トンネル工学研究論文・
報告集第9巻 1999年11月
報告（36）

シールド洞道に働く施工時荷重に関する分析

INVESTIGATION OF THE LOAD ACTING ON SHIELD SEGMENTS DURING TUNNELING

有泉　毅[1)]・岡留孝一[2)]・五十嵐寛昌[3)]・長屋淳一[4)]
Takeru ARIIZUMI, Koichi OKADOME, Hiromasa IGARASHI, Junichi NAGAYA

It is known that the load acting on shield segments immediately after the segments are installed is not easy to be evaluated quantitatively nor to be modeled in the design of tunneling at the time being. In order to define quantitatively the earth pressure during tunneling, a real-scale model test is conducted. Based on the experimental results and the results from the in situ measurements. It is concluded that, the brush pressure from tail seal is rather small while, the load acting the segments during the tail of shield is passing through, is dominated by the earth pressures from back-filling or grease, and sometime may results in a large deviatoric earth pressure according to the tunneling condition.

Key Words : shield tunnel, model test, field measurement, grouting pressure, brush pressure from tail seal

1．まえがき

シールド洞道のセグメントに働く荷重の内，セグメント組立直後の施工時荷重は，荷重としての定量化およびその設計モデル化がされておらず，現行の設計荷重モデルにおける安全率の中で施工時荷重の影響もカバーされていると思われる。しかし，現場計測によりセグメント作用土圧の実態が把握されつつあり，設計の合理化への研究が進む中で，施工時荷重がクリティカルになる場合も考えられる。一般に施工時荷重は，ジャッキ推力による影響が大きいと思われるが，筆者らは，大型土圧計などを用いた現場計測[1)]より，テールシール部分でセグメントの断面方向に非常に大きな偏圧が発生しているのを確認しており，これらのテールシール圧および裏込注入圧などの断面方向の施工時荷重による影響も大きいと考えられる。本論文では，施工時荷重の設計モデル化への1ステップとしてテールシールおよび裏込注入による断面方向の施工時荷重を荷重値として定量化するために実施した実大規模模型実験結果，並びにその結果に基づき現場計測結果を分析した結果について報告するものである。

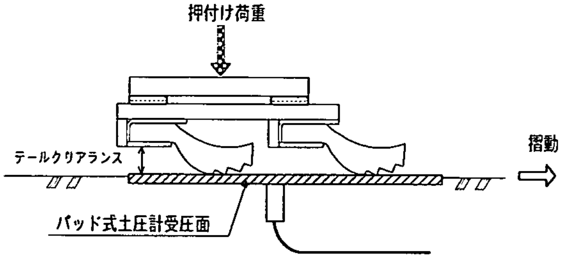
2．テールシール押付け荷重要素実験

(1) 実験の概要

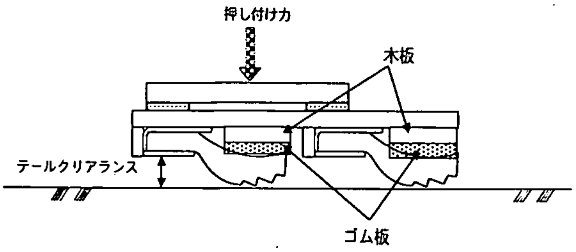
テールクリアランスと押付け荷重及びパッド式土圧計出力値の関係を把握するため，図－1に示す装置に

1）正会員　東京電力（株）電力技術研究所
2）正会員　東京電力（株）送変電建設本部
3）正会員　鹿島建設（株）技術研究所
4）正会員　財団法人　大阪土質試験所

より要素実験を行った。パッド式土圧計は，後述する現場計測[1)]と同じ仕様のもので，受圧面寸法はトンネル軸方向 60cm×円周方向 35cm である。テールシールは，パッド式土圧計受圧面の幅（35cm）に対して均等に荷重として載荷できるように幅を 50cm とし，実機における後方側２段分(ブラシ延長計１m)とした。使用したブラシは，現場計測で使用したものと同じ仕様とし，Ａ及びＣタイプは，ワイヤブラシ素線間にウレタンを充填したもの，Ｂタイプは内側保護板４枚のものである。さらに，実施工時の裏込注入材などがブラシ背面に付着した場合を想定して，図－２に示すような異物(木板及びゴム)を設置したケースも実施した。



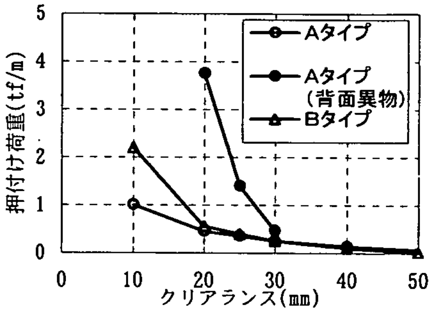
図－１　テールシール押付け荷重要素実験



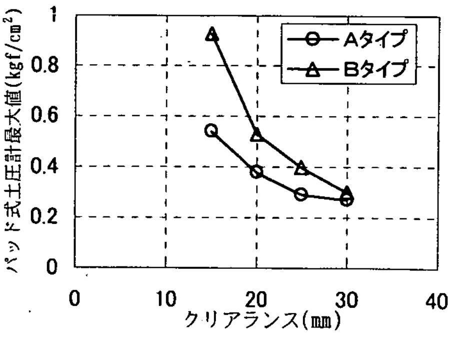
図－２　背面遺物設置ケースの実験状況

(2) 実験結果及び考察

静止状態で，クリアランスを変化させた時のテールシール押付け荷重の測定結果を図－３に示す。テールシール押付け荷重は，標準的なクリアランス(20～30mm)において 0.2～0.5tf/m 程度であるが，クリアランスが小さくなると急激に大きくなり，Ｂタイプブラシではクリアランス 10mm で 2tf/m 以上になった。また，ブラシ背面に異物を設置した場合(Ａタイプ異物設置)には，見かけ上クリアランスが大きく減少したことになり，かなり大きな押付け荷重（4tf/m 以上)になることがわかった。次に，クリアランスを一定に保って摺動させる実験を行った。この時のパッド式土圧計の出力値は両者の相対位置によって変化し，テールシールが２段ともパッド式土圧計に載っている状態(図－１の状態)において最大になった。図－４に各実験ケースのクリアランスとパッド式土圧計測定値の最大値との関係を示す。図－４からパッド式土圧計計測定値の最大値は，後述する現場計測におけるテール通過時の圧力（最大６kgf/cm²，図－８参照）に比べて小さいことが分かる。したがって，現場で計測された大きな偏圧はテールシールによる押付け荷重よりもテールシール間のテールグリス圧の影響が大きいと判断される。



図－３　ｸﾘｱﾗﾝｽと押付け荷重の関係

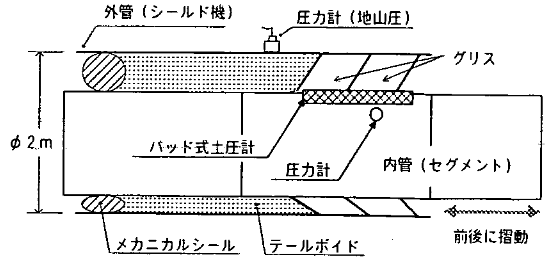


図－４　ｸﾘｱﾗﾝｽとﾊﾟｯﾄﾞ式土圧計最大値の関係

３．テールシール大型円筒模型実験

(1) 実験の概要

実際のシールド工事における施工環境を再現した状態でのセグメントに作用するテール部荷重を評価するため，図－５に示す装置により，実大規模の模

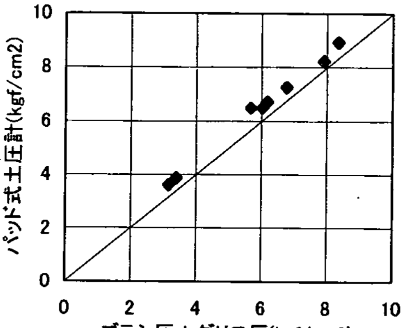


図－５　大型円筒実験装置

型実験を行った。シールド機に相当する外管には，テールブラシが３段設置され，ブラシ間にはテールシールグリスが供給できるようになっている。セグメントに相当する内管には，実施工で用いたものと同じ仕様のパッド式土圧計及びグリス圧を測定するための圧力計が設置されている。外管と内管は偏心しており内管を回転させることによりクリアランス条件を変化させることができる。所定のクリアランス条件において，地山圧を作用させないで摺動させた場合(テールシール押付け荷重のみ作用する状態：実験Ｉ)と，テールボイド部に泥水を充填しブラシ間にグリス圧を作用させて摺動させた場合(実験II）について実験を行った。

(2)実験結果及び考察

円筒実験においても要素実験と同様に，パッド式土圧計とテールシールとの相対位置によってパッド式土圧計の出力値は変化し，テールブラシが２段ともパッド式土圧計に載っている状態(図－５の状態)において最大になった。この状態においてパッド式土圧計には，テールシールブラシ及びグリスの荷重が作用している。そこで，実験Ｉ(地山圧を載荷しないで摺動させた時)で測定された土圧計計測値(ブラシ圧という)と実験IIで計測されたテールシール間圧(グリス圧という)の和と，パッド式土圧計の測定値を比較したところ，図－６に示すように，ほぼ等しいという結果が得られ，パッド式土圧計に作用する荷重はブラシ圧とグリス圧の和であることがわかった。

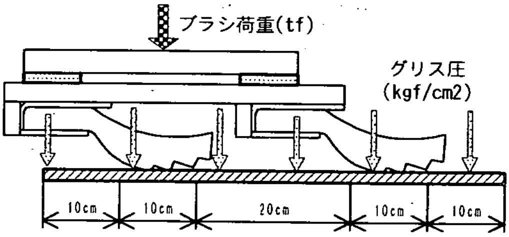


図－６　ﾊﾟｯﾄﾞ式土圧計計測値とﾌﾞﾗｼ圧＋ｸﾞﾘｽ圧の関係

4．模型実験結果のＦＥＭシミュレーション

(1)解析モデル

パッド式土圧計計測値は上記のようにブラシ圧とグリス圧の和として計測されるため，クリアランスの変化からブラシ圧を特定できる要素実験のモデルにグリス圧を加えて，円筒実験と同様の状態でのパッド式土圧計計測値をシミュレーションするFEM解析を行った。図－７にＦＥＭ解析モデルを示す。土圧計受圧板をビーム要素，封入オイルを剛性の非常に小さい四角形要素，両者の境界にジョイント要素を用いてモデル化し，平面２次元ＦＥＭ解析とした。



図－７　ＦＥＭ解析モデル図

(2)解析結果

解析結果を表－１に示す。ケース１，２ともに解析値は計測値よりも若干小さいが概ね一致している。ケース４はケース３にグリス圧を加えたケースであり，解析値はグリス圧分だけ大きくなっており，実験結果に一致する。したがって，テールシールと土圧計の位置関係並びにクリアランスが分かれば，計測結果からブラシ圧およびグリス圧の定量的評価は可能であることがわかった。

表－１　ＦＥＭ解析結果

ケース	荷重条件			解析結果	実験結果
	実験条件	ブラシ荷重	グリス圧		
1	Aブラシ クリアランス :15mm	0.8	0	0.43	0.5
2	Bブラシ クリアランス :15mm	1.5	0	0.84	0.9
3	Aブラシ(異物有) クリアランス :20mm	3.8	0	2.17	-
4	Aブラシ(異物有) クリアランス :20mm	3.8	2	4.17	-

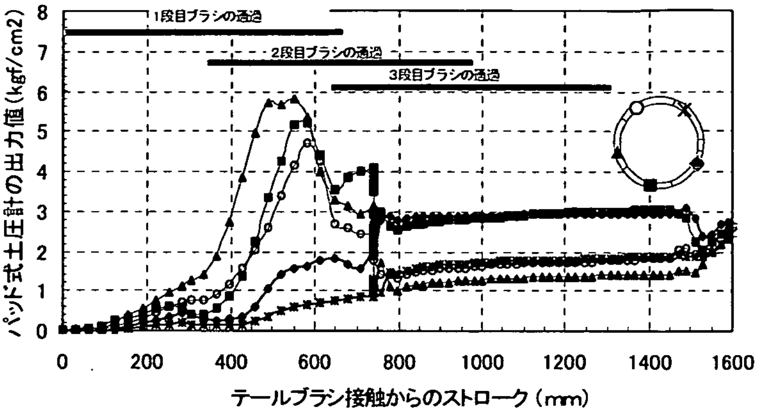
5．現場計測による施工時荷重の評価

今回報告するのは２工事例であり，それぞれ沖積粘性土地盤，洪積粘性土地盤を対象に計測を行ったもの

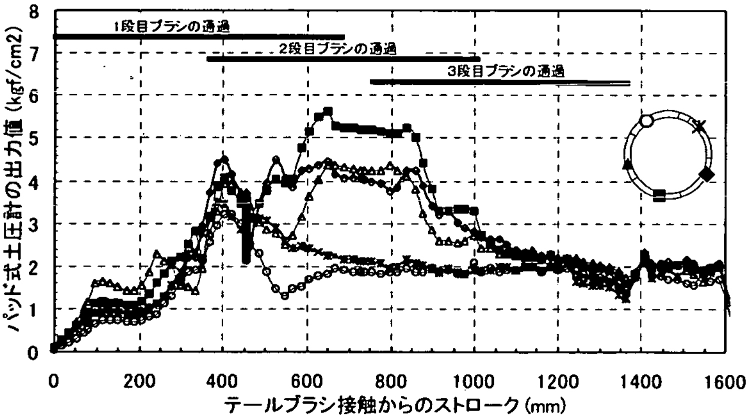
である。沖積粘土地盤を対象としたものは，川崎市の臨海地区で施工したもので，セグメント外径 3,950㎜，桁高 275㎜，幅 1200㎜，６分割ＲＣ平板型セグメント（継手：長ボルト），洪積粘性土地盤を対象としたものは，東京都大田区内で施工したもので，セグメント外径 4,950㎜，桁高 275㎜，幅 1200㎜，６分割ＲＣ平板型セグメント（セグメント間継手：鋼製ボックス，リング間：調芯ピン付きピン）である。（詳細は，参考文献１）を参照）

(1) シールド機摺動に伴う作用圧力の変化

テール通過時におけるパッド式土圧計計測値(以下，作用圧力と称する)を，図－８に示す。ここで，横軸はパッド式土圧計へのテールシール接触開始を起点としたシールド機との相対距離を示す。これらの図より，テールシールが土圧計受圧板に接触してから 400～600㎜ の位置でピークに達し，この時の土圧計とテールシールの位置関係は，受圧板上に１・２段目のテールシールが乗った状態であり模型実験結果と一致している。また，テールシール接触からの作用圧力の増加量は，円周方向の計測箇所によって異なり，大きな偏圧が作用している。しかし，テール部を離脱後，この偏圧は残留せず，土水圧ならびに裏込注入圧が作用し，圧力低下とともに，等方的な圧力分布となる。



図－８(1) ﾃｰﾙ通過時における作用圧力の経距離変化（沖積地盤）



図－８(2) ﾃｰﾙ通過時における作用圧力の経距離変化（洪積地盤）

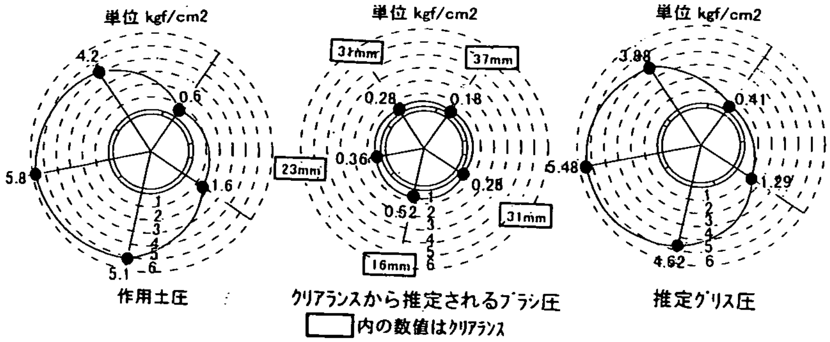
(2) 作用圧力の円周方向分布

①テール通過時の圧力分布

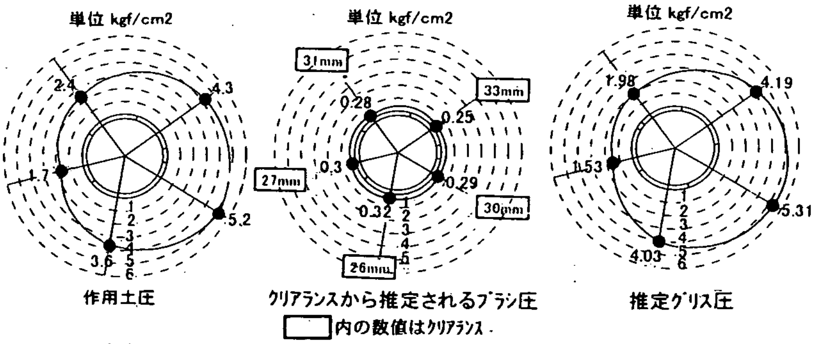
模型実験からテール通過時のパッド式土圧計計測値すなわち作用圧力は，テールシールの押付け荷重(ブラシ圧)とテールシール間圧(グリス圧)の和にほぼ等しいという結果を得ている。そこで，図－９に最大作用土圧発生時のクリアランスから模型実験で得られたクリアランスとブラシ圧との関係を用いて得られるブラシ圧および推定グリス圧の分布を示す。推定グリス圧は，作用圧力の計測結果からブラシ圧を差し引いたものである。クリアランスの計測結果は 16～37mm の範囲であり，この時のブラシ圧は，0.2～0.5kgf/cm^2 程度であり，作用圧力に対するブラシ圧の割合は小さく，グリス圧が大きく影響していることが現場計測値からも判明した。作用圧力の円周方向偏圧傾向は，テールシールで閉塞された部分に非圧縮体であるグリスが充填されているためテール通過時のセグメントの変形やシールド機の姿勢変化により部分的にグリス圧が上昇することが主要因であると想定される。この偏圧は，テール通過とともに裏込注入圧へと移行し，作用圧力の低下とともに等方的な分布となるため，前後のリングにおいて圧力の分布および大きさが異なり３次元的に荷重が変化する状態となっていると考えられる。

②裏込注入時の圧力分布

テール通過時に偏圧となった作用圧力は，図－9に示すように，テール部の離脱とともに低下し，ほぼ等方的な圧力に変化する。テール離脱後には，土水圧及び裏込注入圧が作用するが，ほぼ等方的な分布になっている。裏込注入は，セグメント外周に裏込注入材を十分に行き渡らせるため地盤の受け入れ抵抗(圧力)に通常 0.5～1.0kgf/cm²を上乗せした圧力を目安として行われる。これまでの計測実績から，裏込注入圧作用時の土圧係数(=側方土圧/鉛直土圧)を調べると，0.5～1.5 の範囲にある[4]が，このデータの中には 10 年前のかなり古い事例もあり，現在のシールド施工技術及び裏込注入材の品質向上を考慮すると，この土圧係数の値は，1に近い範囲に狭まることが考えられる。



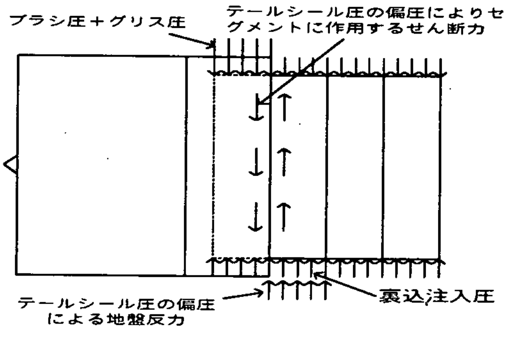
図－9(1) クリアランスから推定されるブラシ圧およびグリス圧（沖積地盤）



図－9(2) クリアランスから推定されるブラシ圧およびグリス圧（洪積地盤）

(3)テール通過時の偏圧の評価

現場で計測されたようなテールシール部分に偏圧が生じた場合，セグメントの断面力で考えると荷重の釣り合いがとれない。図－10 に示すように，この偏圧による荷重のアンバランス分は後続セグメントの軸方向の剛性で抵抗することとなり，セグメントおよびリング間継手にせん断力が生じることとなる。これらは，テール通過時においてＲＣセグメントにコンクリートクラックを発生させる要因になることが考えられ，今後はテール前後の３次元圧力状態を考慮した施工時荷重の検討が必要かと思われる。



図－10 シールド機テール部における偏圧状況

(4)テール付近の荷重分布状況

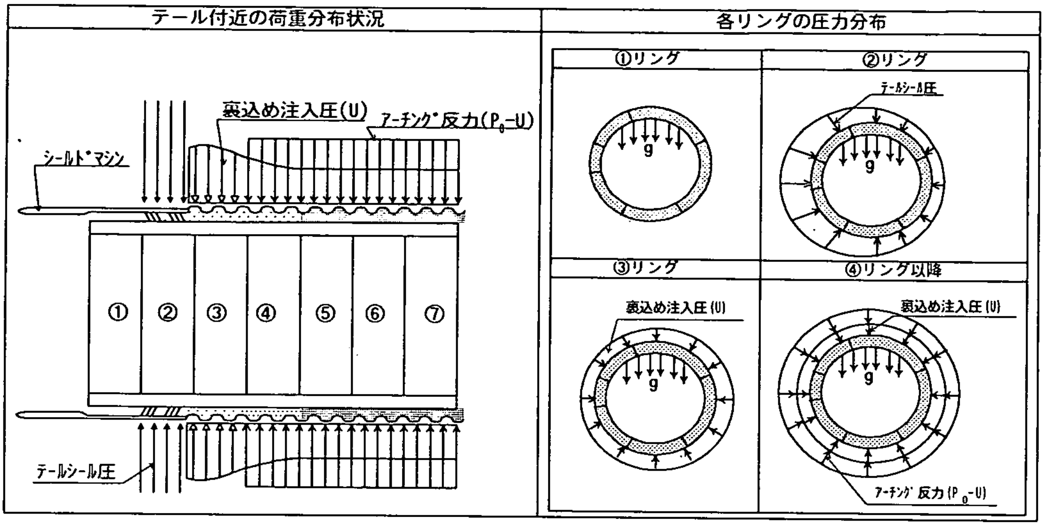
現場計測結果よりテール通過付近の施工時荷重は，各リング毎に異なる荷重分布が作用しており，３次元的な荷重状態にある。図－11 にテール付近の荷重分布の模式図を示す。これらの各リング毎の荷重状態は，次のような状態にあると考えられる。

a)①リングは組み立て時のセグメントリングであり，セグメントの自重のみが作用する。

b)②リングは，テールシール圧が作用する。現場計測事例よりテールブラシによる荷重は比較的小さく，グリス圧が支配的である。また，現場計測事例から非常に大きな偏圧が作用するリングでもある。

c)③リングはゲル状態の裏込注入が充満しているリングであり，裏込注入が液圧に近い状態で作用する。また，このリングにおいてはリングの変形に対して直接支持するものはないため，地盤応力解放によるアーチが形成される箇所でもあると考えられる。

d)④リング以降は裏込注入材がボイド部に充填されており，硬化している過程にある。この箇所では注入圧による地盤のクリープや注入材自身の収縮がないと過程すれば注入圧はそのまま保持されることになる。また，このリングでは，前リングの地盤応力解放に伴うアーチング効果により地中応力が分散され，このリングにもアーチング効果による反力が生じるものと考えられる。



図－11　テール付近の荷重分布状況

6. まとめ

施工時荷重に関する模型実験および現場計測結果を以下にまとめる。

①テール通過時のテールシールによるブラシ圧は比較的小さく，グリスや裏込注入等による圧力が支配的である。

②テールシールとパッド式土圧計の位置関係およびクリアランスが分かれば，ＦＥＭ解析によりブラシ圧の定量的評価が可能であある。

③テール通過時の施工条件によってはテールシールによる大きな偏圧が作用する。

④テールシール部で大きな偏圧が作用するが，テール離脱後は等方的な裏込注入圧が作用し，テール付近の応力状態は掘進過程により変化し，３次元的な応力状態にある。

今後は，テール前後の円周方向偏圧やトンネル軸方向の荷重分布状況などの３次元応力状態による解析を行い，セグメントへの影響を定量的に評価していくとともに，施工時荷重を考慮したセグメント設計へ向けてのモデル化が課題である。

参考文献

1）有泉 毅，岡留孝一，長屋淳一：シールド洞道に働く荷重計測結果とその分析について，トンネル工学研究発表会 論文・報告集第８巻，土木学会，1998.11，pp.367～372.

2）有泉 毅，岡留孝一，五十嵐寛昌，長屋淳一：シールド洞道の施工時荷重に関する研究（１）—模型実験—，第 54 回土木学会年次学術講演会，1999.9

3）長屋淳一，有泉 毅，岡留孝一，五十嵐寛昌：シールド洞道の施工時荷重に関する研究（２）—計測値分析—，第 54 回土木学会年次学術講演会，1999.9

4）橋本　正，長屋淳一，書川康一，大倉利武：裏込注入によるセグメント背面圧測定事例の分析，第 31 回地盤工学研究発表会，1996.7，pp.2291～2292.