

大断面および長距離対応のシールドマシン設計 に関するリスク評価

Risk Evaluation of Shield Machine Design with Large Diameter and Long Distance Excavation

橋本正¹, 譽田孝宏², 朱合華³, 馬陝峰³, 亀村勝美⁴

Tadashi Hashimoto, Takahiro Konda, Hehua Zhu, Xianfeng Ma and Katumi Kamemura

¹正会員 工修 財団法人 地域 地盤 環境 研究所(〒550-0012 大阪府大阪市西区立売堀4-3-2)

E-mail : hasimoto@geor.or.jp

²正会員 工修 財団法人 地域 地盤 環境 研究所 地盤工学研究部門(〒550-0012 大阪府大阪市西区立売堀4-3-2)

³工博 同济大学 地下建築与工程系(中国 上海市四平路1239号)

⁴フェロー会員 工博 大成建設株式会社 原子力本部(〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

Shanghai Chongming Changjiang River Crossing Road is a long-distance shield tunnel with the largest diameter in the world. To avoid and/or reduce some risks during the tunnel construction, the concerned risks were analyzed and evaluated in each planning, designing, construction works. In this paper, these risks especially concerned about the feasibility and reliability of shield machine were evaluated based on opinions and advices from some Japanese experts, who have plenty of experiences in a lot of shield tunnel construction projects. Additionally, how to apply the risk evaluation results effectively was also mentioned in this paper.

Key Words : risk evaluation, shield machine design, large diameter, long distance excavation, cross under river, very soft clay

1. はじめに

中国の経済発展中心地の一つである上海市では、現在、道路や地下鉄のトンネル工事が急ピッチに進んでいる。このうち、中国沿岸高速道路網の一つである長江横断道路は、長江河口に位置する上海市と江蘇省を結ぶ高速道路(図-1参照)であり、上海市の特別大型プロジェクトに位置づけられ、中国内陸部へのアクセスとして期待されている。

本プロジェクトに関する種々の検討は、1993年から開始されたが、とくに2001年には、本工事の実行可能性について検討がなされ、長江の河川横断方式案(トンネル案と橋梁案)に注目して、国際招致された概略設計案に対して審査がなされた。その結果を受けて2002年には、本工事における主要技術と工事実行の可能性に関するリスク評価が実施された。ここでは、その中でもシールドマシンの設計に対する適応性と信頼性に関するリスク評価事例について紹介し、実工事での活用状況について述べる。

2. 工事概要および基本条件

長江横断道路の総延長は約25.5kmであるが、そのうち上海市～崇明島ルートの延長は、図-1に示すように南から上海浦東、長江南港水域、長興島、長江北港水域、崇明島に至る約15kmである。地質、水流、航路等の各種条件を踏まえたリスク評価結果を受けて、南港水域ではトンネル形式が、北港水域では橋梁形式が提案され、総投資額約1900億円が予定されている。

本論文に示す南港水域での上海崇明長江横断道路トンネル工事では、泥水式シールド工法を用いた単円併設シールド掘削が計画された。シールド外径は15.43m(セグメント外径は15.00m)であり、トンネル離隔14.4m、掘進延長約7.5km、線形勾配0.3%~3%が設定されている。トンネルは、上下2層構造であり、上部には3車線の自動車道を、下部には軌道交通や緊急避難通路およびメンテナンス通路に使用する計画になっている。

主たる掘削土層は、長江河川下に分厚く堆積した粘性土層(上半:粘着力 $c \approx 60 \text{ kN/m}^2$, 下半:平均N値 ≈ 9)であり、トンネル天端部での最大深度は約40m(最大水深約23m)である。

なお、リスク評価時には、礫質土は出現しないこと、メタンなどの可燃性ガスは発生しないこと、海水域に近いことから地盤内の地下水内に塩分が含まれていることが条件として設定された。要求工期は3年である。また、陸上部付近の換気塔からシールド

発進および到達することから、支障物等がなく陸上および海上から発進および到達立坑へアクセスできることが、地上環境条件として付加された。施工条件としては、昼夜間施工が可能であること、掘削残土を昼夜間搬出できること、掘削に見合った残土捨て場があり、資材搬出入が可能であること、空水域の制限がないこと、洪水や地震等の自然災害による工事中断はないものと仮定した。

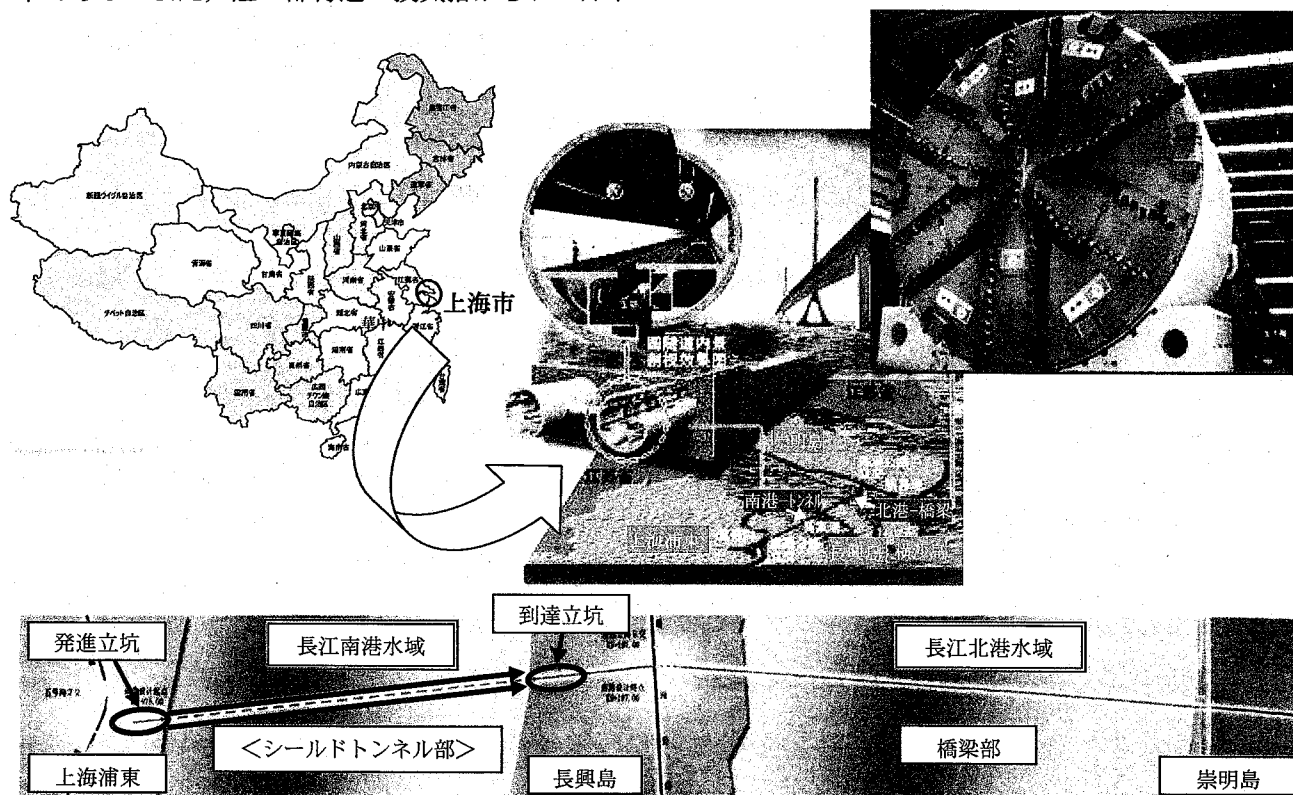


図-1 上海崇明長江横断道路トンネル工事のイメージ図およびシールド切羽面の写真

3. リスク評価の必要性とリスク項目

長江横断道路工事は、長江河口部の全体流域に関係しており、工事規模の大きさ、工事影響がおよぶ領域の広さ、工事技術面の困難さを考えると、世界的にも超大型プロジェクトに位置付けられる。よって本工事では、不確実要素や自然界および人為的な面に関係したリスクが大量に発生すると予測された。ただし、事前に検討して適切な処置を講ずれば、回避または損害程度の低減が可能なリスクはあると考えられた。

想定したリスクを表-1に示す。これらのリスク項目を発注者と施工者サイドが十分認識し、有効かつ経済的な対策法を考案することを目的に、各リスク項目に対して種々の機関がリスク評価を実施した。ここでは、大断面かつ長距離に対応したシールドマ

シンの設計に関するリスク評価について説明する。

リスク評価方法としては、数多くのシールド工事に携わった複数の日本人専門技術者によって、類似規模である東京湾横断道路トンネル(以下、TTB)やオランダのGroene Hart Tunnel(以下、GHT)などの事例を参考しながら、「大断面」「長距離」「高速施工」などの制約条件を設定し、シールドマシンの設計におけるリスク項目を抽出し、定性的な分析を実施して、リスク回避に向けた方策について検討した。

4. 長距離、高速施工に関する経済性評価

シールドマシンの性能検討上、最終的には経済性が優先される場合が多いことから、ここでは、施工距離と掘進速度に関する経済性評価をおこなった¹⁾。

表-1 リスク項目

1. 総合的な要因によるリスク	1.1 長江河川状況の変化によるリスク
	1.2 地震に伴う工事へのリスク
	1.3 工事に伴う長江河口部の生態圏におよぼす影響に関するリスク
	1.4 テロ攻撃による長江横断道路へのリスク
	1.5 営業時の収益リスク
2. 施工時におけるリスク	2.1 地質調査の精度と信頼性に関するリスク
	2.2 超大型橋梁施工(上部工および下部工)時のリスク
	2.3 シールドマシンの設計(適応性と信頼性)におけるリスク
	2.4 シールド施工時のリスク
3. 営業時におけるリスク	3.1 構造物の耐久性(使用期限100年を想定)に関するリスク
	3.2 悪天候による橋梁部の営業リスク(橋梁部の耐震性に関するリスクも含む)
	3.3 橋梁部の営業維持管理に関するリスク
	3.4 通行船艦同士の衝突および通行船艦の橋梁への衝突によるリスク
	3.5 トンネル横断方向・縦断方向の構造安定性、防水効果の信頼性に関するリスク
	3.6 長距離トンネルの換気リスク
	3.7 トンネル内での火災リスク

(1) 施工距離に関する評価

長距離施工用にマシン仕様がアップした場合、一般的には長距離施工ほど安価傾向にある。ただし、掘削土や資材機材の搬出入距離が長くなり、それに伴い設備と電気を多く消費することになる。

類似事例を参考に今回の工事条件で経済的な掘進延長を試算した結果、5～7km/台の距離が経済的であると想定できた。本工事の掘進距離は約7.5kmであることから、シールドマシン1台による施工が経済的であると判断した。ただし、実施工では、工期制約条件がクリティカルになり、2台のマシンで並行掘進することになった。

(2) 掘進速度に関する評価

高速施工の場合、工程的には短縮されるが、低減する費用と増加する費用がある。工期短縮に伴う低減費用としては、労務費主体の一次覆工や坑内整備工などが、また、損料主体のシールド設備坑内設備費用、電気料金などが挙げられる。一方、増加費用としては、シールドマシン費、掘削土処理費、流体輸送設備費、泥水処理設備費などがある。つまり、日進量の上昇に伴って設備自体の容量が大きくなり、本体価格とともに機械損料が上昇し、工事費の増加につながる傾向にある。

1リングあたりの掘進時間を表-2のように設定して掘進速度を試算した結果、1リング掘進するのに100分必要になることが判明した。これを踏まえて、全工期の試算を実施した結果(表-3参照)、日進量18m/日、月進量342m/月となり、全工期は約26.5ヶ月になった。これは、3年以内の工期条件を満足する結果であった。

表-2 1リングあたりの掘進サイクルタイム

項目	時間(分)	備考
掘進時間	40	セグメント幅 : 2m
セグメント組立	50	
その他 (掘進準備、送排泥水)	10	掘進スピード : 50mm/min
合計	100	

表-3 全工期の試算

日進量	4.5リング/方×2方×2.0m/リング=18m	
月進量	18m/日×19日/月=342m	
全工程	初期掘進	約5ヶ月(段取り替え含む)
	本掘進	(7.5km-160m(初期掘進)) ÷342m/月=約21.5ヶ月
	合計	約26.5ヶ月

5. シールド性能の必要条件

今回のリスク評価をおこなうにあたり、本工事と類似規模の工事として日本とオランダにおけるシールド工事事例をリストアップした。これら工事の基本条件を表-4に示す。本工事は、「大断面」「長距離」「大深度(高水圧)」「高速施工」などの特徴を有しており、シールドマシン性能の基本条件は、表-5のようになる。この中でもとくに、土砂シールド、カッタービットおよびテールシールドに関する検討が最も重要であると考えられたことから、ここでは本工事における施工条件に基づいて、これらの性能について以下に検討をおこなった。

表-4 本工事と施工事例の基本条件

	本工事	TTB	A 現場	B 現場	C 現場	D 現場	GHT
工法	泥水式	泥水式	泥水式	泥水式	泥水式	泥水式	泥水式
シールド外径(m)	15.43	14.14	12.14	12.34	5.81	5.75	14.90
大断面	○	○	○	○	—	—	○
掘進距離(km)	約 7.5	1.75	1.92	1.98	2.4	6.5	7.0
長距離	○	—	—	—	—	○	○
最大土被り厚(m)	約 40	60	45	—	—	—	35
高水圧	○	○	○	—	—	—	—
高速施工	○	—	—	—	○	○	○
自動組立	○	○	○	○	—	半自動	○

表-5 シールドマシン性能の必要条件

1. 長距離掘進	1.1 カッタービットの耐摩耗性、耐久性の向上 1.2 土砂シールとテールシールの耐摩耗性、耐久性の向上 1.3 マシン各部位の耐久性の向上
2. 大断面	2.1 カッター面板の偏心荷重に対する構造的安定性の確保 2.2 内周部と外周部の摺動距離の差が大きくなるビット部分の耐久性確保 2.3 大口径シールドのスリット構造を考慮した面板中央部の土砂取り込み確保
3. 大深度(高水圧)	3.1 土砂シールの耐圧止水性能の向上 3.2 テールシールの耐圧性能の向上
4. 高速施工	4.1 カッター回転数の上昇に依存した土砂シールおよびビットの耐久性向上 4.2 セグメント全自動組立機による組立時間の短縮

(1) 土砂シール

ここでは、高速施工を想定して50mm/minの掘進速度を設定したため、カッター切込み深さが大きくなり、カッタービットの磨耗量に影響すると考えられる。そこで、ビット切削深さを25mm程度にした場合のシールド摺動距離を試算した(式(1)～(3)参照)。なお、シールド外径15.43mの駆動方式を中間支持方式とした場合、土砂シールドの外径は8.3m程度となり、日本における施工実績とはほぼ同一範囲内にあることから、現状技術にて対応可能と考えられる。

$$n_c = \frac{V}{h \times n} = \frac{5.0}{2.5 \times 4} = 0.5 \text{ rpm} \quad (1)$$

ここで, n_c : カッター回転数 (rpm)

V : 掘進速度 (cm/min.)

 h : ビット切削深さ (cm)

n : パス数 (TTB 実績より $n=4$)

シール部周速：

$$V_a = \pi \times 8.3\text{m} \times 0.5\text{rpm} = 13.03\text{m/min} \quad (2)$$

シール部摺動距離：

$$\begin{aligned} L_x &= 7\,500\text{m} \div 0.05\text{m/min} \times 13.03\text{m/min} \\ &= 1\,954\,500\text{m} = 1954.50\text{km} \quad (2\,500\text{H}) \quad (3) \end{aligned}$$

(2) カッタービット

泥水式シールドが、掘進速度 50mm/min で対象地盤を掘削した場合のビット磨耗量を式(4)のように試算した。磨耗係数は、F3 種ビットの実績を参考に

した。通常のビット許容磨耗量は 20mm 前後であることから、ビット交換は不要と判断した。ただし、ビット交換が必要になった場合には、中間換気塔にシールドマシンが到達した際に交換可能である。

$$\begin{aligned} \text{摩耗量} &= \text{摩耗係数 (mm/km)} \times \pi \\ &\quad \times \text{カッター外径 (m)} \times \text{回転数 (rpm)} \\ &\quad \times \text{掘削距離 (km)} / \text{掘進速度 (m/min)} \\ &= 0.0012 \times \pi \times 15.5 \times 0.5 \times 7.5 \div 0.05 \\ &= 4.4 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4)$$

(3) テールシール

テールシールは、高水圧および裏込め注入圧に十分耐えられることと、施工中の磨耗等による損傷を考慮した材質および形状にする必要がある。テールシールの材質については、長距離掘進であることと、地下水に含まれる塩分を考慮して、耐久性に優れているステンレス性の採用を想定した。なお、テール部での異常漏水時の対策のひとつとして、緊急止水装置(図-2 参照)をシール間に1段設置する方法が挙げられる。

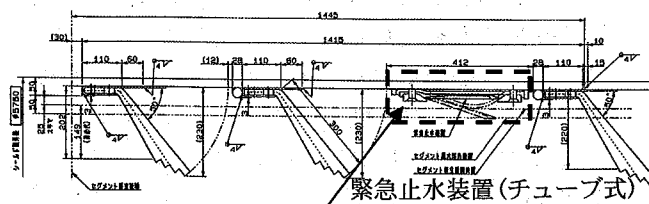


図-2 緊急止水装置を有するテールシール

6. リスク評価およびその活用状況

(1) リスク評価の方法

「リスク：R」は、対象事象の「発生確率：P」と、その事象が発生したときに被る「損害の大きさ：C」を用いて表現することができる。

今回のリスク評価は、仮定した施工条件、限られた類似工事事例に基づいているため、定量的評価ではなく、客観的評価(同種工事における過去の実績データとの比較評価)と、主観的評価(複数の専門技術者の経験に基づく評価)を実施した。

発生確率と損害の大きさに関するランク分けを表-6に示す。抽出されたリスク項目ごとに、表-6に基づいてランク分けをおこない、その結果をリスクマトリックス(表-7参照)に準拠して、表-8に示すリスクの大きさに応じた定性的評価をおこなった¹⁾。

(2) リスク評価の結果

シールド外径 14 m 以上のシールド施工実績を有する複数の専門技術者の意見に基づいてリスク項目を抽出したところ、51 項目がリストアップされた。次に、各リスク項目に対してランク分けをおこなった結果、R1：1 項目、R2：7 項目、R3：30 項目、R4：13 項目の結果を得た(表-9 参照)。今回の評価では、シールド工法の採用を否定する R5 に評価されたリスクはなく、本工事へのシールド工法の適用は可能と判断された¹⁾。

以下に、各リスクに対する回避対策の基本な考え方を以下に示す。

a) R3 に対するリスク回避対策

シールドマシン設計時の配慮によって、リスクの大部分を防止することができる。ただし、リスクの大きさは、トラブル発生時の対応(補助工法の確実性、緊急時対応マニュアルの有無とその教育、連鎖損害の防止策など)に依存することから、事前にトラブルへの対応方法や補助工法について、様々な状況を想定した上でその適用性を検討し、実施管理手法を明確化しておくことが重要である。また、対策を検討する際、安全側に余裕を持たせすぎると設備が過大になったり、施工性を低下させたりする可能性もあるので、検討には十分注意する必要がある。なお、個々の対策案については、概念設計段階では一般論に始終してしまうため、ここには明記していない。

b) R4 に対するリスク回避対策

今回のリスク評価の結果、R4 に分類された 13 項目に対する対応策を表-10に示す。これら 13 項目に対するリスク回避対策の基本的な考え方は、発生確率 P と損害の大きさ C の組合せによって表-11に示すように個々に異なる。表-11に基づいた表-10に示す対応策を講じることにより、発生確率や損害の大きさがランクダウンされ、事前評価の R4 から R3 にリスク低減されるという再評価結果を得た。

表-6 発生確率 P および損害の大きさ C のランク

ランク	発生確率 P の内容	損害の大きさ C の内容		
		物理的損害	人的損害	シールド工法の適用性
1	ほとんど発生しない	極小	なし	問題なし
2	希に発生する	小	なし	問題なし
3	時々発生する	中 (工期・工費に影響)	軽微	適切な事前対策と施工中の管理
4	かなりの頻度で発生する	大 (工期・工費に大きな影響)	重傷事故	工法の適用に当たっては制限を設けて集中的な管理
5	頻繁にまたはほとんど間違いなく発生する	極大 (工事中止)	人命損傷	適用すべきではない

表-7 リスクマトリックス

P \ C	1	2	3	4	5
1	R1	R1	R2	R2	R3
2	R1	R2	R2	R3	R4
3	R2	R3	R3	R4	R4
4	R3	R4	R4	R5	R5
5	R4	R5	R5	R5	R5

表-8 リスクの大きさ

リスク	リスクの内容
R1	リスク保有：ほとんど無視できる。
R2	軽微リスク：設計上の配慮、施工時の日常管理で対応できる。
R3	中度リスク：設計上十分配慮し、施工においては綿密な管理計画を立案する。
R4	重度リスク：設計条件を明確にした上で施工上の制限を設ける。施工に当たっては、集中管理をおこなう。
R5	極大リスク：一旦発生するとプロジェクトの存続に影響する。工法採用は不可である。

表-9 抽出されたリスク項目およびランク分け結果

No.	項 目	リスク項目	評価		
			P	C	R
1	① カッタビットの配置、材質、摩耗	① ビット配置により土砂の取込みが悪いと、掘削能力の低下による過大推力、過大カットトルクが発生する可能性が高い。	2	2	R2
2		② ビット取付位置によって掘削土量の差が有るため、部分摩耗およびビット交換回数が増える。	2	3	R3
3		③ 土質によってチップの欠損や異常摩耗、母材の摩耗等が発生する。	1	3	R2
4		④ ビット形状によって切削性の低下および母材の摩耗が考えられる。	2	3	R3
5		⑤ 掘削距離が長いと、ビットが摩耗し、掘進不能となる。	3	3	R3
6		⑥ 最外周ビットが摩耗すると、推力が上昇し掘進不能になる可能性がある。	1	3	R2
7		⑦ ビット摩耗状況を把握していないと、対策が遅れ、本体の摩耗に繋がる。	2	3	R3
8	② マシン各部位の耐久性	① カッタ本体外周部が摩耗することにより、外周ビットが脱落し、推力の増大や掘進不能となる。	1	4	R3
9		② アジテータ羽根の摩耗により、排泥管口元の閉塞および土砂の堆積が発生し、チャンバ内が閉塞する。	2	3	R3
10		③ アジテータのベアリング寿命により、回転が出来なくなる。	1	4	R3
11		④ 機内排泥管の摩耗により、泥水漏れや切羽圧保持が困難となる。	1	4	R3
12		⑤ 軸受部ベアリングの寿命により、カッタが回転不能となる。	1	4	R3
13		⑥ 長距離のためギヤ・ピニオンの歯面が破損し、カッタが回転不能となる。	1	4	R3
14		⑦ エレクタ旋回車輪と昇降・スライド軸受の寿命により、各装置が作動不能となる。	2	3	R3
15		⑧ 長時間使用するため、油圧ポンプおよび電動モータの寿命より、機器が作動しなくなる。	2	3	R3
16		⑨ バルブ類の内部摩耗により、機能が確保できず、油圧系統に支障が出る。	2	3	R3
17		⑩ 異物(木片等)の混入により、排泥管が閉塞する。	2	4	R4
18	③ シール性能チェック	① 長距離使用するとカッタシールと摺動面が摩耗し、軸受け部に土砂・地下水等が浸入する。これにより、ベアリング等の破損に繋がり、カッタ回転が不能となる。	2	3	R3
19		② 施工条件に合ったシール取付位置、シール段数、摺動速度、潤滑油量、給油圧力等を配慮しないとシールの性能が保てない。	1	4	R3
20		③ シール部は熱に耐えられず、所定温度以上になると所定性能が失われ、土砂等の浸入によりベアリングが破損する。	1	4	R3
21		④ 施工条件に対応したテールシールの段数を装備しないと、止水性能・耐久性能が保てず、テールから地下水・裏込め材等が噴発する。また、切羽圧力保持も出来ない。	2	3	R3
22		⑤ 海水等により、テールシールが劣化し破損する。	1	4	R3
23		⑥ セグメントは、テール部で偏心したり楕円状になったりするので、クリアランスは均等ではないことを考慮しないと地下水圧等に耐えられない。	1	4	R3
24		⑦ テールシールに給脂をおこなわないと、ブラシの止水性能および耐久性能が低下し、地下水や裏込め材等の噴発が発生する。	2	4	R4
25		⑧ テールシール破損時や交換時、地下水等の噴発防止をおこなわないと、坑内水没や陥没等の事故に繋がる。	1	5	R4
26	④ テールでのスキンプレートの異常変形	① 異常変形は無いが、まれに設計時の荷重条件の設定や計算手法の不備、施工時の異常操作等により、異常変形が発生する可能性がある。	1	5	R4
27	⑤ セグメント自動組立装置の必要性能	① 計画時間内に組立できる性能を有していないと、工程に影響を与える。	2	3	R3
28		② エレクタに剛性および耐久性が無いと、重量の大きいセグメントを精度良く組立てることができず、カケ、漏水、セグメント変形の原因になる。	2	2	R2
29		③ 6軸動作機能を有していないと、自動組立に必要な位置決めができない。	2	3	R3
30		④ エレクタは高速度で作動するので、すべて自動にておこなわないと作業員の安全性が確保できない。	1	5	R4
31	⑥ 裏込め注入設備、注入材の性能、注入孔	⑤ エレクタにセグメントを自動供給しないと、安全性および作業性が悪い。	3	3	R3
32		① テールボイド発生と同時に裏込め注入をおこなうべきであるが、同時裏込め注入装置内で硬化し、閉塞しやすい。	3	3	R3
33		② 地上設備から直接裏込め注入することは、長距離のため注入量管理およびポンプ能力から困難である。	5	3	R4
34		③ 裏込め注入材料の必要性状は、材料分離を起こさない、流動性を失わない、注入後の容積減少が少ない、早期に地山の強度以上になる、水密性に優れている等である。また、通常の裏込め注入材を長距離圧送した場合、配管内で硬化し閉塞しやすい。	2	4	R4
35	⑦ 形状保持装置	④ 大口径のため、充填性を考慮して注入孔の数を決める必要がある。	3	2	R2
36		① セグメント径および重量が大きいため、テール内でセグメントが潰れ、次のセグメント組立が困難になる。	3	3	R3
37		② 拡張ジャッキの設定圧を間違えると、セグメントに内圧をかけ、破損に繋がる。	2	2	R2
38	⑧ 泥水圧保持システム	① 掘削距離が長くなると、地上のポンプを可変速としただけでは圧力伝播の遅れが有り、切羽圧変動に対し制御の遅れが生じる。	3	3	R3
39		② 長距離配管の場合、ヘッド圧のみによる掘削停止中の切羽圧力保持はできない。配管延長が長いと、配管抵抗値の少量変化がポンプの必要揚程変化に大きく影響し、ポンプがキャビテーションを発生しやすくなりウォーターハンマを起こす。	3	3	R3
40		③ 総推力は、推進諸抵抗の総和に必要な余裕を考慮しないと、方向制御等スムーズな掘進が確保できない。	2	2	R2
41	⑨ 掘進スピードの確保とジャッキ能力、本数	② 幅広セグメント使用によりロングジャッキが必要となり、ロードにたわみが出。	1	2	R1
42		③ セグメント分割に合わせたジャッキ配置を考慮しないと、クラック等が発生し、セグメントの品質が確保できない。	4	3	R4
43		④ 全自動エレクタを使用するため、全ジャッキのストローク計測が必要となる。	2	3	R3
44		⑤ ジャッキ引き速度が遅いと、セグメント組立時間が延びる。	2	3	R3
45		⑥ スプレッドの位置と形状を配慮しないと、セグメントに偏心力などの余分な力が作用する。	3	3	R3
46	⑩ ローリング、ピッチング	① シールド機の重心位置等によっては、所定のピッチングが保てない場合や、一方だけのローリングが発生する事もあり、方向制御に影響を与える。	2	4	R4
47	⑪ セグメント搬送	① セグメント形状が大きく、重量が重いので、運搬方法を注意しないとセグメントにクラックやカケが発生しやすい。	4	3	R4
48	⑫ 地盤改良用グラウト孔	① 障害物や異物等が切羽に出現した場合の除去方法には、切羽前地山を自立させるための補助工法が必要となる。	2	4	R4
49	⑬ 電気、水、その他のラインでのトラブル	① 各ラインは、掘進のために必要なラインばかりなので、切断等トラブルが有ると施工が中断する。	3	3	R3
50	⑭ 防火設備	① 切羽には大量の作動油類があるため、万一これらに引火した場合、坑内火災が発生する。	1	5	R4

表-10 リスク評価結果一覧表(R4 から R3 に低減された例)

項目	リスク項目	対策案	事前評価		再評価	
			P	C	P	C
② マシン各部位の耐久性	⑩ 異物(木片等)の混入による排泥管の閉塞	閉塞を想定して、取り出し口を設ける。	2	4	2	3
③ シール性能チェック	⑦ 不適切なテールシールへの給脂による止水性能および耐久性の低下	自動給脂装置を設置し、その管理を徹底する。	2	4	1	4
	⑧ テールシールの破損時や交換時の不適切な噴発防止による坑内水没や陥没	トラブル発生時の補助工法の確実性に依存するため、適用性と施工管理手法について十分事前検討する。	1	5	1	4
④ テールでのスキンプレーットの異常変形	① 設計荷重の条件設定や計算手法の不備、施工時の異常操作等による異常変形の発生	設計時のチェックを厳重にした上、設計条件の限界を考慮した施工管理マニュアルを整備し、厳格に実施する。	1	5	1	4
⑤ セグメント自動組立装置の必要性能	④ 高速度で作動するエレクタによる作業員の事故の可能性	事前の安全対策と安全教育を徹底し、施工管理マニュアルを整備し、厳格に実施する。	1	5	1	4
⑥ 裏込め注入設備、注入材性能、注入孔	② 地上設備から直接裏込め注入する場合の注入量管理およびポンプ能力の問題	坑内設備に切り替えて対応する。	5	3	2	3
	③ 不適切な注入材選定による材料分離、流動性の喪失、容積減少、強度不足、水密性低下、配管内での硬化	事前の注入材設計時に十分な検討をおこない、試験施工を実施する。	2	4	1	4
⑨ 掘進スピードの確保とジャッキ能力、本数	① 総推力の余裕不足による方向制御等スムーズな掘進への影響	ジャッキ推力については、設計時に十分な余裕を取る。	2	4	1	4
	③ 不適切なジャッキ配置によるクラックの発生	設計時に十分検討をおこない、設計条件を考慮した施工管理を実施する。	4	3	3	3
⑩ ローリングピッチング	① 不適切なシールド機の重心位置による方向制御に影響を与えるピッチング、ローリングの発生	設計時のチェックを厳重におこなう。	2	4	1	4
⑪ セグメントの搬送	① 不適切な運搬方法によるセグメントのクラックやカゲの発生	適切な搬送方法を計画し、搬送時の管理を徹底する。	4	3	3	3
⑫ 地盤改良のためのグラウト孔	① 障害物や異物等が切羽に出現した場合、除去のための切羽と自立させるための補助工法	グラウト孔を事前に設置し、具体的な地盤改良工法について適用性と管理手法について事前に検討する。	2	4	2	3
⑭ 防火設備	① 作動油類への引火による坑内火災の発生	事前の安全対策と安全教育を徹底し、施工管理マニュアルを整備し、厳格に実施する。万一発生した場合の延焼防止策が重要である。	1	5	1	4

表-11 R4 に対するリスク回避対策の基本的な考え方

P	C	影響度	リスク回避対策
1	5	基本的に発生しないが、一旦発生すると影響は非常に大きい。	発生確率を最小限におさまるよう、設計時に十分配慮するとともに、発生した場合に出来る限り損害が小さくする対策を検討する。ただし、過大な投資により、合理性を損なう場合があるので、注意を要する。
2	4	まれに発生し、工費に与える影響は大きい。	発生確率を小さくすべく設計時に十分配慮した上で、設計条件の適用限界や不確実要素を明確にし、これらの項目に関する徹底した施工管理をおこなう。また、発生した時の損害をできる限り小さくする対策を検討する。
4	3	かなりの頻度で発生し、工費に影響を与える。	何よりも発生確率を小さくする設計をおこなう必要があり、設計上残された不確実要素に対して施工管理をおこなう。
5	3	頻繁に発生し、工期および工費に影響を与える。	リスクの原因は明らかであることから、発生確率を小さくするよう対策を検討する。

(3) リスク評価結果の活用方法

本工事を対象とした今回のリスク評価は、前例のない大工事に対する実行性評価の一環として実施されたフィジビリティースタディーであり、中国において初めての取り組みであった。多くの機関がそれぞれの技術力を結集して実施したリスク評価報告書については、関係機関(管理側、設計側、施工側)に提出されており、その結果、北側ルートでは橋梁で、南側ルートではトンネルで施工する方法が最もリスクが低いと判断され、国に提出された工事全体の最終的な実行性検討報告書に引用された。つまりこれらの研究成果は、中国政府が長江横断道路工事を批准する際に、重要な参考資料および判断材料になった。

今回のリスク評価研究は、充実した内容に仕上がっていることから、各方面から多大な評価を得ており、上海市だけではなく中国全国の関係者の中でも話題となった。これらの成果報告は、上海市において建設部門の賞を受賞しており、これが契機になって、以後の各プロジェクト開始前に、リスク評価の実施が増加傾向にある。

ただし、その結果を実工事でどのように有効利用されたかについて、詳細内容まで周知されていない。とくに、マシン製作については、今回ドイツ企業が担当しており、今回のリスク評価報告書を手渡してはいるものの、どのように活用され対策を講じたのかについては、中国サイドは、まだあまり把握できていないのが実状である。

中国サイドとしては、立派な研究成果であっても、実工事に対して迅速かつ十分に活用され難い現状に反省点が多々あるものの、今後大規模工事にこれらの研究成果を活かしていきたいと考えている。このような取り組みは、すでに欧米では標準的に実施されている。日本においても、すでに類似したリスク検討が各ステージで部分的に実施されているものの、計画段階～供用後の維持管理段階まで、すべての段階を通じたシステマティックなリスク評価およびその有効活用がなされているとは言い難い状況にある。総合的な運用方法も含めて今後早急に取り組んでいくべき課題と思われる。工事ごとにセフティーアセスメントのような形で、計画、設計、施工、維持管理のトータルにわたってリスク評価することができれば、想定される複数のリスク要因を効率よくピックアップし、優先順位に沿って対応することができ、リスク回避またはリスク低減につながるものと期待される。

7. おわりに

今回のリスク評価で得られた知見を以下に示す。

- (1) 本トンネル工事の特徴である「大断面」「長距離」「高速施工」などの制約条件下で、シールドマシンの設計に関するリスク項目を詳細に抽出した結果、51項目がリストアップされた。各リスクに対してランク分けをした結果、シールド工法の採用を否定する R5 評価はなく、本工事へのシールド工法の適用は可能と判断された。
- (2) リスク危険度の高い R4 評価の 13 項目については、発生確率 P と損害の大きさ C の組合せの違いに応じたリスク回避対応策を講じることにより、P や C がランクダウンされ、事前評価の R4 から R3 に再評価された。
- (3) 現状のシールドマシン技術に基づいてリスク項目を抽出してリスク評価を実施することにより、対応策を含むマシン設計の方針が明確化でき、リスクアセスメントの有用性が示された。

参考文献

- 1) 橋本正，譽田孝宏，朱合華，馬陝峰，亀村勝美：シールドマシンの設計に対する適応性と信頼性に関するリスク評価事例，土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集，3-188，pp.375-376，2007。