

5. 参考資料

5.1 柔構造継手管路の限界変位の検討

曲管部が柔構造継手で構成されている場合には、継手が離脱する曲管変位を把握し、耐震化の必要性を検討する必要がある。

地震時に曲管背面の基礎材が強度低下し、内圧スラスト力により曲管(スラストブロック)が移動して継手離脱に至る限界変位は、過去の被災事例を参考として、計算により推定する。

5.1.1 過去の地震における被災事例

(1) 鳥取県西部地震におけるダクタイトル管路

路線名：大山山麓開拓建設事業 幹線用水路

口径・管種：800～900mm T・K形ダクタイトル鉄管

管路延長：18.9km

最大震度：6弱

地震時の状況：管内空虚(建設中)、液状化の発生なし。

管路の被害：31箇所での継手で離脱または重大な拔出し、2箇所でのブロックぎわで管変形。

被災箇所の一覧を表5.1に示す。

表5.1 被災箇所一覧

	区分	屈曲角度			ブロックの有無	異形管から 離隔(n本目)	継手拔出し量 (mm)	備考
		°	'	''				
1	B	14	48	32	有	1	60	
2	A	弁室のきわ			有	1	段差30	継ぎ輪
3	B	7	29	47	無	1	52	
4	A	86	57	46	有	1	100	ゴム輪露出
5	B	23	26	13	有	2	46	
6	A	21	21	55	有	2	277	継手離脱(継ぎ輪)
7	A	傾斜配管部			有	1	管変形	32° 傾斜下端部
8	B	11	31	34	有	1	48	
9	A	8	2	44	有	1	21	ゴム輪露出
10	B	30	59	52	有	2	50	
11	A	1	25	27	無	1	22	ゴム輪露出
12	B	22	10	21	有	1	56	
13	A	傾斜配管部			有	2	管変形	36° 傾斜埋設部の支台
14	B	8	17	4	有	1	56	
15	B	26	9	20	有	1	47	
16	B	18	44	6	有	1	47	
17	B	18	17	36	有	1	58	
18	A	23	57	26	有	1	116	継手離脱
19	B	23	57	26	有	1	47	
20	A	24	21	39	有	1	65	ゴム輪露出
21	B	77	8	33	有	0	55	ブロック内の曲管同士
22	B	77	8	33	有	1	50	
23	B	77	8	33	有	2	50	
24	B	傾斜配管部			有	0	42	28° 傾斜上端部の曲管同士
25	A	傾斜配管部			有	1	69	28° 傾斜上端(継手離脱)
26	B	水平移行後			有	5	62	
27	B	15	46	12	無	1	55	
28	B	傾斜配管部			有	1	50	30° 傾斜下端部
29	B	5	2	19	無	1	49	
30	B	14	46	51	有	1	47	
31	A	11	18	0	無	3	12	ゴム輪露出
32	B	45	0	0	有	1	53	
33	B	44	48	50	有	1	48	
区分A) 「受口～挿し口の離脱」または「ゴム輪の露出」により水密性を確保できない状態								
区分B) 継手離脱には至らないものの「規格値の1.5倍を超える伸び出し」を示す状態								

表 5.1 より、継手離脱または規格値の 1.5 倍を超える拔出し(継手離脱は規格値の約 2 倍)を示した継手は、合計 31 箇所と調査した 3970 箇所の 0.8%であるが、そのうちの 94%(29/31 箇所)が曲管・構造物から 2 本以内の継手で発生しており、その影響が顕著であることがわかる。

被害を受けた管路の一例を図 5.1 に示す。

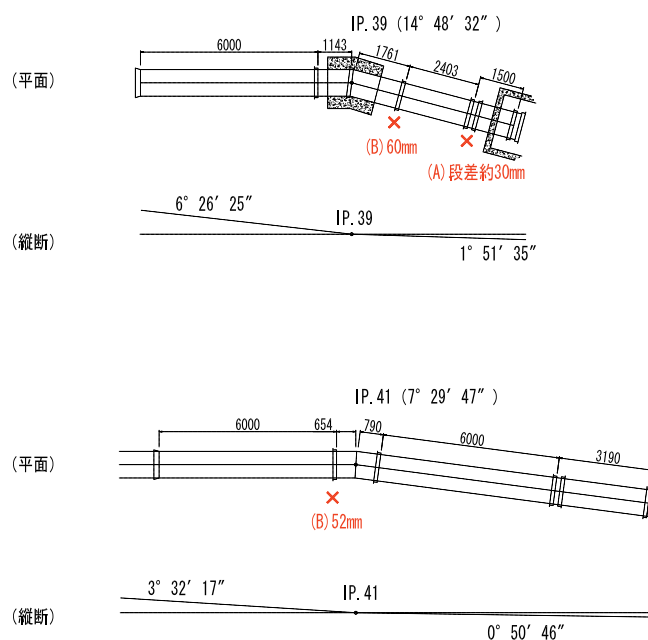


図 5.1 管路の平面・縦断線形と被災箇所 (No.1,2,3)

(2) 東北地方太平洋沖地震における管路被災事例 (東北)

路線名：隈戸川地区 幹線用水路

口径・管種：1350～2600mm FRPM 管

管路延長：17.8km (布設替えを実施した区間長はこのうち 3.0km)

最大震度：6 強 (須賀川市の地震計)

地震時の状況：通水(供用中)、埋戻し砂に液状化発生、盛土断面で側方流動発生。

管路の被害：109 箇所の継手で許容値を上回る拔出し (うち 3 箇所で継手離脱)、11 箇所の付帯施設で浮上・沈下による被災など。

(3) 東北地方太平洋沖地震における管路被災事例 (関東)

路線名：芳賀台地地区 菅又幹線用水路

口径・管種：700～800mmFRPM 管

管路延長：9.2km

最大震度：6 強(栃木県市貝町の地震計)

地震時の状況：通水(供用中)、液状化の発生なし。

管路の被害：16 地点、68 箇所の継手で漏水(その内、2 箇所の継手では破損を伴う)。

スラストブロックの移動 (被災後の継手計測結果より推察)、管変形が発生。

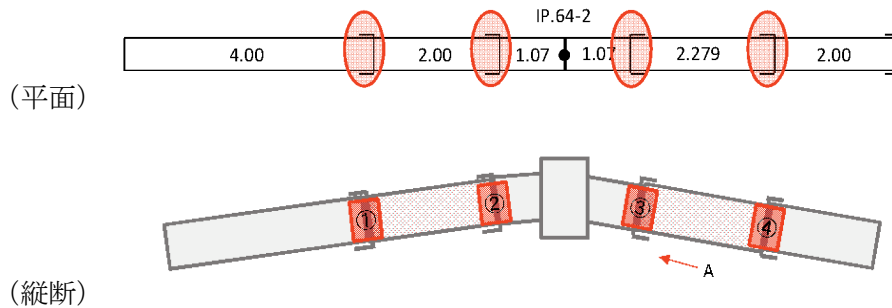
表 5.2 被災箇所一覧

災害査定時 名称	口径	被災状況	構造物情報	水平屈曲 情報	復旧範囲		備考
					m	継手箇所	
IP64-1	φ 800	抜け出し	スラストブロック	30°	6.00	4	空気弁保護工(2号)併設
IP71	φ 800	抜け出し	スラストブロック	15°	6.22	4	
IP72	φ 800	抜け出し	スラストブロック	19°	6.46	4	
IP76	φ 700	破損・抜け出し	スラストブロック	28°	17.15	6	空気弁保護工(6号)併設
IP109	φ 700	破損・抜け出し	スラストブロック	88°	16.81	6	
IP64-2	φ 700	抜け出し	スラストブロック	30°	6.42	4	
IP135-1	φ 700	抜け出し	スラストブロック	11°	7.86	4	
IP137	φ 700	抜け出し	スラストブロック	11°	7.80	4	
IP139-1	φ 700	抜け出し	スラストブロック	19°	9.70	4	
IP140-1	φ 700	抜け出し	スラストブロック	14°	8.60	4	
IP150	φ 700	抜け出し	スラストブロック	11°	8.44	4	
IP154	φ 700	抜け出し	スラストブロック	8°	9.10	4	空気弁保護工(15号)併設
IP163	φ 700	抜け出し	スラストブロック	6°	8.95	4	空気弁保護工(16号)併設
IP167	φ 700	抜け出し	スラストブロック	38°	9.95	4	空気弁保護工(17号)併設
IP174	φ 700	抜け出し	スラストブロック	34°	8.64	4	
IP226	φ 700	抜け出し	スラストブロック	7°	8.65	4	空気弁保護工(25号)併設

※出典：直轄災害復旧事業 芳賀台地地区 災害復旧事業計画書を整理

表 5.2 より、被災箇所はいずれもスラストブロックが設置された屈曲部に集中しており、被災延長の合計は 146.75m であった。被害を受けた管路の一例を図 5.2 に示す。被災箇所はいずれもスラストブロックを設置した屈曲部の上下流の継手（2～3ヶ所）に抜け出し又は破損が生じている状況であった。

なお、復旧範囲の判定は、地上への漏水や陥没、管内目視調査が可能な φ 800 は管内への浸入水の状況、施工管理基準値を上回る抜け出し量の計測により行われている。また、管内目視調査ができない φ 800 未満は、漏水や地上部の陥没状況と φ 800 の継手抜け出し傾向（屈曲部の上下流 2 本）を踏まえて復旧範囲を判定している。



(単位: mm)						
測点	設計値	規格値	基準値	実測値	差	判定
FRPM (φ 800mm) L=4000mm						
①	139	+ 53	192	196	+ 4	OUT
FRPM (φ 800mm) L=2000mm						
②	0	+ 53	53	75	+ 22	OUT
SS (φ 800mm) L=2140mm						
③	0	+ 53	53	60	+ 7	OUT
FRPM (φ 800mm) L=2279mm						
④	139	+ 53	192	200	+ 8	OUT
FRPM (φ 800mm) L=2000mm						

出典：直轄災害復旧事業 芳賀台地地区 災害復旧事業計画書を引用

図 5.2 管路の平面・縦断線形と被災箇所(IP64-2 スラストブロック付近)

5.1.2 計算による曲管部継手の限界変位

管路被災事例によると、多くのケースで曲管から1本目、2本目の管が大きく移動し、継手の離脱等もこの箇所に集中している。この傾向をもとに、ここでは図5.2に示すように曲管の変位に伴って直近の管だけが動く（最も厳しい）条件を仮定して継手の伸出量を計算し、離脱に至る曲管の限界変位を求める。

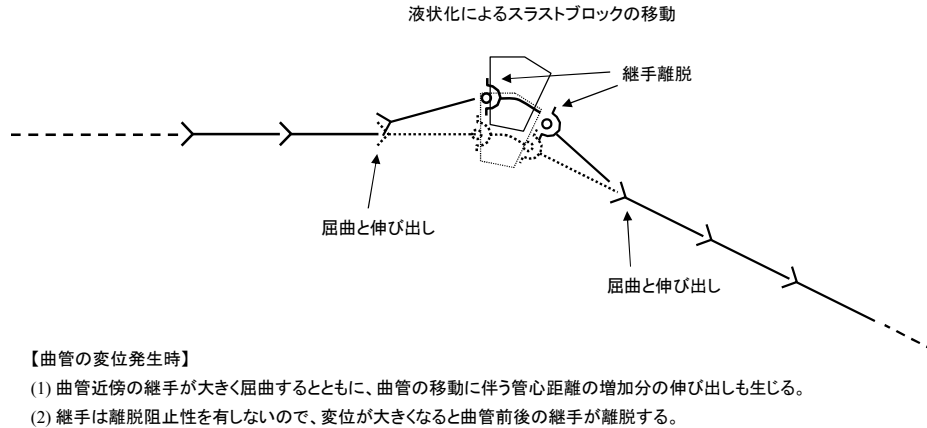


図5.2 柔構造継手管路の曲管の限界変位

計算は曲管継手の屈曲に着目し、模式的に図5.3に示す。曲管継手背面側の最大継手伸び量は、真直に抜け出す量 E_1 と屈曲による抜け出し量 E_2 の和になり、それぞれ次式により求めることができる。

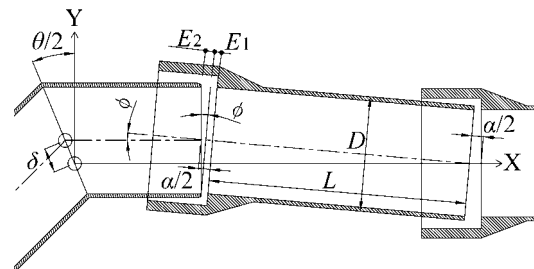


図5.3 屈曲した継手部

$$E_1 = \frac{\alpha}{2} - \frac{D}{2} \times \sin \phi$$

$$E_2 = D \times \sin \phi$$

$$\alpha = \sqrt{\left(L + \delta \times \sin \frac{\theta}{2}\right)^2 + \left(\delta \times \cos \frac{\theta}{2}\right)^2} - L$$

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{L + \delta \times \sin \frac{\theta}{2}}{L + \alpha} \right)$$

ここで、

α : 曲管が移動して伸びた管中心距離、 D : 管の外径、 ϕ : 継手屈曲角度、

L : 曲管に接続された管の長さ、 δ : 曲管の移動量、 θ : 曲管角度

である。

曲管が背面側へ移動(δ)したとき、曲管に接続された管だけが屈曲(ϕ)し、管中心距離の伸び(a)は屈曲した管の両側の継手で等分に負担すると仮定する。この考え方で求めた曲管継手(背面側)の最大伸び量(E_1+E_2)が、挿し口先端が所定の位置からゴム輪まで抜け出す寸法になるときを曲管の限界変位とする。

口径により継手の呑込み寸法が異なり、曲管角度や接続される管の長さもさまざまであるが、K形直管と曲管の組合せを例として限界変位を表 5.3 に示す。45° 曲管の場合、呼び径 75~250 で 180mm 程度、呼び径 300~1000 で 250mm 程度となる。90° 曲管の場合、呼び径 75~250 で 100mm 程度、呼び径 300~1000 で 160mm 程度となる。

表 5.3 曲管の限界変位 (K 形継手)

呼び径	直管長さ (m)	限界変位(mm)	
		45°曲管	90°曲管
75	4.0	189	110
100		186	109
150	5.0	186	109
200		183	108
250		179	107
300	6.0	284	170
350		279	169
400		275	168
450		270	166
500		266	165
600		258	163
700		250	160
800		243	158
900		236	156
1000		258	173

5.2 費用対効果の検討

設計基準の耐震設計では、施設の重要度がA種またはB種で液状化対策が必要な場合には、対策を検討することとされており、費用対効果の検討に抛らず対策を実施することとなる。ここでは参考として、「大規模地震対策に係る土地改良事業の費用対効果分析に関する効果算定マニュアル」（平成23年6月30日 23農振第600号 農村振興局整備部長）に準じて、本工法を用いて部分的に耐震強化する管路施設の費用対効果を算出した計算例を示す。

(1) 土地改良事業の経済効果

① 考え方

経済効果（総費用総便益比）は、土地改良事業の経済性評価を行うもので、一定地域の範囲における評価期間（当該事業の工事期間+40年）の下で必要な投下費用（総費用）と、それによって発現する総便益を対比することで測定を行う。

大規模地震対策の効果の算定にあたっては、大規模地震発生時における一連の確からしいシナリオ（地震発生から復旧までのストーリー想定）を設定する。また、効果額算定では、評価期間内に強い揺れに見舞われる回数の期待値（地震発生確率）を効果額に乗じることにより各効果の適正な評価が得られる。年当たりの地震発生確率は、対象地区内における今後30年以内に震度6以上の揺れが発生する確率を「全国地震動予測地図」から読み取り、ポアソン過程に従って推定する。なお、地震発生確率が大きくなれば、より高い費用対効果となる。

$$\text{総費用総便益比} = \text{総便益} / \text{総費用} \geq 1.0$$

② 総費用

総費用は、通常のパイプライン工事費に加えて別途必要となる耐震対策工事費を合算した全体工事費であり、図5.3の右側の耐震対策ありせば工事費にあたる。

③ 総便益

総便益は、通常のパイプライン工事費（耐震対策なかりせば工事費）に加えて、パイプラインの大規模地震対策を行うことにより未然に防げる被害額であり（図5.4）、図5.3の左側にあたる。また、効果には表5.3に示す項目があり、これらは地震の発生確率及び割引率を乗じて評価期間内の総額を算出する。

なお、図5.3には表記していないが、一律定められない断水に伴う作物減産被害がある。また、その他一律定まらないものとして、道路交通障害に伴う損失、住宅の二次災害被害の発生リスクなど、便益として考慮すべき項目がある。

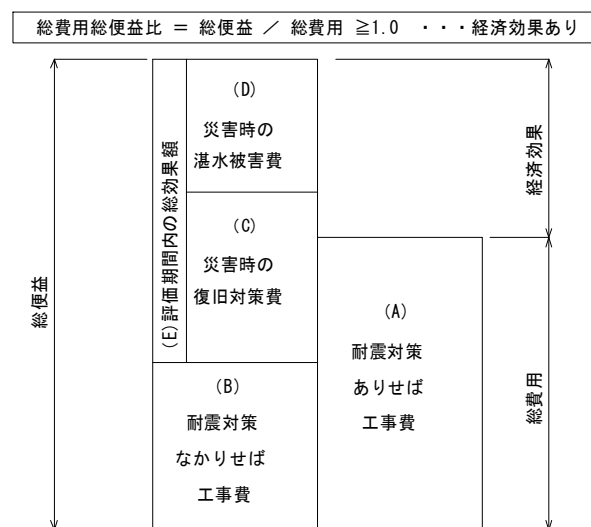


図5.3 耐震対策の費用対効果の概要

表 5.3 効果項目と効果要因

効果項目名	効果の要因
災害時の作物減産防止効果	地震時の断水により生じる作物の生産の減少を防止する
災害時の湛水被害防止効果	地震時、用水氾濫により生じる農地・農業用施設への被害、及び、一般・公共資産への湛水被害が軽減する
災害時の復旧対策費軽減効果	農業水利施設の損壊により生じる復旧工事費が軽減する

パイプラインの大規模地震対策による被害のイメージは、下図のようになる。

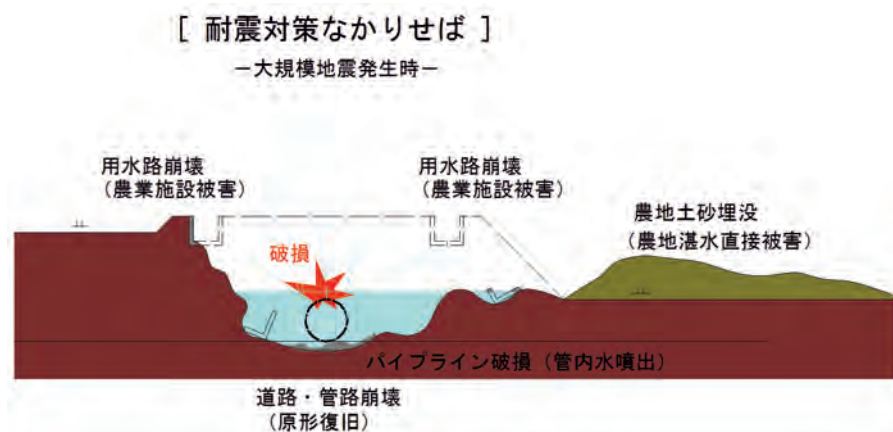


図 5.4 パイプラインの大規模地震による被害

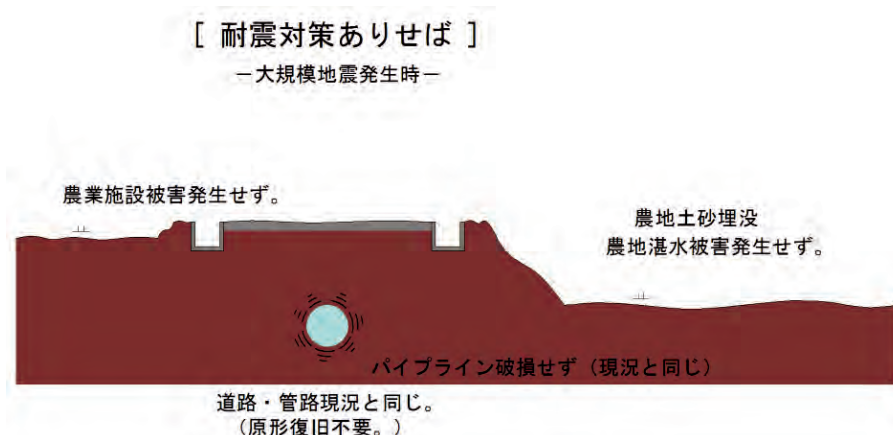


図 5.5 パイプラインの大規模地震対策による効果

(2) 費用対効果の算定例

① 算定条件

費用対効果の算出条件は、新たに新設するパイプラインとし、屈曲角度 45° に対して、「(B) 耐震対策なかりせば」は従来工法としてスラストブロックによるスラスト対策、「(A) 耐震対策ありせば」は、耐震対策として管路の鎖構造化（範囲は屈曲部上下流それぞれ管 5 本）を想定した。

「(B) 耐震対策なかりせば」、「(A) 耐震対策ありせば」のそれぞれの配管模式図を図 5.6 に示す。

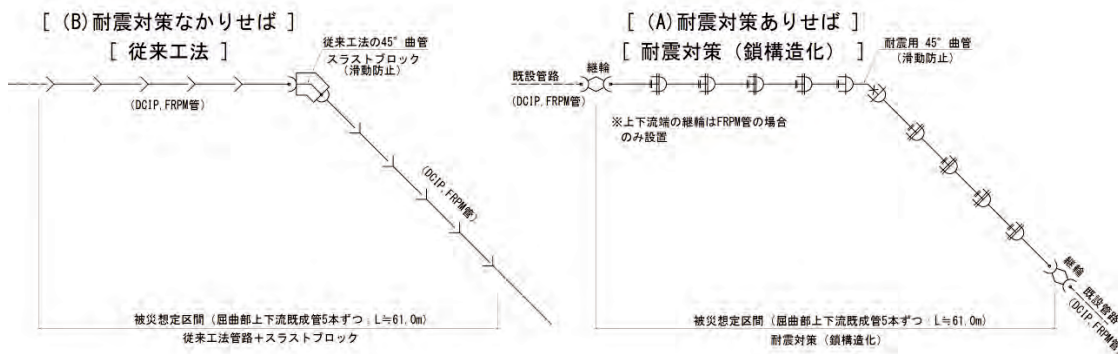


図 5.6 従来工法と部分的な鎖構造化による配管模式図

その他の諸元は下記を想定し、従来工法の管材の規格は、設計基準の構造計算手法により求めた。

- ・ 口径：φ 500、φ 1000
- ・ 管種：ダクタイル鋳鉄管・強化プラスチック複合管（以下 FRPM 管と呼ぶ）
- ・ 設計水圧：0.5MPa、0.75MPa、1.0MPa
- ・ 今後 30 年の大規模地震（震度 6 弱以上）の発生確率：65%

② 総費用

総費用は、(A) 耐震対策ありせば工事費であり、本工法の工事費となる。

屈曲部上下流それぞれ管 5 本ずつの範囲を対策範囲として工事費を計上した。

耐震継手管 10 本+曲管+簡易土留施工土工費・仮設費+舗装取壊し復旧費
 (前後の配管が FRPM 管の場合は上記に加え継輪 2 個)

③ 総便益

便益は、以下に示す (B) ~ (F) により算出した。

(B)：耐震対策なかりせば工事費

従来工法の工事費であり、範囲は耐震対策と合わせて、屈曲部上下流それぞれ管 5 本ずつの工事費を計上した。

標準管 10 本+曲管+スラストブロック+簡易土留施工土工費・仮設費

(C)：災害時の復旧対策費

災害時の復旧対策費は、図 5.7 に示す配管、図 5.8 に示す施工断面により、被災箇所の工事費を算出した。なお、既設管に接続するため、DCIP 管・FRPM 管ともに上下流端に継輪が必要になる。

標準管 10 本+曲管+継輪 2 個+スラストブロック+簡易土留施工土工費・仮設費+舗装取壊し復旧費

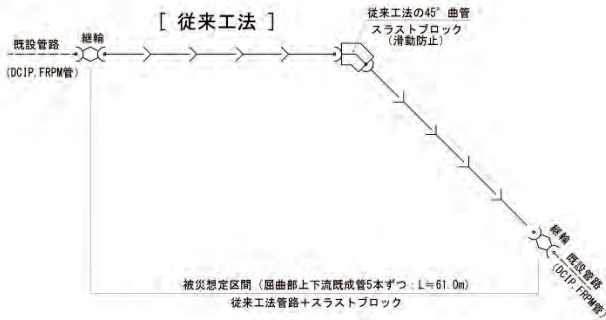


図 5.7 災害復旧時の配管模式図

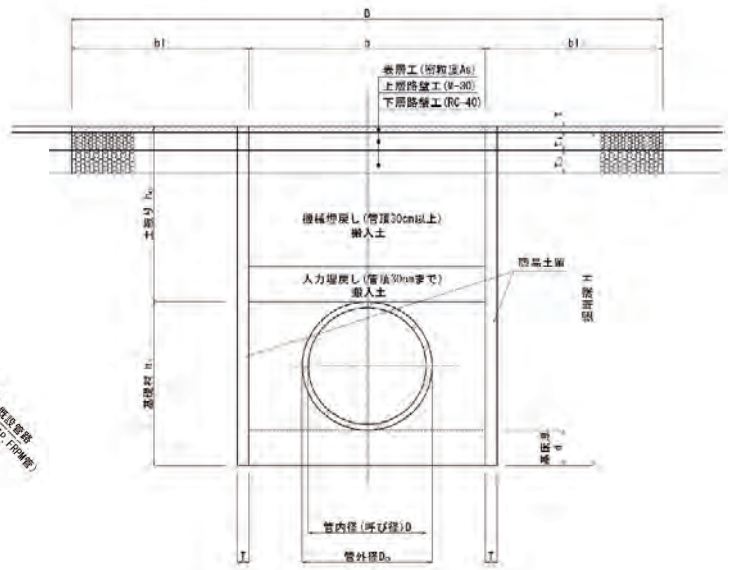


図 5.8 簡易土留施工 工事費算定断面図

(D) : 災害時の湛水被害費

災害時の湛水被害費は農地および農業施設被害額（復旧工事費）であり、以下のように算出した。

- ①被災面積： $A = \{5.0 \times (D + 2.0) \times L61.0m\} \div \text{土砂埋没深 } 0.5m$
- ②農地被害額 = $A (\text{ha}) \times \text{農地被害単価} (\text{円/ha})$
- ③農作物被害額 = $A (\text{ha}) \times \text{農作物被害単価} (\text{円/ha})$
 ※農作物被害面積は土砂埋没被害面積と同等の浸水被害面積を見込む。
- ④農業施設被害額 = $L61.0m \times \text{用水路被害単価} (\text{円/m}) \times 2 (\text{両側})$
- ⑤農地および農業施設被害額 = ② + ③ + ④

※なお、各被害単価は事例より以下のとおりとした。

農地被害単価：農用地土砂埋没被害単価 = 7,441,000 (円/ha)

農作物被害単価：水稲浸水被害単価 = 258,000 (円/ha) (0.5m 未満)

用水路被害単価：コンクリート水路 $0.6m \times 0.6m = 21,000 (\text{円/m})$

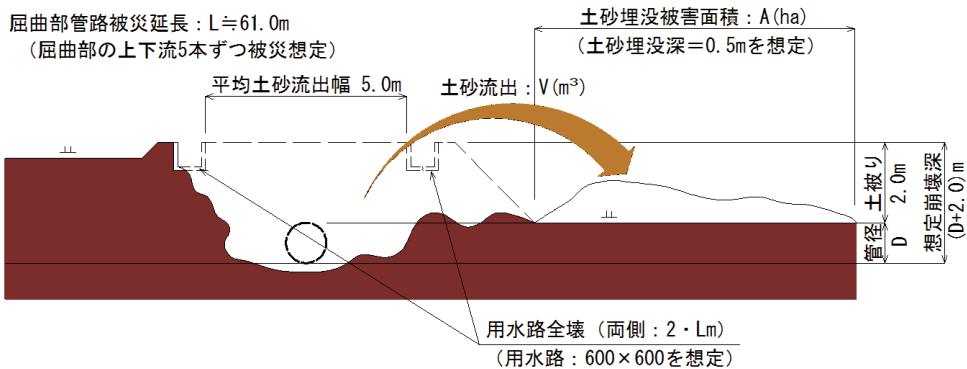


図 5.9 パイプラインの大規模地震による被害想定図

(E) : 評価期間内の総効果額

年効果額は、大規模地震想定額 ((C) 災害時の復旧対策費 + (D) 災害時の湛水被害費) に年次地震発生確率を乗じて算出する。(E) 評価期間内 (40 年間) の総効果額は、年効果額 (現在価値化割引後) の合計となる。

(E) 評価期間内の総効果額 = Σ (評価期間 40 年間の年効果額 (現在価値化割引後))

年効果額 = (大規模地震被害想定額) \times 年次地震発生確率 $B_n \div$ 年次割引率 α_n

※ ・ 30年以内に一回も地震の起こらない確率を p としたときの n 年目の地震発生確率 B_n

$$n \text{ 年目の被害発生確率} : B_n = e^{-p(n-1)} \cdot (1 - e^{-p})$$

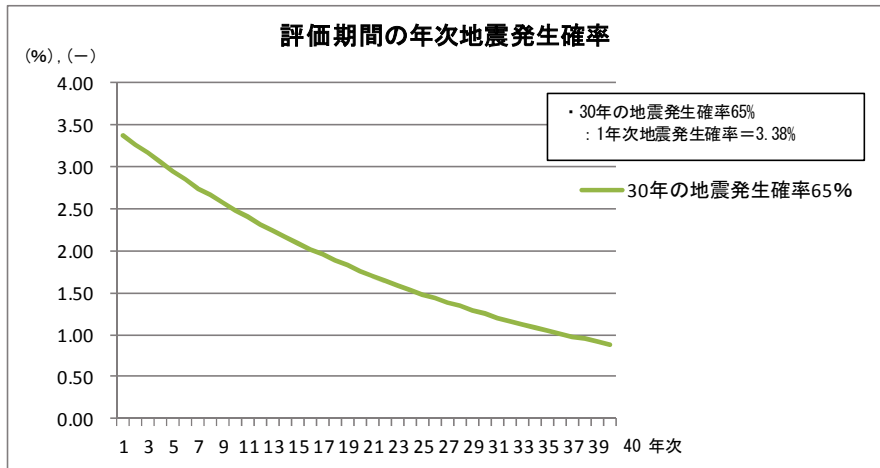
30年以内に震度6弱以上の地震が発生する確率が65% (0.65) の時

$$p = 1 - (1 - 0.65)^{(1/30)} \approx 0.034$$

・ 現在価値化するための n 年目の割引率 : α

$$1 \text{ 年目の割引率} 4\% : \alpha_1 = 1 + 4/100 = 1.04$$

$$n \text{ 年目の割引率} : \alpha_n = 1.04^n$$



← 評価期間 : 40年 →

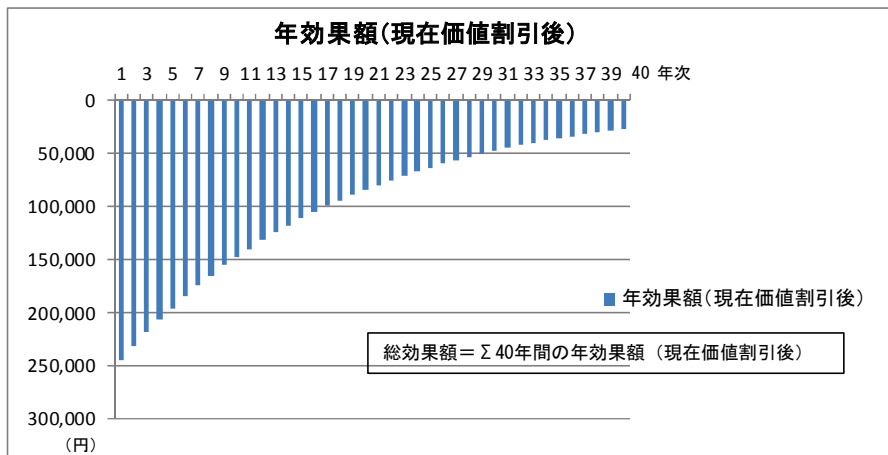


図 5.10 年次地震発生確率及び年効果額 (現在価値割引後) の一例

④ 費用対効果の算定結果

パイプラインの大規模地震対策による費用対効果の算定結果は表 5.4 のとおりであり、計算例では全て 1.0 以上となった。

計算例では、効果として農地および農業施設被害額とパイプライン本体の被害額を計上しているが、これら以外に断水に伴う作物減産被害、道路交通障害に伴う損失、住宅近接地においては二次被害の発生リスクなど、便益として考慮すべき項目があり、これらの損失が発生するような条件ではより高い費用対効果となる。

表 5.4 大規模地震対策による経済効果の検討結果

対象施設	使用圧力 MPa	(A)	(B)	(C)	(D)	= (A)	(E)	= (B)+(E)	総費用 総便益 比 > 1.0 --OK
		耐震対策がある場合の工事費 (千円)	耐震対策がない場合の工事費 (千円)	災害時の復旧対策費 (千円)	災害時の湛水被害費 (千円)	総費用 (千円)	Σ 40年間の割引後総効果額 (千円)	総便益 (千円)	
DCIP φ 500	0.50	13,600	11,300	11,500	3,696	13,600	6,596	17,896	1.31
	0.75	13,600	11,300	11,600	3,696	13,600	6,640	17,940	1.31
	1.00	13,600	11,300	11,600	3,696	13,600	6,640	17,940	1.31
DCIP φ 1000	0.50	26,700	19,500	20,400	3,927	26,700	10,560	30,060	1.12
	0.75	26,700	19,600	20,600	3,927	26,700	10,647	30,247	1.13
	1.00	26,700	19,800	20,800	3,927	26,700	10,734	30,534	1.14
FRPM φ 500	0.50	14,100	11,100	11,700	3,696	14,100	6,683	17,783	1.26
	0.75	14,100	11,300	11,900	3,696	14,100	6,770	18,070	1.28
	1.00	14,100	11,300	11,900	3,696	14,100	6,770	18,070	1.28
FRPM φ 1000	0.50	28,700	19,000	21,500	3,927	28,700	11,038	30,038	1.04
	0.75	28,800	19,600	22,100	3,927	28,800	11,298	30,898	1.07
	1.00	28,800	20,000	22,500	3,927	28,800	11,472	31,472	1.09

6. 参考文献

- ①埋設管の水平抵抗力と液状化程度の関係、平成 26 年度農業農村工学会大会講演会、2014 年 8 月、井谷昌功、藤田信夫、澤田 豊、有吉 充、毛利栄征、河端俊典
- ②液状化地盤における断面形状の異なる埋設管の水平抵抗力、平成 26 年度農業農村工学会大会講演会、2014 年 8 月、藤田信夫、井谷昌功、澤田 豊、有吉 充、毛利栄征、河端俊典
- ③水平載荷実験による継手構造管路屈曲部の挙動、平成 27 年度農業農村工学会大会講演会、2015 年 9 月、井谷昌功、横田木綿、藤田信夫、有吉 充、毛利栄征、河端俊典
- ④液状化地盤における継手構造管路屈曲部の動的挙動、平成 27 年度農業農村工学会大会講演会、2015 年 9 月、藤田信夫、井谷昌功、有吉 充、毛利栄征、河端俊典
- ⑤液状化地盤における管路挙動 — 隈戸川地区幹線用水路の被災事例 —、平成 27 年度農業農村工学会京都支部研究発表会、2015 年 11 月、春本朋洋、宮田 勉、有吉 充、井谷昌功、毛利栄征、河端俊典
- ⑥液状化地盤における埋設管の水平抵抗力に関する模型実験、農業農村工学会論文集第 295 号、2015 年 2 月、井谷昌功、藤田信夫、澤田 豊、有吉 充、毛利栄征、河端俊典
- ⑦水平載荷時の継手構造管路屈曲部の挙動メカニズム、農業農村工学会論文集第 300 号、2015 年 12 月、井谷昌功、藤田信夫、横田 木綿、有吉 充、毛利栄征、河端俊典
- ⑧液状化地盤中の管路屈曲部の動的挙動に関する検討、農業農村工学会論文集第 301 号、2016 年 2 月、井谷昌功、藤田信夫、有吉 充、毛利栄征、河端俊典
- ⑨液状化地盤における管路屈曲部の設計に関する検討、農業農村工学会論文集第 302 号、2016 年 6 月、井谷昌功、藤田信夫、毛利栄征、河端俊典

液状化地盤におけるパイプラインの耐震化向上技術

— 管路屈曲部の耐震工法 —

設計・施工マニュアル（第 1 版）

平成 28 年 12 月

株式会社クボタ パイプシステム事業部

東京本社 〒104-8307 東京都中央区京橋2丁目1番3号 TEL 03-3245-3104
本社 〒556-8601 大阪市浪速区敷津東1丁目2番47号 TEL 06-6648-3041

内外エンジニアリング株式会社

本社 〒601-8213 京都市南区久世中久世町1丁目141番地 TEL 075-933-5111

国立大学法人

神戸大学 大学院農学研究科

〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1
<http://www.research.kobe-u.ac.jp/ans-soilenv/>

国立大学法人

茨城大学 農学部

〒330-0393 茨城県稲敷郡阿見町中央3-21-1
<http://geotech.agr.ibaraki.ac.jp/MohriLab/index.html>

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

農村工学研究部門 施設工学研究領域

〒305-8609 茨城県つくば市観音台2丁目1-6
<http://www.naro.affrc.go.jp/nire/>