

地圧によるトンネル変状の対策事例分析と解析的検証

CLASSIFY AND ANALYSIS OF THE COUNTERMEASURES OF THE DEFORMED TUNNEL BY EARTH PRESSURE

野城一栄¹⁾・朝倉俊弘²⁾・小島芳之¹⁾・高橋徹¹⁾・松長剛³⁾

Kazuhide YASHIRO, Toshihiro ASAKURA, Yoshiyuki KOJIMA, Toru TAKAHASHI, Takeshi MATSUNAGA

The mechanical behavior of a tunnel lining is considered by model tests and numerical analyses, and the new design standard of the countermeasures for deformed tunnels is proposed. The design standard is verified by comparing with past designs and the frame analyses which can consider crack propagation. It is found that the standard can propose an appropriate countermeasure corresponding to the degree of deformation of a tunnel and that stiffness, strength and toughness of the reinforced lining increase with reinforcing rank applied in the standard. It can be said that with this standard, the design of the countermeasures of deformed tunnels are able to be done easily and reasonably.

Key Words: Mountain tunnel, Deformation, Countermeasure, Crack, Design method

1. はじめに

現在供用中のトンネルには、材料劣化や地圧等の外力により覆工にひび割れなどの変状を生じているものがあり、これらの中には対策を要するものも少なくない。しかし、変状トンネルの対策工の設計は経験的な判断に基づいていることが多く、覆工に発生している応力状態等を力学的に評価し、設計に反映している事例は極めて少ない。筆者らは、対策工の設計実績の整理、模型実験、数値解析によって覆工の力学的挙動の検討を進め、変状トンネル対策工の設計法を提案した¹⁾²⁾³⁾。本報告では、変状トンネルの対策工の事例調査、変状トンネル対策工の標準設計の概要、設計事例調査との比較および数値解析による標準設計の妥当性の検証について述べる。

2. 変状トンネルの対策工の事例調査

(1) 事例調査

まず、標準設計を策定するに先立ち、供用中に変状を生じ対策工がなされた鉄道トンネルのなかで、内空変位の計測がしっかりなされていたトンネルを選び、変状の傾向と対策工の設計の傾向とを既存の資料から調査した。ここでは、変状の種類は供用中のトンネルの地圧による変状の原因として最も多い塑性圧による変状を選び、対策工の工種、対策工前後の内空変位速度の変化に着目し、28のトンネルについて調査を行った。図-1に対策工前の内空変位速度の分布を示す。ここで、内空変位が小さいと計測自体がされず、また、資料として残らないことが多いことに注意する必要があるが、月に2mm以上も内空が縮小しているトンネルもあることがわかる。図-2に施工された対策工の分布、図-3に内空変位速度と対策工の工種との関係を示す。対策工種としては、ロックボルト、

-
- 1) 正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 トンネル担当
 - 2) 正会員 工博 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部
 - 3) 正会員 パシフィックコンサルタンツ (株) トンネル部

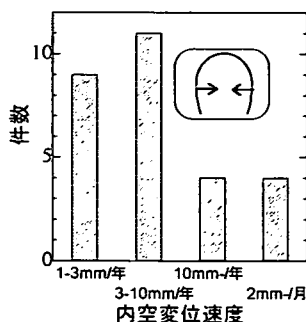


図-1 内空変位速度の分布

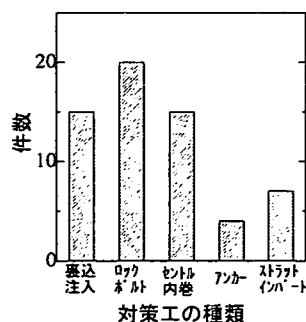


図-2 対策工種の分布

内空変位速度	小計	注裏込注入	ロックボルト	セントル内巻	アンカー	ストラットインバート
～3mm/年	9	7	6	5	1	
3～10mm/年	11	5	8	7	2	2
10mm～/年	4	2	3	1		2
2mm～/月	4	1	3	2	1	3
合計*)	28	15	20	15	4	7

*)組合せて施工される例があり合計は一致しない

図-3 内空変位速度と対策工種の関係

セントル・内巻の順で多く採用されている。ただし、裏込注入は既往の資料に記載されない例がかなり多いと考えられる。内空変位速度が10mm/年を超える場合はストラット、インバートの例が多くなることがわかる。この中から、対策後も内空変位速度が計測されていた9トンネルに対し、対策工前後の内空変位速度の変化を図-4に示す。この図より対策前の変位速度に応じて対策工が使い分けられ、変位速度が小さいときには主に裏込注入、ロックボルト、内巻・セントルで抑制できるが、変位速度が10mm/年以上となると、これらのみでは抑制できないことが多く、アンカー、ストラット、インバートも必要となってくることがわかる。例えば、Eトンネル、Gトンネルにおいては、それぞれセントル、裏込注入+ロックボルトがまずなされたが、それだけでは変位を抑制できず、それぞれアンカー、ストラットを後から施工した。また、Iトンネルにおいては、インバート施工後しばらく経ってから変位が再開し、ロックボルト、セントルを追加している。これらの、一次の対策工によっては変位を抑制できなかったトンネルの中から、G、Iトンネルについて、その原因について検討を行った。

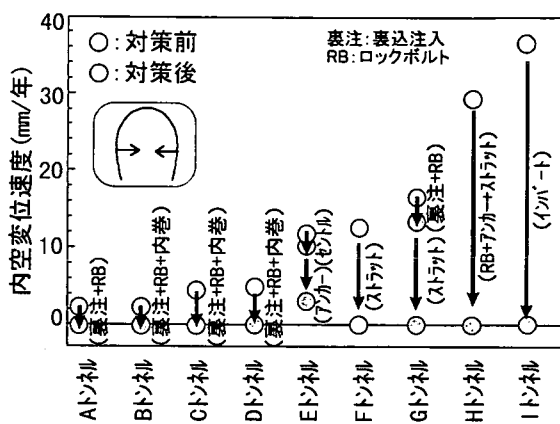


図-4 対策工の施工による内空変位の抑制

これらのみでは抑制できないことが多く、アンカー、ストラット、インバートも必要となってくることがわかる。例えば、Eトンネル、Gトンネルにおいては、それぞれセントル、裏込注入+ロックボルトがまずなされたが、それだけでは変位を抑制できず、それぞれアンカー、ストラットを後から施工した。また、Iトンネルにおいては、インバート施工後しばらく経ってから変位が再開し、ロックボルト、セントルを追加している。これらの、一次の対策工によっては変位を抑制できなかったトンネルの中から、G、Iトンネルについて、その原因について検討を行った。

(2) Gトンネルの例⁴⁾

Gトンネル(表-1)は東北地方に位置する単線のトンネルである。竣工直後から盤膨れや側壁の押し出しが著しく、内空断面が約15mm/年の速度で縮小した(図-5)。それに伴い、側壁からアーチ肩部にかけて多数の水平ひび割れが発生し、天端には長さ7m程度の圧が発生した。トンネル周囲の地質は新第三紀中新世の緑色凝灰岩と同時期に貫入した流紋岩が主体で、緑色凝灰岩については膨潤性粘土鉱物であるモンモリロナイトを多量に含んでおり、浸水崩壊度試験においても浸水崩壊度D(原形を留めない)を示し、脆弱化さらには粘土化しやすい岩盤であった。特に緑色凝灰岩の卓越する区間で多くの変位が確認されていることから、これらの変位はトンネル周辺地山の塑性圧の作用によるものと考えられた。

対策工として裏込注入、ロックボルトを行ったが、これらの対策工だけでは変形を抑制できず、その後ストラットによる補強を行い、ようやく変形が収まった。変位の概要、対策工の概要を図-6、7に示す。

表-1 Gトンネルの概要

構造	単線トンネル(非電化)側壁直
掘削工法	上部半断面工法 巻厚 30cm
地形・地質	新第三紀中新世の緑色凝灰岩 凝灰角礫岩、流紋岩
土被り	最大で800m、変状部300m強

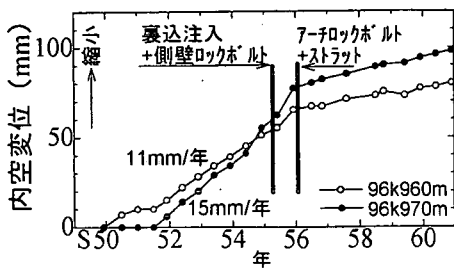


図-5 内空変位

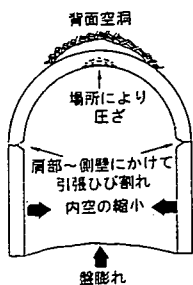
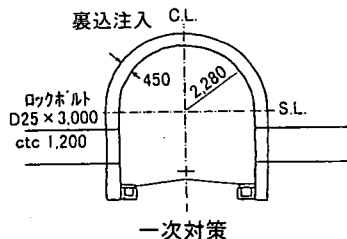
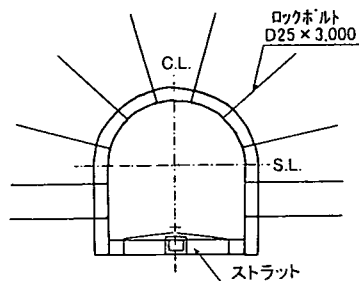


図-6 変状の概要



一次対策



二次対策

図-7 対策工

(3) I トンネルの例⁹⁾

I トンネル（表-2）は北陸地方に位置する複線のトンネルであるが、竣工（昭和42年）後まもなく著しい断面縮小（水平内空 最大 36mm/年）を生じ、天端部においては圧さを生じた。I トンネルの変状の概要を図-8 に模式的に示す。これは、トンネル周囲の地質が新第三紀の泥岩中であり、塑性圧を生じやすい地質であったこと、インバートのない構造であったことが原因と考えられた。昭和49年に圧さ部にはモルタル吹付けを行い補修し、塑性圧への対策工としてインバートを施工した。施工後は図-9 に示すように内空の縮小が止まり、変状が落ち着いた。しかし、平成3年に対策工施工箇所において再び変状（圧さが生じた部位の剥離・垂下、天端部における放射状のひび割れ）が生じた。これは、インバートを施工することにより内空変位を抑制することができたが、逆に、内空変位を抑制することによって塑性圧を受け流すことができなくなり、天端部では圧縮応力が増加し、破壊を生じた（図-10）ものと考えられた。これに対してはセントル、内巻（SFRC 吹付け）、ロックボルトを施工して対応した（図-11）。

表-2 I トンネルの概要

構造	複線トンネル（電化）
掘削工法	上部半断面工法 巻厚 50-60 cm
地形・地質	新第三紀鮮新世の泥岩 qu=3-6MPa 自然含水比 25-40%
土被り	最大で 150m、変状部 70m

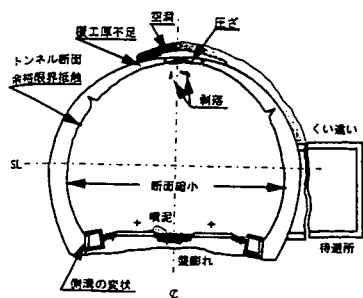


図-8 変状状況の模式図

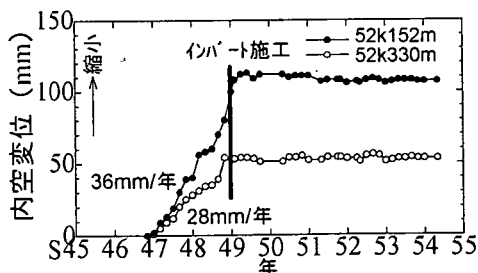


図-9 内空変位

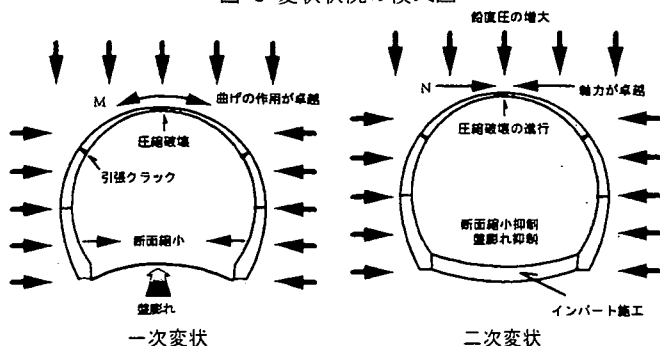


図-10 変状原因の想定図

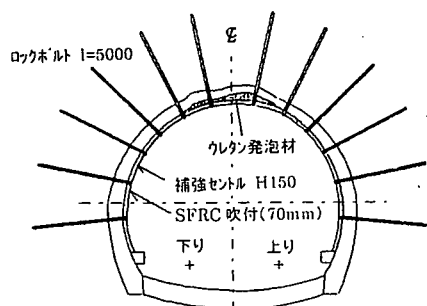


図-11 二次対策

G トンネルの対策事例からは、変位速度が大きい場合は、裏込注入、ロックボルトのようなトンネル覆工の一部を強化する対策工だけでなく、ストラット、インバートを設置し、リングとして地圧に対応するようにトンネル全体の構造を改良し、剛性を上げる対策が必要であることがわかる。

また、I トンネルの対策事例からは、インバートを施工する場合はかえって覆工内の断面力を増加させることにつながりかねないため、ロックボルト、内巻等をおこない、覆工の耐力を増加させるための対策工も合わせて行うておく必要があることがわかる。

3. 変状トンネル対策工の標準設計の概要 ³⁾

2. で示した、過去の変状トンネル対策工の設計実績に基づき、さらに、対策工の効果の確認、個々の対策工に関する、覆工模型実験、数値解析 ²⁾を行った上で、施工性、経済性などを加味して、図-12 に示すような標準設計を今回提案した。

対策工種としては、一般的な対策工である裏込注入工、ロックボルト補強工、内巻工（場所打ちコンクリート+セントル）、内面補強工（炭素繊維シートまたは鋼板）を組み合わせることとした。ここで、図-13 に変状トンネル対策工の標準設計の、設計法全体に対する位置付けを示すが、標準設計は、条件の類似した設計事例がない場合で、一般的な変状原因、地質、構造を持つトンネルに対し適用することができるとしている。標準設計は、地圧の種類（塑性圧/地山の緩みによる鉛直圧/偏圧）、トンネルの断面（複線/単線）ごとに決められており、対策工を設計する際の標準的な設計のパターンが示されている。

一方、補強ランク、すなわち、対策工の程度には、補強ランクⅠ～Ⅳまであり、そのうち、ランクⅢまで標準設計を適用できるとした。ここで、ランクⅣがもっとも程度の重い対策工となる。補強ランクは、内空変位速度（覆工の変形速度）をもとに決定する。内空変位速度は鉄道トンネルの保守において健全度の指標として良く用いられており、過去のデータも豊富に蓄積されているため、補強ランクを決定する際には、内空変位速度により一旦ランクを決定し、トンネル固有の条件（構造条件、ひび割れの量、大きさなど）を考慮してランクの補正を行うこととした。その後、各対策工法が適用可能であることを確認し、最終的な標準設計を決定する。補強ランクⅠでは裏込注入工、補強ランクⅡでは裏込注入工+ロックボルト補強工、補強ランクⅢでは、裏込注入工+ロックボルト補強工+内巻工 もしくは 内面補強工となっている。今回の標準設計においては裏込注入工を必須の対策工と位置づけているが、これは、実験、解析により裏込注入工のもつ優れた補強効果が明らかになった ¹⁾ためである。

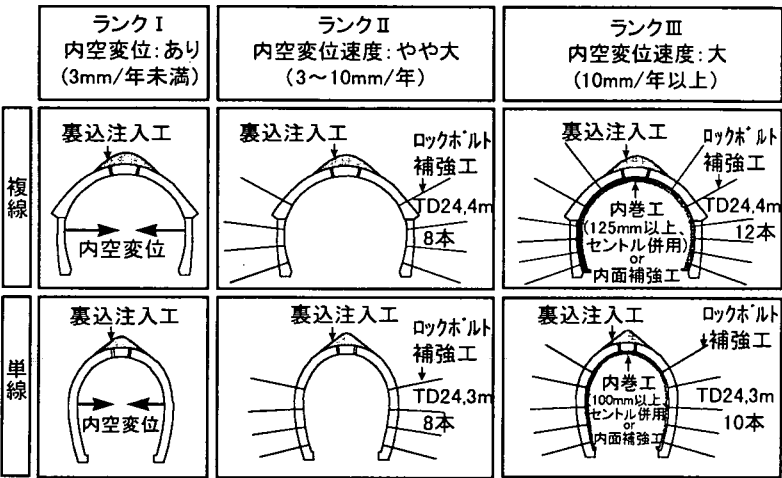


図-12 標準設計（塑性圧の場合の例）

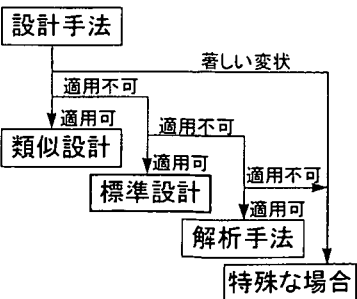


図-13 標準設計の位置づけ

4. 標準設計の妥当性の検証

(1) 設計実績調査との比較による検証

ここでは、標準設計の妥当性を示すため、標準設計と対策工の設計実績調査結果とを比較した。ここでは、2. で示した 28 トンネルに対し、標準設計に従って補強ランクを決定し、実際になされた対策工と比較している。さて、補強ランクを決定する際には、内空変位だけでなくトンネルの巻厚、構造欠陥、地質条件といったトンネル個々の条件を考慮して補強ランクを決定する必要がある。今回の標準設計では、トンネル個々の条件を考慮するため、表-3 のように補強ランクを決定する際に補正を行っている。ここでは、内空速度でランク分類した後、この補正表に基づいて補強ランクの補正を行っている。図-14 に補強ランクと対策工種との関係、図-15 に補正後の補強ランクと各種対策工の採用率との関係を示す。これらより、補強ランクが小さい場合は主に裏込注入、ロックボルト、内巻・セメントルを中心として対策がなされるが、補強ランクが大きくなると、それらに加えて、アンカー、ストラット、インバートの施工例が増加することが確認できる。このことから、図-12 で示した標準設計は施工実績にてらして平均的な対策工を示していることがわかる。

表-3 補強ランクの補正

	状態	対処
変状程度大	① 圧さまたはせん断ひび割れあり	1 ランク上げる
	② 幅の広い引張ひび割れ・食い違いあり	
	③ 複数の引張ひび割れが並行	
	④ 覆工に作用する軸力が特に大きい	
地圧大	① 内空変位が加速度的に増大	ランクIV
	② 3m 以上の圧さ又はせん断ひび割れ	
地圧大	① 巻厚・強度が十分(設計値以上)	1 ランク上げる
	② 背面空洞がない	
	③ 打継ぎ目部の構造的欠陥がない	
	④ インバートがあるにもかかわらず変状	

補強ランク	小計	注込	ロックボルト	内巻	セメントル	アンカー	インバート
ランク I (0)							
ランク II	10	7	7	4	1		
ランク III	11	5	8	8	2	2	
ランク IV	7	3	5	3	1	5	
合計*)	28	15	20	15	4	7	

*)組合せて施工される例があり合計は一致しない

図-14 補強ランクと対策工種

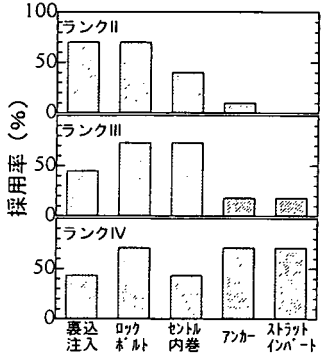


図-15 対策工の採用率

(2) 数値解析による検証

次に、骨組解析により標準設計の妥当性の検証を行った。解析条件を表-4、解析ケースを表-5 に、解析モデルを図-16 に示す。解析手法は、ひび割れの発生・進展を考慮できる、ひび割れ進展解析手法²⁾である。図-17 にひび割れ進展解析の流れを示す。

表-4 解析条件

構造	覆工	新幹線想定、巻厚 70cm 単線標準断面想定、巻厚 30cm
	欠陥	天端 60° 範囲に背面空洞
対策工	裏込注入工	空洞部に地盤ばね復活でモデル化
	ロックボルト補強工	先端固定のばね要素でモデル化
	内面補強 (炭素)	塑性ヒンジを剛結に戻す事による
地盤	変形係数	500MPa (軟岩想定)
地圧	地圧作用方向	塑性圧想定 (水平地圧)

表-5 解析ケース

無対策	対策工なし
ランク I	裏込注入工
ランク II	裏込注入工+ロックボルト補強工
ランク III	裏込注入工+ロックボルト補強工+内面補強工

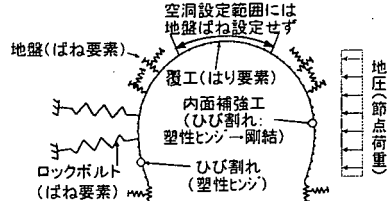


図-16 解析モデル

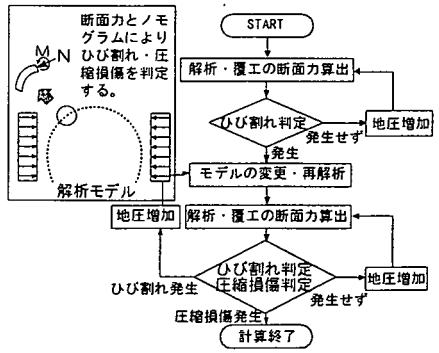


図-17 解析の流れ

図-18 に、標準的な断面を持つ複線トンネルの場合の、解析により得られた内空変位量 u と地圧 p との関係を示す。無対策では①天端外側引張りひび割れ→② SL 内側引張りひび割れ→③天端内側圧縮損傷の順でひび割れが発生したが、対策工を施工した場合はいずれも、③ SL 外側圧縮損傷となった。ここで、圧縮損傷が生じた地圧をもって構造耐力とした。対策工は②の後に施工したが、対策工の施工によって構造耐力、剛性が増加していることがわかる。対策工施工後の、剛性、構造耐力を図-19 に示す。補強ランクが大きくなるに従って、剛性、構造耐力いずれも増加していることがわかる。さらに、構造耐力時の覆工の変位量も大きくなっており、剛性の増加に加えじん性も向上していることがわかる。単線トンネルの場合を図-20、21 に示すが、複線トンネルとほぼ同様の傾向が得られてい

ることがわかる。このことから、今回提案した標準設計を適用条件を満足する変状トンネルに対して適用した場合、簡易でかつ合理的な対策工の設計を行うことができることを、骨組解析により検証することができた。

5. まとめ

変状トンネルの対策工の事例調査を行い、その結果を参考にした標準設計の提案と、設計実績との比較、数値解析による標準設計の妥当性の検証を行った。この結果、①設計事例調査より、今回提案した標準設計は、変状の程度に対応する適切な対策工を提案していること、②数値解析より、標準設計においては、補強ランクの増加とともに、剛性、耐力、じん性が向上することがわかった。

これらのことから、今回提案した標準設計は、適用条件を満足するトンネルに対して適用した場合、簡易な手順で、合理的な対策工の設計を行うことができることがわかった。これからは、実際にこの標準設計を用いて対策工の設計を行い、実測結果による評価を行って、更なる検証を行って行く予定である。

なお、今回の成果の一部は日本道路公団試験研究所との共同研究の成果であり、ご協力頂いた中田雅博、三谷浩二の両氏に深甚なる謝意を表します。

参考文献：

- 1) 朝倉俊弘、小島芳之、安藤豊弘、佐藤豊、松浦章夫：「トンネル覆工の力学挙動に関する基礎的研究」、土木学会論文集、No493/Ⅲ-27、1994.6
- 2) 朝倉俊弘、小島芳之、野城一栄、中田雅博、三谷浩二、松長剛：「変状トンネル対策工の設計法」、第 10 回岩の力学国内シンポジウム、1998.1
- 3) 変状トンネル対策工設計マニュアル、(財) 鉄道総合技術研究所、1998.2
- 4) 野沢伸一郎、伊藤忠八、竹内定行：「既設トンネルの膨圧を克服」、トンネルと地下、1992.10
- 5) 片寄紀雄、奥石逸樹、松本武海：「緩やかな膨圧現象とつきあって 30 年」、トンネルと地下、1997.3

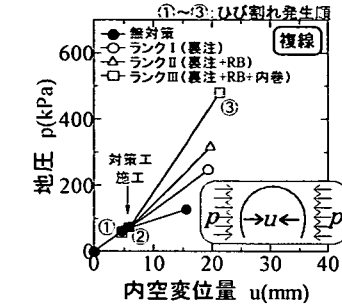


図-18 地圧と内空変位量との関係

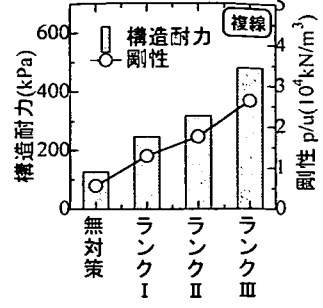


図-19 補強ランクと耐力・剛性

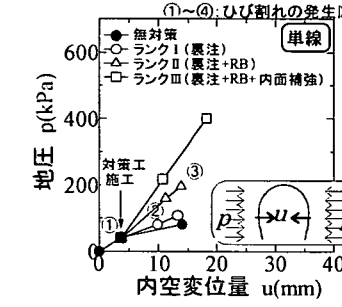


図-20 地圧と内空変位量との関係

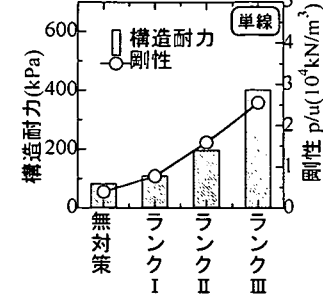


図-21 補強ランクと耐力・剛性