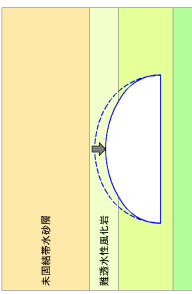
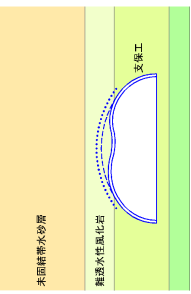
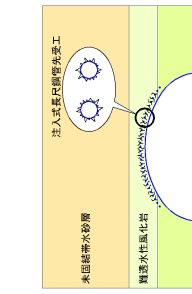
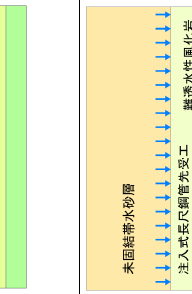
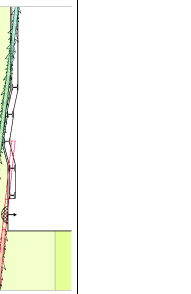


要因分析のまとめ

本委員会において、事故の原因について考えられる10の項目を抽出し、それらが要因となるか否かの可能性について評価を行った。その結果は、下記の通りである。

項目	要因となる可能性の評価		要因 推定
	調査・設計・施工の経緯	考察	
1	<p>説明図</p> <p>難透水性風化岩 (D2層) の強度</p> <ul style="list-style-type: none"> D2層は風化の程度や潜在的亀裂、弱層が分布するため物性値のバラツキが大きかった (N値が5から50以上)。また、上部層との境界面近くは強風化傾向にあった。 FEM解析等の設計では、2本のボーリング調査結果から得られた地山物性値の平均値により均質な地層としてモデル化していた。 標準II型部の施工時の計測結果から逆解析等により地山物性値を再評価しており、大断面部では危険側の設計となった。 	<ul style="list-style-type: none"> 通常の条件であれば当初設計時点での調査頻度が少ないとまでは言えないが、今回のような特殊条件においては、調査頻度が少ないため、地山強度等の物性値や地層厚さを適正に評価することができなかつた可能性がある。 当該資料のみでは不規則に分布する潜在的亀裂や弱層を設計目的に合わせて適切に評価することは技術的に困難が伴った (水圧に對する遮水層の安定性を評価する場合亀裂や弱層など局所的に物性が低い箇所の影響が大きいと想定される) 難透水性風化岩は、物性値にバラツキがあつたにもかかわらず、一つの均質な層として、物性値を代表値によって評価したことが適切でなかつた可能性がある。 ボーリング調査結果に基づく3次元地質モデルによる想定地質では、大断面トンネル天端からD2上面までの距離は、一部を除き2.0mを下回ることが想定され、D2の厚さが想定より薄かつたことが、要因となつた可能性がある。 D2層上面は20度から60度の傾斜角を持つていることが確認され、想定より不陸があると想定されることから、局所的に薄い箇所が存在する要因となつた可能性がある。 	A-① 難透水性風化岩層の強度や厚さ
2	<p>説明図</p> <p>難透水性風化岩 (D2層) の厚さ</p> <ul style="list-style-type: none"> 大断面トンネル部において、D2層の厚さを約2.79~3.67m確保できると見込んでいたが、その後の調査の結果、厚さは約1.90~2.28mしか確保できず、強風化が進んだ強度の低い上部の層が支配的になつていた可能性があることが分かつた。 <p><small>*注:分析に用いられたボーリングデータには、埋め戻し後に陥没箇所が実施されたものも含まれており、陥没事故による傷品の影響を受けている可能性も否定できない。なお、福岡市公表の「追加地質調査結果」について、(福岡市交通局、H28.3)では、陥没箇所が実施されたものを除き、2.39~2.45mの結果が示されている。</small></p> <ul style="list-style-type: none"> D2層の上部境界面は、追加ボーリングの結果、比較的大きな傾斜角を持つていることから不規則な凹凸を有すると推定される 	<ul style="list-style-type: none"> 難透水性風化岩層の上面の不陸および内部の小断層や剥離面、多くの亀理や亀裂が存在し、これが水みちとなり、局所的に水圧作用面がトンネル掘削面に近かつた可能性がある。 	◎
3	<p>説明図</p> <p>高い地下水水位による影響</p> <ul style="list-style-type: none"> 難透水性風化岩層に水圧が作用した。 当該区間の地下水水位は地表面付近にあり、沖積、洪積の砂礫層内に帯水していることから、設計では地上からの葉液注入工が計画されていた。 	<ul style="list-style-type: none"> 難透水性風化岩層に高い水圧が作用する中で施工となるが、FEM解析 (全応力解析) により地盤変位や部材の発生応力に着目した検討がなされ、設計及び施工にあつては、その遮水性や水圧に對する耐力が十分あるものとしてトンネルの安定性を確認していた。現場に即した解析手法の検討や、解析の限界を認識した上で安全側の設計となるような工学的判断が不足してつたことが要因となつた可能性がある。 	A-② 地下水圧の影響
4	<p>説明図</p> <p>難透水性風化岩 (D2層) の耐力不足の可能性</p> <ul style="list-style-type: none"> 土水一体のFEM解析により、トンネル掘削時の周辺地盤の変位、支保工、補助工法の評価を実施し、安定性を照査した。 <ul style="list-style-type: none"> 福岡市地下鉄他工区におけるNATMの施工実績では、主に砂層の地下水水位低下工法、遮水や地山補強を目的とした葉液注入工が実施されている。 標準II型部の導坑、本坑掘削時の計測結果から同定した地山物性値をもとに大断面掘削の予測解析を実施し、注入式長尺鋼管先受け工、サイドパイル、高強度次付けにより補強をすることでD2層の安定を確保すると示していた。 	<ul style="list-style-type: none"> 福岡市地下鉄他工区のNATMの施工実績では、主に砂層の止水や風化岩層部の地山強化により葉液注入工が実施されているが、本トンネルでは、未固結帯水砂層に對して止水のための葉液注入を実施せずAGFに期待したことが、要因となつた可能性がある。 	◎
5	<p>説明図</p> <p>導坑施工による影響</p> <ul style="list-style-type: none"> 導坑施工時の計測結果は、予測値に近い変位が発生していた。 先導導坑掘削時の支保工104基の天端沈下量は8mmで予測FEM解析値と一致しており、先導導坑掘削前までは想定とおりの挙動を示していた。 	<ul style="list-style-type: none"> 天端沈下、内空変位、AGF鋼管の変位は解析値に近い値が計測されており、先導導坑の計測データにより特に問題はないため、要因となつた可能性は低い。 	△

要因判定の凡例 ◎：主要因(直接的な要因であると考えられるもの) ○：副要因(直接的な要因による影響を強めたと考えられるもの) △：要因の可能性が低いもの

項目	要因となる可能性の推定		要因 推定	
	調査・設計・施工の経緯	考察		
6	 <p>トンネル断面形状の影響</p> <ul style="list-style-type: none"> 高い地下水圧が作用しかつ脆弱な地質条件においては、扁平な断面形状が、厳しい地質条件下で影響度合いを強め、トンネル天端の安定性の低下を助長した可能性がある。 	<p>トンネル断面形状の影響</p> <ul style="list-style-type: none"> 高い地下水圧が作用しかつ脆弱な地質条件においては、扁平な断面形状が、厳しい地質条件下で影響度合いを強め、トンネル天端の安定性の低下を助長した可能性がある。 	○	B-① トンネル断面形状の変更
7	 <p>トンネル支保工の安定性</p> <ul style="list-style-type: none"> 吹付けや鋼製支保工の耐力超過はなかった。 支保工脚部の支持力不足はなかった。 計測Bの結果より、105基の鋼製支保工の最大応力は耐力 245N/mm² を超えていない。 	<p>トンネル支保工の安定性</p> <ul style="list-style-type: none"> 吹付けや鋼製支保工の耐力超過はなかった。 支保工脚部の支持力不足はなかった。 計測Bの結果より、105基の鋼製支保工の最大応力は耐力 245N/mm² を超えていない。 	△	
8	 <p>注入式長尺鋼管先受工の横断方向の地山改良効果</p> <ul style="list-style-type: none"> D2層の地山に対して亀裂注入となっていた。 注入材は、いずれの地山にも適用範囲が広いウレタン系が選定されている。 注入式長尺鋼管先受工の注入管理方法は、技術資料に記載されている注入圧および注入量で管理されている。ただし、注入圧については、技術資料に記載されている「初期圧+2.5MPa」とすれば、遮水機能を期待物への影響が懸念されたため、未固結帯水砂層へのリーク、および近接構造試験施工を行い、先受効果を確認したのち、それ以降の注入式長尺鋼管先受工については、「初期圧+1.0MPa」を上限として施工している。注入量については、注入式長尺鋼管先受工削孔時に湧水が無い場合は 10kg/m(95kg/本)、湧水がある場合は 12kg/m として施工を行っている。 	<p>注入式長尺鋼管先受工の横断方向の地山改良効果</p> <ul style="list-style-type: none"> D2層の地山に対して亀裂注入となっていた。 注入材は、いずれの地山にも適用範囲が広いウレタン系が選定されている。 注入式長尺鋼管先受工の注入管理方法は、技術資料に記載されている注入圧および注入量で管理されている。ただし、注入圧については、技術資料に記載されている「初期圧+2.5MPa」とすれば、遮水機能を期待物への影響が懸念されたため、未固結帯水砂層へのリーク、および近接構造試験施工を行い、先受効果を確認したのち、それ以降の注入式長尺鋼管先受工については、「初期圧+1.0MPa」を上限として施工している。注入量については、注入式長尺鋼管先受工削孔時に湧水が無い場合は 10kg/m(95kg/本)、湧水がある場合は 12kg/m として施工を行っている。 	○	B-② すりつけ区間における補助工法の施工方法の変更
9	 <p>注入式長尺鋼管先受工の縦断方向の地山改良効果</p> <ul style="list-style-type: none"> 陥没箇所は陥没部のラップ形状の影響を受ける区間であり、他の部分と比べてラップ長が短く、さらに根元に根元が切断された。 鋼管の打設位置のずれや広がり認められないが、天端部の AGF をガイトセルの干渉により 0.1~0.2m 下げたことで鋼管を一部切断している。 	<p>注入式長尺鋼管先受工の縦断方向の地山改良効果</p> <ul style="list-style-type: none"> 陥没箇所は陥没部のラップ形状の影響を受ける区間であり、他の部分と比べてラップ長が短く、さらに根元に根元が切断された。 鋼管の打設位置のずれや広がり認められないが、天端部の AGF をガイトセルの干渉により 0.1~0.2m 下げたことで鋼管を一部切断している。 		
10	 <p>計測管理や対策工の実施</p> <ul style="list-style-type: none"> 薄板の切り羽押出計測では 102 基で約 9mm の切り羽前方への変位が計測された。 地表面沈下、天端沈下、支保工応力等の経時変化を計測していた。 管理基準値を超えた場合の対策として増し吹付けや注入式ロックボルトを計画していた。 施工者は支保工応力のひとつの計測点が管理基準値 (I) を超えたことを把握したが、発注者への報告はなかった。その後、管理基準値 (II)、管理基準値 (III) を超えるが、リアルタイムで把握することができなかった。 	<p>計測管理や対策工の実施</p> <ul style="list-style-type: none"> 薄板の切り羽押出計測では 102 基で約 9mm の切り羽前方への変位が計測された。 地表面沈下、天端沈下、支保工応力等の経時変化を計測していた。 管理基準値を超えた場合の対策として増し吹付けや注入式ロックボルトを計画していた。 施工者は支保工応力のひとつの計測点が管理基準値 (I) を超えたことを把握したが、発注者への報告はなかった。その後、管理基準値 (II)、管理基準値 (III) を超えるが、リアルタイムで把握することができなかった。 	△	

要因判定の凡例 ◎：主要因(直接的な要因であると考えられるもの) ○：副要因(直接的な要因による影響を強めたと考えられるもの) △：要因の可能性が低いもの