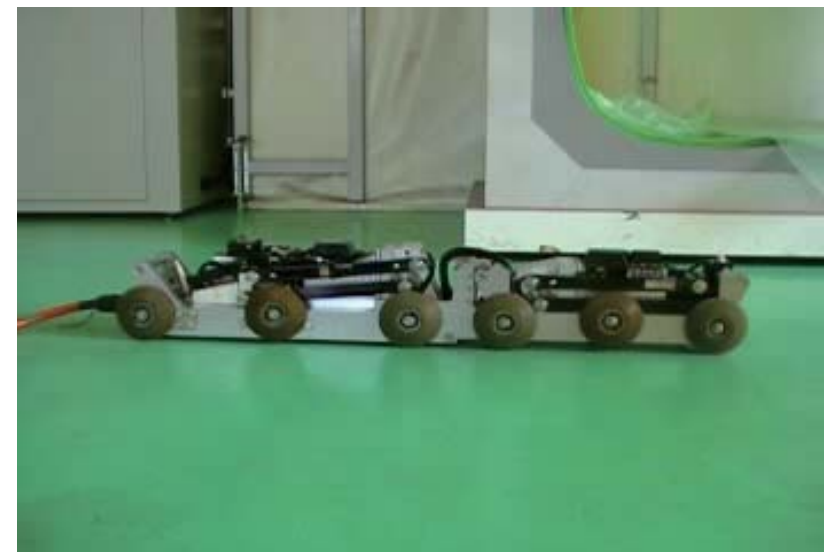
φ200～φ350mm測定用ロボット (HP管の長さ:2.00m)



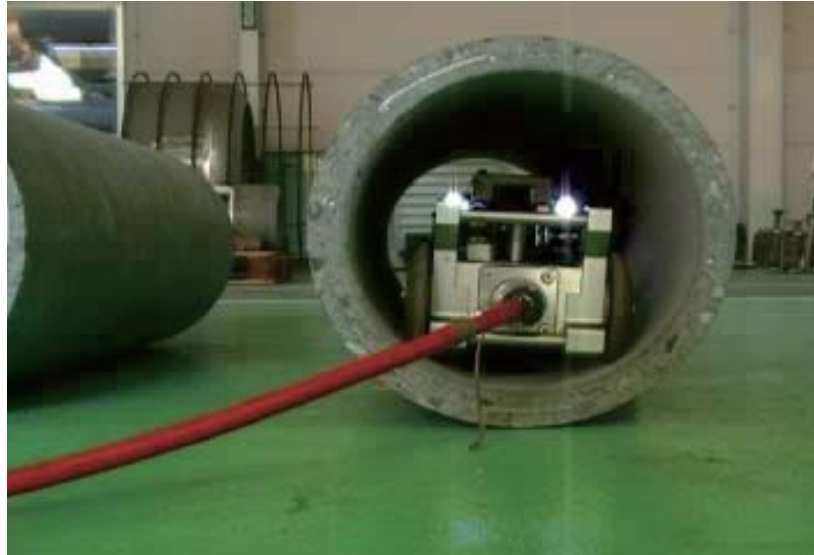
φ400～φ700mm測定用ロボット (HP管の長さ:2.43m)



6

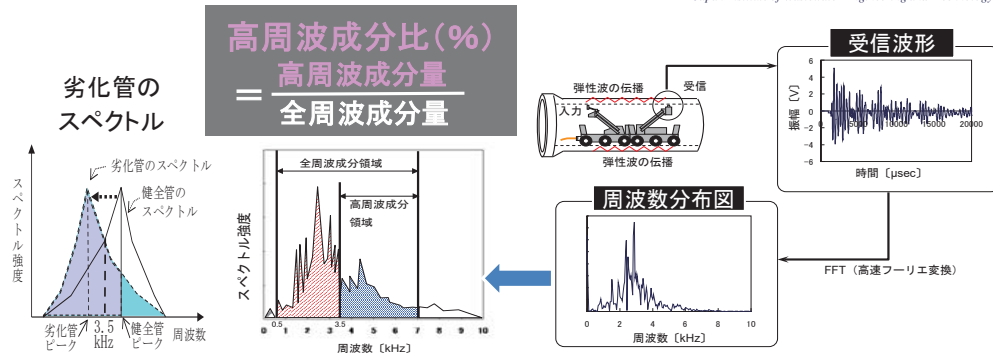


7

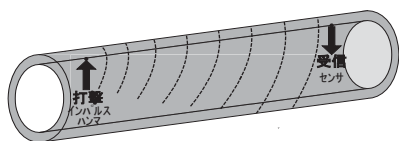


8

(3) 検査及びデータ処理方法



衝撃弾性波検査法で得られる波形
 管に与えた衝撃により生じる種々の固有振動が複雑に合成された振動現象



波形の特性→管の剛性EIの変化に回答

	挙 動	評価指標との関係
管軸方向 [棒状部材]		$f_L = \frac{a_n^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$ f_L : はり部材の共振周波数 a_n : 振動次数から求まる定数 EI : 曲げ剛性 L : 部材長さ (両端固定端) ρA : 単位長さ質量 剛性[EI]低下→共振周波数f_L低下
管断面方向 [円環断面]		$f_c = \frac{K}{R^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$ f_c : 円環断面の共振周波数 K : 振動次数から求まる定数 EI : 曲げ剛性 R : 管厚中心半径 (円環) ρA : 単位長さ質量 剛性[EI]低下→共振周波数f_c低下

※上記の振動の模式図は、振動次数が1次の場合を例示している。実際に管体には生じる振動は、管軸方向、管断面方向ともに、複数の次数の振動が複雑に重なり合っている。

10

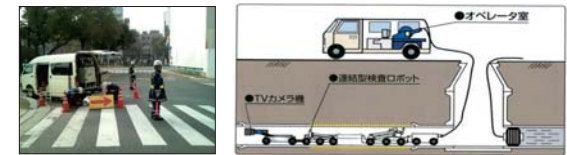


9

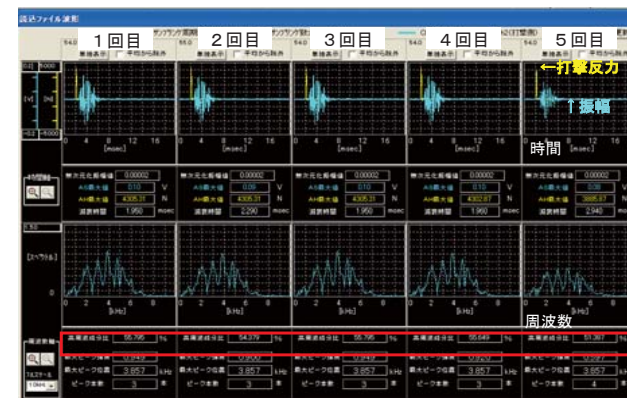
(4) 調査方法

作業手順は、TVカメラ調査
と同一

調査作業のイメージ



PC画面 データ処理は、作業車両内のパソコンで自動的に行われる



受信波形
 ↓
 高速フーリエ
 (FFT) 変換
 ↓
 周波数分布図
 ↓
 高周波成分比(%)
 ↓
 中央値を採用

11

3. 衝撃弾性波検査法の解析方法

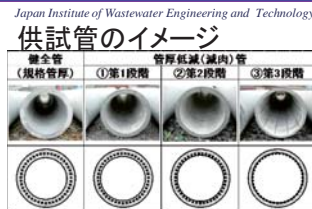


(1) 仮想管厚と仮想破壊荷重

仮想管厚とは



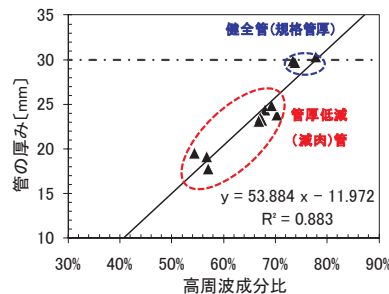
高周波成分比F(%)



仮想管厚T(mm)

$$T = a \cdot F + b$$

高周波成分比と管厚との関係

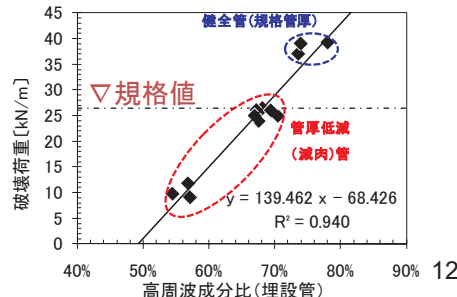


係数a,b,c,dは、
基礎実験により
決定された定数

仮想破壊荷重S(kN/m)

$$S = c \cdot F + d$$

高周波成分比と破壊荷重との関係



衝撃弾性波検査法による管の安全度



衝撃弾性波検査法で得られた「仮想管厚」、「仮想破壊荷重」を用いて埋設時の管の安全度を計算する。

① 管の耐荷力 Q_B (kN/m²)

$$Q_B = \frac{0.25P_B r + 0.165W r}{k r^2}$$

※ P_B : 管の破壊荷重(kN/m)等のデータは、衝撃弾性波法による結果推計値)を入力

- 管の破壊保証モーメント M_B (kN・m/m)
 $M_B = 0.25P_B \cdot r + 0.165W \cdot r$
ここに、 M_B : 破壊保証モーメント (kN・m)
 P_B : 管の破壊荷重 (kN/m)
 r : 管厚中心半径 (m)、 W : 管の自重 (kN/m)
- 管に発生する最大曲げモーメント M_{max} (kN・m/m)
 $M_{max} = k \cdot q \cdot r^2$ 、ここに、 k : 支承条件による係数
 q : 管に係る荷重 (kN/m²)
- 破壊荷重 P_B の管が耐えることのできる等分布荷重 (=耐荷力) Q_B (kN/m²)は、 $M_{max} = M_B$ を満足する場合の q であることから、
 $k \cdot q \cdot r^2 = 0.25P_B \cdot r + 0.165W \cdot r$ より、
 $q = [0.25P_B \cdot r + 0.165W \cdot r] / k \cdot r^2 = Q_B$

② 管に作用する荷重 Q

$$Q = W(\text{埋戻し土による鉛直荷重}) + p(\text{活荷重})$$

③ 管の安全度 F_B

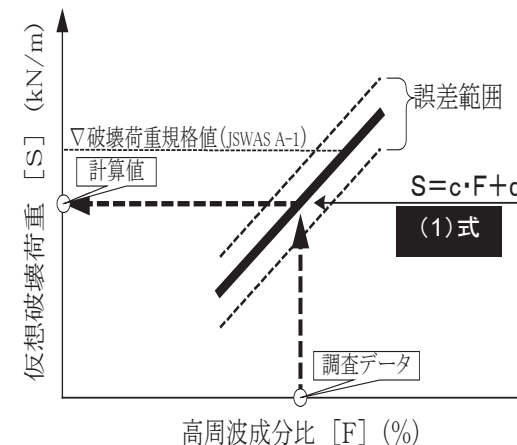
$$F_B = Q_B / Q$$

ここに、 F_B : 管の破壊に対する安全度
 Q_B : 管の破壊に対する耐荷力 (kN/m²)
 Q : 管にかかる荷重 (kN/m²)

仮想破壊荷重の算出について



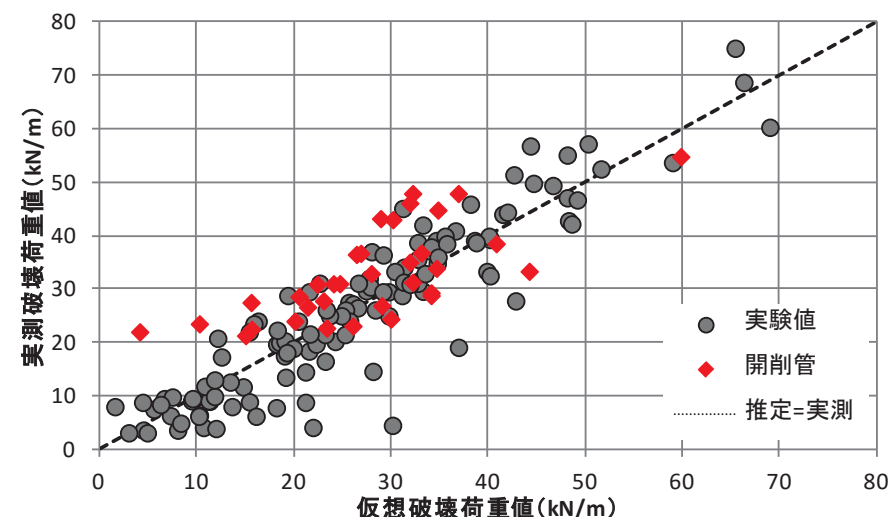
衝撃弾性波検査法の調査で得られた高周波成分比から仮想破壊荷重を算出し、解析に使用する基礎数値とする。



(1)式における係数一覧

呼び径	係数		備考*
	c	d	
200	63.9	-22.6	R²= 0.822
250	61.4	-19.3	R²= 0.892
300	139.3	-68.3	R²= 0.940
350	114.5	-49.9	R²= 0.783
400	142.4	-54.5	R²= 0.871
450	107.9	-23.1	R²= 0.844
500	172.3	-71.3	R²= 0.763
600	94.5	-18.3	R²= 0.755
700	223.3	-83.3	R²= 0.797

実破壊荷重と仮想破壊荷重との関係



推定値と実測値は良く一致することを確認

(2) 管1本ごとの評価



Japan Institute of Wastewater Engineering and Technology

【管1本ごとの評価基準の例】

ランク	衝撃弾性波検査法による管の健全度	説明
A	0～60%以下	管の有する破壊耐力が規格値を下回り、管に作用する荷重を下回り、 管の安全性が損なわれている状態
B	60%を超えて80%以下	標準的な埋設条件下において、管の有する破壊耐力が、管に作用する荷重を上回るものの、一般的な安全率を満足できていない状態
C	80%を超えて100%未満	標準的な埋設条件下において、管の破壊耐力が作用荷重を上回り、かつ一般的な安全率を満足できるが、終局限界状態に対する十分な安全係数を確保できない状態
なし	100%	管の有する 破壊耐力が規格値と同等以上 であり、構造的に健全な状態。

- スパン全体の健全度が高くて、そのうちの**管1本の劣化**でも陥没リスクはある。
- 管1本ごとの定量的な健全度の把握・蓄積が有効

16

(4) TVカメラ調査との比較



Japan Institute of Wastewater Engineering and Technology

項目	劣化位置	衝撃弾性波検査法	TVカメラ調査
腐食	減肉	内面	○(定性)
		外面	×(視認不可)
破損	軸方向クラック	内面	○(定性)
		微小クラック	×(視認不可)
		上記以外	○(定性)
	欠落	外面(側面)	×(視認不可)
管の周方向クラック		※ △(管頂のみ)	○(定性)
上下方向のたるみ		×	○
浸入水		×	○
取付け管の突出し		×	○
油脂の付着		×	○
樹木根侵入		×	○
モルタル付着		×	○

18

(3) スパン全体の評価



Japan Institute of Wastewater Engineering and Technology

スパンでの管の安全度 F_B の平均値を算出することで、緊急度判定が可能

【スパン全体の緊急度の判定基準例】

緊急度	定義	衝撃弾性波検査法による管の安全度 $[F_B]$	説明
I	速やかに措置の必要な場合	$1.25 > F_B$ の平均値 または $1.25 > F_B$ となる管の本数が20%以上	管の有する破壊耐力が、管に作用する荷重を下回り、管の安全性が損なわれている状態
II	簡易な対応により必要な措置を5年未満まで延長できる場合	$1.6 > F_B$ の平均値 ≥ 1.25	管の有する破壊耐力が、管に作用する荷重を上回るものの、一般的な安全率を満足できていない状態
III	簡易な対応により必要な措置を5年以上に延長できる場合	$2.0 > F_B$ の平均値 ≥ 1.6	管の破壊耐力が作用荷重を上回り、かつ一般的な安全率を満足できるが、終局限界状態に対する十分な安全係数を確保できない状態
なし	衝撃弾性波検査法において異常が認められないもの	F_B の平均値 ≥ 2.0	管の破壊耐力が作用荷重を上回り、かつ終局限界状態に対する十分な安全係数を確保できる状態

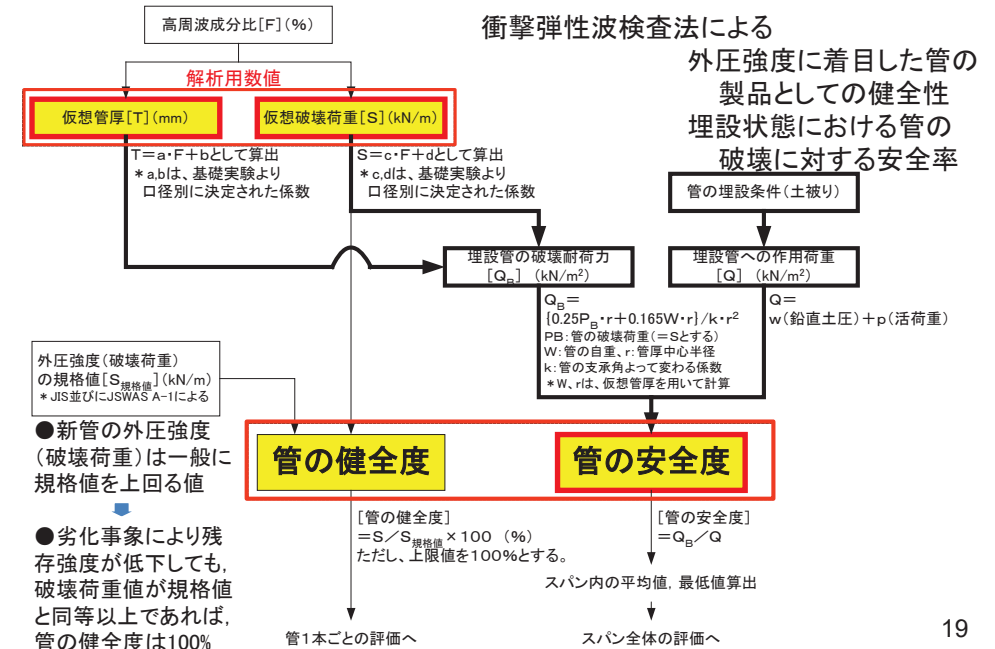
スパン全体での緊急度I以外であっても、スパン内の緊急度Iに相当する管($1.25 > F_B$)については、個別に判断

17

(5) 衝撃弾性波検査法による管の診断指標



Japan Institute of Wastewater Engineering and Technology



19

4. 衝撃弾性波検査法の活用法



Japan Institute of Wastewater Engineering and Technology

① 事故の未然防止

TVカメラ調査が検知できない劣化を衝撃弾性波検査法により発見することで一層の事故の未然防止が期待できる。

② 改築工法選定の適正化によるコスト縮減

TVカメラ調査は評価できない管の耐荷能力を把握することで、低コストの改築工法の選定が期待できる。

③ 健全施設の継続利用によるコスト縮減

衝撃弾性波検査法により、耐用年数以上の管であっても、管の残存体力を評価することで、部分修繕で継続利用が期待できる。

④ 耐用年数設定による長期的な改築計画の策定

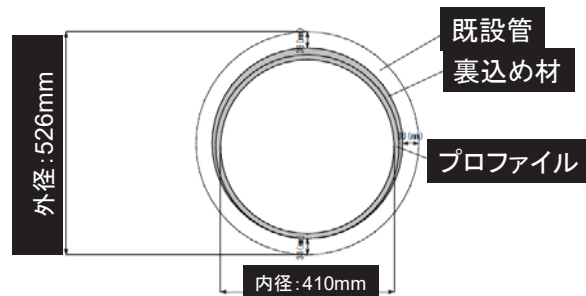
衝撃弾性波により健全度曲線を作成し、管きよの耐用年数を設定する。耐用年数を基にストックマネジメントを踏まえた長期的な更新計画を策定する。

20

計算モデルと計算結果例



Japan Institute of Wastewater Engineering and Technology



既設管径: φ450 → 更生管径410のケース

計算結果

自立管	複合管		
	使用限界状態	終局限界状態	適用
	1.80 > 1.00	3.15 > 2.5	○
	2.70 > 1.00	4.48 > 2.5	○
○	1.40 > 1.00	2.38 < 2.5	×
	1.80 > 1.00	3.47 > 2.5	○

4スパンのうち3スパンについて複合管の適用が可能と判断された。

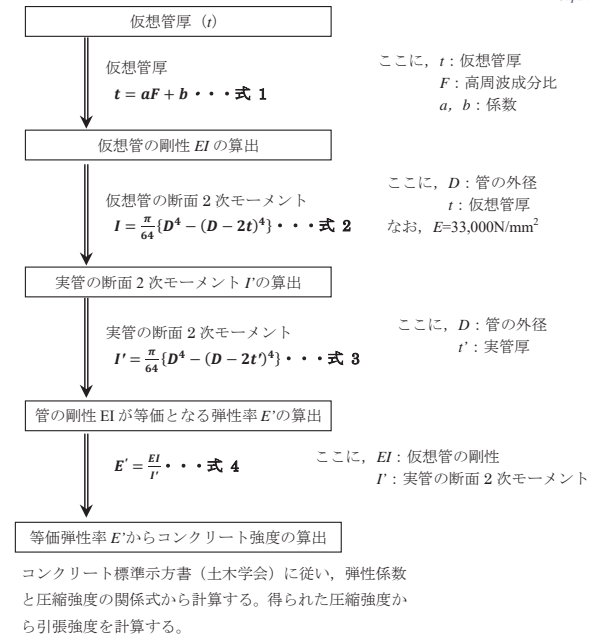
※使用限界状態における安全率(1.0)および終局限界状態における安全率(2.5)は、「管きよ更生工法における設計・施工ガイドライン(案)」(日本下水道協会)に記載された値を用いた。

22

衝撃弾性波検査法を利用した複合管の検討



Japan Institute of Wastewater Engineering and Technology

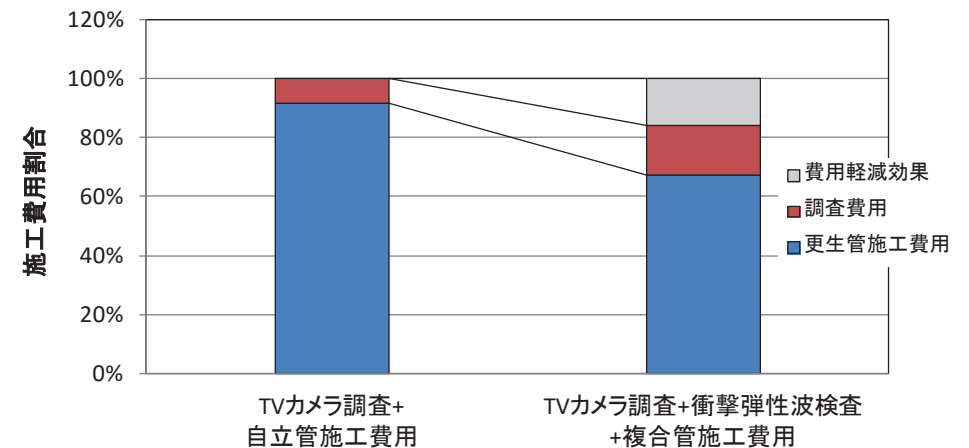


21

更生工法の選定による施工コストの比較例

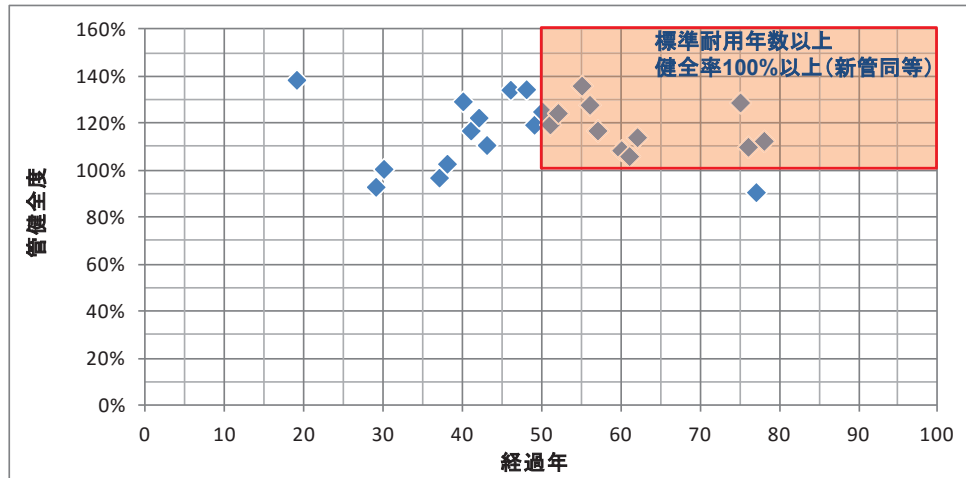


Japan Institute of Wastewater Engineering and Technology



4スパン中3スパンについて複合管が選定できる場合、衝撃弾性波検査の施工費用を入れたとしても、複合管を選定するケースは自立管を選定する場合に比べて約16%の施工費用が低減される結果となった

23



管健全度(外圧強度値)と経過年数の関係を求めることで、
管渠の耐用年数を設定できる
標準耐用年数以上でも健全度が高いケースが存在する

24

診断, 対策範囲の検討

No.	管径	TVカメラ調査						衝撃弾性波検査法						総合判定	対策		
		緊急度	物理的			機能的			管の安全度 (管の仮想破壊耐荷力/作用荷重)			管の健全度 (管の仮想破壊耐荷重/破壊耐重の規格値×100)				緊急度	
			A	B	C	A	B	C	[平均値]	<1.25比	[最小値]	[平均値]	健全率比				Aランク管比
5	φ400	I	欠落		補修跡、クラック			取付突出	なし	2.000	0.0%	2.000	100%	100%	0%	I	異常箇所の修繕
6	φ400	I	欠落	クラック				取付突出	Ⅲ	1.991	0.0%	1.885	99%	92%	0%	I	異常箇所の修繕
12	φ500	Ⅱ		鉄筋露出	補修跡			モルタル	Ⅲ	1.949	0.0%	1.623	96%	72%	0%	Ⅱ	改築
13	φ450	Ⅲ						取付突出	なし	2.000	0.0%	2.000	100%	100%	0%	Ⅲ	簡易対処



対策の例
No.5, No.6: 部分改築
No.12: スパン更生
No.13: 簡易対処

26

- 60年以上の経過管も多くは残存強度がある
- 緊急度 I or II でも部分的な劣化の場合もある



- 即、スパン更生でなく
- LCC比較でスパン全体か部分的な改築か決定



改築事業費の低減

25

LCCの検討

○検討ケース:

- ケース1 布設替えにより更新
- ケース2 更生工法により長寿命化対策を実施
- ケース3 異常部分のみ部分改築工法を実施し耐用年数に至った後に長寿命化対策を実施

○費用比較条件:

- 1スパン延長 40.00m
- 経過年数 布設後50年と設定
- 異常の数 5箇所
- 期待される使用年数(標準耐用年数) 部分改築工法 20年

布設替え工法 50年

更生工法 50年

●対策工法の整備単価

部分改築工法 73千円/箇所(メーカー実績)

布設替え工法 120千円/m, 4800千円/スパン※

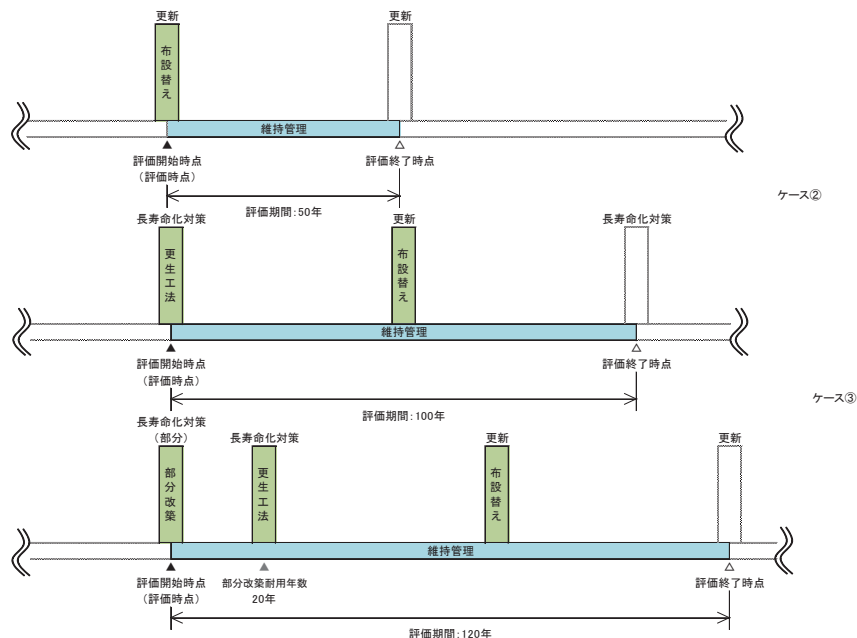
更生工法 100千円/m, 4000千円/スパン※

●維持管理費

300円/m/年より, 12千円/年※

※ストックマネジメント手法を踏まえた下水道長寿命化計画策定に関する手引き(案)
より引用

27



28

長期的改築計画の策定

○「手引き」の長期的改築・修繕計画の考え

改築条件の設定
(1) 改築時期
(2) 改築費用

健全率予測式
目標耐用年数

改築シナリオの設定

長期的改築・修繕計画の策定

30

評価結果

項目	評価期間	累積費用	年平均費用	評価
ケース①	50	5,400 千円	108 千円/年	—
ケース②	100	10,000 千円	100 千円/年	—
ケース③	120	10,605 千円	88 千円/年	○

○ライフサイクルコスト改善額:

- 毎年改善額 $108 - 88 = 20$ (千円/年)
- 社会的割引率4%で割り戻したライフサイクルコスト改善額
 $20 + 20 / (1.04)^1 + \dots + 20 / (1.04)^{119} \approx 515$ 千円

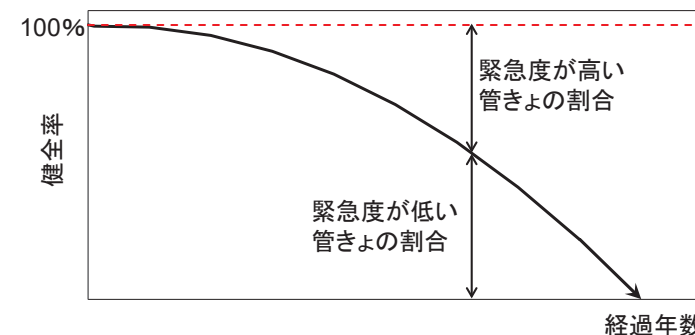
○下水道長寿命化支援制度の要件への合致について:

- 長寿命化対策実施時点における管きよの使用年数50年 \geq 処分制限期間20年 OK
- 長寿命化対策実施後の管きよの使用年数70年 \geq 処分制限期間20年 OK
- 設置から更新までの管きよの使用年数120年 \geq 標準耐用年数50年 OK

29

健全率予測式とは

- ・健全率 \Rightarrow 健全な管きよ / 全管きよ
- ・健全率予測式 \Rightarrow 健全率と経過年数の関係式
- ・改築時期の設定が可能になる



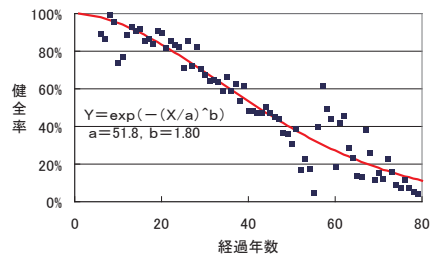
健全率曲線

31

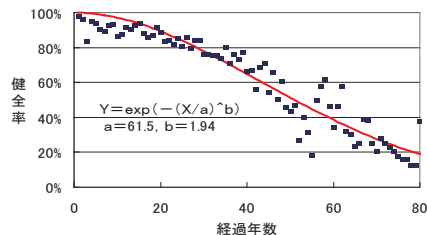
【条件】

- ・事業別: 公共／流域
- ・管種別: 全管種／陶管／ヒューム管
- ・推定式: ワイブル分布曲線

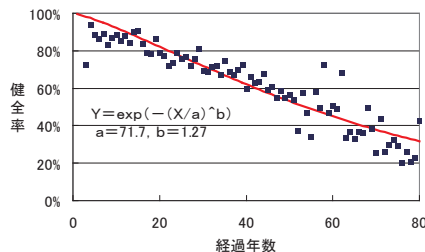
「下水道施設のストックマネジメント手法に関する検討委員会」資料より



【国総研版 健全率予測式の例(陶管)】



【国総研版 健全率予測式の例(全管種)】



【国総研版 健全率予測式の例(ヒューム管)】

(参考) 管きょ劣化データベース(国土技術政策総合研究所ホームページ)
<http://www.nilim.go.jp/lab/ebg/rekka-db.html>

32

長期的改築・修繕計画をたてる基本

- ① リスク低減
- ② 事業費低減

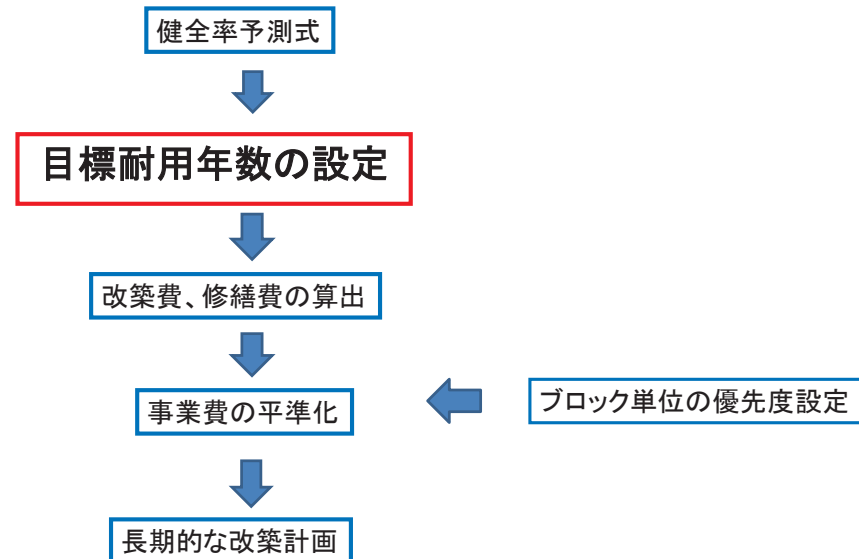


- ① 適切な改築時期
- ② 適切な改築の優先順位

- * 早すぎる→投資が膨大
- * 遅すぎる→後年度負担が増大

34

長期的改築計画策定の流れ



33

適切な改築時期の設定

目標耐用年数⇒改築サイクル <重要>

(1) 通常の耐用年数は管路50年

➡ 財政的に実施困難

(2) 長期的更新計画を決めている事例

東京都 80年 ➡ 経済的耐用年数

S市 90年 ➡ 過去の調査結果

* 改築までは修繕で対応

35

<手引き>

(1) 健全率予測式による

① マルコフ推移確率モデル

② ワイブル分布近似式

③ 管渠劣化データベース活用、独自の予測式

(2) 過去の改築実績に基づく

④ 耐用年数を設定

劣化状態の把握に管の残存強度
⇒ 衝撃弾性波検査法の活用



提案

① スパン全体の緊急度Ⅰ、Ⅱの割合が50%

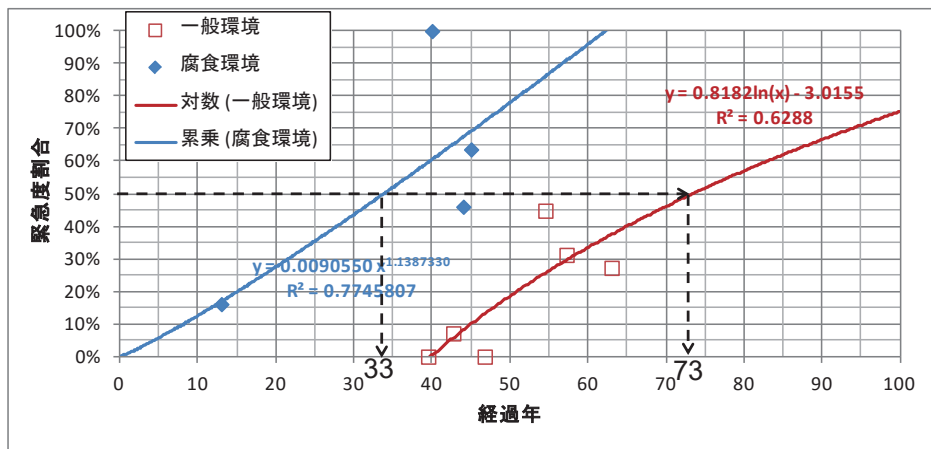
② スパンの健全度平均値が80%以下

36

緊急度による健全率予測式(他都市事例)



Japan Institute of Wastewater Engineering and Technology



緊急度割合50%となる年数を計算すると、

・一般環境: 73年

・腐食環境: 33年

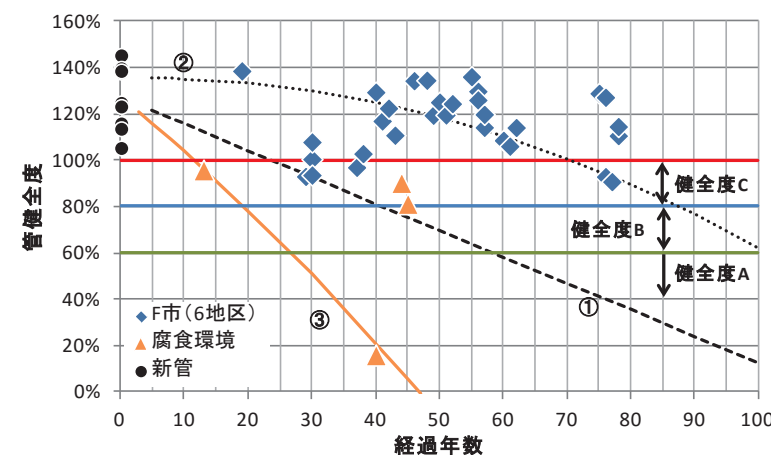
と設定される。

38

健全度による健全率予測式(他都市事例)



Japan Institute of Wastewater Engineering and Technology



健全度曲線	衝撃弾性波検査ランク		
	C	B	A
	100%健全度 ≥ 80%	80% > 健全度 ≥ 60%	60% > 健全度
① 早期に劣化が顕在化する場合	23年	41年	58年
② 緩やかに性能低下する場合	70年	87年	101年
③ 腐食環境	11年	19年	26年

39

項目	整備ブロック考慮案
手法のイメージ	<p>事業費 時間</p> <p>ブロック単位で平準化</p>
手法の概要	既存ストックをブロックして捉え、ブロック単位で改築更新事業を進める。
長所（メリット）	・対策箇所がブロック単位となり、工事の効率性が高い

発生確率

- 管の施工年度
- 管の埋設深さ
- 苦情の情報の有無等

被害規模

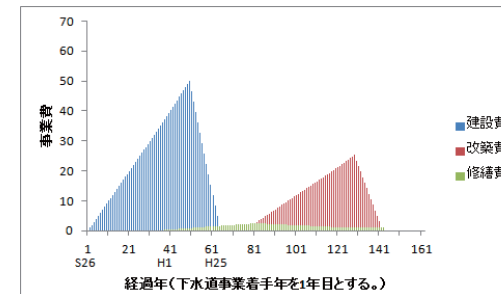
- 重要施設の有無
- 重要道路



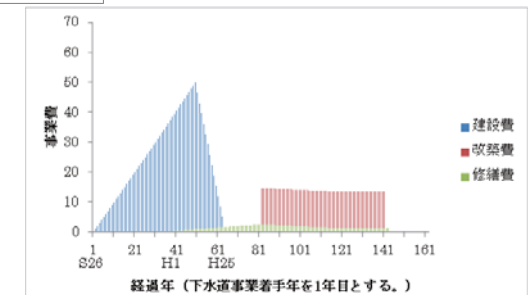
● ブロック単位の整備優先度を設定し、この優先度をベースに事業費の平準化を行う。

40

おわり



事業費の平準化



41