

### 3 円形シールドトンネルの仮設柱撤去の影響 に関する実験とその解析

#### A Study on Temporary Column Removal in Triple-face Shield

松本嘉司\*・小山幸則\*\*・岡野法之\*\*・井原俊一\*\*\*・馬場幸彦\*\*\*\*

Yoshiji MATSUMOTO, Yukinori KOYAMA, Noriyuki OKANO, Shyun-ichi IHARA and Yukihiro BABA

Recently, triple-face shield tunneling method is receiving much attention, because it can construct a tunnel in a short period without any auxiliary method such as chemical grouting, etc. In this method, temporary columns are installed between permanent columns. After supporting girders are in place, the temporary columns are removed.

In this paper, we discuss about the behavior of a test tunnel model and three-dimensional FEM simulation analysis in the process of the temporary columns' removal. The tunnel model pipe, columns and media to be analyzed were simulated by shell, beam and solid elements, respectively in FEM package "ABAQUS".

*Keywords* : triple-face shield, temporary column removal, experiment, three-dimensional analysis

#### 1. はじめに

近年、トンネルの大深度化に伴い、切込を必要としないので、高水圧下でも地盤改良等の補助工法を用いずに、短い工期で工事ができる3円形シールド工法が注目されている。

3円形シールドによりトンネルを建設する場合、セグメント覆工の他に、本設柱と仮設柱を建て込み、トンネル完成後に本設柱を残して仮設柱は撤去されることになる。この場合、全ての仮設柱を同時に撤去することは不可能であるため、仮設柱の撤去はある順序に従って行われることになる。このとき、トンネル覆工体は撤去とともに変形し、周辺地盤も変形させることになるので、地盤と覆工の間にはこの変形に伴う力のやり取りが生じるばかりではなく、地盤中の応力の再配分が生じて覆工に作用してくる土圧の大きさも変化することになる。仮設柱撤去に伴うこれらの相互作用が、トンネル構造物に及ぼす影響を適切に評価することは、トンネルの安全性を確保する上で重要である。

そこで、セグメント覆工1リング毎に、2本の柱(本設または仮設柱)を建て込むタイプのトンネルに関して、施工上妥当であろうと思われる撤去パターン2ケースについて、大型模型実験とFEM解析を行った。FEM解析は、仮設柱撤去過程時における覆工体の挙動が3次元적であり、従来の2次元FEM解析では困難であるため、3次元解析とした。

---

\*正会員      工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科  
\*\*正会員      (財)鉄道総合技術研究所 トンネル研究室  
\*\*\*正会員      (株)熊谷組 技術本部 土木技術部  
\*\*\*\*学生会員      東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻

## 2. 実験および解析方法

### 2・1 実験方法<sup>1)</sup>

実験は、幅4 m、高さ3 m、奥行き3 mの大型実験土槽内に、珪砂5号（最大粒径0.85mm、土粒子の密度2.648g/cm<sup>3</sup>、最大乾燥密度1.660g/cm<sup>3</sup>、最適含水比15.0%）を用いた実験地盤および仮設柱撤去のできるトンネル模型を造成および設置（図-1）し、土槽上部から耐圧水袋により荷重（1.5kgf/cm<sup>2</sup>）を載荷した状態で柱の撤去を行い、トンネル構造体に作用する土圧と発生するひずみを計測した。実験地盤は、湿潤状態の材料を砂投入用シュートを用いて、土槽内に1層50cmとし6層に分けて投入して敷き均し、地盤作成管理と密度上昇を目的として、各層の敷き均し毎に散水を行った。作成した地盤の乾燥密度および含水比は、それぞれ1.508g/cm<sup>3</sup>および5.575%であった。模型下面については、地盤との一体化を図るため、模型の形状に合わせて地盤を整形し、その上に模型を設置した。本トンネル模型の材質は鋼（SS400）で、寸法は地下鉄駅部の1/10を想定し、幅171cm、高さ85cm、軸方向長さ300cm、円筒部及びプレート部は、実際の地盤とセグメントの相対剛性比 $\kappa$ を、想定した実トンネルと同一となるように、式(1)より円筒部の板厚を9mmとした。

$$\kappa = E_s \cdot \alpha^3 \cdot 12 \cdot (1 - \nu_1) / (E_1 \cdot t^3) \quad \text{----- (1)}$$

$E_s$ : 土の変形係数

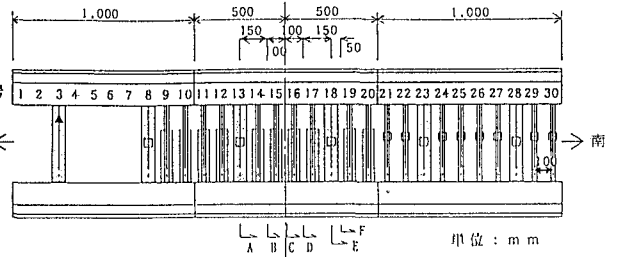
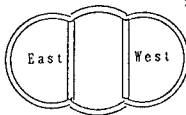
$E_1$ : 管の弾性係数

$\nu_1$ : 管のポアソン比

$t$ : 管厚

$\alpha$ : 管の半径

柱の列名  
(北から見て)



単位: mm

図-2 模型断面図（仮設柱部）

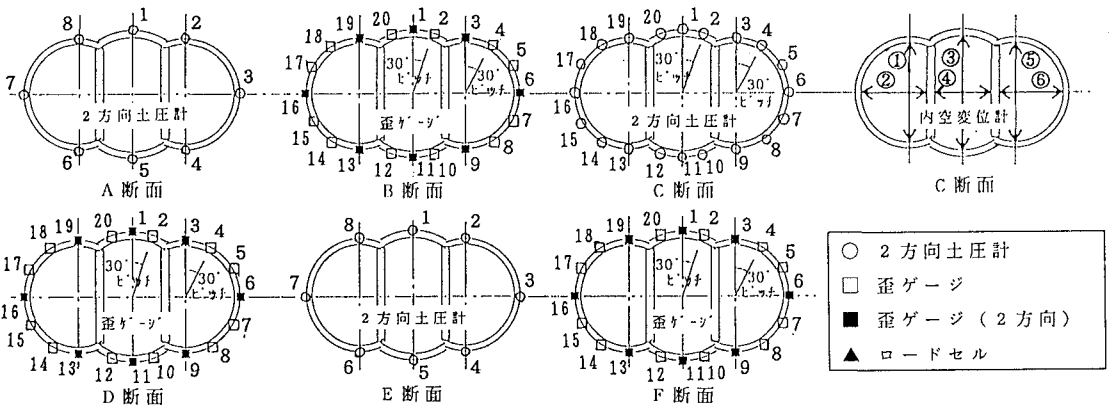


図-3 計測器の配置

また覆工と縦梁の間とは、20 cm間隔に厚さ 6 mm のプレートで台座を設けて荷重を伝達するようにした。縦梁には H 鋼を用い、できるだけ単純な構造とした(図-2)。また柱については、施工段階における切羽方向と坑口方向を想定して、切羽側および中間部には、50cmピッチに設置された本設柱(φ42.7mm×t2.3mmの鋼管パイプ)の間に10cmピ

ッチで、仮設柱(φ27.2mm×t1.9mmの鋼管パイプ)を設置し、中間部の仮設柱については、ジャッキの収縮により柱の撤去を模擬できるようにした。坑口側は本設柱のみを設置した。中間部に設置したジャッキを引き下げることにより、仮設柱の撤去を模擬した。なお、計器は図-3に示すように配置し、撤去される仮設柱の軸力の変化がわかるように、番号12と14～17の柱(計10本)のジャッキにはロードセルを取り付けた。

また、仮設柱の撤去パターンは、施工性を考慮して、図-4に示すような左右交互に仮設柱を撤去していく A パターン、および片側の 1 スパン分の仮設柱を一度に撤去していく B パターンの 2 とおとした。

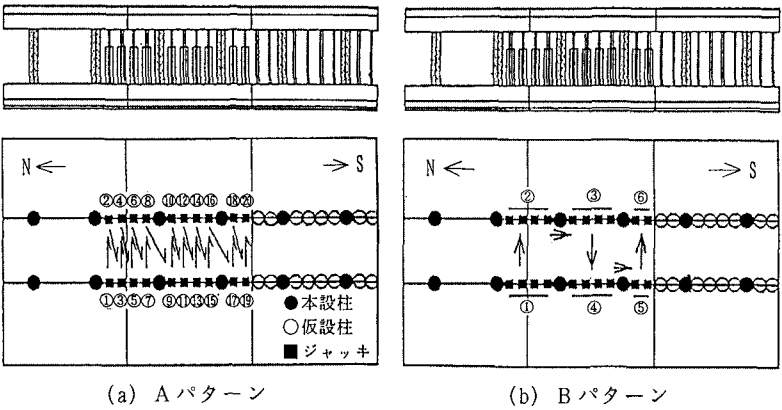


図-4 仮設柱の撤去パターン

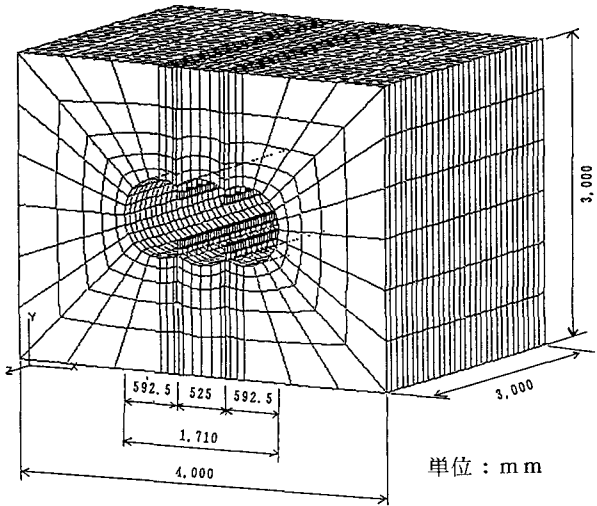


図-5 解析モデル

## 2・2 解析方法

解析は、汎用解析パッケージ ABAQUS で行い、総節点数は10,536、構成要素は、実験地盤を 6 面体ソリッド要素(7,200個)、トンネル模型管の円筒部を 4 角形シェル要素(2,856個)、柱をビーム要素(96個)とし、弾性解析を行った。モデル化した範囲は実験土槽全体とし、模型管と地盤は一体で、実験土槽は動かない、すなわち、4つの側面と下面がローラー支承であるという境界条件を与えた。

解析モデルおよび解析に使用した主な入力物性値をそれぞれ図-5 および表-1 に示す。ここで、実験地盤の弾性係数は、コーン貫入試験より得られた  $q_c = 4 \text{ kgf/cm}^2$  を用いて、以下の式(2)、(3)より求めた。

$$N = q_c / 4 \quad \text{----- (2)}$$

$$E (\text{kgf/cm}^2) = 70 + 5N \quad \text{----- (3)}$$

表-1 入力物性値

| 項 目    | 要素種別    | 入 力 物 性 値                          |       |
|--------|---------|------------------------------------|-------|
|        |         | 弾 性 係 数                            | ポアソン比 |
| トンネル模型 | シェル (管) | $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ | 0.33  |
|        | ビーム (柱) |                                    |       |
| 実験地盤   | ソリッド    | $7.5 \times 10 \text{ kgf/cm}^2$   | 0.33  |

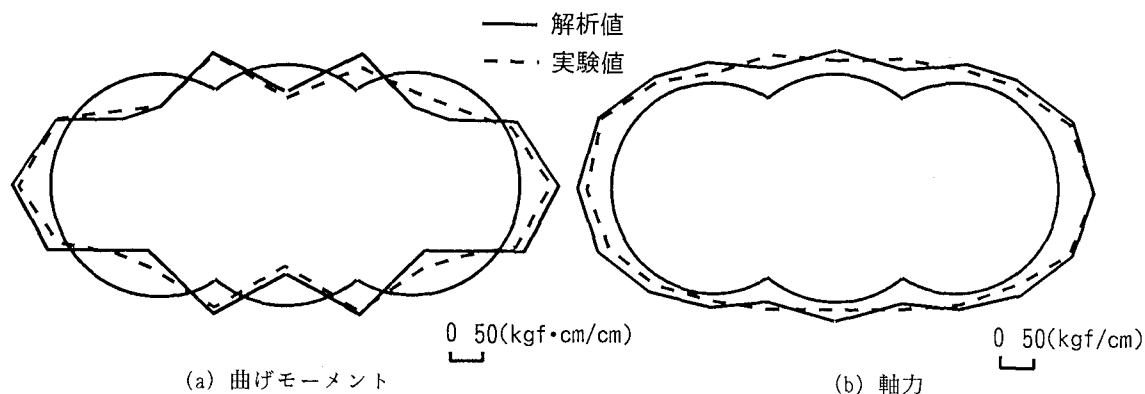


図-6 仮設柱撤去前の周方向断面力 (B断面)

### 3. 実験および解析結果

#### 3・1 仮設柱撤去前の断面力

仮設柱撤去前のB断面のトンネル周方向曲げモーメントおよび軸力を図-6に示す。解析値は、曲げモーメントおよび軸力ともに、若干大きめであるが、その分布形状は実験値と一致している。曲げモーメントをみると、中央円および側円のクラウン部とインバート部で正曲げ、中央円の肩部および側円のスプリングライン部で、負曲げになっており、その値は側円の方がやや大きい。

一方、軸力は、全周にわたってほぼ均一であるが、実験値は、中央円クラウン部においてやや小さく、その肩部では若干大きい傾向にある。

表-2 仮設柱撤去による各柱(東側)の軸力の増分

| 撤去した柱 | 上段: 解析値<br>下段: 実験値 (単位: kgf) |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-------|------------------------------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|       | 本設<br>3                      | 本設<br>8 | 仮設<br>9 | 仮設<br>10 | 仮設<br>11 | 仮設<br>12 | 本設<br>13 | 仮設<br>14 | 仮設<br>15 | 仮設<br>16 | 仮設<br>17 | 本設<br>18 | 仮設<br>19 | 仮設<br>20 | 本設<br>23 | 本設<br>28 |
| 撤去前   | 0                            | 0       | 0       | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| Y9    | 0                            | 2       | 1       | 1        | 0        | 0        | 2        | 0        | 0        | 0        | -1       | -1       | 0        | -1       | 0        | 1        |
| E9    | 30                           | 509     |         | 282      | 124      | 56       | 26       | 2        | -4       | -4       | -4       | -5       | -1       | -2       | 0        | 0        |
| Y10   | 18                           | 260     |         |          |          | 24       | 10       | 1        | 0        | -3       | -2       | 1        |          |          | -3       | -1       |
| E10   | 28                           | 513     |         | 282      | 125      | 57       | 29       | 2        | -3       | -4       | -5       | -7       | -2       | -3       | 0        | 1        |
| Y11   | 18                           | 263     |         |          |          | 24       | 13       | 1        | 0        | -3       | -3       | 0        |          |          | -6       | -3       |
| E11   | 43                           | 959     |         |          | 571      | 233      | 127      | 21       | -5       | -10      | -11      | -14      | -5       | -5       | -1       | 0        |
| Y12   | 3                            | 491     |         |          |          | 74       | 45       | 8        | 1        | -4       | -5       | 0        |          |          | 0        | -3       |
| E12   | 39                           | 967     |         |          | 572      | 233      | 130      | 24       | -3       | -9       | -11      | -16      | -7       | -5       | -1       | 1        |
| Y13   | 3                            | 506     |         |          |          | 77       | 48       | 5        | 0        | -8       | -10      | -1       |          |          | -3       | -3       |
| E13   | 35                           | 1396    |         |          |          | 766      | 465      | 106      | 18       | -8       | -19      | -29      | -13      | -11      | -3       | 0        |
| Y14   | 10                           | 620     |         |          |          | 290      | 145      | 30       | 4        | -9       | -10      | -7       |          |          | -6       | -3       |
| E14   | 29                           | 1405    |         |          |          | 787      | 468      | 109      | 21       | -6       | -19      | -30      | -14      | -13      | -4       | 1        |
| Y15   | 13                           | 656     |         |          |          | 268      | 159      | 31       | 6        | -7       | -10      | -4       |          |          | 3        | 4        |
| E15   | 15                           | 1756    |         |          |          | 1365     | 909      | 90       | 14       | -23      | -44      | -24      | -20      |          | -6       | 0        |
| Y16   | 3                            | 790     |         |          |          | 579      | 146      | 52       | 0        | -14      | -14      |          |          |          | 6        | 4        |
| E16   | 13                           | 1758    |         |          |          | 1367     | 910      | 90       | 15       | -22      | -43      | -23      | -21      |          | -7       | 1        |
| Y17   | 5                            | 789     |         |          |          | 584      | 146      | 54       | 1        | -14      | -13      |          |          |          | 3        | 1        |
| E17   | 5                            | 1803    |         |          |          | 1865     |          | 410      | 143      | 26       | -17      | -24      | -22      |          | -10      | 0        |
| Y18   | 8                            | 825     |         |          |          | 850      |          | 214      | 76       | 21       | 3        |          |          |          | 3        | 1        |
| E18   | 3                            | 1803    |         |          |          | 1869     |          | 410      | 144      | 27       | -15      | -23      | -23      |          | -12      | 0        |
| Y19   | 8                            | 832     |         |          |          | 860      |          | 220      | 78       | 23       | 4        |          |          |          | 3        | -1       |
| E19   | 7                            | 1825    |         |          |          | 2328     |          | 570      | 205      | 101      | -8       | -22      | -19      |          | -1       | 1        |
| Y20   | 8                            | 854     |         |          |          | 1103     |          | 269      | 23       | 69       |          |          |          |          | 3        | 3        |
| E20   | 9                            | 1824    |         |          |          | 2335     |          | 570      | 197      | 103      | -5       | -20      | -21      |          | -1       | 1        |
| Y21   | 8                            | 857     |         |          |          | 1114     |          | 275      | 128      | 74       |          |          |          |          | 0        | 3        |
| E21   | -20                          | 1831    |         |          |          | 2755     |          | 759      | 433      | 57       | 1        | -34      | -2       |          | -4       | -2       |
| Y22   | 8                            | 867     |         |          |          | 1264     |          | 280      | 197      |          |          |          |          |          | 3        | 4        |
| E22   | -22                          | 1828    |         |          |          | 2764     |          | 761      | 435      | 60       | 4        | -35      | -3       |          | -3       | 4        |
| Y23   | 8                            | 877     |         |          |          | 1277     |          | 283      | 205      |          |          |          |          |          | 3        | 4        |
| E23   | -33                          | 1822    |         |          |          | 3127     |          |          |          |          | 1314     | 261      | 94       |          | -49      | -6       |
| Y24   | 5                            | 883     |         |          |          | 1403     |          |          |          |          | 473      |          |          |          | 3        | 6        |
| E24   | -32                          | 1821    |         |          |          | 3128     |          |          |          |          | 1316     | 261      | 95       |          | -47      | -7       |
| Y25   | 5                            | 892     |         |          |          | 1423     |          |          |          |          | 484      |          |          |          | 9        | 3        |
| E25   | -34                          | 1815    |         |          |          | 3164     |          |          |          |          | 1824     |          | 376      |          | -22      | -11      |
| Y26   | 8                            | 896     |         |          |          | 1461     |          |          |          |          | 845      |          |          |          | 29       | 1        |
| E26   | -34                          | 1813    |         |          |          | 3165     |          |          |          |          | 1828     |          | 376      |          | -20      | -13      |
| Y27   | 8                            | 897     |         |          |          | 1473     |          |          |          |          | 860      |          |          |          | 35       | 6        |
| E27   | -38                          | 1795    |         |          |          | 3193     |          |          |          |          | 2283     |          |          |          | 412      | -35      |
| Y28   | 8                            | 903     |         |          |          | 1474     |          |          |          |          | 1006     |          |          |          | 58       | 1        |

また、解析値は実

験値に比べかなり大きな値となっている。

## (2) トンネル周方向曲げモーメント

中央円のクラウン部およびインバート部の増分を図-7に示す。B断面に着目すると、実験、解析ともに、仮設柱を撤去するにしたがって、12番の仮設柱撤去まで曲げモーメントは増加していくが、B断面を含むスパンの仮設柱を撤去していくと減少し、撤去が完了すると、撤去前より若干小さな値となる。

次に、D断面に着目すると、11番の仮設柱の撤去時から増加し始め、14番の仮設柱撤去時をピークに減少に転じ、撤去完了時には撤去前より小さな曲げモーメントとなる。

最後に、F断面に着目すると、F断面のスパンの2スパン前にある仮設柱を撤去しているときは、ほとんど変化がなく、すぐ手前のスパンにある仮設柱を撤去するにしたがって増加し、16番以降の仮設柱を撤去すると減少する。

以上、解析は実験の傾向を比較よく表していることがわかるが、特に変化が大きくなると思われる計測断面付近の仮設柱撤去時の実験値が小さい。このことは、解析では地盤とトンネル模型を一体とし、かつ地盤を弾性体として扱っているのに対し、実験では、トンネル模型の変形に伴う地盤の緩みや地盤と模型管の間のすべりが生じているためと考えられる。

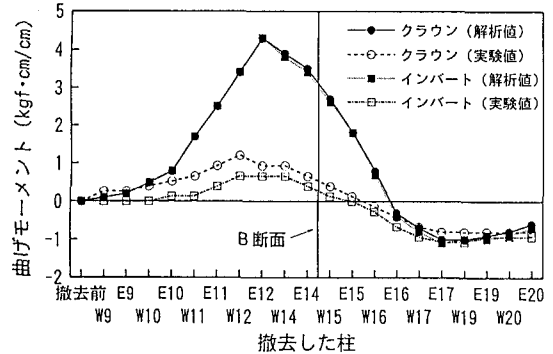
## (3) トンネル周方向軸力

B断面の中央円のクラウン部およびインバート部の増分を図-8に示す。実験では、B断面を含むスパンの仮設柱を撤去するにつれて減少していくが、解析では、10番の柱の撤去時から減少し、B断面を含むスパンの仮設柱を撤去し始めると増加傾向になり、最終的には撤去前の軸力とほぼ等しくなり、実験結果をうまくシミュレートできていない。

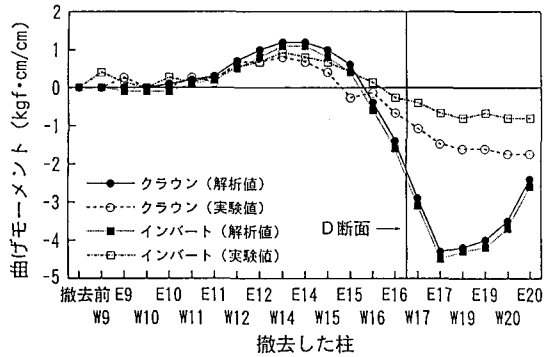
DおよびF断面についても、挙動自体は異なるが、B断面同様、実験結果をうまくシミュレートできなかった。

## (4) トンネル軸方向軸力

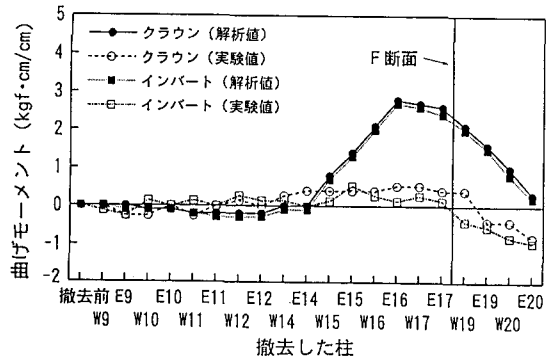
B断面の中央円のクラウン部およびインバート部の増分を図-9に示す。実験および解析とも、撤去開始と同時に軸力は減少し、B断面を



(a) B断面



(b) D断面



(c) F断面

図-7 トンネル周方向曲げモーメントの増分

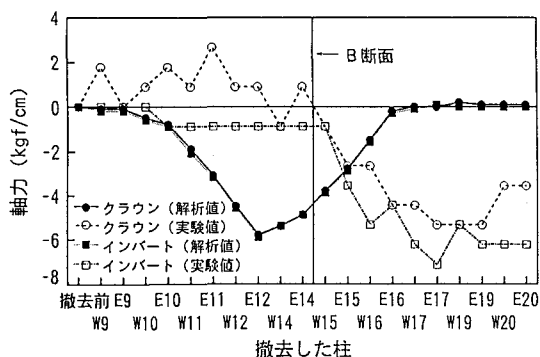


図-8 トンネル周方向軸力の増分 (B断面)

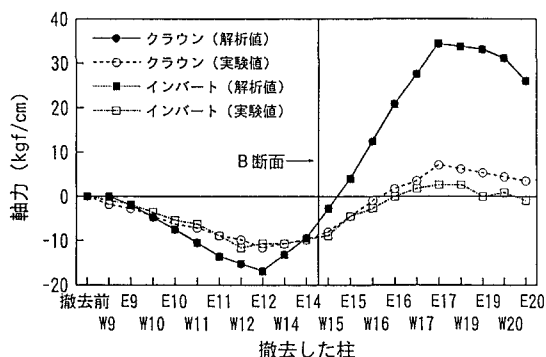


図-9 トンネル軸方向軸力増分 (B断面)

含むスパンの仮設柱を撤去し始めると増分に転じ、17番の仮設柱撤去時にピーク値を示す。しかしながら、実験では最終的に撤去前の値になるのに対し、解析では増加軸力が残留する結果となった。

表-3 仮設柱撤去による各柱 (東側) の軸力の増分

| 上段：解析値<br>下段：実験値 (単位:kef) |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |      |      |     |     |     |    |   |   |  |  |  |
|---------------------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------|------|-----|-----|-----|----|---|---|--|--|--|
| STEP                      | 本設<br>3 | 本設<br>8 | 仮設<br>9 | 仮設<br>10 | 仮設<br>11 | 仮設<br>12 | 本設<br>13 | 仮設<br>14 | 仮設<br>15 | 仮設<br>16 | 仮設<br>17 | 本設<br>18 | 仮設<br>19 | 仮設<br>20 | 本設<br>23 | 本設<br>28 |      |      |     |     |     |    |   |   |  |  |  |
| 撤去前                       | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |      |      |     |     |     |    |   |   |  |  |  |
| STEP1                     | -12     | 19      | 5       | 3        | 1        | 3        | 10       | 6        | 5        | 3        | -2       | -6       | -4       | -5       | -1       | 2        |      |      |     |     |     |    |   |   |  |  |  |
| STEP2                     | 15      | 1756    |         |          |          | 20       | 26       | 13       | 9        | 7        | 7        | 1365     | 309      | 90       | 14       | -23      | -44  | -24  | -20 | -6  | 0   | 0  |   |   |  |  |  |
| STEP3                     | 1756    | 1792    |         |          |          |          |          |          |          |          |          | 1792     | 333      | 109      | 16       | -20      | -14  | 1302 | 253 | 88  | -43 | -6 | 0 | 0 |  |  |  |
| STEP4                     | -26     | 1824    |         |          |          |          |          |          |          |          |          | 3102     |          |          |          |          | 409  | 1314 | 261 | 94  | -49 | -6 | 0 | 0 |  |  |  |
| STEP5                     | 1824    | 1853    |         |          |          |          |          |          |          |          |          | 1853     |          |          |          |          | 439  | 1314 | 261 | 94  | -49 | -6 | 0 | 0 |  |  |  |
| STEP6                     | -33     | 1822    |         |          |          |          |          |          |          |          |          | 3127     |          |          |          |          | 439  | 1314 | 261 | 94  | -49 | -6 | 0 | 0 |  |  |  |
| STEP7                     | 1822    | 1869    |         |          |          |          |          |          |          |          |          | 1869     |          |          |          |          | 439  | 1314 | 261 | 94  | -49 | -6 | 0 | 0 |  |  |  |
| STEP8                     | -32     | 1818    |         |          |          |          |          |          |          |          |          | 3129     |          |          |          |          | 439  | 1320 | 262 | 95  | -44 | -9 | 0 | 0 |  |  |  |
| STEP9                     | 1818    | 1845    |         |          |          |          |          |          |          |          |          | 1845     |          |          |          |          | 439  | 1320 | 262 | 95  | -44 | -9 | 0 | 0 |  |  |  |
| STEP10                    | -38     | 1795    |         |          |          |          |          |          |          |          |          | 3193     |          |          |          |          | 2305 | 14   | -4  | 412 | -35 | 0  | 0 | 0 |  |  |  |
| STEP11                    | 1795    | 1844    |         |          |          |          |          |          |          |          |          | 1844     |          |          |          |          | 1827 | 14   | -4  | 145 | -17 | 0  | 0 | 0 |  |  |  |

### 3-3 Bパターン

#### (1) 柱の軸力

仮設柱撤去による各柱 (東側) の軸力の増分を表-3に示す。実験および解析とも、片側の1スパン分の仮設柱を1度に撤去しても、撤去される反対側の柱には影響せず、撤去される側の前後の柱に荷重の再配分が起こる。

#### (2) トンネル周方向曲げモーメント

B断面の中央円のクラウン部およびインバート部の増分を図-10に示す。実験および解析とも、Aパターンと同様、B断面を含むスパンの前のスパンにある仮設柱を撤去したとき (STEP2) に、増分値は最大となり、STEP4で撤去前よりやや小さくなり、その後はほぼ一定となる。

#### (3) トンネル周方向軸力

B断面の中央円のクラウン部およびインバート部の増分を図-10に示す。実験および解析とも、Aパターンと同様、B断面を含むスパンの前のスパンにある仮設柱を撤去したとき (STEP2) に、増分値は最大となり、STEP4で撤去前よりやや小さくなり、その後はほぼ一定となる。

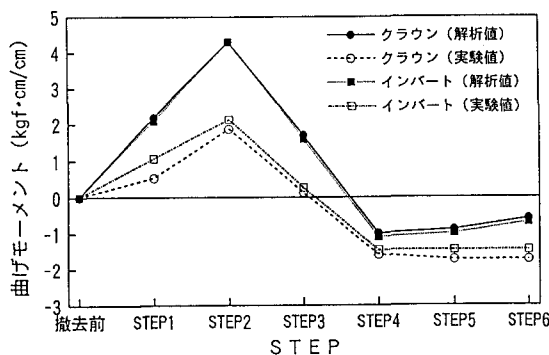


図-10 トンネル周方向の曲げモーメントの増分 (B断面)

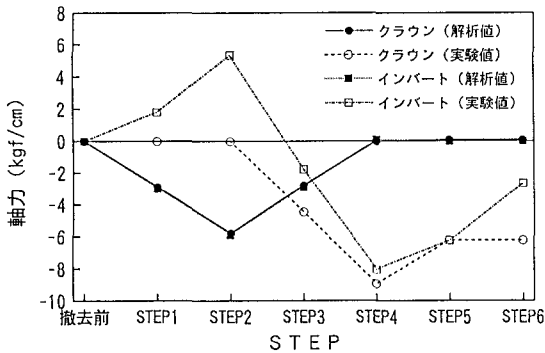


図-11 トンネル周方向軸力の増分 (B断面)

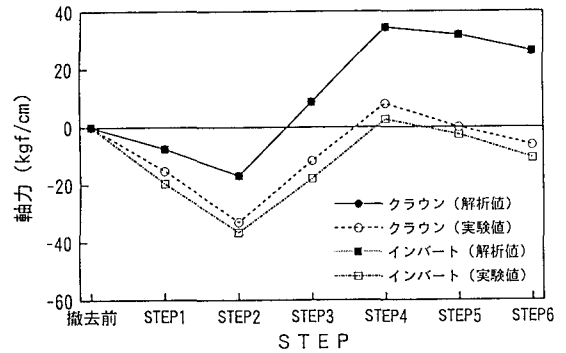


図-12 トンネル軸方向軸力増分 (B断面)

ト部の増分を図-11に示す。解析ではSTEP2で最小となり、STEP4ではほぼ撤去前の値となるのに対し、実験では全く違った挙動を示している。

#### (4) トンネル軸方向軸力

B断面の中央円のクラウン部およびインバート部の増分を図-12に示す。実験および解析とも、STEP2まで減少し、その後STEP4で最大となり、また、STEP6に向けて減少するという挙動であり、解析は実験を比較的良好にシミュレートしている。しかし、大きさは、解析の方がやや圧縮側にシフトしている。

### 4. 実験および解析結果に関する考察

柱撤去に伴う応力の再配分の状態は、地盤、トンネル模型管、柱それぞれの剛性比によって異なるものと考えられる。今回の実験のトンネル構造は実際に試設計のなされたものに基づいて諸元を定めたが、地盤の剛性に対するトンネル模型管の横断方向および軸方向の剛性は単円形のトンネルに比べてかなり高いものであり、このような条件の3円形トンネルの柱撤去時の挙動について、本実験および解析結果に基づいて考察する。

#### (1) 柱の軸力

Bパターンの結果より、1度に1スパン分の仮設柱を撤去してもその反対側の柱に影響がない。これは、模型管が円筒型のため、中央円のクラウンのアーチ型は、支点が沈下する方向に対しては剛性が小さく、一方、管のトンネル軸方向の剛性と縦梁の剛性がかかなり高いことによるものであると考えられる。例えば、縦梁の剛性を1/4に低下させた解析と模型管の軸方向の剛性を1/10に低下させた解析を行った結果、反対側の柱の軸力の増加には0.6%程度しか影響がなく、また、地盤の剛性を10倍に高くして解析を行った場合にも同様の結果が得られたことからいえる。

また、実験値は解析値の約1/2程度の値となっているが、これは、模型管の設置の際に、柱と取りつくトンネル下半部のカモメ型のセグメント(Kセグメント)の背面では、地盤と模型管の密着が十分でなかったためであると考えられる。

#### (2) トンネル周方向曲げモーメント

Aパターンの場合、トンネル周方向曲げモーメントに影響し始めるのは、ちょうど1スパン前の仮設柱の撤去時であることがわかる。この影響範囲は、トンネル模型管、柱および地盤の剛性の比によって変わると考えられるが、今回対象としたトンネルでは、仮設柱撤去による3次元的挙動は1スパンで収束している。

また、B、D、Fのいずれの断面においても、最初に増加傾向を示す。これは、仮設柱の撤去が進むにつれて、計測断面より坑口側の断面の剛性が小さくなり、荷重は仮設柱の撤去されていない、剛性の高い計測

断面の方に流れるためと考えられる。その後、計測断面付近の仮設柱が撤去されるにつれて、断面の剛性が低下し、それに伴って、トンネル周方向曲げモーメントも減少する。

BパターンについてもAパターンと同様の傾向にあり、1スパン8本の仮設柱のうち、その半分の4本が撤去されたとき（Aパターンでは仮設柱10撤去完了時、BパターンではSTEP1）は、その8本すべてが撤去されたとき（Aパターンでは仮設柱12撤去完了時、BパターンではSTEP2）のほぼ半分の曲げモーメントであり、撤去パターンには依らないことが明らかとなった。

### (3) トンネル周方向軸力

トンネル周方向軸力は、いずれのパターンの場合でも、各計測断面における実験値と解析値との間に大きな相違がみられる。曲げモーメントは、曲げ変形に伴って生じるもので、トンネルに作用する土圧の局部的なばらつきの影響を受けにくいに対し、軸力は、模型管背面地盤の密度のばらつきや覆工と地盤のすべりなどによるトンネル接線方向に作用する土圧の計測点付近の局部的なばらつきの影響を大きく受けることになる。一方、解析では、地盤が均等でトンネル模型管との連続性が保たれるとしている。また、発生した応力変動の大きさも小さいものであった。これらのことから、実験値と解析値に大きな違いが生じたものと思われる。

### (4) トンネル軸方向軸力

トンネル軸方向軸力は、トンネル周方向軸力に比べ、接線方向応力の影響が小さく、ほとんどがトンネル模型管の曲げによるものであるので、解析は、実験の傾向を比較的よく表すことができたと考えられる。しかし、解析値の方が実験値よりもかなり大きな値となったが、これは、トンネル模型管端部を実験では拘束していなかったのに対し、解析では回転を拘束した条件としたためと考えられる。

## 5. 結論

- ① 実験の結果から、今回の地盤、覆工、柱、縦梁のそれぞれの剛性比の場合には、仮設柱撤去過程の差は、トンネルの断面力の発生に大きな影響を及ぼさないことがわかった。
- ② 仮設柱の撤去が柱軸力に影響を及ぼす範囲は、撤去される柱と同列の隣接する2、3本であり、反対側の柱にはほとんど影響しない。
- ③ トンネル周方向の軸力をシミュレートするのは、本条件ではかなり困難であるが、その他の断面力については、3円形シールドトンネルにおける仮設柱撤去の影響を3次元FEMにより、おおよそシミュレートすることができた。したがって、今後、種々の地盤条件、構造条件の場合の検討に有効に活用できるものと考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、3円形シールドトンネルの設計ならびに施工上の検討のうち、仮設柱撤去の影響について、大型土槽実験とその解析の比較を行い考察した。今後は、さらに撤去パターンについて検討し、危険な撤去パターンならびに最適な撤去パターンを明確にし、3円形シールドトンネルの合理的な設計施工法を確立していきたい。

## 7. 参考文献

- 1) 小山幸則、井原俊一他：3円形シールドトンネルに関する模型載荷実験、土質工学研究発表会論文集、pp.1967～1968、1994.6.