

# 셴드터널 설계시의 원가절감방법에 대해서



北原 陽一  
(Kitahara Yoichi)

日本 Civic Consulting Engineers Co., LTD., 본부장  
(kitahara@nccnet.co.jp)

## 1. 셴드터널 공사비의 추이

셴드공법은 일본에서 비싸다는 이미지가 있다. 그러나 비개착공법 외에 시공이 어려운 도심부의 인프라 정비에서는 비싸더라도 셴드공법을 채용할 수 밖에 없는 상황이 10년정도까지, 이른바 일본경제의 버블붕괴시점까지 계속되었다.

일본경제가 상승하는 시기에는 노동력부족이나 숙련기술자 부족 또는 안전성향상으로부터 기계화, 무인화 등 자동화기술, 폭주하는 지하공간에 비원형의 셴드를 구축하는 기술, 정거장부를 셴드로 구축하는 기술, 지중에서의 분기나 접합기술 등이 많이 개발되어 극단적으로는 비용을 들이더라도 무엇이든 할 수 있는 수준에 달했다.

그러나 버블붕괴 이후 특히 근래 10년정도는 비용저감의 바람이 불어 셴드공법의 공사비도 상당히 저

감되어 있다. 예를 들면 1997년에 개통한 동경만 아쿠아라인(약간은 특별하지만)은 굴착체적 1m<sup>3</sup>당 약 13만엔의 공사비가 소요되었지만, 2007년도 개통 예정의 동경메트로 13호선은 1m<sup>3</sup>당 약 6.5만엔으로 50%정도가 소요되었다.

## 2. 비용저감 대책의 개요

셴드터널의 비용저감 대책은 계획, 설계, 발주, 시공의 각 단계에서 추출된다. 일반적으로 비용저감효과는 초기단계로 갈수록 효과가 있다. 즉 계획이나 설계단계에서 충분한 검토가 필요하다고 할 수 있다. 아울러 근래 건설비용만이 아닌 장래 유지관리 비용도 포함한 라이프사이클비용(LCC)의 고려도 도입되기 시작하고 있다.

## 2.1 계획단계

요구되는 계획조건을 만족하고 다음의 사항을 고려한 계획을 입안하는 것이 중요하다.

- (1) 시공조건 : 용지나 공사용 도로의 확보 등 가설 시 주변에 미치는 영향을 잘 조절하는 효율적인 시공이 주요 요소가 된다.
- (2) 주변환경조건 : 도심지 토목에 있어서 소음, 진동, 대기오염 등 환경문제의 해결을 빼놓고 사업의 조기실현은 있을 수 없다.
- (3) 경제성 : 용지비, 구조물의 규모, 시공방법, 버력의 처리비용 등 경제성을 크게 좌우하는 항목의 계획단계에서 충분한 검토가 비용저감에 크게 기여한다.

## 2.2 설계단계

설계단계에 있어서는 비용저감을 목적으로 최신 시공기술을 도입하는 검토(예를 들면 다음의 검토)를 수행하여 공사예정가격을 산출하는 것이 중요하다.

- 복공방법의 재검토(터널외경의 축소/세그먼트 두께의 저감 등)
- 세그먼트폭의 확대나 접속방식, 세그먼트 제작 방법의 검토
- 시공조건에 알맞은 쉴드기종의 선정이나 기본 사양의 검토
- 쉴드굴진속도나 세그먼트 조립속도의 향상 등에 의한 공기단축 검토
- 발진도달방식 등 시공검토에 의한 비용저감대책 등

## 2.3 발주단계

발주단계에서는 발주공사의 상황에 따라 발주방식에 관한 비용저감대책의 검토가 필요하다(예를 들면 입찰시 VE방식, 설계시공일괄(DB)방식, 성능발주방식, 분리발주방식, CM방식, PFI, BOT, T/K계약 등).

## 2.4 시공단계

발주방식이나 계약방식에도 의존하지만, 발주시 시공제안(기술제안이나 비용저감대책), 계약후의 VE제안에 의한 비용저감대책 등의 검토가 필요하다. 또한 이 단계에서는 시공사의 기술력이 비용경쟁력을 크게 좌우한다.

## 3. 설계단계에서의 비용저감

설계단계나 발주단계는 각국의 특수성도 있으므로 좋고 나쁜 것을 비교할 수 없기 때문에 여기서는 주로 설계단계에서의 비용저감대책에 대해 서술한다.

### 3.1 쉴드터널의 직접공사비

그림 1은 굴착직경 약 7m, 연장 약 1km를 모델로 이수식 쉴드터널의 1차복공 직접공사비의 내역을 나타내었다. 세그먼트가 40%, 쉴드장비가 25%로 두가지가 약 2/3를 차지한다. 1대의 쉴드장비로 시공연장이 길어지면 쉴드장비의 비율은 작아진다. 그러나 세그먼트는 거리에 비례하기 때문에 상대적으

## 셴드터널 설계시의 원가절감방법에 대해서

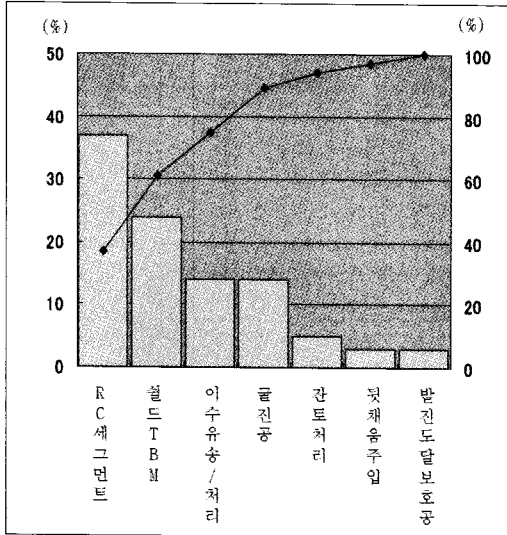


그림 1. 이수식 셴드 1차복공 직접공사비(예)

로 차지하는 비율이 상승한다. 따라서 이 두 요소를 얼마나 합리적으로 설계하는가가 비용저감에 크게 영향을 준다.

### 3.2 셴드장비

셴드장비에 대해서는 1대의 장비를 얼마나 길게 사용하는가가 열쇠이다. 그래서 장거리시공이나 U턴사용, 또는 인양하여 재이용하는 대책이 필요하다. 그림 2는 그림 1의 모델에서 시공연장과 m당 직접공사비의 관계를 나타낸 예이다. 시공연장이 길어질수록 공사비의 저감과 연결되지만, 시공연장을 길게 할수록 장비관리비용이나 갬내 운반비 등 비용상승이 되므로 적절한 시공연장을 검토할 필요도 있다. 장거리 시공에 대해서는 동경만의 경우와 같이 해저하부를 굴착직경 3.62m로 9km를 1대의 장비로 굴착하는 경우도 있다. 지하철의 경우는 1대의 장비로 정거장부를 통과시켜 사용하거나 정거장 구간

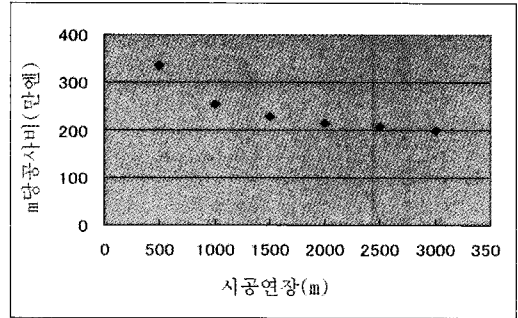


그림 2. 시공연장과 m당 직접공사비 관계(예)

에서 탈착하는 셴드를 사용하여 정거장부를 포함해 1대의 셴드로 시공하는 예도 있었다.

장거리시공에서는 비트나 면판, 축받침 등 구동에 있어서 마모방지대책이나 교환기능을 고려할 필요가 있다. 또한 굴착연장이 길어지면 다양한 토질조건에 대응이 가능한 장비로 할 필요가 있다. 아울러 1대의 장비로 시공하는 경우 공정의 지연을 방지하기 위해 급속시공의 요구도 있다. 앞서 언급한 바와 같이 9km의 장비는 평균 월 굴진장 500m로 시공하기 때문에 많은 노력이 필요했다.

또한 U-Turn도 지하철 등 병설셴드에서 많이 사용되고 있다. U-Turn공간의 확보가 가능하고 공정상 문제가 없으면 유효한 대책이다.

중대구경장비의 재활용은 일본에서는 거의 없다. 그 이유는 다음과 같으며, 일본에서 설계하는 신품을 사용하는 것과 큰 차이가 없는 상황이기 때문이다.

- ① 도로운송상의 제약
- ② 셴드장비의 인양곤란(운지문제)  
⇒①, ② 분할제조립이 가능한 구조(→비용상승)
- ③ 발주연장이 짧고, 터널구간을 복수의 시공사에 설계, 시공되는 경우
- ④ 공구별로 세그먼트의 구조, 종류, 이음이 다르므로 여기에 대응하는 장비가 되는 경우

⑤ 굴착버력처분비가 비싸고, 굴착단면을 최소화 하는 경향이 있다

⇒ ③, ④, ⑤ 공구별로 최소비용이 요구된다(→표준화되어 있지 않다)

⑥ 장비의 보관장소 확보가 곤란하여 유지비가 고가

⑦ 제작사의 독자적인 노하우를 타사에 공개하지 않는 등(타사제품의 성능보증이 곤란)

따라서, 예를 들면 장비사양이나 세그먼트 사양의 표준화, 부품조달이 쉬운 장비구조로의 변경, 장비 구성부품의 내구성 향상, 적절한 운용계획의 구축 등이 개선되면 일본에서도 장비운용이 촉진될 것으로 판단된다. 단 장비나 세그먼트를 표준화하는 것은 조건에 따른 설계면에서 과설계가 되기 때문에 1개 공구만의 경제성이 아닌 전체적으로 고려해야만 한다. 또한 일본의 장비는 옵션이 많다. 이것은 굴착 지반에 대응하는 리스크회피나 오퍼레이터의 기량 차이를 커버하기 위한 다양한 시스템이 조합된 것이 원인이다. 시공자의 기술수준에도 의존하지만 얼마나 효율적인 장비를 만드는가도 비용저감의 한 부분 이라고 생각된다.

### 3.3 세그먼트

일본에서는 굴착외경을 축소하는 것이 전체공사비에 크게 영향을 미친다. 따라서 2차복공의 생략이나 세그먼트두께의 축소 등 굴착외경의 축소를 꾀하는 것은 비용축소에 직접적으로 반영된다. 그러나 이것은 개인적인 판단으로써, 장래의 유지보수 등을 고려하여 2차 복공을 생략하여 그 공간을 남겨두는 것은 바람직한 것이라고 할 수 있다. 따라서 비용적으로 크게 차이가 없으면 LCC도 고려하여 판단해야 한다고 생각된다.

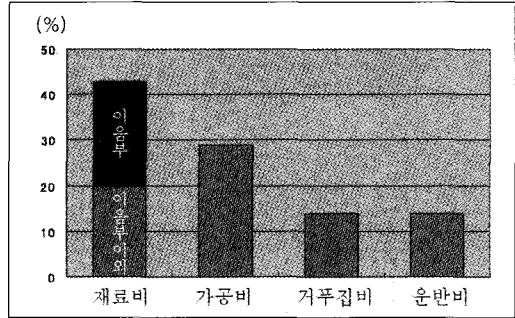


그림 3. RC세그먼트 재료비내역(%)

그림 3은 세그먼트에 관한 비용내역의 예이다. 이음부에 큰 비용이 소요되었다. 일본은 연약지반에서의 시공이 많기 때문에 연약지반에서도 자립이 가능한 고강성의 이음으로 두께가 커졌기 때문이다. 일본에서는 지반조건의 다양화, 자동조립에의 대응, 2차복공의 생략에 따른 내면이 평평한 세그먼트의 요청 등 많은 이음방식이 개발, 실용화되어 있다. 이와 같은 고품질의 이음방식 채용이 시공정밀도의 향상과 함께 세그먼트의 완성도, 진원도를 비약적으로 높였다. 그러나 양질의 지반에서는 링강성을 높일 필요가 없기 때문에 돌출식 이음 등의 간이적인 이음 또는 간이 세그먼트를 채용하는 등 검토도 비용절감에 중요한 요소가 되었다. 단 이음형식은 조립 속도에 영향을 미치기 때문에 시공성을 향상시키는 이음구조에도 배려가 필요하다.

아울러 2차 복공생략과 함께 철도에서는 내면평활용 이음의 채용이 필요없을지도 모르지만 이음의 부식처리는 필요하다고 생각된다.

또한 이음부의 수를 줄여 비용저감을 꾀할 수 있다. 즉 세그먼트 폭의 확대, 분할수의 축소 등이다. 이것은 지수성의 향상이나 세그먼트조립에 요하는 시간단축에도 연결되기 때문에 비용저감에는 일석 이조가 된다.

## 실드터널 설계시의 원가절감방법에 대해서

그림 4는 터널외경과 세그먼트폭의 관계를 나타낸 것이다. 일본에서는 과거 철도터널 단면급의 세그먼트폭은 1,000mm 또는 1,200mm가 주류였지만, 최근에는 1,500mm나 1,600mm의 사례가 나오고 있다. 구미에서는 터널경은 커지지만 2,000mm까지의 실적이 있다. 또한 일반적으로 세그먼트폭은 두께의 5배 이하로 알려져 있다. 그림 5는 세그먼트 두께와 폭의 관계를 나타내었다. 철도단면에서는 2배~4배가 많이 채용되고 있다.

그림 6은 터널외경과 세그먼트두께의 관계이다. 일반적으로 세그먼트의 최소 두께는 외경의 4% 정도로 알려져 있지만, 터널경이 커지면 4% 이하의 두께도 나타나고 있다. 그러나 세그먼트폭을 확대하거나 두께를 두껍게 하는 경우, 세그먼트의 비틀림 강성이 충분히 확보되지 않아 응력집중 등의 영향이 커지거나, 세그먼트폭 방향으로 일정한 응력분포가

되지 않아 부재로서 평가를 할 수 없는 경우가 있다. 따라서 시공시 하중이나 시공성 등을 고려하고, 설계시 충분한 주의가 필요하다.

또한 세그먼트의 분할 수는 적은 편이 이음의 감소 등 제조비용의 면이나 지수성 측면에서 유라하여, key세그먼트도 다른 세그먼트와 같은 크기로 하는 등분할 세그먼트 등이 채용되고 있다. 그러나 세그먼트의 대형화에 따른 취급이나 세그먼트의 호장이 길어짐에 따른 조립의 어려움(특히 key세그먼트) 등의 시공성이나 운반제약 등도 충분히 검토할 필요가 있다. 또한 세그먼트폭을 과거의 1.2배, 분할을 등분할로 하여 분할수를 하나 줄이는 경우 약 10%의 비용절감을 꾀할 수 있다.

세그먼트제작방법의 합리화로는

- 강섬유 보강콘크리트를 사용하여 철근의 가공 조립비 저감

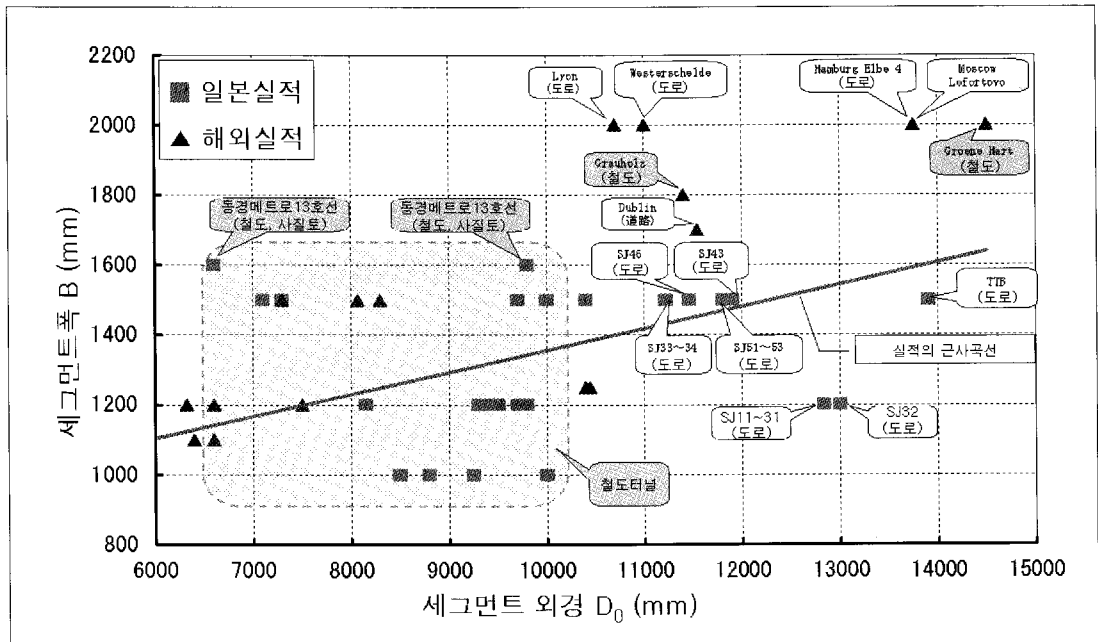


그림 4. 터널외경과 세그먼트 폭의 관계

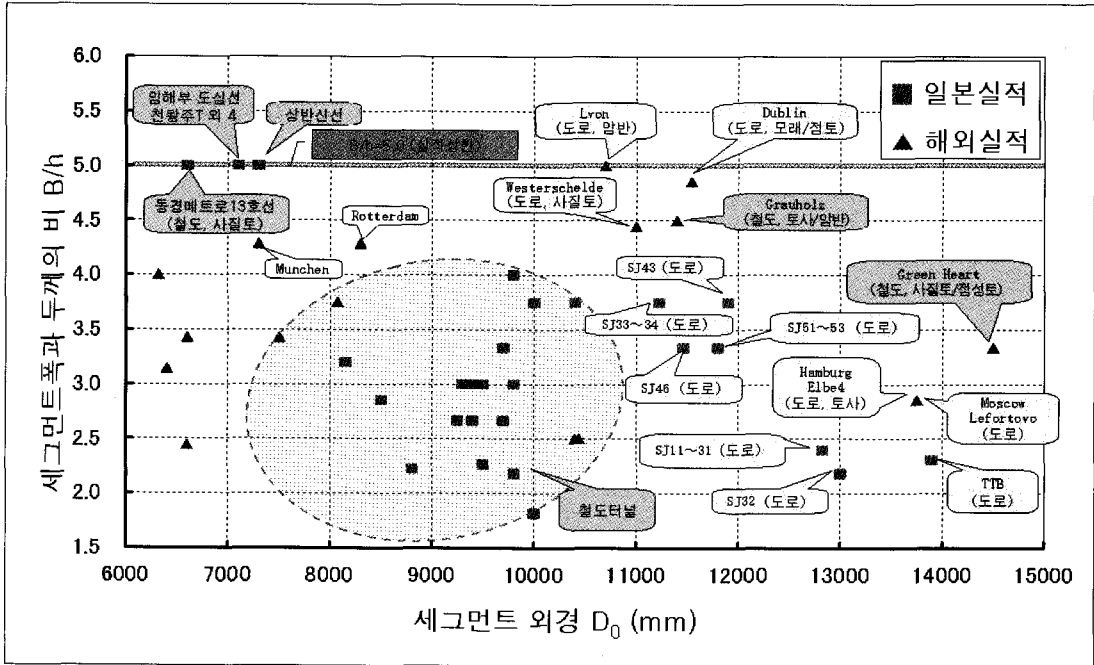


그림 5. 세그먼트두께와 폭의 관계

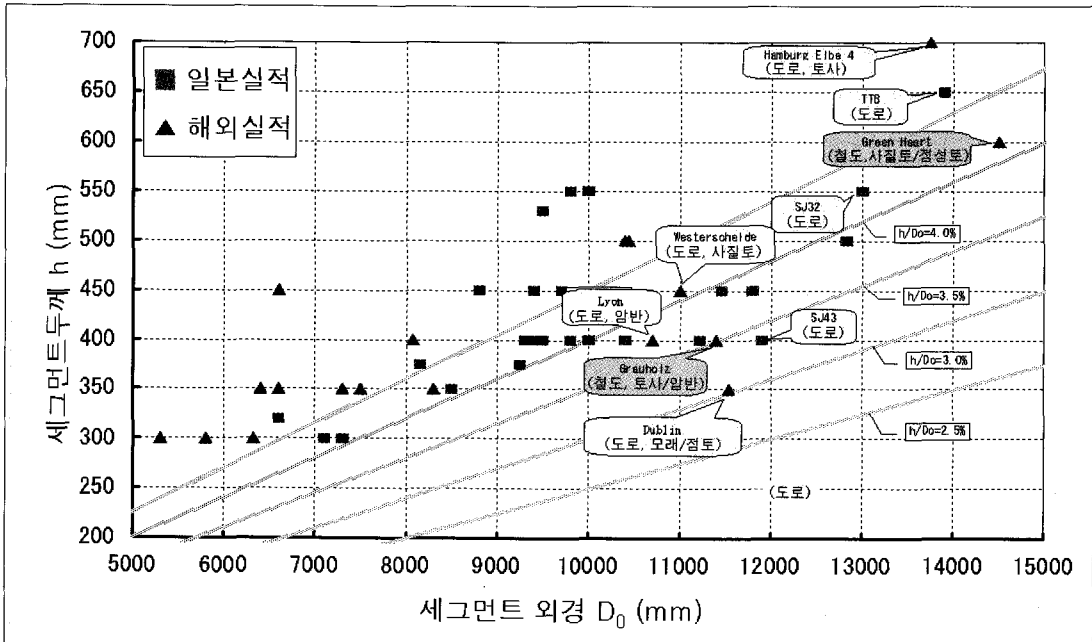


그림 6. 터널외경과 세그먼트두께의 관계

## 셴드터널 설계시의 원가절감방법에 대해서

- 고유동 콘크리트를 채용하여 진동다짐을 간소화하고, 거푸집의 운용회수 증가
- 세그먼트의 규격화에 따른 거푸집비용의 저감
- 수중양생의 생략 등 양생방법의 재검토
- 제품정밀도를 확보하는 것은 중요하지만 불필요한 사양요구의 개선

등 제작비용의 저감요인이 되는 비용절감항목이 있다. 또한 고유동 콘크리트를 채용하여 거푸집 사용회수를 2배로 하는 경우 약 8%의 비용절감을 꾀할 수 있다.

또한 일본에서는 세그먼트제작은 공장제작이 거의 대부분이지만, 현지제작이 가능하면 운반비 등의 대폭저감으로 연결된다. 용지문제, 동일 세그먼트제작수의 문제 등도 있지만, 3,000~4,000Ring 이상이 라면 검토할 가치가 있다.

### 3.4 기타

일본에서는 굴착한 토사가 산업폐기물이나 아니냐로 버력의 처리처분비용에 크게 영향이 있다. 기본적으로 이수식 셴드에서는 1차 분급된 모래자갈 분은 일반버력, 2차 분급된 세립토는 산업폐기물이 된다. 또한 토압식 셴드에서는 배토성상에 따라 취급이 다르지만, 이토압셴드의 경우 산업폐기물이 되는 경우가 많은 실정이다. 따라서 기종의 선정에 있어서 굴착버력의 대형 제방에 이용, 고화재와 혼합하여 유동화처리토로서 터널의 인버트부나 개착공법의 매립재로 이용하는 등 버력의 유효이용도 비용절감에 기여하고 있다.

셴드의 발진도달, 특히 연약지반에서는 대규모 지반개량이 필요한 경우가 많고, 개량비용이 커진다. 그래서 지반개량을 최소한으로 하고 발진도달방식

의 검토도 유효하다.

또한 공기단축은 단순히 기계손료나 경비의 저감이 아니며, 공용개시시기를 서둘러 건설투자의 조기회수나 경제파급효과 등에 크게 영향을 미친다. 셴드터널의 급속시공 예를 들면 셴드굴진, 세그먼트 조립의 동시시공 등의 다양한 개발이나 검토가 수행되고 있지만, 굴진이나 조립만이 아니라 갱내의 재료운반 등 갱내 가설설비 등 전체 시스템에의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

## 4. 맺음말

셴드터널의 원가절감방법에 대해 설계를 주제로 한 일본에서의 실적이나 취급에 관한 개요를 소개하였다. 한국 기술자들이 향후 셴드터널을 설계하는데 있어서 원가절감을 위한 참고가 되기를 바란다.

## 참고 문헌

1. 北原陽一(1996), 省力化を図るための自動化への展望と課題, 月刊下水道 Vol.19, No.2, pp.21-25.
2. 北原陽一(1996), シールド技術-最近の傾向と課題, 月刊下水道 Vol.19, No.13, pp.53-55.
3. 北原陽一(1998), シールド工法におけるコストダウンへの取組みと自動化の実際, 技術情報協会講習会テキスト.
4. (財)先端建設技術センター(2000), シールド工事の合理化に関する検討委員会報告書.