

日本電信電話公社茨城電気通信研究所 正会員 田中邦男

同 同 山川喜弘

同 同 小林英夫

1、まえがき 連続コンクリートトンネルの安定性検討のためには、長年月に亘る地山のゆるみ、地震等に起因する終局的分離過程を解析することが必要となる。この場合、軸方向の移動が微少で圧縮強度が大きい連続コンクリートトンネルにおいては、分離過程時に発生する追合効果が重要な意味を持つてくる。本文は、この追合作用の影響を検討するために、既にトンネル部分に、図1のような切断線が生じている一つのモデルを取り上げ、不等沈下時における追合力の算定を行い、これにもとづき、トンネルの極限的な安定性に対する考察を試みたものである。

2、追合力の理論的考察と実験的検証

図1に示すような連続トンネルの $O_1 \sim O \sim O_2$ が切断している場合の力学モデルとして、丁度2つの片持ばりが $O_1 \sim O \sim O_2$ 面で、向かい合わせに接触している状態を想定する。この状態下では土圧が2つのはりに同じようにかかるため、 $O_1 \sim O \sim O_2$ を対称面として左右対称にならわ。このため図2のごとく、はりの中立軸はお互に Δ_1 ずつ縮むが、片持ばりの端面に微少な傾きが生じ、天端があがみ合った形で Δ_2 ずつ伸び、天端の接触部で追合力 F が発生することになる。このような追合力 F が生ずることにより、左右のはりがお互に Δ_3 ずつ縮むものとする。このとき、 $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ の間には、式(1)の関係式が成立しなければならない。

$$\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = \Delta, \quad \Delta: \text{肉厚(初期肉厚)} \quad \text{-----(1)}$$

これらの Δ_i に対する厳密な解析は、サン・ブナンの提示した問題の組み合わせ、等で求めることができるが、ここでは、通常のはり理論を適用して、式(2)のごとく定める。

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= -\frac{q^2 l^7}{14,336 E^2 I^2} + \frac{3q l^5}{2560 E^2 I^2} F - \frac{D^2 l^3}{192 E^2 I^2} F^2 \\ \Delta_2 &= \frac{\eta q D^2 l^3}{96 E I} - \frac{\eta D^2 l}{8 E I} F, \quad \Delta_3 = -\frac{\lambda L}{2 E A} F \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

q : 土圧, D, A, E, I : トンネル外径, 断面積, ヤング係数, 断面2次モーメント,

F : 追合力, L : 地山のゆるみ長さ(空洞長), η, λ : 補正係数,

式(2)を式(1)に代入し、整理すると、追合力は式(3)のように表示される。この場合追合力は、 $\{q_1\}, \{q_2\}$ がともにプラスとなる時に発生するが、実際的には $\{q_2\} > 0$ であり、また軸方向の移動が微少となる連続トンネルの切断

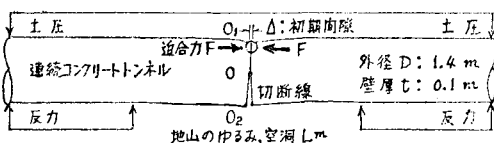


図1. 連続トンネルにおける分離過程のモデル。

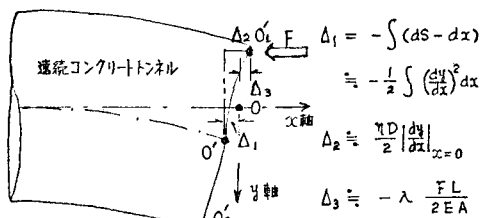


図2. トンネル軸方向伸縮量 $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ 。

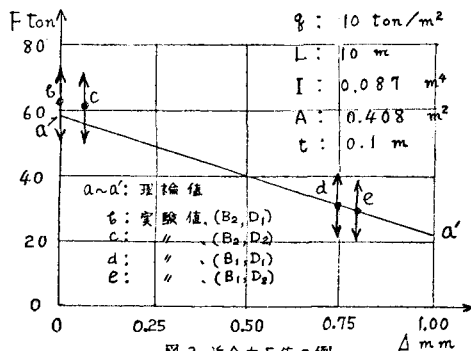


図3. 追合力 F 値の例。

表1. 要因および水準。

要因	水準	
	1 水準	2 水準
A 追合効果	A ₁ 追合作用有、	A ₂ 追合作用無、
B 接触状態 (肉厚差)	B ₁ 接触不良、 (肉厚大)	B ₂ 接触良好、 (肉厚小)
C 分布荷重	C ₁ 5ton/m ² に对应、	C ₂ 10ton/m ² に对应、
D 時間差	D ₁ セット直後 に測定、	D ₂ 繰り返して 測定、

面においては、 Δ （初期間隙）は微小と仮定することができ、 $\{q_1\} > 0$ となって、追合力が生ずることが言える。

$$F \approx \frac{5A \cdot \{q_1\}}{84L \cdot \{q_2\}} \cdot \left[1 - \frac{800A^2D^2L \cdot \{q_1\}}{63 \cdot \{q_2\}^3} \right] \quad (3)$$

$$\{q_1\} = 448\pi q D^2 EI - 3q^2 D^2 L^2 - 43,008 E I^2 \cdot \Delta$$

$$\{q_2\} = 320\pi A D^2 EI + 1,280 \lambda EI^2 - 3q A D^2 L^2$$

以上の追合力は、図4のモデル実験によって、容易に確認することができる。図4、IIの精密実験については、表1の要因および水準を定めて、複合形直交計画にもとづき実施し、図5のごとき結果を得た。（実物大トンネルの場合に換算表示する。）これより、抽出した追合力をグラフ中に示して理論結果と比較すると、図3例のように表われ、理論解析例と同様の傾向となっていることが言える。

3、極限における安全領域の算定例

図1に示す地山のゆるみ長さ（空洞長さ） L は、土圧 q の程度に対応した限界値をもち、許容される空洞長さ L_m が定まる。この限界空洞長さ L_m と土圧 q との関係は、片持ばりとしての算定式および式(3)の追合力 F の算定式から求まる、式(4)の関係式にもとづいて、定めることができる。この場合追合力は、 L_m, q を含むため、 $F(L_m, q)$ で表示する。

$$\frac{q}{8} L_m^2 - F(L_m, q) \approx K \quad \text{---(4)}$$

K：トンネル諸元、コンクリート強度で定まる定数。

式(4)で求まる $L_m \sim q$ の関係をグラフで表わすと、図6中に例示するとき傾向となる。また、実際問題として重要な、切断力所開口部よりの土砂侵入に対処するための許容限界幅および追合力作用点付近での局部的圧壊の程度を仮定すると、同様に、限界空洞長さ L_m と土圧 q との関係が式(5)で表示され、図6中に例示するような傾向となる。

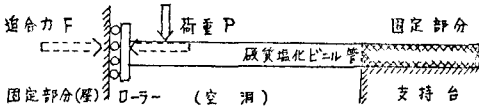
$$L_m \approx \frac{2V}{\sqrt{\kappa}} \cdot \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{q}} \cdot \sqrt{E_m} \quad \text{--- (5)}$$

κ ：局部的圧壊の程度を表示する係数、 V ：追合力が作るモーメントの腕の長さ（トンネル外径）との比率、 E_m ：切断力所開口部における許容限界幅、

具体例として、式(4)(5)中の K, E_m, V, κ が表2で示される値の場合には、図6のごとき安全領域の一例が求められる。

4、あとがき 本文中の議式は多くの仮定を含み、吟味を要するが、かかる追合作用は、連続トンネル等に存在する基本事象をなすことが推測できる。今後は、地震、クラック成長、等の問題を加えて、本質的検討を行う予定である。

第一実験（確認実験）---- 荷重 P を加えると、追合力 F が生ずる。



第二実験（精密実験）---- 分布荷重 q を加えると、追合力 F が生ずる。
1/30 換型実験

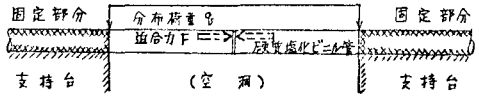


図4. 追合力抽出、確認のためのモデル実験。

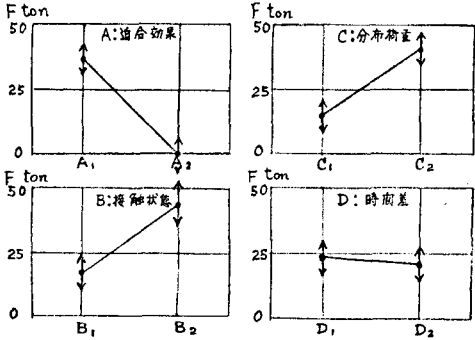


図5. 要因効果の推定。

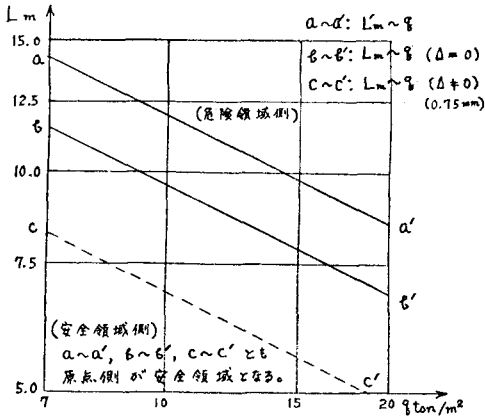


図6. 安全領域の算定例。

表2. 主要因子

因子	適用値	説明
K	44.3 ton	トンネル外径、断面2次モーメント及びコンクリート強度で定まる算定定数である。
E_m	2.0 mm	排水フィルター関係資料により、土砂侵入限度を2mm程度とする。
V	2 / 3	追合力発生から分離状態となるまでに、1～2/3と変化するとし、悪条件とする。
κ	$7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ton}$	圧壊発生時の過渡期間が終わり、平衡状態となった時点での値を仮定する。