

高尾川における地下河川の整備について

THE MAINTENANCE OF THE UNDERGROUND RIVER

IN TAKAOGAWA

田浦康司¹

Koji TAURA

¹ 福岡県那珂県土整備事務所 災害事業室 (〒816-0943 大野城市白木原 3-5-25)

1. はじめに

平成26年8月22日の未明から朝方にかけて、福岡県筑紫野市の周辺では、寒冷前線の南下に伴い発生した雨雲により局所的に猛烈な豪雨が発生し、気象庁の太宰府観測所では8月としては既往最大となる1時間に98.5mmという雨量を記録した。このため筑紫野市の中心を南北に貫流する二級河川高尾川が氾濫し、商店街を含む多くの家屋が浸水被害を受けた。

高尾川流域では市街化が進んでおり、川に沿って商店街や県内最古の酒造が立ち並ぶなど、浸水対策の必要性に加え、当該地域の歴史や街並みの保全、また地域の活性化が望まれていた。

そのため福岡県では、本浸水被害の再度災害防止を目的とした床上浸水対策特別緊急事業(以下、「床対策事業」という)の実施に当たり、現況河川の真下に地下河川を整備するという全国でもあまり例のない工法を採用した。

近年、気候変動等による水災害の激甚化、頻発化が問題となっている中で、当該地域の様な都市域における浸水対策は事業用地の確保が困難なケースが想定される。高尾川における地下河川の整備は、都市における浸水対策の1つの解決策として有用だと考える。

著者は、本事業の初年度から、県の担当として計画、設計、施工に至る一連の工程に携わっており、今回は事業の目標と課題(「設計における課題」、「施工における課題」)への対応について紹介する。

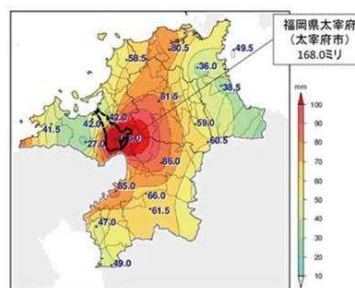


図-1 アメダス期間降水量分布図 (H26. 8. 22 0-9時)

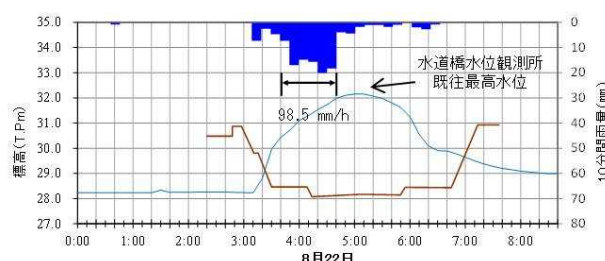


図-2 太宰府観測所雨量と高尾川水位の状況 (H26. 8. 22)

2. 流域の概要

高尾川は、福岡県の北西部を流れる二級河川御笠川の二次支川であり、筑紫野市の中心市街地を流れ、一次支川である鷲田川に流入する流路延長 1.5 km、流域面積 4.4 km²の小河川である。流域近傍には西鉄大牟田線やJR鹿児島本線、九州自動車道、国道3号等があり、交通の要衝となっている。筑紫野市は、県最大の都市である福岡市を含む福岡都市圏の南に位置し、現在も人口の微増が続いている。

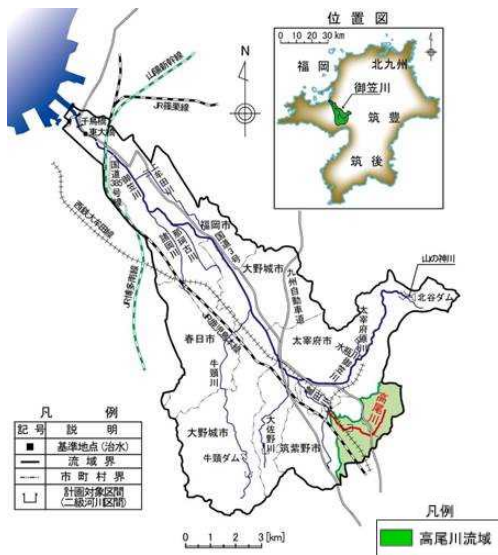


図-3 御笠川流域図（高尾川流域図）

3. 流域の浸水被害

(1) 過去の浸水被害

高尾川は、この10年間だけでも5回も氾濫しており、およそ2年に1回の割合で床上浸水被害が発生している。

表-1 高尾川流域の近年の浸水被害

発生年月日	降雨要因	水文状況 24時間雨量 (mm)	被害状況	河川名
H21年7月	梅雨	307.0	床上浸水 92戸 床下浸水 48戸	高尾川
H22年7月	梅雨	233.5	床上浸水 35戸 床下浸水 36戸	鷺田川, 高尾川
H24年7月	梅雨	209.0	床上浸水 17戸 床下浸水 5戸	鷺田川, 高尾川
H26年8月	全線	169.5	床上浸水 46戸 床下浸水 46戸	鷺田川, 高尾川
H30年7月	梅雨	333.5	床上浸水 25戸 床下浸水 19戸	高尾川

(2) H26. 8. 22 の浸水被害

特に平成26年8月22日の豪雨においては、浸水面積7.4ha, 床上浸水被害46戸, 床下浸水被害46戸という浸水被害が発生し、市民生活に大きな打撃を与えた。

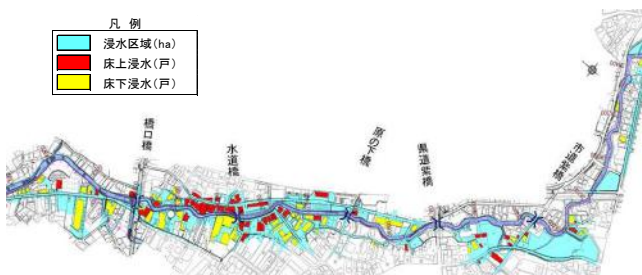


図-4 浸水区域図



写真-1 浸水状況 (H26. 8. 22) (左：洪水前, 右：洪水時)

4. 事業の概要

(1) 事業の経緯

福岡県では、平成11年、15年に本川である御笠川の氾濫により博多駅が浸水した洪水を契機として、御笠川において河川激甚災害特別緊急事業等に着手し、平成20年に被災規模相当の洪水に対する一定の完成をみた。一方、高尾川等の支川ではその後も浸水被害が相次いだことから、平成24年度より一次支川鷺田川の赤岸堰(0k920)地点から二次支川高尾川の西鉄橋梁(1k020)地点までの約2.1kmにおいて河川改修事業に着手した。しかし、その矢先、平成26年の浸水被害を受け、度重なる浸水被害に対し、緊急的な解消を目指す必要があるとして、鷺田川の西鉄二日市駅付近(1k780)から高尾川の県道紫橋付近(0k840)までの約1.0kmにおいて平成27年度から床対事業に着手している。本事業はおよそ5箇年で予算を集中投資することで、再度災害の発生を防止し、当該地域の浸水被害の軽減を図ることを目的としている。



図-5 事業区間位置図

(2) 高尾川床対事業の概要

本事業では、市街地において限られた期間内に事業効果を発現させる必要があるため、従来の用地買収を伴う河道拡幅等に加え、地下河川によるバイパスについても洪水防御計画の一つとして比較検討を行った。その結果、経済性、社会的影響を総合的に判断し、地下河川によるバイパスと流下阻害の原因となっている橋梁改築をメニューとした。

【事業概要】

- ・事業延長 L=1,040m
- ・事業期間 H27～H31
- ・事業費 78 億円
- ・整備内容 地下河川(シールド工法) L=1,040m
橋梁架替 N=1 橋 , 特殊堤 L=120m

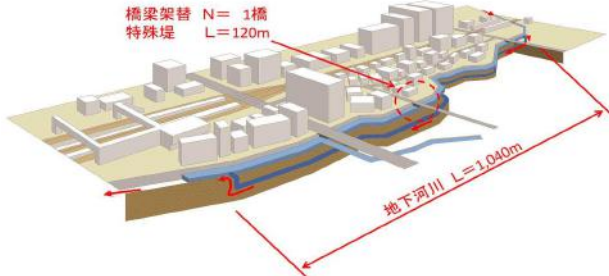


図-6 事業イメージ

5. 事業の目標と課題

事業の目標と課題を以下のとおり設定した。

(1) 目標

本事業における目標は、度重なる浸水被害を早期に軽減するため、「限られた期間での確実な事業効果発現」とした。

(2) 課題

本事業で採用した地下河川は、全国的にも例の少ない工法であり、限られた期間内に確実な事業効果を発現させるためには、適切な施設設計を行う際の課題や施工段階の課題等、今までにない様々な課題があった。

6. 設計における課題

事業目標の達成に向け、設計上の課題とそれに対する対応について紹介する。

(1) 設計概要

地下河川の計画諸元は、理論値より河川分派に伴う流入損失、管内ロス、流出損失等のロスを考慮し、目標流量の分派に必要な地下河川規模を設定した。

- ①計画流量 河道 30 m²/s , 地下河川 30 m²/s
(H26.8.22 河道 40 m²/s , 地下河川 30 m²/s)
- ②トンネル延長 1,040 m
- ③内径(外径) φ 5.0 m (φ 6.0 m)
- ④曲線半径 R60(3 箇所), R30(8 箇所), R25(1 箇所), R20(9 箇所), R18(4 箇所), R16(2 箇所)
- ⑤流下方式 自然流下圧力管方式
- ⑥流入形式 越流堤による横越流
- ⑦流出形式 逆流防止堰

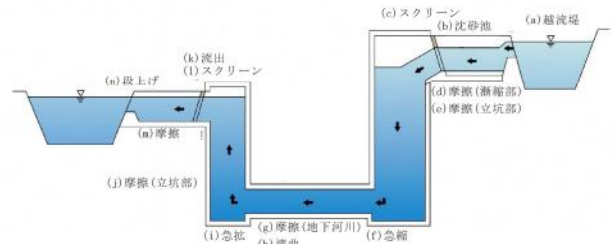


図-7 各部損失モデル

(2) 課題

本施設に求められるのは「洪水時の確実な流下機能の確保」であり、以下の段階における再現精度や維持管理基準の設定が課題であった。(ここでいう機能とは計画流量の流下とする)

a) 施設整備段階

施設整備段階においては、当初は机上検討により施設諸元を決定したが、地下河川への分流特性は様々な要素に支配されるため、再現精度に課題があり、確実な計画流量の流下ができない恐れがある。

b) 維持管理段階

施設整備後に見込まれる土砂の堆積と地下河川流量との関係性が不明であり、土砂の排土に関する定量的な指標がないため、維持管理の状況によって確実な計画流量の流下ができない恐れがある。

(3) 対応

これら課題に対し、大型の水理模型を用いて施設形状を決めるための実験と、形状決定後の土砂堆積の影響を検証する2種類の水理模型実験を行った。

7. 施設形状の決定に資する実験

地下河川の確実な計画流量の流下が可能となるよう施設形状を決定することを目的として実施した。

(1) 実験概要

本実験に使用する模型は、経済性や再現性を考慮の上、対象区域を3つに区分し、縮尺 1/25 スケールで製作した。それを利用して各部における損失を実証するため、湾曲損失実験、流入施設実験、流出施設実験を実施した。

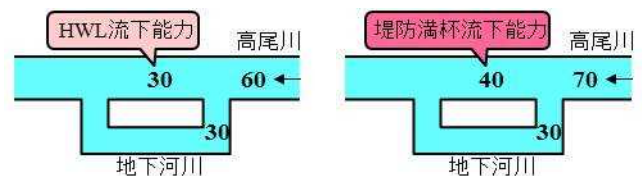


図-8 計画流量 (左: 河川整備計画、右: 床対計画)

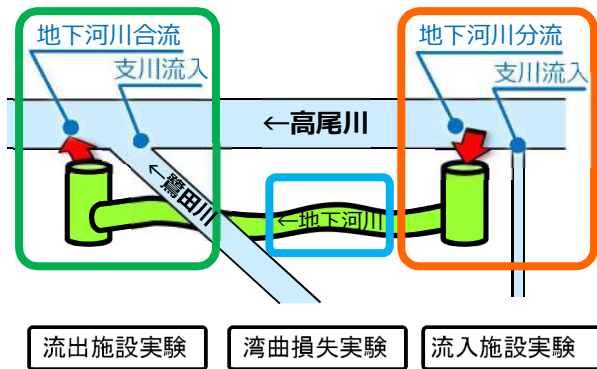


図-9 施設形状決定に資する実験イメージ

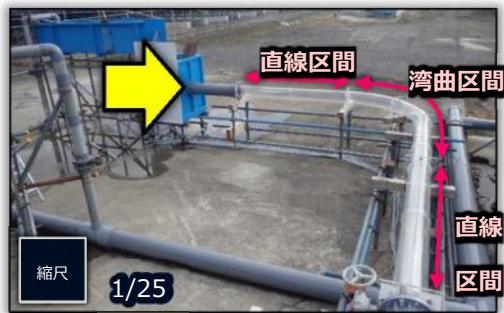


写真-2 湾曲損失実験模型

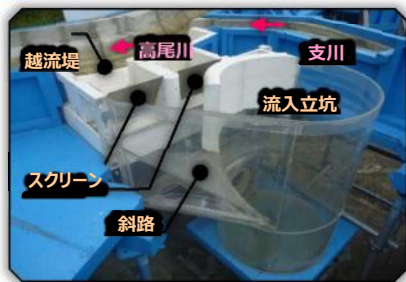


写真-3 流入施設実験模型 (上:全体、下:流入施設部)

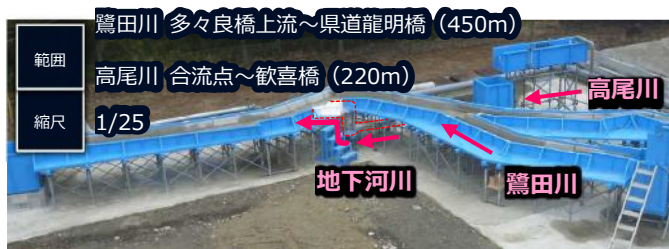


写真-4 流出施設実験模型

(2) 実験結果

製作した模型の流入,流出形状等を複数案変化させ,計画流量の流入及び流下が可能な形状を決定した。

a) 湾曲損失実験

本計画の特徴である多数の湾曲による損失について,当初計画では水平曲りによる損失を屈折による損失と仮定して設定していたが,実験による実証値を得ることができ,施設形状に反映した。

(当初計画における損失設定の考え方)

屈折による損失¹⁾

$$h_{be} = f_{be} \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

$$f_{be} = 0.946 \sin^2 \frac{\theta}{2} + 2.05 \sin^4 \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

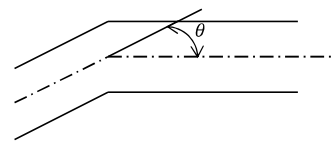


図-10 屈折管

ここに, h_{be} : 屈折による損失水頭(m), f_{be} : 屈折損失係数, V : 管内流速(m/s), θ : 屈折角(図-10 参照)

表-2 水平曲りによる損失係数の理論値と実験値の比較

	理論値	実験値
損失係数	3.66	2.82

b) 流入施設実験

流入施設における損失を評価し,完全越流で計画流量が流下可能な施設形状を決定した。なお,実験結果より越流堤の形状や高さ,流入方式,止水域部分の形状変更を行った。

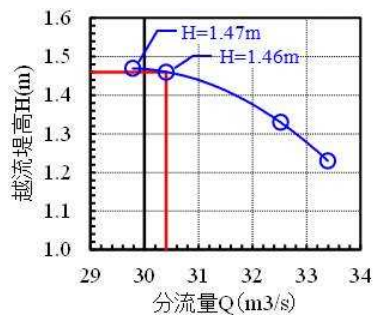


図-11 実験結果例 (越流堤高と分流量の関係)

表-3 変更内容

	原案	最終案	備考	
越流堤高	1.61m	1.46m		
門数	4門	2門	流況を踏まえて必要十分な門数に変更	
導流壁	断面形式	複断面	単断面	複断面効果が微小のため、形状簡素化
	壁厚	0.5m	1.5m	ケーソンを用いることでコスト削減
	先端形状	鋭角	直角	流況に差異がないため、形状を簡素化
開口幅	1.0m	4.0m	スムーズな流れとなる開口幅を設定	

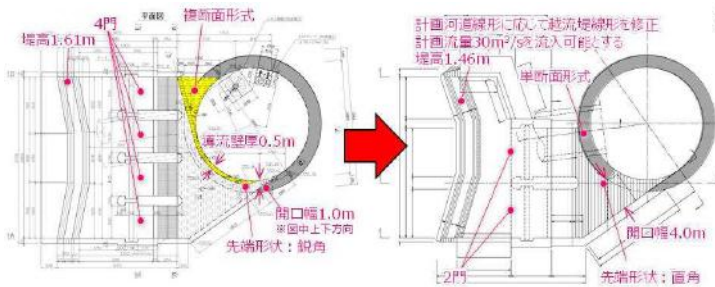


図-12 流入施設実験結果の反映（左：原案, 右：最終案）

c) 流出施設実験

流出施設における損失を評価し、計画流量流下時に施設内水位が所定の水位以下となる施設形状を決定した。

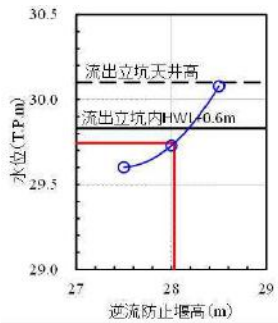


図-13 実験結果例（逆流防止堰高と立坑内水位の関係）

表-4 変更内容

	原案	最終案	備考
逆流防止	0.91m	1.70m	流入施設における越流開始流量から逆流防止堰高を検討（上流からの流入後に、逆流する高さに設定することで、直落下による施設損耗を防ぐ）
堰高	(T.P.27.24m)	(T.P.28.03)	堰高は計画河床高からの高さで表記

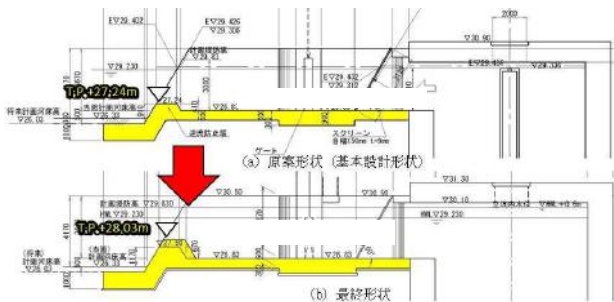


図-14 流出施設実験結果の反映（上：原案, 下：最終案）

(3) まとめ

水理模型実験により施設の最終形状を確定し、洪水時の確実な流下機能を確認することができた。また、止水域となる部分の形状変更や施工性の改善によりおよそ 5 千万円のコスト削減を行うことができた。

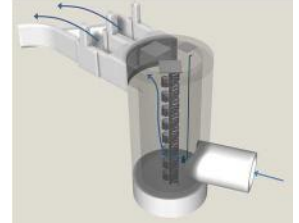
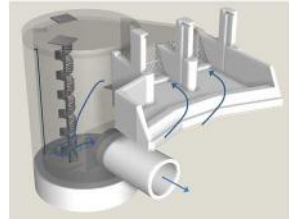


図-15 流入施設イメージ

図-16 流出施設イメージ

8. 維持管理に資する実験

地下河川の実運用では、洪水流を引き込む際に大量の土砂流入が伴うと想定される。土砂の流入、堆積、流下、流出の形態や計画流量の流下に与える影響を明らかにし、地下河川の流下機能を継続的に確保するため排土基準を設定することを目的として実施した。

(1) 実験概要

流入土砂の影響を把握するため、既存の水理模型を利用し、河道からの土砂流入実験や流入立坑及び地下河川実験、流出立坑及び流出部実験を実施した。

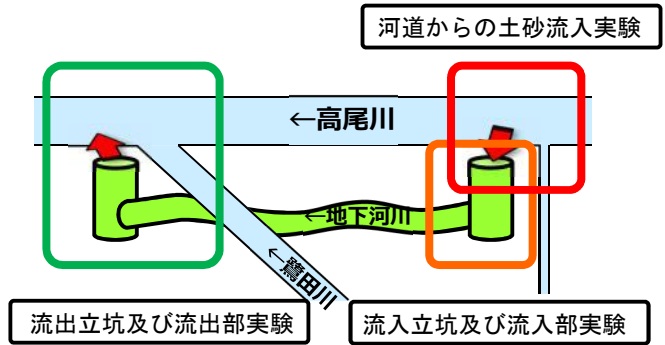


図-17 維持管理に資する実験イメージ



写真-5 河道からの土砂流入実験



写真-6 流入立坑及び地下河川実験



写真-7 流出立坑及び流出部実験

(2) 実験結果

河道内流砂のうち地下河川への流入量を把握し、土砂の堆砂状況や堆積に伴う水位上昇量、分流低減量を把握した。

a) 河道からの土砂流入実験

現地河床材料調査に基づく粒径を再現した土砂を河道に投入し、流入施設への流入土砂量を採取・計測した。その結果、流量規模に依らず、河道流砂量の約18%が流入し、粒径は6mm以下が卓越することが分かった。

表-5 地下河川流入流砂量

流量	流量・分流量 (m ³ /s)		土砂投入量 模型値 (L/30sec)	地下河川 土砂流入量 模型値 (L/30sec)	地下河川 土砂流入量 原型値 (m ³ /s)	土砂流入率 (%)
	高尾川	地下河川				
床対計画流量	70	35.34	9.7	1.778	0.185	18.3
1/30確率流量	72	35.98	9.7	1.799	0.187	18.5
1/50確率流量	81	41.12	10.7	1.977	0.206	18.5

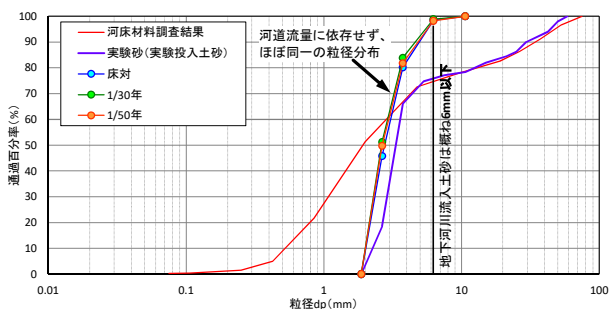


図-18 地下河川流入流砂の粒径

b) 流入立坑及び地下河川実験

流入土砂のうち約16%が流入立坑に堆砂し、約84%は地下河川に流入することが分かった。また堆砂状況の時間変化を把握し、堆砂厚、量と流入立坑水位の関係が確

認できた。

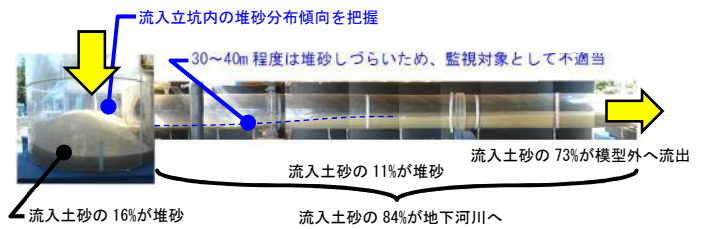


写真-8 流入立坑及び地下河川実験の様子

c) 流出立坑及び流出部実験

流出立坑に到達した土砂のほとんどは鷺田川に放出され、流出立坑内の堆砂は極めて微量であり、水位上昇・分流量低下に影響しないことが分かった。

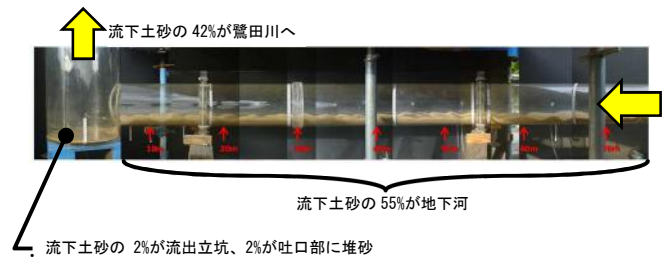


写真-9 流出立坑及び流出部実験の様子

(3) まとめ

水理模型実験により流入・流出立坑の堆砂による影響や地下河川への堆砂動態が把握され、分流量を維持するための排土基準(案)を流入立坑及び地下河川の流入側付近において設定することができた。

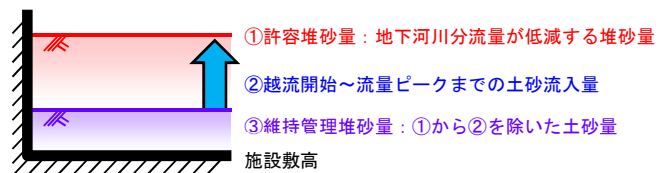


図-19 排土基準の考え方

表-6 設定した排土基準(案)

河道条件	流量条件	堆砂なし 高尾川 流量 (m ³ /s)	許容量				1/ハイドロ(〜ピー)		維持管理堆砂量		維持管理堆砂厚		
			流入立坑 流量 (m ³ /s)	流入立坑 水位上昇 量(m)	地下河川 堆砂量 A(m ³)	地下河川 堆砂量 B(m ³)	流入立坑 堆砂量 C(m ³)	地下河川 堆砂量 D(m ³)	流入 立坑 A-C (m ³)	地下 河川 B-D (m ³)	流入立坑	地下河川	流出立坑
1/10計画 堤防潰析 (70m ³ /s)		34.66	40 (+5.34)	0.544	150	1,200	105	558	45	642	51cm	66cm	流入立坑に 準じる*

9. 施工における課題

次に施工段階の課題とそれに対する対応について紹介する。

(1) 背景

シールド工事については、平成24年に岡山県倉敷市

で作業員5名が亡くなる等,近年でも事故が発生している。国土交通省においても「シールドトンネル施工技術安全向上協議会」により事故防止にむけた議論が進められており,厚生労働省も平成29年3月には「シールドトンネル工事に係る安全対策ガイドライン」を策定するなどシールド工事におけるより充実した安全対策を講じるべく関係省庁に適切な措置の実施を要請しているところである。

(2) 課題

本施工における目標は,「工事の確実な早期完成」であり,今まで経験の少ない工法において,いかに施工上のリスクを抽出,評価,対応するかが課題であった。

(3) 対応

福岡県においては過去に例のない工事であり,課題解決に向けた高尾川地下河川技術検討委員会(以下「技術検討委員会」という)を設立し,本シールド工事のリスクマネジメントに取り組んでいる。

10. 技術検討委員会での取組

ここでは,当事務所において平成29年から取り組んでいるリスクマネジメントの取組を紹介する。

(1) 工事概要

本取組の対象工事は,高尾川床対事業の主要工事である高尾川地下河川築造工事とし,発進立坑の築造と地下トンネル部分をシールド工法にて築造するものである。

本工事は,連続する急曲線シールド掘進(R=16~60m,27箇所)や掘進位置の地層が著しく脆い風化花崗岩であること,また河川直下での低土被りシールド掘進である等の特徴があり,施工管理を行う上で非常に難易度が高いものである。

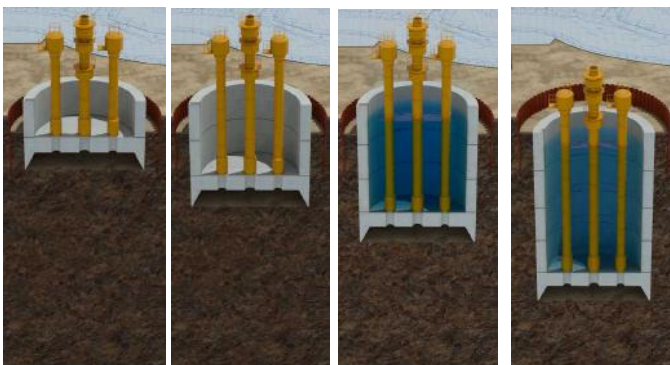


図-20 発進立坑施工イメージ (ニューマチックケーソン工)

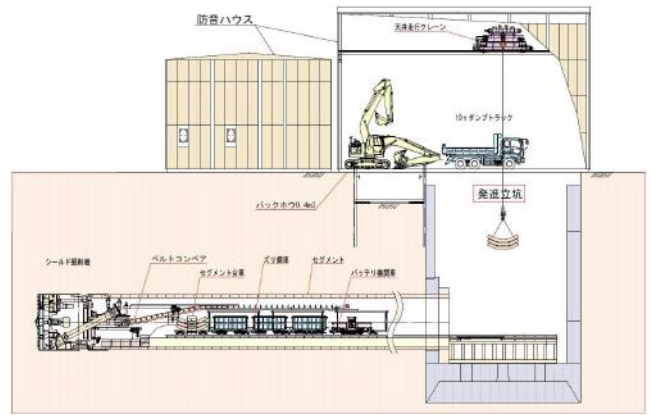


図-21 地下河川施工イメージ (シールド工)

(2) 技術検討委員会の概要

本委員会は発注者,施工者,設計者,学識者で構成され,本工事の特徴を踏まえリスクを抽出し,その対応や認識の相互共有を図るものである。

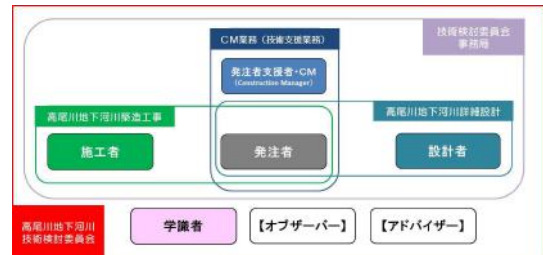


図-22 技術検討委員会模式図

(3) 技術検討委員会の取組

本委員会では,工事着手前のリスクアセスメント(リスクの抽出,分析,評価),リスク対応とその評価,実施時のPDCAサイクルの構築等を実施した。現地調査を含め1年間で計3回の委員会を開催し,リスク対応について議論すると共に,「みえる化」に努めた。

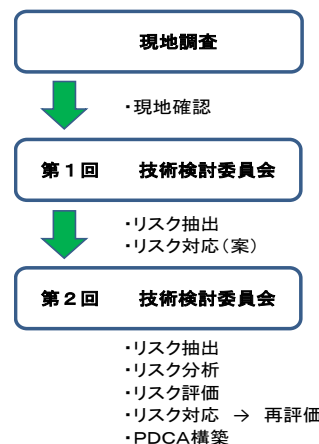


図-23 技術検討委員会開催内容

11. リスクアセスメント

本工事におけるリスクを抽出し、管理方針に基づき分析・評価を行った。

(1) リスクの管理方針

リスク管理方針は、事業の主旨を踏まえ、「工程の遅れ(事業の遅れ)」と「労働災害」とした。

(2) リスクの抽出、分析

本工事において想定し得るリスクを抽出し、管理方針に基づき下記のとおり分類した。

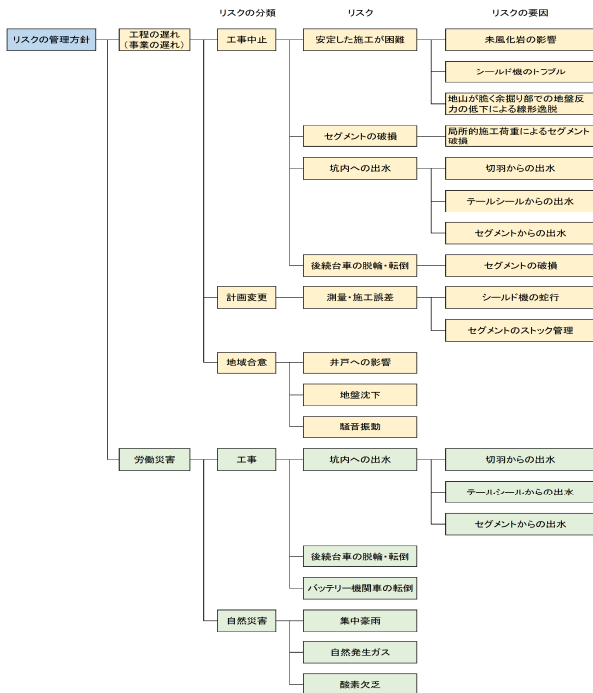


図-24 リスク分類図

(4) リスクの評価

リスクは、評価項目を「工期への影響」、「工事費への影響」、「発生頻度」とし、以下のとおり定義した。

$$\text{リスク} = \text{影響度(工期, 工事費)} \times \text{発生頻度}$$

そのため、リスクは影響度又は発生頻度のいずれかを改善することで低減されるものとした。

また、評価は「高」、「中」、「低」の3段階とし、可能な限り定量的な評価を行うことを基本としたが、やむを得ない場合は定性的な評価を行った。

表-6 評価区分(案)

	高	中	低
工期の影響	4箇月以上の遅れ	4箇月未満の遅れ	1箇月以下の遅れ
工事費の影響	1億円以上の増	1億円未満の増	1千万以下の増
発生頻度	発生確率50%以上	発生確率10~50%	発生確率10%未満

リスクの管理方針	リスクの分類	リスク	リスクの要因	発生する具体的な事象	①本事業が保有するリスク評価						
					工期への影響	工事費への影響	発生頻度				
事業の遅れ	工程の遅れ(事業の遅れ)	工事中止	安定した施工が困難	破砕地盤による反力不足(大きな地盤反力)	高	中	低	高	中	低	
				未風化岩の影響	高	中	低	高	中	低	
				シールド機のトラブル	高	中	低	高	中	低	
				地山が長く余留り部での地盤反力の低下による機形逸脱	高	中	低	高	中	低	
				セグメントの破損	高	中	低	高	中	低	
				局所的施工荷重によるセグメント破損	高	中	低	高	中	低	
				坑内への出水	高	中	低	高	中	低	
				切羽からの出水	高	中	低	高	中	低	
				テールシールドからの出水	高	中	低	高	中	低	
				セグメントからの出水	高	中	低	高	中	低	
労働災害	計画変更	後続台車の脱輪・転倒	セグメントの破損	高	中	低	高	中	低		
			シールド機の蛇行	高	中	低	高	中	低		
			セグメントのストック管理	高	中	低	高	中	低		
			地域合意	井戸への影響	地盤沈下	高	中	低	高	中	低
					騒音振動	高	中	低	高	中	低
					工事	高	中	低	高	中	低
			自然災害	集中豪雨	坑内への出水	高	中	低	高	中	低
					切羽からの出水	高	中	低	高	中	低
					テールシールドからの出水	高	中	低	高	中	低
					セグメントからの出水	高	中	低	高	中	低
後続台車の脱輪・転倒	高	中			低	高	中	低			
バッテリー機関車の転倒	高	中			低	高	中	低			
自然発生ガス	高	中			低	高	中	低			
酸素欠乏	高	中	低	高	中	低					

図-25 リスク評価の事例

12. リスクマネジメント

前述のリスクに対し、その低減目標を設定し、それに向けた対策の検討とその評価を行った。また、それらを継続的に更新していく体制を構築した。

(1) リスクの低減目標

発生が想定される事象毎に工程や工事費への影響を考慮し、表-7 のとおり影響度を「重度」、「中度」、「軽度」にランク分けした。次に表-8 のように影響が重度、中度な事象については、発生頻度を「低」とすることでリスクを低減し、影響が軽度な事象については発生頻度を「中」とすることでリスクを保有することとした。

表-7 影響度のランク(案)

ランク	定義
重度	数年、数億円規模の影響が生じ、場合によっては人命にかかわる事象
中度	数ヶ月、数千円規模の影響が生じるが、人命への影響はない事象
軽度	数日、数百万円規模の影響が生じるが、速やかに復旧できる程度の事象

表-8 リスク低減目標(案)

ランク	工期への影響			工事費への影響			発生頻度		
	高	中	低	高	中	低	高	中	低
重度	高	中	低	高	中	低	高	中	低
中度	高	中	低	高	中	低	高	中	低
軽度	高	中	低	高	中	低	高	中	低

(2) リスク対策とその評価

リスクの低減目標に向けた対策を検討し、再度リスク評価を行った。その結果を発注者、設計者、施工者間で共有し、最終的な現場での実施に対するリスク評価を行った。

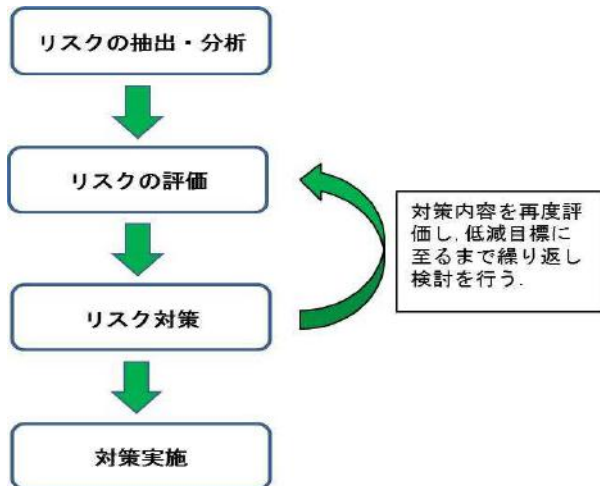


図-24 リスク対策決定のプロセス

(3) PDCAサイクルの構築

現在、工事は工事着手前の計画段階(Plan)の検討を経て、工事の実施段階(Do)となっている。今後は技術検討委員会の枠組みを利用した評価段階(Check)、改善段階(Action)の取組を適宜行い、PDCAサイクルが円滑に回るよう努めていく。



図-25 PDCAサイクルのイメージ

13. おわりに

高尾川のような都市小河川における浸水対策は、用地の確保という面から実現が難しく、長期化していることが多い。一般的に地下河川は、費用対効果の面で高いハードルがあり、都市部以外での適用は難しい。しかし対策の検討に当たっては、社会情勢や時間的な効果も含め十分に検討し、総合的な判断を行う必要がある。

実施においては、今回示した様に施設設計段階での課題や、完成後の維持管理における課題、施工管理上の課題等をクリアすると共に、現場では都市部での工事であるため、騒音振動や地下水等の影響についても配慮が必要となる。

現在、地下河川築造工事はシールド掘進を行っているところであり、今後、急曲線の連続に向け、厳しい施工管理と工程管理が求められている。国内でもこの規模のシールドトンネルにおける27箇所もの急曲線の連続施工は例がないものであり、本工事の事例は都市小河川における、浸水対策のモデルとなり得るものだと考えられる。本事例が、同様の被害に苦しむ地域における抜本的取組の参考となれば幸いである。

謝辞：本事業のリスクマネジメントに際しては、早稲田大学創造理工学部社会環境工学科の岩波基教授に技術検討委員会の委員に就任いただき、学術的なサポートをいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1)土木学会,水理公式集,pp376,1999

(2018. 10. 12 受付)