土木鋼構造物の設計法と最近技術に関する講習会
道路分野での鋼構造物における最近の話題

大断面シールドトンネル分合流部における鋼殻の設計法について

平成19年6月25日

首都高速道路㈱　土橋　浩

1

大断面シールドトンネル分合流部における鋼殻の設計法について

- 都市部におけるトンネル技術の課題
- シールド分合流部の構造の特徴
- 設計の基本（要求性能，限界状態，構造照査法等）
- 大断面シールドトンネル分合流部の鋼殻の設計
  - 設計の課題（解析モデル，RC躯体の有効剛性，施工履歴）
  - 鋼殻継手板の設計法
- 鋼殻とRC躯体接合部の設計
  - 軸力，せん断力，曲げモーメントに対する設計
- 地震応答解析の事例
- 今後の課題

2

都市部におけるトンネル技術

- 近年のシールド技術の飛躍的な発展
  掘削精度や止水性能の向上，内面平滑性
- 道路トンネルなど大断面トンネルへの適用拡大

課題：コスト削減 ⇩

- 二次覆工省略による断面の縮小化
- シールド掘進延長の長距離化

3

シールド長距離化に伴う課題

道路トンネルの場合：

- 地上とアクセスする出入口が必要

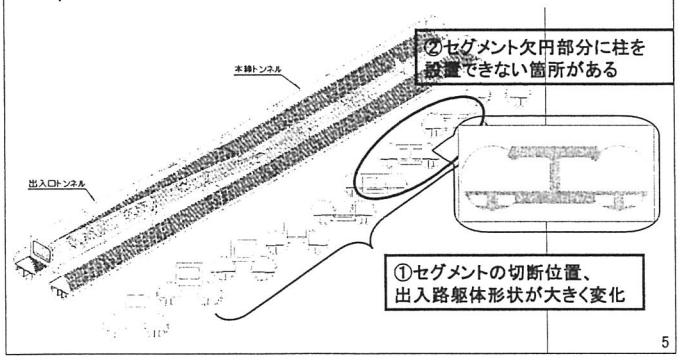
従来，出入口部は開削工法で施工されていたため，
シールド区間が分割され掘進延長が制限された

⇩

シールド本線トンネルと出入口トンネル
分合流部を構築する新たな技術が必要

4

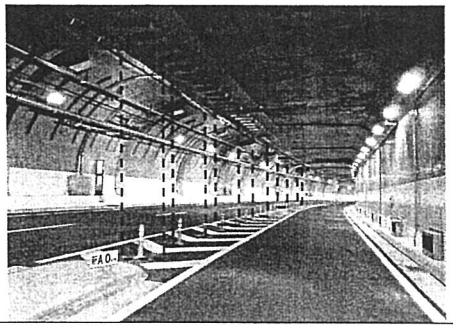
シールド分合流部の構造の特徴



5

分合流部構造の特徴

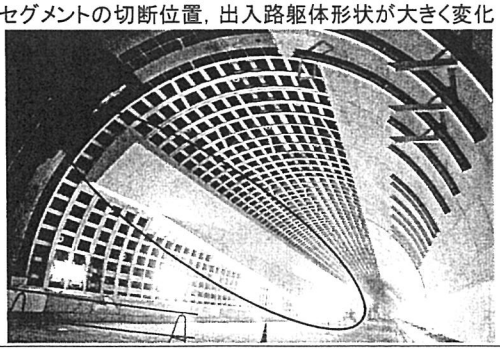
- セグメント欠円部分に柱を設置できない箇所あり



6

分合流部構造の特徴

- セグメントの切断位置，出入路躯体形状が大きく変化



7

要求性能（覆工の役割）

- 安全性：作用荷重に対する安全性
- 使用性：内空の確保，使用目的に適合した機能
- 耐久性：水密性，防水性，耐久性

8

限界状態

使用限界状態(2006年制定トンネル標準示方書[シールド工法編])

- ひび割れの使用限界状態
  鉄筋の腐食またはひび割れ部からの漏水によってセグメントの耐久性，水密性が損なわれる状態
- 変形の使用限界状態
  過大な変形によりトンネルを使用するために必要な建築限界等の必要内空確保が損なわれる状態
- 目開き量の使用限界状態
  トンネルの止水性を確保するために設計で考慮したセグメント継手の目開き量が大きくなり，水密性，継手部の耐久性が損なわれる状態
- 損傷の使用限界状態
  部材に損傷を生じ，そのまま使用することが不適当となる状態

9

構造照査方法

- 鋼殻およびRC躯体は，許容応力度法を用いて，材料を線形弾性体として構造計算することを原則とする(常時，L1)
- 耐震照査は，限界状態設計法(L2)による
- 地盤ばね(法線・接線方向)は非線形ばねとして取り扱う

10

作用と荷重

- 荷重の種類
  (1)死荷重
  (2)土圧および水圧
  (3)揚圧力
  (4)地表面上の荷重
  (5)土被り荷重
  (6)地盤反力
  (7)トンネル内活荷重
  (8)地震の影響
  (9)その他(施工時荷重、近接施工の影響、送排気ダクト圧力等)

11

材料の設計用値

- 材料
  (1)鋼材(鋼殻，躯体，仮設材)
  ・構造用鋼材、鋼管、鋳鋼品、ボルト
  ・「トンネル標準示方書[開削編]・同解説(H8.5)」
  ・「道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編(H14.3)」(鋼殻)
  (2)鉄筋
  ・JIS G 3112「鉄筋コンクリート棒鋼」
  ・SD345を使用することを原則
  (3)コンクリート
  ・JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」

12

構造解析方法

- **解析ステップ**
  鋼殻:施工ステップを考慮した逐次解析と完成形での単独解析
  躯体:完成形での単独解析
- **解析モデル**

	解析ステップ	鋼殻	RC躯体
鋼殻解析モデル	逐次解析 完成時単独	梁要素	平面ひずみ要素
躯体解析モデル	完成時単独	梁要素	梁要素

13

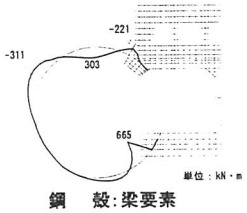
鋼殻設計における課題

- 課題1:解析モデルの検討
  鋼殻とRC躯体の適切なモデル化
- 課題2: RC躯体の有効剛性の評価
  躯体の剛性低下の影響を考慮
- 課題3:施工ステップの評価
  施工履歴による先行応力を考慮

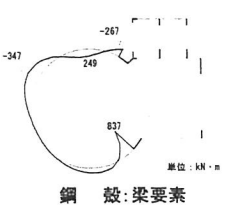
14

課題1:解析モデルの検討

- 接合部の鋼殻の拘束条件(剛域設定)の適切な評価
- 接合部の鋼殻拘束位置の適切な評価
- 接合部の曲げモーメントが約25%低減される



鋼　殻:梁要素
RC躯体:平面ひずみ要素

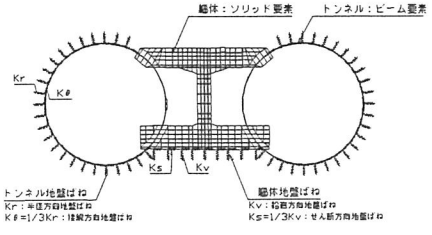


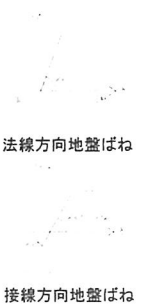
鋼　殻:梁要素
RC躯体:梁要素

15

解析モデル(全体系をモデル化)

鋼殻:梁要素
RC躯体;平面ひずみ要素





16

課題2：RC躯体の有効剛性の評価

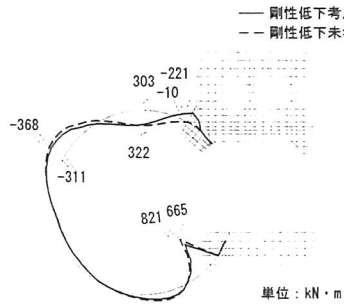
- 有効剛性の評価
  鋼殻の設計に対して，接合躯体の剛性の長期有効剛性を考慮して断面照査する

- RC躯体の有効剛性
  躯体がRCの場合の有効剛性は，クリープ，乾燥収縮および曲げひび割れを考慮して算出（コンクリート標準示方書）

17

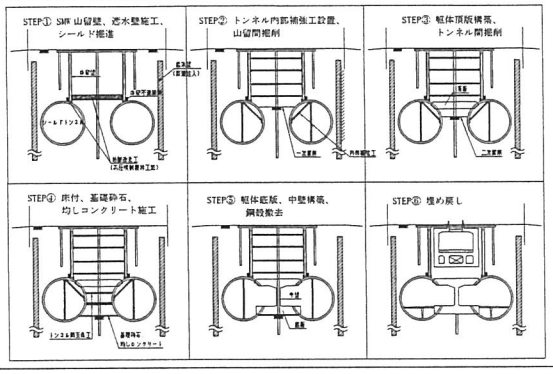
RC躯体の剛性低下の影響を考慮

- RC躯体の剛性低下により曲げモーメントが約20%増加



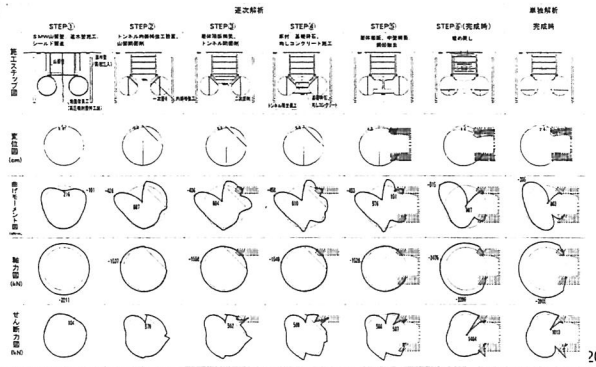
18

課題3：施工ステップの評価



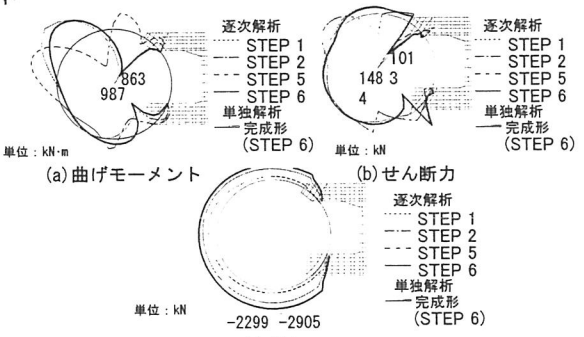
19

逐次解析の採用（先行応力の考慮）



20

逐次解析・単独解析の結果



21

構造照査手順

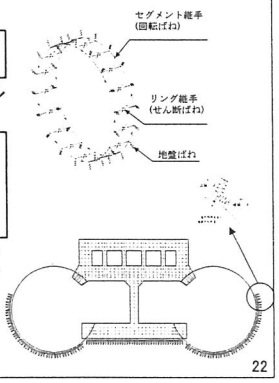
単独解析
（シールドトンネル完成まで）

鋼殻：梁－バネモデル

逐次解析
・掘削～躯体完成までの施工ステップを考慮した解析
単独解析
・躯体の最終完成形を単独で解析

鋼殻解析モデル
躯体解析モデル

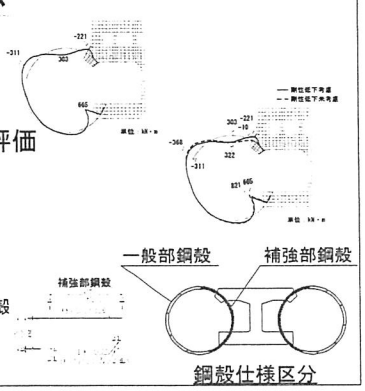
断面力
軸力、曲げモーメント、せん断力



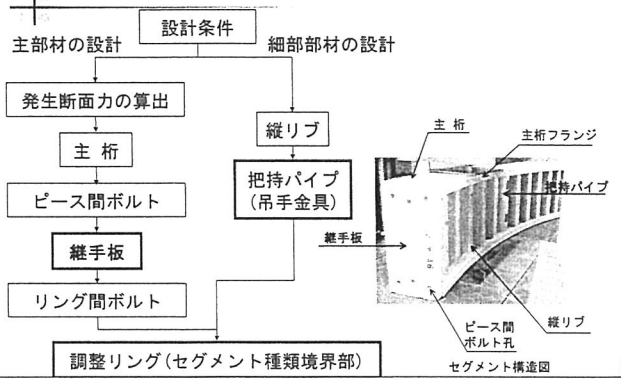
22

鋼殻の設計法

- 鋼殻と躯体のモデル化
  RC躯体：平面ひずみ要素
  鋼殻：梁要素（剛性一様）
- RC躯体の有効剛性を評価
- 先行応力の評価
  施工履歴を考慮した逐次解析
- 鋼殻仕様の断面変化
  鋼殻と躯体接合部
  ⇒補強仕様鋼殻，フランジ付鋼殻
  側円部
  ⇒一般仕様鋼殻



FEMによる継手板の設計



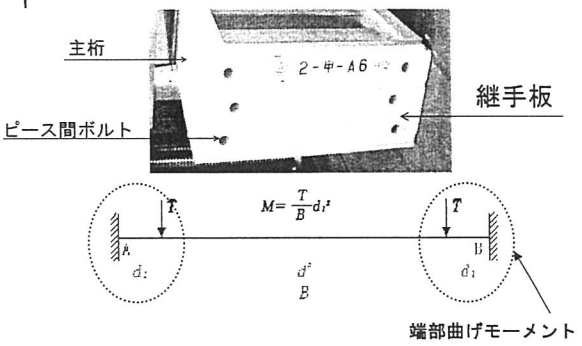
24

FEMによる継手板の設計

- 主桁厚（フランジなし）と同一
  「シールド工事用標準セグメント（日本下水道協会）」
- ボルト径
  ボルトの降伏以前に継手板に大きな塑性変形を発生させない
  継手板の剛性が低下し、ボルト自体の強度を有効に用いることができなくなるため
  「橋梁用高力ボルト引張り接合設計指針（案）（日本鋼構造協会）」
- 主桁内面からピース間ボルト位置までの距離
  （ワッシャー幅三角形分布反力の重心位置）
  継手板のスパン曲げモーメントにより決定

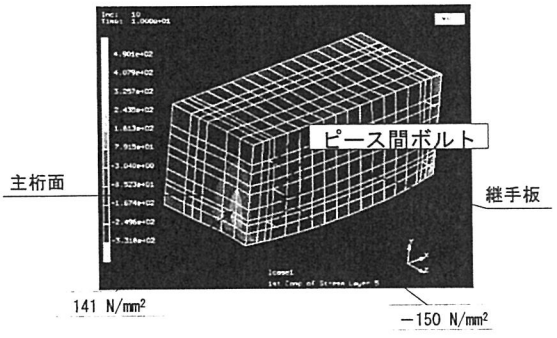
25

スパン曲げモーメントに対する継手板の設計
（端部曲げモーメント考慮しない）



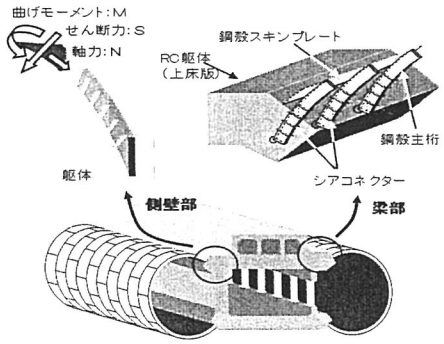
26

3次元FEM解析結果
（スパン曲げモーメント＞端部曲げモーメント）



27

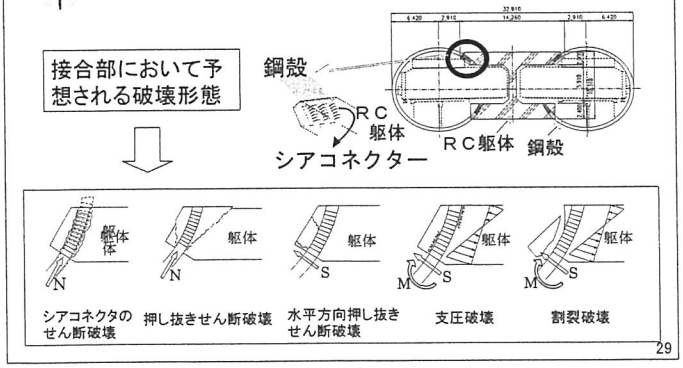
鋼殻−RC躯体接合部構造



28

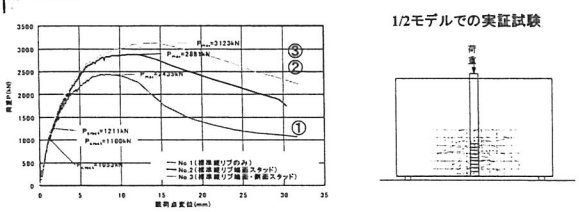
鋼殻とRC躯体接合部の設計

接合部において予想される破壊形態



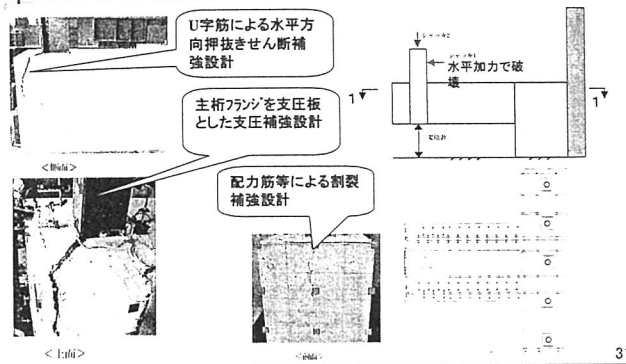
29

軸力に対する設計



30

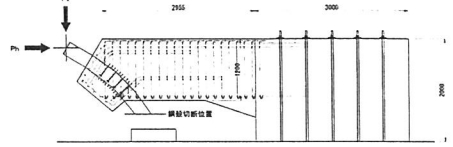
せん断力+曲げモーメントに対する設計



31

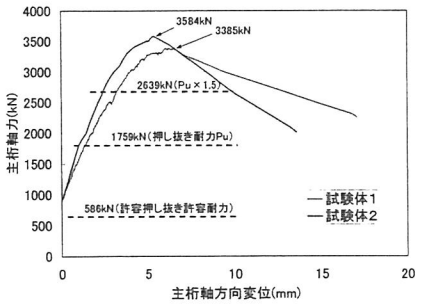
1/2スケール実証実験による設計法の確認

- 実構造物の設計結果の1／2モデル化による載荷試験
  （主桁形状、躯体寸法、配筋を1／2にモデル化）
- 躯体構築後の主桁切断時の状況を確認
  （主桁に初期荷重を載荷した後に供試体のｺﾝｸﾘｰﾄ打設）
- 許容応力度の範囲内での複数の荷重（M、N、S）載荷に設計法の検証
- 曲げモーメントとせん断力が作用した状態での鉛直押抜きせん断耐力確認

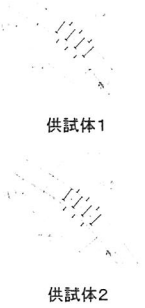


32

実証実験による押し抜き耐力の確認

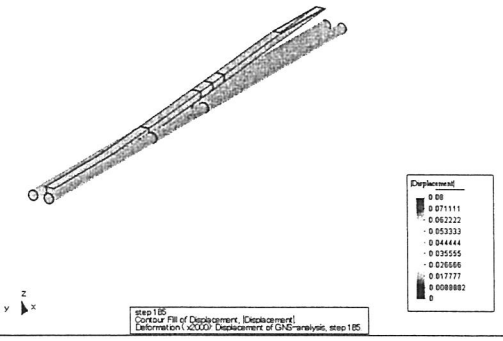


押抜きせん断耐力　荷重・変位関係



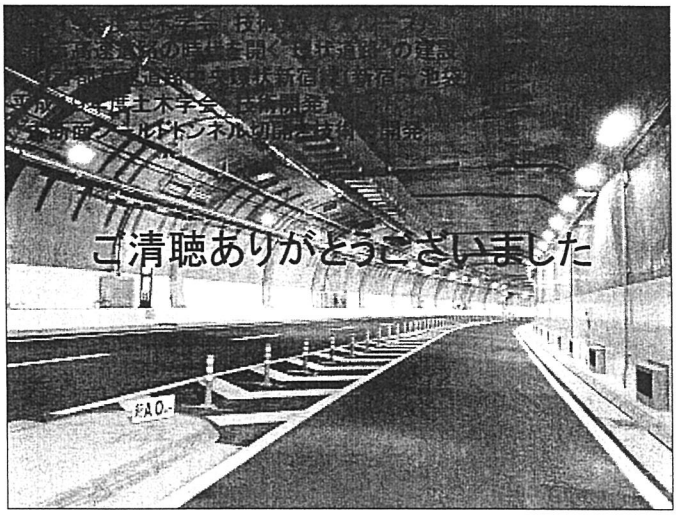
33

3次元地震応答解析の事例
（トンネル軸直角方向入射）



34

今後の課題

- 設計の合理化
  - ・施工段階で得られた計測結果を分析
  - ・荷重作用，地盤反力等について再評価，検証
  - ・合理的な施工法の提案
  - ・接合構造の合理化
  - ・3次元動的解析による耐震性能の照査
- 性能照査型設計法への移行
  - ・覆工（鋼殻）の設計に限界状態設計法の導入
  - ・洪積（硬質）地盤における覆工の合理化

35