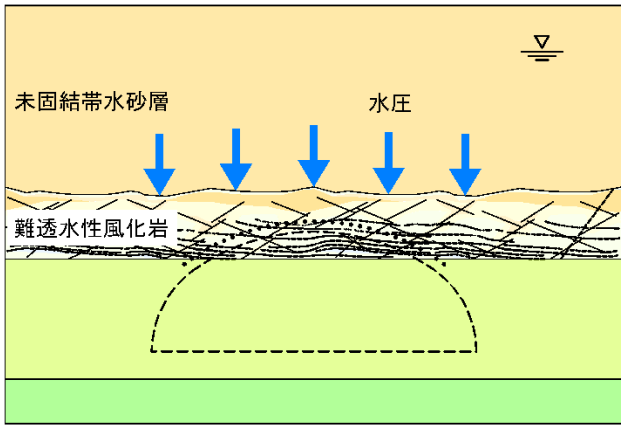
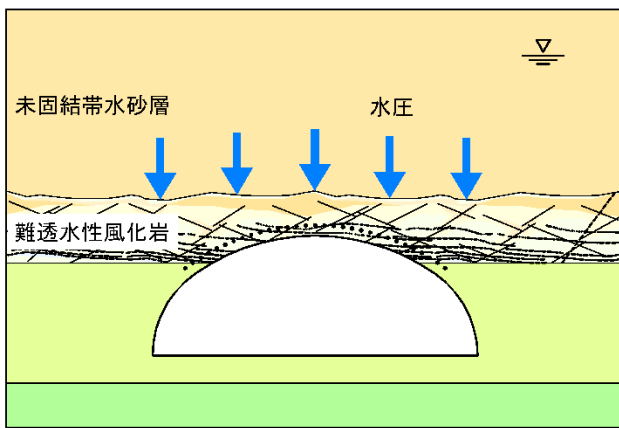
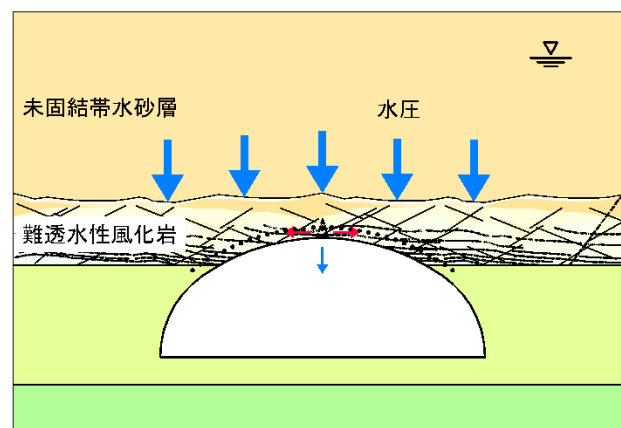
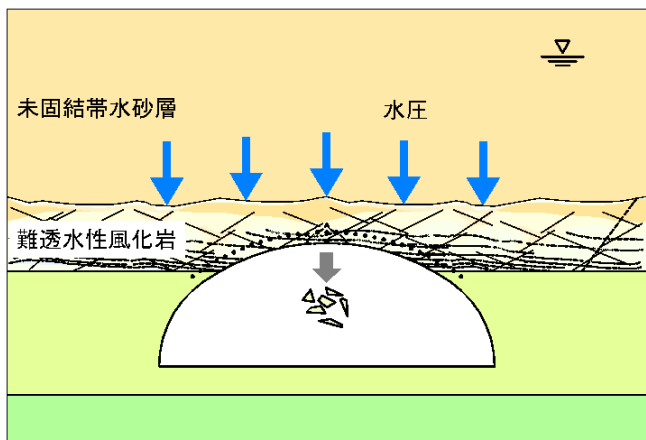
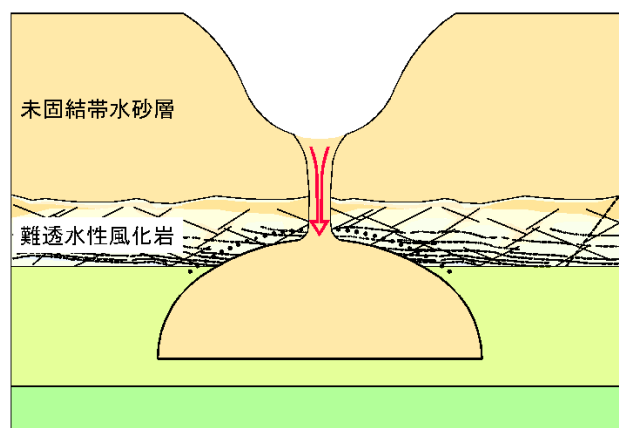


事故の発生メカニズム

要因分析を踏まえた道路陥没事故の発生メカニズム

<p style="text-align: center;">①</p> 	<p style="text-align: center;">②</p> 	<p style="text-align: center;">③</p> 
<ul style="list-style-type: none"> 難透水性風化岩の上部が強風化、低強度となっている。 未固結帯水砂層からは水圧が作用している。 	<ul style="list-style-type: none"> 未固結帯水砂層の地下水に対して、上部の強風化、低強度部を薄く残し、トンネルが掘削される。 	<ul style="list-style-type: none"> 残った薄い強風化、低強度部に水圧が作用し、難透水性風化岩に緩みや亀裂が進展し始める。または、潜在的弱部に水みちが形成される。
<p style="text-align: center;">④</p> 	<p style="text-align: center;">⑤</p> 	
<ul style="list-style-type: none"> 連続的な剥落、漏水を伴いながら、難透水性風化岩の破壊が進行する。 	<ul style="list-style-type: none"> 未固結帯水砂層が地下水とともにトンネルに流入し、道路陥没に至る。 	

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	
	説明図	調査・設計・施工の経緯	考察		
1		<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下においては、調査頻度が少なかったため、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った可能性がある。 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 (水圧に対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ったにもかかわらず、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った可能性がある。 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 上面までの離隔は、一部を除き 2.0m を下回ることが想定されことから、D2 の厚さが想定より薄かったことが、要因となった可能性がある。 D2 層上面は 20 度から 60 度の傾斜角を持っ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、局所的に薄い箇所の存在が要因となった可能性がある。 	◎	A-① 難透水性風化岩 層の強度や厚さ
2		<p>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っていた可能性があることが分かった。 *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を実施されたものも含まれており、陥没事故による攪乱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、陥没箇所を実施されたものを除き、2.39~2.45mの結果が示されている 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っていることから不規則な凹凸を有すると推定される 			
3		<p>高い地下水位による影響</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薬液注入工が計画されていた。 	<ul style="list-style-type: none"> 難透水性風化岩層の上面の不陸および内部の小断層や剥離面、多くの節理や亀裂が存在し、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った可能性がある。 	◎	
4		<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。 福岡市地下鉄他工区における NATM の施工実績では、主に砂層の地下水位低下工法、遮水や地山補強を目的とした薬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、高強度吹付けにより補強をすることで D2 層の安定性を確保するとしていた。 	<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の施工となるが、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、設計及び施工にあたっては、その遮水性や水圧に対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いたことが要因となった可能性がある。 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盤部の地山強化を目的として薬液注入工が実施されているが、本トンネルでは、未固結帯水砂層に対して止水のための薬液注入を実施せず AGF に期待したことが、要因となった可能性がある。 	◎	A-② 地下水圧の影響
5		<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。 先進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、先進導坑掘削時までは想定ど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、先進導坑の計測データにより特に問題はないため、要因となった可能性は低い。 	△	

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			評価	要因推定
	説明図	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"> 遮水層の厚さを確保するため、扁平な断面を採用し、FEM解析で支保の妥当性を確認していた。 	<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。 	<ul style="list-style-type: none"> 吹付けや鋼製支保工の耐力の超過はなかったため、直接の要因ではないと推定される。 計測Bの結果より、天端から異常出水が発生するまで、応力計測結果から支保工は健全であると推定され、耐力が不足したとは認められず、要因となった可能性は低い。 地表面沈下も顕著な増加が認められず、支保工の支持力、脚部沈下も認められないため、要因となった可能性は低い。 	△	
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、遮水機能を期待するD2層を破ること、未固結帯水砂層へのリーク、および近接構造物への影響が懸念されたため、立坑発進部で「初期圧+1.0MPa」として試験施工を行い、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も「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。 	<ul style="list-style-type: none"> 地山条件、湧水条件に対しては注入圧や量の管理を適切に行っており、直接原因となった可能性は低い。 ただし、潜在的亀裂は初期地山状態ではほとんど空隙がないため、十分な地山改良効果が発揮されず、掘削時に緩みが生じた可能性がある。 ラップ部においても注入による十分な地山改良効果が発揮されず、さらに鋼管切断により周辺地山の改良部分の一部が欠損し、必要なラップ長が不足、或いはラップしていない状態となり、当該補助工法に期待する効果が十分発揮されなかった可能性がある。 	○	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"> 陥没箇所は拡幅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をガイドセルの干渉により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"> 導坑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。 	<ul style="list-style-type: none"> 支保工等の計測状況の把握に遅れが生じていたが、状況変化は急速であり、その時点で陥没事故自体を防げたとは言い難く、要因となった可能性は低い。なお、福岡市からは、「(管理基準値を超えた際に、)「事故を防止する何らかの措置がとれた可能性がある。」との意見があった。 支保工応力のひとつの計測点が管理基準値(I)を超えた時点では、その他の計測点や計測項目で異常値を示しておらず、その時点で今回の大規模な陥没事故までを予見することは困難だったと考えられる。その後、管理基準値(II)、管理基準値(III)を超えるが、加速度的に生じる現象の中で陥没に至った状況を踏まえると、陥没事故を防ぐ対策は想定し難い。 	△	

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