

### 3.8 考えられる事故の発生メカニズム

#### (1) 考えられる事故の原因

これまでに述べた倉敷市の事故に関する検討の結果から、事故に至る直接的な原因は以下の理由から 111R の K セグメントが拔出し、111R ならびに 110R の安定性が損なわれたことによるものと推定される。

- 1) 111R の K セグメントのリング継手 (110R 側) が斜めにトンネル内部へ引張られたと推定される破壊形態を示している。
- 2) 111R の K セグメントのセグメント継手ならびに B2 セグメントのセグメント継手の損傷状態に、K セグメントが切羽側に移動したことによって生じたと推定されるひび割れや破損が見られる。
- 3) 三次元 FEM によるシミュレーションの結果、降伏点を超える引張力がリング継手(M16)に作用した可能性があることを確認した。

このような K セグメントの拔出しの要因には複数の事象が挙げられるが、以下の理由から 111R の K セグメントの拔出しが発生した要因として K セグメントがセグメントリングに作用する軸力などによって拔出し易い形状・寸法であったことや、セグメントとシールドテールの上部との競り (または、テールクリアランスの縮小による偏圧) が挙げられる。

- 1) K セグメントの挿入角度が  $\theta_K = 1/3 \theta_A$  ( $\theta_K$ : K セグメントの中心角,  $\theta_A$ : A セグメントの中心角) の実績である  $7^\circ$  前後に対して約  $10^\circ$  と大きく、K セグメントの押出し力が大きくなる (トンネル標準示方書では「 $7\sim 22^\circ$  としている例が多い」としているが、 $22^\circ$  の実績は等分割の K セグメントであり、RC セグメントの  $\theta_K = 1/3$  または  $1/4 \theta_A$  の分割角度の K セグメント場合には  $7^\circ$  前後の実績が主流である。また、突合せ継手の一種であるほぞ付きセグメントの挿入角度は  $6^\circ$  未満としている例が多い)。
- 2) K セグメントの拔出しに抵抗する K セグメントと B セグメントの間の摩擦力はセグメント継手面の摩擦係数を  $\mu = 0.5$  と仮定して算出することが多いが、実験結果から条件によっては  $\mu = 0.1$  を下回る可能性があることが確認され、見込んでいた摩擦力が確保されなかった可能性がある。さらに、K セグメントが滑動したときに、突合せ構造であるセグメント継手は継手面の摩擦抵抗のほかには拔出しに抵抗できないこと、リング継手による拔出しに対する抵抗力として回収されたセグメントの調査結果からリング継手の破壊形態がインサートのかぶりコンクリートのせん断破壊という脆性的なものであったことから、拔出しに対する抵抗力が不足していた可能性がある。
- 3) セグメントとシールドとの位置関係の推移から、2 月 7 日の施工ではトンネル上部をシールドのテールスキンプレートで抑える力が働いていた可能性がある。
- 4) 掘進指示書にシールドの姿勢を  $0.1$  度上向きで維持するとされているにもかかわらず、測量結果は下向き (2 月 6 日昼) であるなど、シールドの姿勢制御が順調に行われていない可能性が認められ、測量データのない 2 月 7 日昼にはさらにシールドのテールの上部がセグメントに接近していた可能性がある。
- 5) 110R、111R の頂部付近のセグメントにはセグメント幅方向に伸びる曲げひび割れと見られるひび割れが確認されており、トンネル上部から大きな力が作用した可能性を示唆している。

- 6) これらの事実確認の結果を踏まえて三次元のFEM解析によるシミュレーションを行った結果、トンネル上部にシールドテールの競りが生じていたと仮定した場合に、111RのKセグメントが抜出す可能性が十分にあることが確認された。

(2) 考えられるトンネルの崩壊過程

回収されたセグメントの調査結果等から、トンネルの崩壊は二段階で生じたと推定され、崩壊に至った過程としては、以下が考えられる。

【第一段階】

①111R の K セグメントの拔出し

【第二段階】

②111R の K セグメントの脱落

③111R の B2 セグメントの折れ、B1 セグメントの脱落

④110R の K セグメントの拔出し、脱落

⑤110R の崩壊

①111R の K セグメントの拔出し

(1) で示したように、トンネル崩壊のきっかけは、111R の K セグメントが切羽側に拔出したことによるものと推定される。K セグメントのリング継手が斜めに引張られたと推定される破壊形態を示していることから、K セグメントは図 3.8.1 に示すように切羽側がトンネル内側へ落ち込むようにして拔出したと考えられる。拔出した K セグメントは、エレクションガイドによって一時的に抑えられたが、拔出しによって生じた隙間から地下水の流入が始まったことが可能性として考えられる。事故発生時の状況で、不具合発生からトンネル崩壊に至るまでの間に、切羽の作業員が不具合を徒歩で連絡し、その後、トンネル内に戻るなど復旧活動が行われていたことから、この状態が 20 分程度継続していたものと思われる。

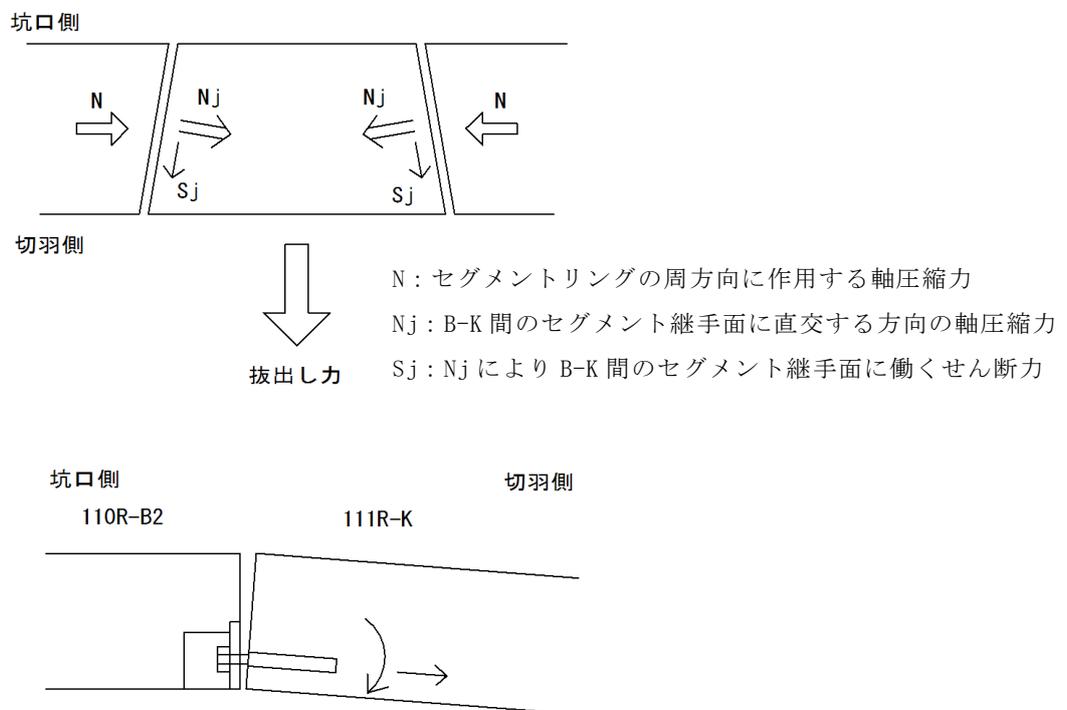


図 3.8.1 K セグメントに発生する引張力と曲げ

## ②111RのKセグメントの脱落

Kセグメントが拔出したのち、地下水の流入が継続することによって周辺地盤が緩められ、セグメントに作用する荷重が増加することで、Kセグメントの拔出しにより安定性が低下した111R、110Rが壊滅的に破壊し、短時間に大量の土水の流入が生じたことが可能性として考えられる。

この時のトンネルの崩壊過程としては、まず、エレクトリオンガイドによって一時的に拔出しが抑えられていた111RのKセグメントへ作用する荷重が増加し、拔出し力に抵抗することができなくなり脱落した可能性が考えられる。図3.8.2に、111RのKセグメントの拔出し、脱落時のイメージを示す。

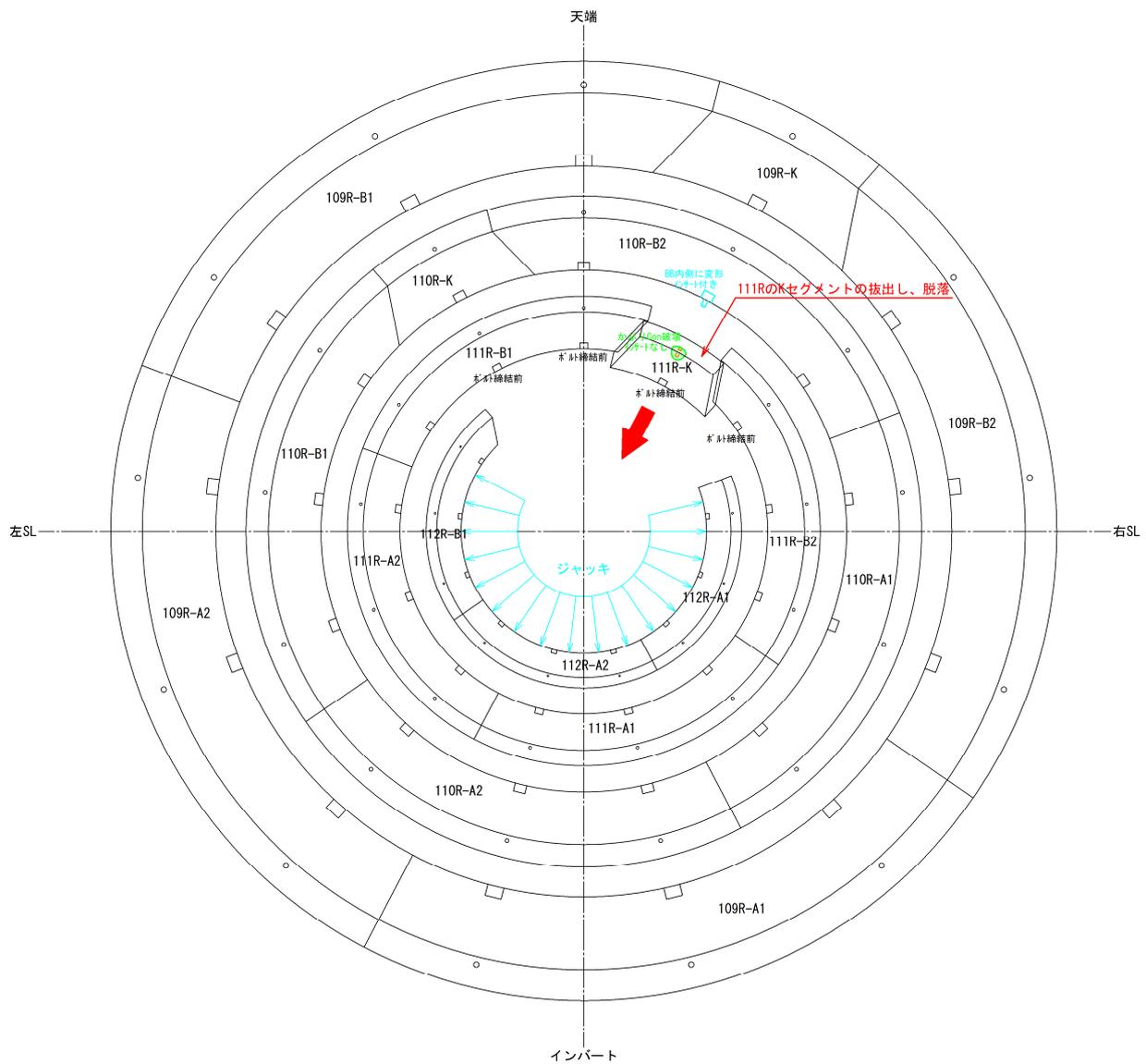


図 3.8.2 111RのKセグメントの拔出し、脱落

### ③111R の B2 セグメントの折れ、B1 セグメントの脱落

111R の K セグメントが脱落することで、111R が不安定となるが、スプリングラインより下方は、112R のセグメントを介して、ジャッキによりトンネル軸方向に支持された状態にあるため、瞬時であるが、どうにか形状を維持できたと考えられる。

一方で、111R の B2 セグメントのスプリングラインより上方と、B1 セグメントは、ジャッキによる拘束を受けていないため、外部からの荷重によりトンネル内側へ落ち込んだ状態になると考えられる。リング継手に発生するせん断力が、ボルトの耐力を越えることでリング継手が破断し、B2 セグメントはジャッキ拘束の有無の境で折れ、B1 セグメントはトンネル内側へ脱落したと考えられる。

この時、図 3.3.1 に示したセグメントの海中残置状況から、折れ曲がった B2 セグメントの上に、B1 セグメントが位置しているため、破壊の過程としては B2 セグメントが折れ、次に B1 セグメントが脱落したことになる。図 3.8.3 に、111R の B2 セグメントの折れ、B1 セグメントの脱落時のイメージを示す。

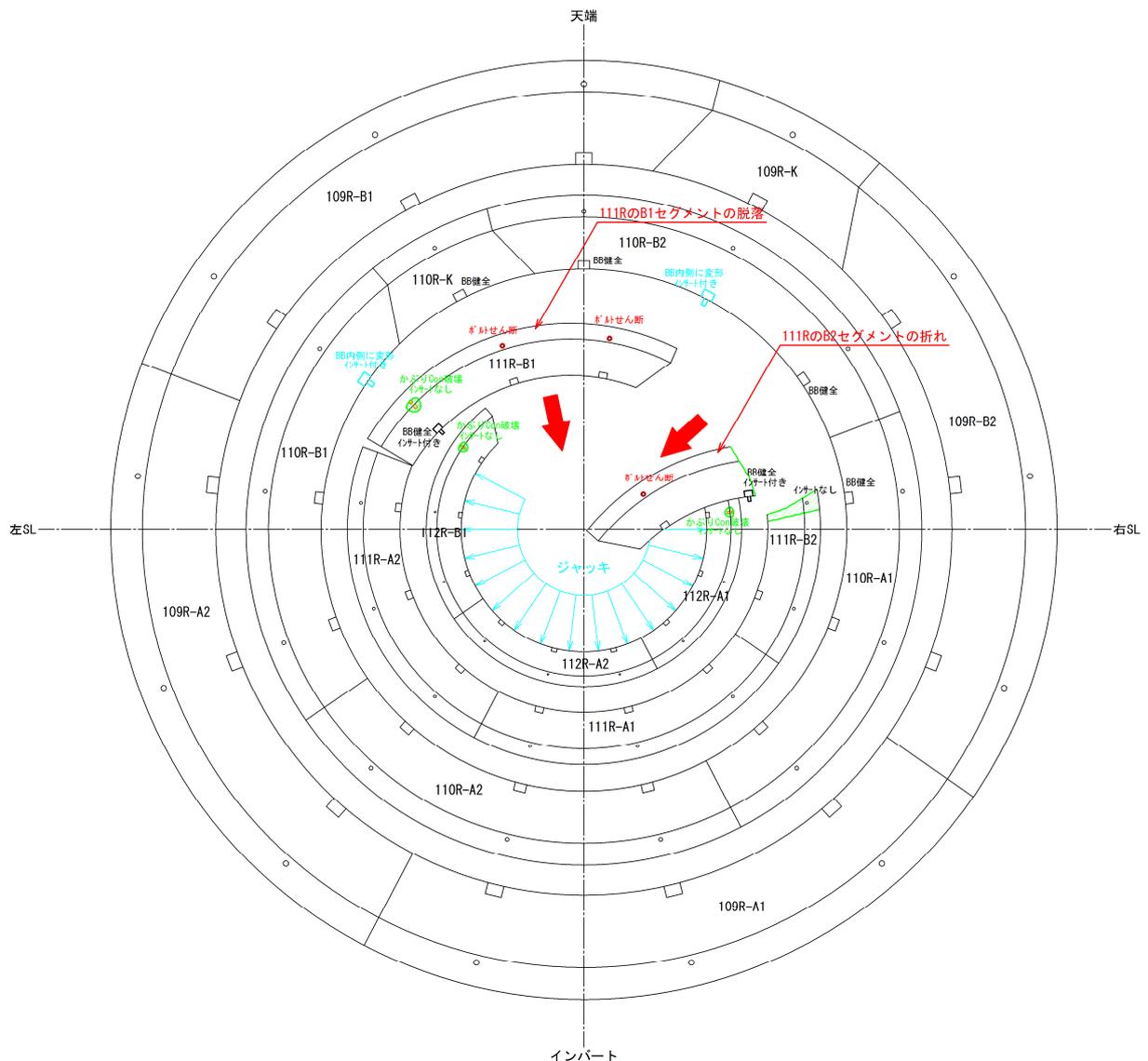


図 3.8.3 111R の B2 セグメントの折れ、B1 セグメントの脱落

#### ④110R の K セグメントの拔出し、脱落

111R の B1 セグメントが脱落により、リング継手で接合されている 110R の K セグメントが引張られ、脱落したことが考えられる。写真 3.8.1 に示すように 110R の K セグメントと 111R の K セグメントのインサート側の損傷状況が似ていること、図 3.3.1 に示したセグメントの海中残置状況から 110R の K セグメントはシールド内に残っていたことから、110R の K セグメントも切羽側へ拔出すように脱落したと考えられる。図 3.8.4 に、110R の K セグメントの拔出し、脱落時のイメージを示す。



a) 110R



b) 111R

写真 3.8.1 K セグメントの損傷状況

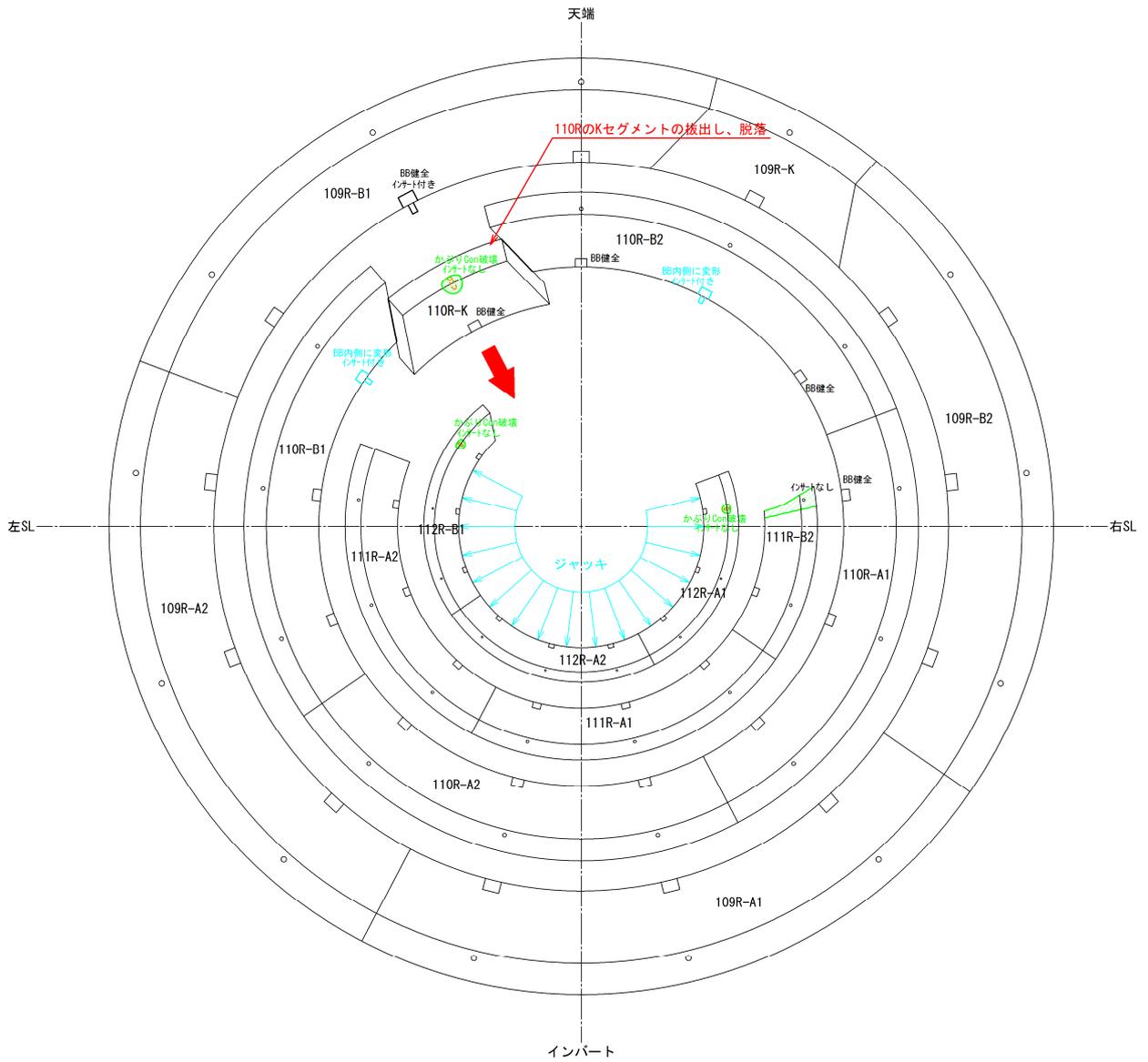


図 3.8.4 110R の K セグメントの拔出し、脱落

### ⑤110R の崩壊

110R の K セグメントが脱落することで、110R も不安定となり、110R が崩壊に至ったと想定される。110R-111R 間のリング継手で 111R のインサート側にかぶりコンクリートの破壊が多いこと、109R-110R 間のリング継手で 109R のボルトボックス側にかぶりコンクリートが破壊し、アンカー筋がトンネル内側に大きく変形した状態であることから、110R がトンネル坑口側へ向かってめくられるように崩壊し、大量の土水の流入とともに坑口へ流されたことが考えられる。また、110R より切羽側にある 111R、112R、および、先に切羽側へ脱落したと考えられる 110R の K セグメントはシールド側へ流されたと考えられる。さらに、110R の崩壊とともに 109 の K セグメントも 110R の K セグメントと同様に抜出し脱落したが、流入した土砂に埋もれたため、回収できなかったことが考えられる。図 3.8.5 に、110R の崩壊時のイメージを示す。

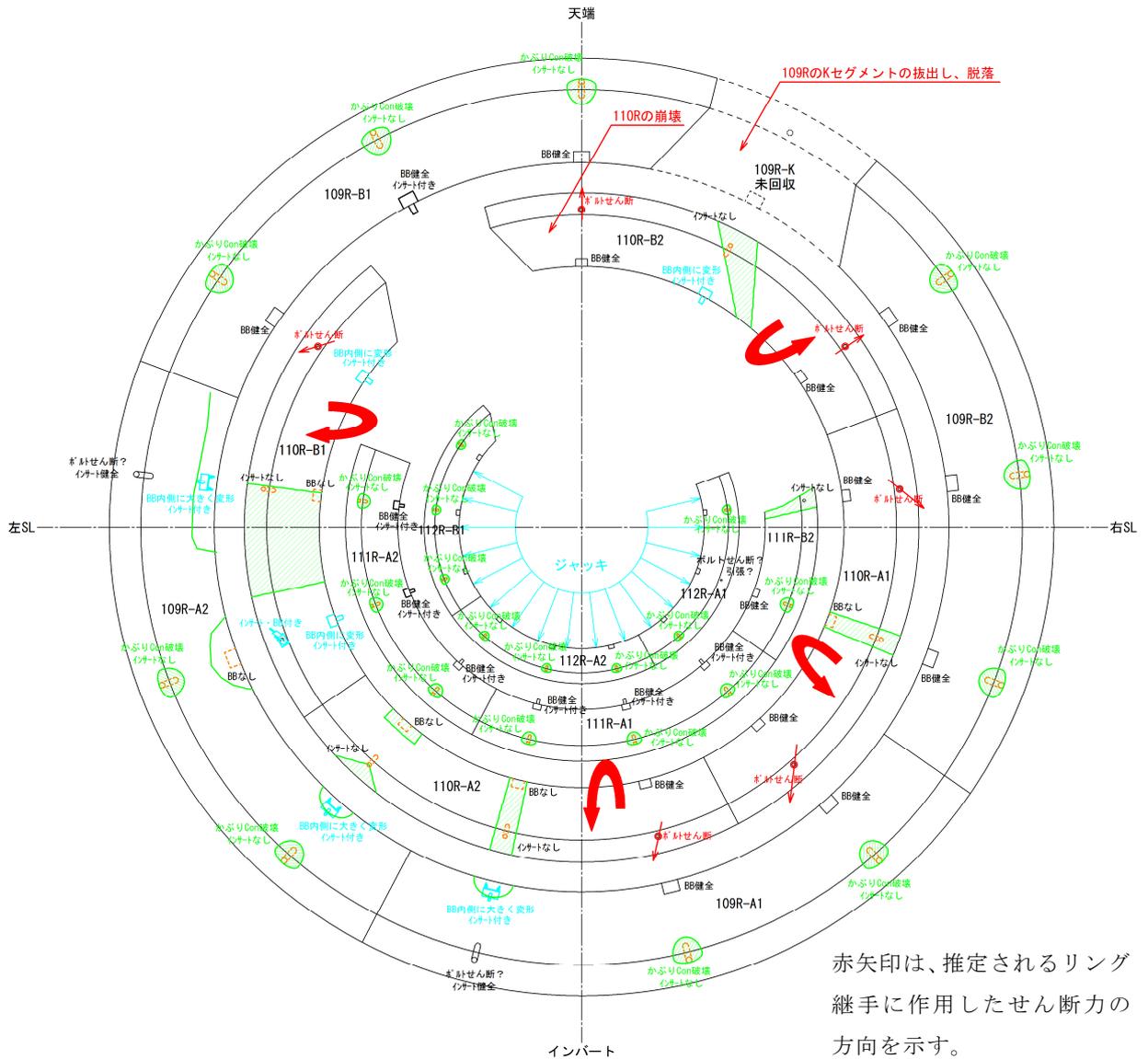


図 3.8.5 110R の崩壊