고강도 콘크리트와 고장력 철근을 적용한 쉴드 세그먼트의 역학적 거동에 대한 실험적 연구

이규필¹, 박영택², 최순욱³, 배규진⁴, 장수호^{5*}, 강태성⁶, 이진섭⁷

An experimental study on mechanical behavior of shield segment with high-strength concrete and high-tension rebar

Gyu-Phil Lee, Young-Taek Park, Soon-Wook Choi, Gyu-Jin Bae, Soo-Ho Chang, Tae-Sung Kang, Jin-Seop Lee

ABSTRACT An experimental research on the possibility of using high-strength concrete with the design strength of 60 MPa and high-tension rebar with the yielding strength of 600 MPa instead of conventional reinforced concrete segment to reduce its production cost was performed. Full-scale bending tests on both conventional and high-strength reinforced concrete segments were carried out to compare their mechanical and structural behaviors of the segments under flexural action. From the experiments, it was shown that the failure load of high-strength reinforced concrete segment was approximately 30% higher than that of the conventional segment even though reinforcements in high-strength segment were reduced by 26%. The test result showed that the bearing capacity of high-strength segment highly increased by high-strength concrete and high-tension rebar. It also verified the high possibility of high-strength reinforced concrete segment as a technical alternative to reduce the production cost of segments in a shield tunnel.

Keywords: Segment, shield tunnel, high-strength concrete, high-tension rebar, bending test

요 약 본 연구에서는 세그먼트의 제작비용을 절감하기 위한 방안으로서, 설계강도가 60 MPa인 고강도 콘크리트와 항복강도가 600 MPa인 고장력 철근을 사용하여 철근량을 저감시킨 고강도 철근보강 세그먼트 시제품을 제작하였다. 이상과 같이 제작된 고강도 세그먼트와 기존 철근보강 세그먼트의 역학적 거동을 비교하기 위하여, 세그먼트의 실물 휨실험을 실시하였다. 실험결과, 철근량이 약 26%가 감소하였음에도 불구하고 고강도 철근보강 세그먼트의 파괴하중은 일반 철근보강 세그먼트보다 약 30% 크게 나타나 고강도 콘크리트와 고장력 철근으로 인해 세그먼트의 내하력이 크게 향상되었음을 확인하였다.

주요어: 세그먼트, 쉴드 터널, 고강도 콘크리트, 고장력 철근, 휨실험

접수일(2012.04.21), 수정일(2012.04.30), 게재확정일(2012.05.09)

¹한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 수석연구원

²한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 수석연구원

³한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 전임연구원

⁴한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 선임연구위원

⁵한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 연구위원

⁶삼표건설 R&D팀 과장

⁷삼표건설 R&D팀 상무

*교신저자: 장수호 (E-mail: sooho@kict.re.kr)

1. 서 론

세그먼트 라이닝(segment lining)은 공장이나 현장에서 미리 제작된 프리캐스트(precast) 세그먼트를 조립하여 설치되는 터널 라이닝으로서, 쉴드 터널에서 필수적으로 사용되는 구조체이다. 특히, 쉴드 터널 세그먼트는 쉴드 TBM의 추진을 위한 반력지지 구조물로서의 역할과 공사 중의 안정성 확보는 물론이고 영구적인 터널 라이닝의 역할도 하게 된다.

세그먼트의 역학적·구조적인 중요성 이외에도, 일반적으로 세그먼트의 비용은 쉴드 터널 직접공사 비의 약 25~40% 수준으로서 가장 큰 비중을 차지한다(장수호 등, 2011; 한국터널공학회, 2008; 일본 터널기술협회, 2000). 특히 세그먼트가 쉴드 터널 직접공사비에서 차지하는 비중은 쉴드 터널의 단면이 커지고 시공 연장이 길어질수록 더욱 증가하게 된다.

따라서 쉴드 터널의 건설비용을 줄이기 위한 가장 큰 절감방안 중의 하나로서, 세그먼트의 성능 향상을 통해 세그먼트의 제작비용을 절감하기 위한 기술 개발이 선진국을 중심으로 활발히 이루어지고 있다. 일본에서는 고강도 또는 초고강도 콘크리트에 의해 세그먼트의 두께를 축소하는 방안이 지속적으로 연구되고 있으며(일본 쉴드 터널신기술연구회, 2001), 이외에도 합성 세그먼트(composite segment), 연성 세그먼트(ductile segment) 등이 개발되고 있다(Takashi et al., 2004; Zhang and Koizumi, 2010). 유럽에서도 유럽 공동연구프로젝트인 TUNCONSTRUCT 프로젝트를 통해 세그먼트의 제작비용을 절감하면서도 내구성을 향상시키기 위한 고성능 세그먼트들을 개발한 바 있다(Beer, G., 2010). 특히, 최근 들어서는 철근을 생략하거나 최소화하기 위한 기술적 대안으로서 강섬유보강 콘크리트 세그먼트(Steel-Fiber Reinforced Concrete segment)가 개발되어 그 적용 사례가 증가하고 있다(Kasper et al., 2008; Tiberti and Plizzari, 2009).

그러나 아직까지 우리나라에서는 세그먼트 라이닝의 수치해석적 연구와 세그먼트 배열방법에 대한 연구사례들은 일부 보고되고 있으나(김광진 등, 2006; 김정현과 강경진, 2007; 신중호 등, 2009), 세그먼트의 제작비용 절감 및 성능 향상과 관련된 재료적·구조적 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 세그먼트의 제작비용을 절감하기 위한 기술적 방안으로서, 설계강도가 60 MPa인 고강도 콘크리트와 설계 항복강도가 600 MPa인 고장력 철근을 사용하여 철근량을 저감시킨 고강도 철근보강 세그먼트 시작품을 제작하였다. 또한 실물 재하실험을 통해 고강도 세그먼트 시작품과 기존 세그먼트와의 역학적 거동 특성을 비교하여, 제작된 고강도 세그먼트 시작품의 성능을 검증하고자 하였다.

2. 실험체 제작 및 실험방법

2.1 세그먼트 실험체의 제작

본 연구에서는 그림 1과 같이 서울시지하철 7호선의 OO공구에서 사용되었던 외경 7.22 m, 길이 3,180 mm, 폭 1,500 mm인 세그먼트 라이닝의 A타입 세그먼트를 실물 재하실험을 위한 실험체로 제작하였다.

이때 본 연구의 주 실험대상으로서, 철근량을 저감하기 위하여 설계강도가 60 MPa인 콘크리트와 설계 항복강도가 600 MPa인 철근(SD600)을 사용한 고강도 철근보강 세그먼트의 실물 실험체를 제작하였다. 이와 같이 제작된 고강도 철근보강 세그먼트와의 성능 비교를 위하여, 다음의 표 1과 같이 콘크리트의 설계강도가 42 MPa이고 철근의 설계 항복강도가 400 MPa(SD400)인 현행의 세그먼트(Case 1)와 콘크리트의 설계강도만 60 MPa로 향상시킨 세그먼트(Case 2)에 대해서도 실물 실험체를 제작하고 각각의 성능을 비교하고자 하였다.

설계강도가 60 MPa인 고강도 콘크리트의 제작을 위하여, 김병권 등(2011)이 도출한 설계강도가 60 MPa인 고성능 쉘드 세그먼트용 콘크리트의 최적 배합조건을 동일하게 적용하였다. 이와 같은 콘크리트 배합조건에서 가장 특징적인 사항은 경제적인 고강도 콘크리트의 제작을 위해 고로슬래그의 치환율을 50%로 적용하였다는 점이다.

철근과 관련해서는 표 1과 같이 각각의 제작 조건별로 사용된 철근의 항복강도와 직경(호칭)만 다를 뿐, 그림 2와 같이 본 연구에서 사용된 세 가지 세그먼트 제작조건에 대하여 철근배근 간격은 동일하였다. 그러나 본 연구에서 사용한 고장력 주철근의 직경은 19 mm로서, 현재 일반적인 세그먼트의 주철근으로서 사용되고 있는 항복강도가 400 MPa이고 직경이 22 mm인 철근과 비교할 때 단면적이 25.4%가 감소하기 때문에 이와 같은 주철근의 직경 감소 비율에 비례하여 세그먼트 제작에 사용된 철근량도 감소하게 된다(표 1). 전단철근과 배력근으로는 세 가지 제작조건 모두에 대해 공통적으로 H13 철근을 적용하였다(그림 2).

실물 재하실험에 의한 세그먼트 성능평가 시에 세그먼트 내부에 위치한 철근의 거동을 계측하기 위하여, 그림 3~4와 같이 세그먼트 평면도 상의 1/4부분에 위치한 인장철근과 압축철근에 각각 12개 및 4개의 변형률 게이지를 설치하였다.

이상과 같은 조건으로 제작된 세그먼트의 주요 제작 과정들을 정리하면 그림 5와 같다.

표 1. 본 연구의 실험에 사용된 세그먼트의 제작 조건

세그먼트 제작조건	콘크리트 설계강도 (MPa)	철근			
		설계 항복강도 (MPa)	호칭	철근배근	사용철근량 (cm ²)
Case 1	42	400	H22	10@140~170 mm	38.71
Case 2	60	400	H22		38.71
Case 3	60	600	H19		28.65

(a) 평면도

(b) 측면도

그림 1. 본 연구에서 제작한 세그먼트의 제원 및 형상 치수(단위: mm)

(a) 상부 평면도

(b) 하부 평면도

그림 2. 본 연구에서 제작한 세그먼트의 철근 배근도(단위: mm)

그림 3. 세그먼트 철근에의 변형률게이지 설치 위치(● 인장측 ▲ 압축측)

그림 4. 철근에의 변형률게이지 부착 전경

(a) 철근망 제작

(b) 몰드에 철근망 설치

(c) 콘크리트 타설 및 다짐(진동테이블 포함)

(d) 표면 마무리 후 증기양생실 투입

(e) 증기양생 완료 후

(f) 세그먼트 탈형

그림 5. 본 연구에서 사용된 세그먼트의 주요 제작과정

2.2 세그먼트 실물 휨실험 방법

실드 TBM에 의한 지반 굴착 시에는 실드 TBM의 구조적 특성 때문에 굴착면과 세그먼트 사이에 테일보이드(tail void)가 필연적으로 발생하게 된다. 이러한 테일보이드를 그대로 방치하면 지반 침하가 과도하게 발생하기 때문에, 세그먼트 라이닝과 굴착된 지반을 일체화하기 위하여 굴착 직후에 테일보이드를 신속하게 밀실하게 충전하기 위한 그라우팅을 뒤채움 그라우팅을 실시한다(한국터널공학회, 2008).

그러나 그라우팅이 잘 이루어지지 못하여 세그먼트 외부에 테일보이드가 그대로 존재하게 되면, 그림 6과 같이 세그먼트에 큰 집중응력이 발생하여 세그먼트의 구조적 안정성을 저해할 수 있다.

따라서 이상과 같은 불리한 시공조건을 모사하기 위한 휨실험은 세그먼트의 성능평가를 위한 가장 대표적이고 일반적인 실험이다(국토해양부, 2009). 세그먼트의 휨실험은 세그먼트 자체에 대한 휨실험과 세그먼트 연결부에 대한 연결부 휨실험으로 구분된다. 본 연구에서는 세그먼트 연결부에 대한 성능 검토가 연구목적이 아니기 때문에, 세그먼트 자체에 대한 휨실험만을 실시하였다.

세그먼트의 실물 휨실험을 위해 사용된 실험장비는 최대 500톤 용량의 재하 시스템으로서, 최대 17개의 유압 액츄에이터에 대해 변위제어, 하중제어 및 강성제어를 할 수 있는 유압 서보제어기가 포함되어 있다. 재하시스템의 하부는 대형 실험체를 이송할 수 있도록 레일 형태의 대차로 구성되어 있다. 특히, 재하실험 시에는 대차 하부에 장착된 유압 액츄에이터에 의해 대차가 재하 시스템 하부의 철재 블록에 거치되기 때문에, 대차에 실험체를 탑재한 상태에서 재하 실험이 가능하다(그림 7).

본 연구에서는 세그먼트의 실물 휨실험 시에 실험체 상부의 재하를 위하여 재하 시스템의 중앙부에 설치된 유압 서보제어 액츄에이터(최대 재하용량: 200톤, 최대 스트로크: 300 mm)를 사용하

그림 6. 세그먼트 라이닝의 성능평가에 있어서 휨실험의 중요성(Gettu et al., 2004)

였다. 액추에이터 하부에는 지간이 450 mm인 2개의 상부 롤러를 부착하였고 실험체 하부에는 그림 1의 세그먼트 치수에 적합하도록 지간을 3,180 mm로 설정한 롤러 베이스를 설치하여, 세그먼트 실물 실험체에 대해 4점 휨실험을 실시하였다(그림 7 및 그림 8).

모든 실험시에는 서보제어에 의한 변위제어 실험을 실시하였으며, 변위속도는 재하점을 기준으로 하여 5 mm/min으로 설정하였다. 또한 앞선 2.1절에서 설명한 세그먼트 내부의 철근에 설치된 총 16개의 변형률게이지들로부터 얻어지는 변형률 자료는 0.01초당 1개의 속도로 획득하였다.

그림 7. 세그먼트 실물 실험체의 휨실험 장면

그림 8. 세그먼트 실험체 하부의 롤러 베이스

3. 세그먼트의 실물 휨실험 결과분석

3.1 균열발생 하중과 파괴하중의 분석

콘크리트의 설계강도가 42 MPa이고 철근의 항복강도가 400 MPa인 일반 세그먼트(Case 1)에 대한 실물 휨실험 결과, 하중이 약 145 kN일 경우부터 균열이 발생되면서 중립축이 상승하였고, 설계 파괴하중인 554 kN의 하중조건에서는 압축측 철근이 인장철근으로 거동하는 것으로 나타났다. 최종적으로 Case 1의 실험체는 설계 파괴하중 이후에 소성에 가까운 거동을 보이긴 하지만, 재하 하중이 635 kN일 때 압축측 콘크리트의 압괴에 의하여 실험체가 파괴되었다(그림 9a 및 그림 10).

콘크리트의 강도 증가에 따른 세그먼트의 거동 특성을 분석하기 위하여, Case 1과 동일한 철근과 철근량 조건에 대하여 콘크리트 설계강도를 60 MPa로 증가시킨 실험체(Case 2)에 대해서도 휨실험을 실시하였다. 그 결과, 하중이 165 kN일 경우에 실험체에 균열이 발생하면서 중립축이 상승하였고, 최종적으로 재하하중이 710 kN일 때 실험체가 파괴되었다(그림 9b). 이와 같이 콘크리트 설계강도가 기존의 42 MPa에서 60 MPa로 증가되면서, 균열발생 하중과 파괴하중은 각각 약 14% 및 12%가 증가하였다. 이와 같은 하중의 증가를 제외하고는 전반적인 변형 거동은 Case 1의 경우와 유사하였다.

설계강도가 60 MPa인 콘크리트와 항복강도가 600 MPa인 고장력 철근으로 제작된 세그먼트 실험체(Case 3)에 대한 실험 결과, 균열발생 하중은 약 180 kN으로 나타났고 파괴하중은 825 kN으로 관찰되었다(그림 9c).

이상과 같이 세그먼트 제작조건별로 얻어진 주요 하중 결과들을 정리하면 다음의 표 2와 같다. 동일한 철근 제작조건에서 콘크리트의 설계강도 증가에 따른 균열 발생하중과 파괴하중은 각각 13.8% 및 11.8%로 나타났다. 반면, 콘크리트 설계강도가 60 MPa로서 동일하지만 철근을 고장력 철근(SD600)으로 대체하면 균열 발생하중과 파괴하중이 Case 1과 비교할 때 각각 24.1% 및 29.9%가 증가되었음을 확인할 수 있다. Case 3의 결과를 Case 2와 비교하면 고장력 철근에 의한 하중 증가율은 각각 10.3%와 18.1%로서, 콘크리트 설계강도 증가로 인한 효과와 비교할 때 균열 발생 하중의 증가율은 상대적으로 작게 나타났으나 파괴하중의 증가율은 더 크게 나타났다. 즉, 파괴 하중을 기준으로 분석하면 콘크리트의 고강도화보다 고장력 철근의 사용으로 인한 효과가 다소 크게 나타났다. 이상의 결과로부터 현행의 일반적인 세그먼트인 Case 1과 비교할 때 철근량이 약 26% 절감되었음에도 불구하고(표 1 참조), 고강도 콘크리트와 고장력 철근의 사용으로 인해 세그먼트의 내하력은 오히려 향상되었음을 확인할 수 있었다.

(a) Case 1 실험체

(b) Case 2 실험체

(c) Case 3 실험체

그림 9. 세그먼트 실험체별 재하 하중 및 철근 변형률 곡선

그림 10. 파괴 후의 세그먼트 실험체(Case 1)

표 2. 세그먼트 실험체별 균열발생 하중 및 파괴하중

세그먼트 제작조건	균열발생				파괴하중			
	설계 하중	측정 하중	하중증가율 (Case 1대비)	하중증가율 (Case 2대비)	설계 하중	측정 하중	하중증가율 (Case 1대비)	하중증가율 (Case 2대비)
Case 1	124 kN	145 kN	-	-	554 kN	635 kN	-	-
Case 2	124 kN	165 kN	13.8%	-	628 kN	710 kN	11.8%	-
Case 3	152 kN	180 kN	24.1%	9.1%	642 kN	825 kN	29.9%	16.2%

표 1과 같이 사용된 철근량으로 실험체의 파괴하중을 나누어 분석하면 다음의 표 3과 같다. 그 결과, 고강도 콘크리트만 적용했을 경우(Case 2)와 일반 세그먼트(Case 1)를 비교하면, 철근의 단위 사용량에 따라 세그먼트가 지지할 수 있는 하중은 18 MPa의 콘크리트 설계강도 향상에 의해 11.6%만이 증가하였다. 하지만, 고강도 콘크리트와 고장력 철근을 동시에 적용한 경우에는(Case 3), 철근의 단위 사용량에 따른 세그먼트의 내하력은 일반 세그먼트(Case 1)와 비교할 때 75.6%가 증가한 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 세그먼트의 내하력을 향상시키기 위해서는 콘크리트의 강도보다는 철근의 항복강도가 훨씬 더 효과적임을 확인할 수 있다.

표 3. 세그먼트 실험체별 철근 단위 사용량별 내하력 비교

구 분	파괴하중 (1)	사용철근량 (2)	철근의 단위 사용량별 세그먼트 내하력 $(=(1) \div (2))$	단위 내하력 증가율 (Case 1대비)	단위 내하력 증가율 (Case 2대비)
Case 1	635 kN	38.71 cm ²	16.4 kN/cm ² (=164 MPa)	-	-
Case 2	710 kN	38.71 cm ²	18.3 kN/cm ² (=183 MPa)	11.6 %	-
Case 3	825 kN	28.65 cm ²	28.8 kN/cm ² (=288 MPa)	75.6 %	57.4 %

3.2 세그먼트 내부의 철근 작용능력 분석

철근의 종류와 사용량에 따른 세그먼트의 거동특성을 비교·분석하기 위하여, 세그먼트 인장측 철근에 부착한 12개의 변형률게이지로부터 측정된 결과를 정리하면 다음의 표 4와 같다. 이때 파괴 하중의 차이가 가장 큰 Case 1과 Case 3에 대해 철근의 탄성계수를 고려하여 재하 하중단계별로 인장철근에 발생하는 인장응력의 분포를 분석하였다.

분석 결과, 각각의 하중단계별로 재하점 부근의 철근에서 상대적으로 큰 응력이 집중되긴 하였지만, 세그먼트의 폭 방향을 따라서 세그먼트의 중앙부로 인장응력이 전달되는 것을 확인할 수 있었다.

또한 표 4와 같이 재하하중이 300 kN 및 500 kN로서 설계 파괴하중 이하인 경우에는 Case 1과 Case 3 실험체의 인장철근에 발생하는 각각의 최대 인장응력은 유사하게 나타났다.

표 4. 재하하중 수준에 따른 철근 인장응력 분포도(단위: MPa, ▲: 재하점)

그러나, Case 1 실험체의 설계 파괴하중인 554 kN을 초과하는 600 kN의 하중이 재하되었을 때, Case 1 실험체에는 하중 재하점 부근에서 약 1,700 MPa의 최대 인장응력이 발생한 반면, Case 3 실험체에는 약 900 MPa의 최대 인장응력이 발생하여 상이한 인장응력 분포 경향을 나타내었다. 이는 고장력 철근과 고강도 콘크리트를 적용함으로 인해 Case 3 세그먼트 실험체의 내하력이 크게 향상되었기 때문인 것으로 판단된다.

반면, Case 3 실험체의 설계 파괴하중인 642 kN을 초과하는 800 kN의 하중이 재하되었을 경우에는 Case 3 실험체의 하중 재하점 부근에서 약 2,000 MPa의 최대 인장응력이 발생하였다.

이상과 같은 세그먼트 내부의 철근 작용응력의 계측결과에서도 고장력 철근과 고강도 콘크리트로 인한 세그먼트의 내하력 향상효과를 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 고강도 콘크리트와 고장력 철근을 사용하여 철근량을 저감시킨 고강도 철근보강 세그먼트 시작품을 제작하였고 그 역학적 거동을 기존의 일반 세그먼트와 비교하기 위하여 실험 시험을 실시하였다. 이상의 연구로부터 도출된 주요 결과들을 정리하면 다음과 같다.

1. 세그먼트 라이닝의 외경이 7.22 m인 A타입 세그먼트에 대한 휨실험 결과, 동일한 철근 종류와 철근량을 사용한 경우, 콘크리트의 설계강도가 42 MPa와 60 MPa인 세그먼트의 파괴하중은 각각 635 kN과 710 kN으로서 콘크리트의 고강도화로 인해 파괴하중이 약 12% 증가한 것으로 나타났다. 반면, 설계강도 60 MPa의 고강도 콘크리트와 항복강도가 600 MPa인 고장력 철근을 함께 사용한 세그먼트 실험체의 파괴하중은 825 kN로서 고장력 철근으로 인한 파괴하중의 증가율은 약 16%로 나타났다.
2. 설계 파괴하중 이하의 하중 조건에서는 압축측 철근에 압축력이 발생하지만, 설계 파괴하중 이상의 하중이 실험체에 재하되면 압축측 철근이 인장측 철근과 같이 거동하면서 세그먼트 실험체가 파괴에 이르는 경향을 나타내었다. 이는 설계 파괴하중 이상으로 큰 하중이 세그먼트 실험체에 가해질 경우에는 압축측 철근이 인장측 철근으로 거동하면서 추가적인 하중지지 효과를 발현하기 때문인 것으로 판단된다.
3. 철근의 단위 사용량에 따른 세그먼트의 내하력을 비교한 결과, 콘크리트 설계강도의 증가로 인한 내하력의 증가는 약 12%에 불과하였지만, 고강도 콘크리트와 고장력 철근을 모두 적용한 세그먼트의 내하력은 일반 세그먼트와 비교할 때 약 76%가 증가한 것으로 나타났다. 이상의

결과로부터 세그먼트의 내하력 향상 측면에서, 콘크리트의 강도보다는 철근의 항복강도를 증대시키는 것이 상대적으로 더욱 효과적임을 확인하였다.

4. 세그먼트 내부의 주철근에 작용하는 인장응력의 분포를 분석한 결과, 설계 파괴하중 이하의 하중이 재하될 경우에는 세그먼트 실험체 제작조건에 따른 차이는 크게 없었다. 반면, 재하하중이 설계 파괴하중 이상일 경우에는 일반 세그먼트에 사용된 항복강도 400 MPa의 철근에 더 큰 인장응력이 발생하였다.
5. 이상의 실험 휨실험을 통한 세그먼트의 성능 비교 결과, 항복강도가 600 MPa인 고장력 철근을 사용할 경우 일반 세그먼트와 비교하여 철근량이 약 26% 감소하였음에도 불구하고 고강도 콘크리트와 고장력 철근으로 인해 세그먼트의 내하력이 크게 향상되었음을 검증할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업인 “TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM 터널의 최적 건설기술(과제번호: 10기술혁신E091) - 2세부과제: 고성능 세그먼트 라이닝의 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

참고 문헌

1. 국토해양부 (2009), 터널표준시방서, (사)한국터널공학회, pp. 110-113.
2. 김광진, 고성일, 추석연, 김종수 (2006), “쉼드 터널 시공 시 막장안정을 위한 지보압의 이론적, 수치해석적 고찰”, 한국터널공학회 논문집, 제8권 제3호, pp. 197-204.
3. 김병권, 이진섭, 이규필, 장수호, 배규진 (2011), “고성능 쉼드 세그먼트용 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 역학적 특성 및 증기양생 효과 분석”, 한국터널지하공간학회 논문집, 제13권 제3호, pp. 233-242.
4. 김정현, 강경진 (2007), “쉼드 터널의 사다리꼴 세그먼트라이닝 배열방법 개선에 대한 연구”, 한국터널공학회논문집, 제9권 제1호, pp. 1-18.
5. 신종호, 신용석, 박동인, 채성은, 최규훈 (2009), “수치해석을 이용한 세그먼트라이닝의 수리 거동과 누수제어 연구”, 한국터널공학회논문집, 제11권 제2호, pp. 131-140.
6. 日本トンネル技術協會 (2000), 大深度地下利用技術調査小委員會報告書 概要版(モデル検討), 日本トンネル技術協會.

-
7. 장수호, 이규필, 최순욱, 배규진 (2011), “실드 터널 세그먼트 라이닝의 최신 기술동향과 핵심 설계항목의 통계 분석”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제21권 제6호, pp. 427-438.
 8. 한국터널공학회 (2008), 터널 기계화시공 설계편, 터널공학시리즈3, 도서출판 씨아이알, pp. 259-262.
 9. シールドトンネルの新技術研究會 (2001), シールドトンネルの新技術, 土木工學社.
 10. Beer, G. (2010), “Technology innovation in underground construction”, CRC Press, pp. 299-314.
 11. Gettu, R., Barragán, B., García, T., Ramos, G., Fernández C., Oliver, R. (2004), “Steel fiber reinforced concrete for the Barcelona Metro Ling 9 tunnel lining”, Proc. of the 6th RILEM Symposium on FRC, Varenna, Italy, RILEM PRO 39, pp. 141-156.
 12. Kasper, T., Edvardsen, C., Wittneben, G., Neumann, D. (2008), “Lining design for the district heating tunnel in Copenhagen with steel fibre reinforced concrete segments”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 23, pp. 574-587.
 13. Takashi, W., Toshiharu, T., Tsuyoshi, A., Katsuhiko, M. (2004), “Development of a new composite structure segment for large diameter shield tunnel”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 19, pp. 449-450.
 14. Tiberti, G., Plizzari, G.A. (2009), “Parametric study on tunnel linings in fiber reinforced concrete combined with traditional reinforcement”, Proc. of WTC 2009, Budapest, Hungary, Paper No. O-08-09.
 15. Zhang, W., Koizumi, A. (2010), “Behavior of composite segment for shield tunnel”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 25, pp. 325-332.