

高水圧化での高速掘進施工および PET 繊維混入セグメントの適用

鈴木 達也¹・上原 芳文¹・後藤 徹²・林 裕悟³

¹正会員 清水建設株式会社 土木東京支店 土木第三部（〒108-0075 東京都港区港南 5-4-38 松岡品川埠頭ビル）

²フェロー会員 清水建設株式会社 土木技術本部（〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3 シーバンスS館）

³正会員 清水建設株式会社 土木技術本部（〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3 シーバンスS館）

最近のシールド工事は、施工条件の複雑化やコストダウンの要求などにより長距離・大深度・高速施工等、種々の対応が求められている。今回報告する東南幹線シールド工事は、東京都水道局が「都下の送水管ネットワーク化を図り、浄水場の送水区域を拡大して信頼性の高い送水システムを構築する」ために建設するものである。この工事も、昨今の都市事情を反映し、最大土被り 52m、最大水圧 0.49Mpa と高水圧下にあたり、しかも延長 2km を超える長距離のため工期短縮（高速掘進）が要求されたものである。

今回の報告は、大深度での「掘進組立同時施工シールド」の最大月進：560m を超える高速施工の実績、およびスチールセグメントに替えて初採用した新規開発の PET 繊維混入セグメントの施工状況を紹介する。

キーワード：シールド工法、大深度、掘進組立同時施工、PET 繊維混入セグメント

1. はじめに

今回、報告する東南幹線は、東京都水道局が施設整備長期構想として作成した「東京水道長期構想-STEP II-」に則った、東京都の水道事業が将来にわたって、都民生活と首都東京を支える水道でありつづけることを基本的な目標の一環として位置付けられる。これを整備・延伸することによって区部における送水管のネットワーク化を図り、城南、城東地区の相互融通機能を実現すると共に、三郷・金町浄水場の送水区域を拡大して信頼性の高い送水システムを構築するものである。（図-1 参照）

今回報告する工区は、港区港南五丁目から品川区八潮一丁目間に掘削外径 2900mm の泥水式シールドを施工し、送水管(1800mm)を新設する工事である。

今回の報告では、大深度における「掘進組立同時施工シールド」での最大月進 560m を超える高速施工

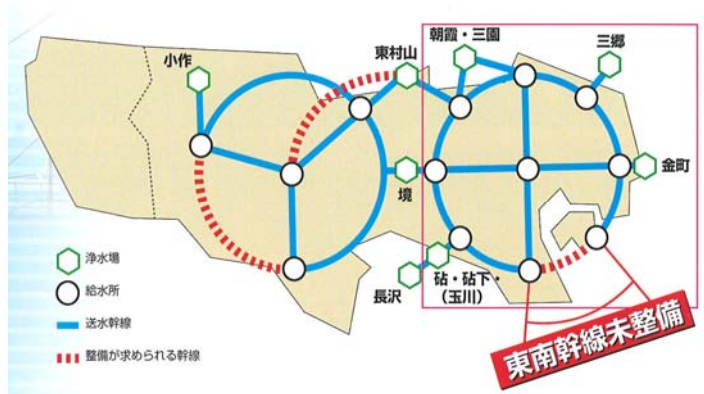


図-1 東京都の送水幹線の概要図

の実績、およびスチールセグメントに替えて初採用した新規開発の PET 繊維混入セグメントの施工状況を紹介する。

2. 工事概要

(1) 東南幹線工事

東南幹線の工事概要は以下のとおりである。

発注者：東京都水道局

工事件名：港区港南五丁目地先から品川区八潮一丁

目間送水管(1800mm)新設工事(シールド工事)

工期：平成20年7月29日～平成23年5月31日

施工者：清水・東洋・青木あすなろJV

工事内容：

- ・一次覆工(シールド築造工) 内径 2450mm
延長 2393.8m
- ・二次覆工(トンネル内配管) 内径 1800mm
延長 2397.1m (FCDφ1800-US エアミルク充填)

この工事は、入札時 VE(技術提案型総合評価方式)によるもので、評価項目は、工期短縮と環境負荷低減である。

これに対して当JVは、掘進組立同時施工(F-NAVIシールド)による工期短縮、鋼製セグメント→RC系



図-2 工事位置図

セグメントによる CO₂ 削減とペットボトルのリサイクルによる環境負荷低減を提案した。

(2) 土質状況

本工事の掘削対象土層は、全線にわたり固結シルト層であり、到達間際に約110mの区間で礫層が出現する。また、可燃性ガスの溶存が土質調査で確認され、防爆タイプのシールド機を採用する必要があった。図-3に路線と地質縦断図を示す。

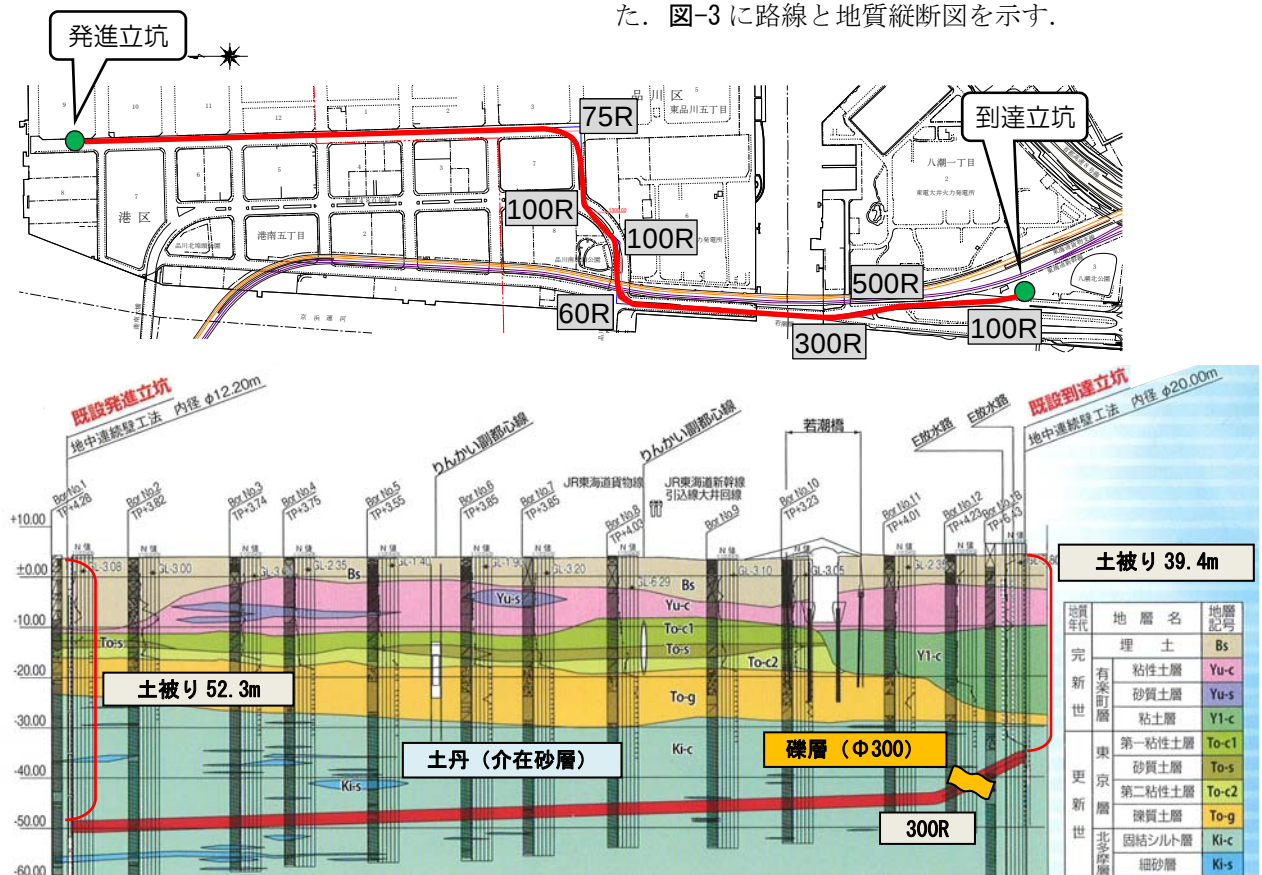


図-3 路線と地質縦断図

3. トンネル掘進状況

(1) F-NAVI シールド工法の採用

この工事では、前述のように技術提案の評価項目として工期短縮があげられていた。このため、本工事に掘進組立同時施工法によるサイクルタイムの短縮を提案し、採用に至っている。

清水建設では、掘進組立同時施工法とし【F-NAVI シールド工法】を開発しており、これを適用した。

【F-NAVI シールド工法】は、独自の首振り機構による方向制御機能で掘進と組立の同時施工を実現した工法で、通常の掘削速度でありながら高速施工が可能である。

通常施工	掘進時間 40分	セグメント組立 20分
	1サイクル 60分	
掘進組立 同時施工 F-NAVIシールド	掘進時間 40分	
	組立前掘削 時間 20分	セグメント組立 時間 20分
	1サイクル 40分	

(掘進速度30mm/分・幅1.2mセグメント施工時と仮定)

図-4 通常施工と同時施工のサイクル比較図

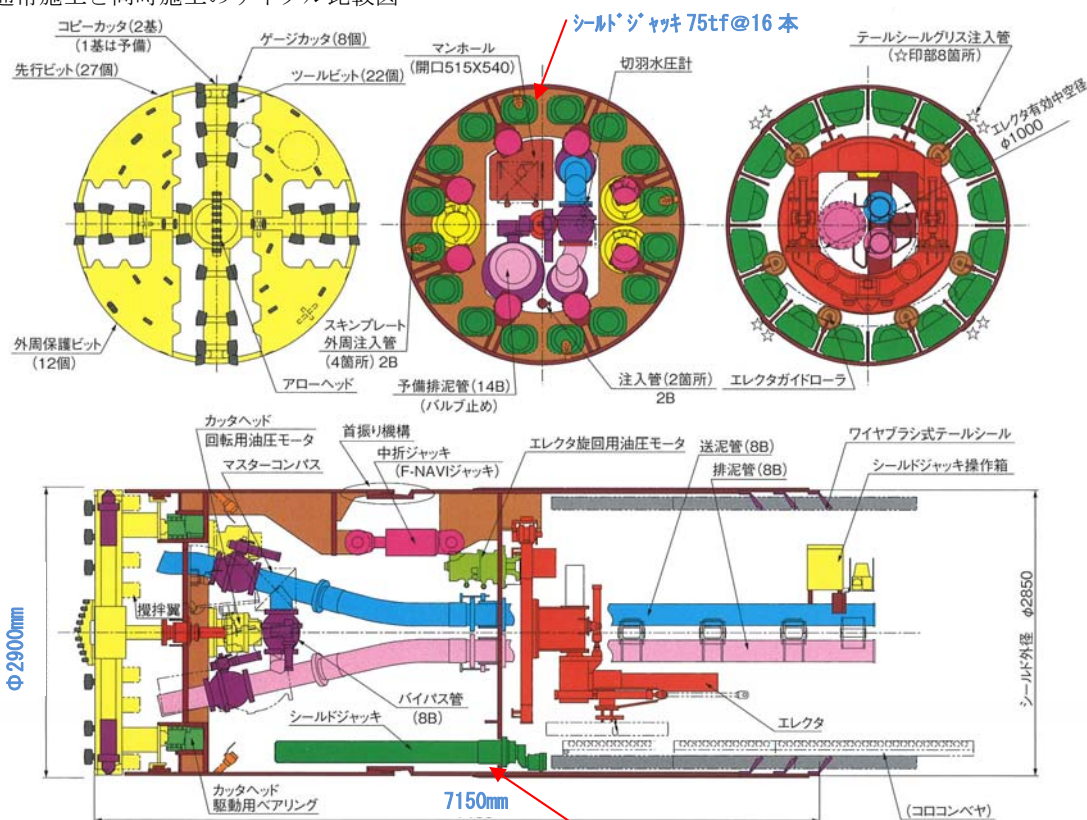


図-5 シールド機

この工法は、平成11年度土木学会技術開発賞、平成15年国土技術開発賞最優秀賞を取得し、現在までに8件の施工実績がある。今回は可燃性ガス溶存の可能性・高水圧・長距離を考慮した結果、切羽保持機構は泥水式を採用した。

(2) シールド機への工夫

シールド機(掘削外径φ2900mm、泥水式)は、可燃性ガス対策としてマシン内を防爆仕様とした。高水圧対策はテールシールド3段を採用、高水圧下でも掘進速度40mm/minを確保できる大容量シールドジャッキを選定した。発進・到達が直接切削方式となっているため、切削ビットの配置と長距離施工においてもビット交換が無いような段差ビットを選定している。(図-5 参照)

同時施工のための首振り機構は、急曲線にも対応可能なように従来機よりも後方に位置させた。これには、油量調整で瞬時に首振りが可能となる配慮を行った。また、セグメント組立時間を考慮して、同時掘進を半ストローク分とし、ジャッキストロークを1.5リング分(1850mm)とした。

(3) 施工結果

図-6 に掘進出来高図を示す。平成 21 年 5 月に掘進を開始し、6 月に段取り替えを終え、7 月から本掘進を開始した。最大月進量は 562.8m、最大日進量は 24.0m を記録し、平成 22 年 2 月に到達した。一次覆工の本掘進区間は R=60m, 75m, 100m を含めて 5 ヶ月で平均約 400m/月強の進行となり、資材運搬の制約がある小口径シールドでも高速掘進を実現できた。

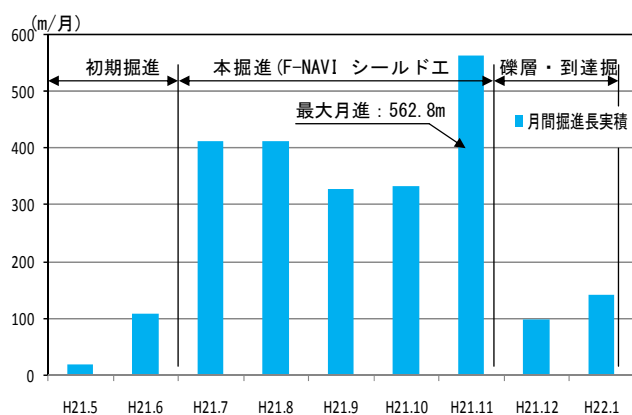


図-6 掘進出来高図

セグメント（後述）は、幅 1200mm で厚さ 130mm (B/T=9.23) という薄さであるが、施工時荷重によるひび割れや掘進組立同時施工での繁忙な切羽作業による欠けも防止することができ、坑内の漏れも減少できた。写真-1 に一次覆工後の坑内写真を示す。



写真-1 一次覆工状況

(4) 今後へ向けての改善点

表-1 に本掘進期間での掘進状況を示す。

更なる高速掘進のためには、a)～c)の方策が考えられる。

表-1 掘進状況表

作業内容	作業方数	割合 (%)	備考
掘削作業	269.5	87.1	本掘進
掘削中止	18.5	6.0	トラブル
荒天中止	2.5	0.8	
設備増設	19.0	6.1	中継 P、分岐
合計	309.5 方	100.0%	

a) サイクルタイムの低減

- ・組立て前掘進時間の低減----ジャッキスピードの向上が考えられるが、設備費増との見極めが必要である。
- ・セグメント組立ての効率化----薄い桁高でも可能なワンタッチ継ぎ手の開発が望まれる。

b) トラブル停止期間の低減

トラブル発生率の高い機器の把握と消耗部品の備蓄が考えられる。

c) 設備設置時間の低減（小口径シールド）

- ・設備のユニット化----これには、接続部の規格統一など機器メーカー間の調整が必要となる。
- ・吊り代の考慮----安全で吊り代の少ない揚重機の開発が望まれる。

4. 適用した新型セグメント

(1) PET 繊維混入セグメント

ここ数年、従来は廃棄処分となる PET ボトルを溶解・成型した再生 PET（ポリエチレンテレフタレート）繊維が開発されてきている。清水建設は、この繊維をコンクリートに混入すると曲げ靱性を高めることに着目し、これを混入した RC 系の新型セグメントを開発・実用化した。これにより、施工時に懸念されるひび割れを抑制して従来は不向きとされた小口径や内水圧トンネルへの RC 系セグメントの適用を拡大し、環境負荷低減や PET ボトルのリサイクル、建設コストの低減に大きな効果を上げることが可能としている。

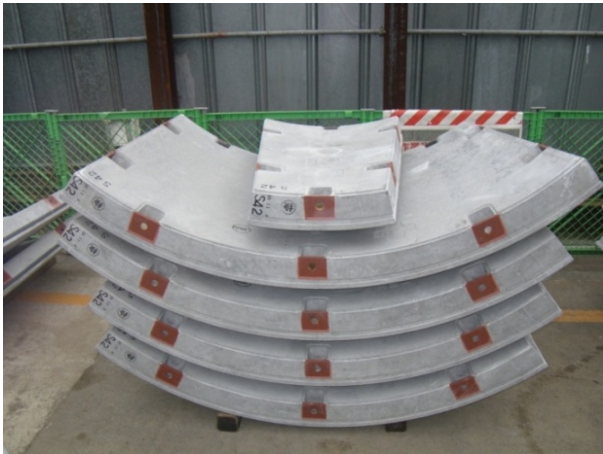


写真-2 適用した PET 繊維混入 RC 系セグメント

(2) 各種性能確認実験

各種の形状と太さ・長さを比較実験した結果、使用した PET 繊維の基本形状は、太さ 0.7mm・長さ 40mm で、表面にインデント加工（表面に凸凹を付ける加工）を施した。引張り強度は 450N/mm^2 以上、比重は 1.32g/cm^3 である。

基本性能としては、以下を確認済みである。

- ・親水性：コンクリートとの付着のためには、表面が親水状態にある必要がある。親水性評価で、他の繊維より親水性が高いことを確認した。
- ・耐アルカリ性：コンクリートに混入するため、耐アルカリ性が必要である。PET 繊維をアルカリ水溶液（ $\text{pH}12.5$ ）に浸漬させた後に引張り試験を行い、強度劣化のないことを確認した。

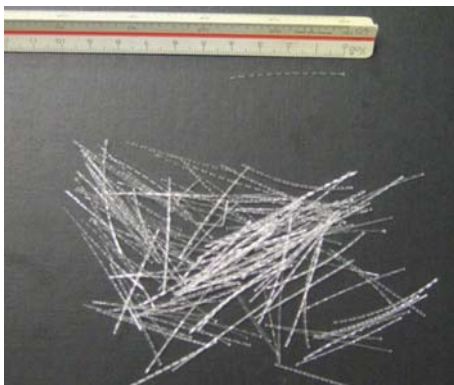


写真-3 使用した PET 繊維

適用にあたり、この PET 繊維を使用して力学試験を行い、その効果を確認した。

a) 平板実物大試験体による曲げ載荷試験¹⁾

大口径のトンネルを想定して、混入量の差による



写真-4 平板実物大 曲げ載荷試験状況

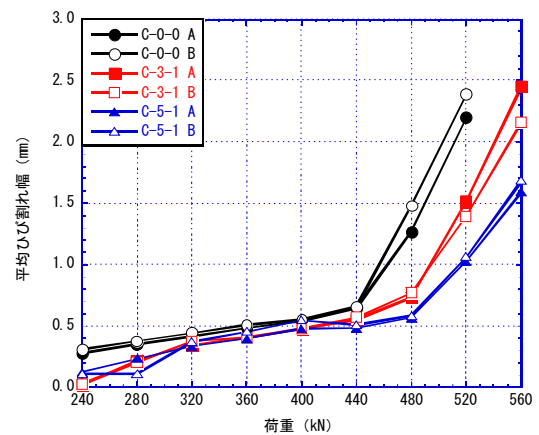


図-7 荷重-平均ひび割れ幅の関係

変位やひび割れ幅の関係を確認した。

実験で得られた結果は、以下のとおりである。

- ①繊維混入で降伏荷重と最大荷重が増加する。
- ②ひび割れ発生直後と鉄筋降伏後に、繊維混入によるひび割れ幅の抑制効果がある。

b) 曲げ靱性と耐衝撃性試験²⁾

トンネルの施工時の衝撃を想定して、混入量の差による耐衝撃性を確認した。

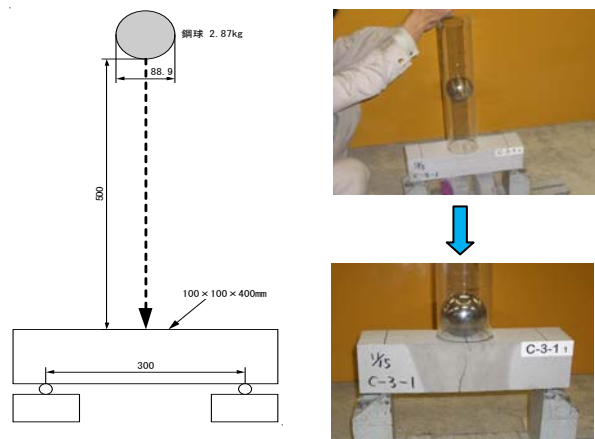


図-8 耐衝撃性試験状況

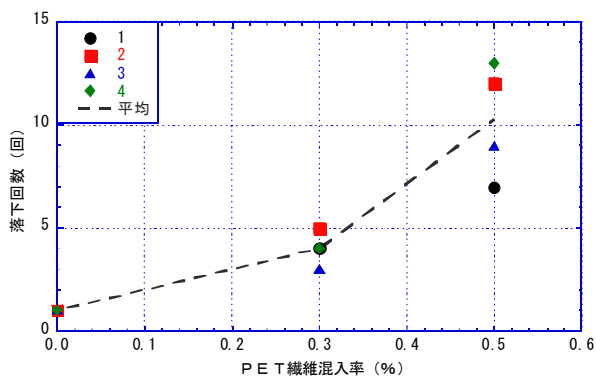


図-9 混入量と衝撃に耐えた回数

実験で以下の効果を確認した。

- ①繊維混入により、曲げ靱性は大幅に増加し JHS 730-2003 の基準を満足する。
- ②0.5vol%の繊維混入で耐衝撃性は 5.5 倍となり取扱い不備でのひび割れを防止できる。

(3) 新型セグメント採用の経緯

前述のとおり、本工事の評価項目のひとつは環境負荷低減であり、以下の提案内容が評価された。

- ①新型セグメントの適用で、原設計である鉄鋼系セグメントに比べて 63% (2,303,895kg-CO₂) の環境負荷低減効果がある。これは、新幹線で東京-大阪間を 1,200 往復強できる CO₂ 量に匹敵する。³⁾

なお、この計算では、日本建築学会：LCA データベースにより、鋼材→2.278 kg-CO₂/kg、コンクリート→0.195 kg-CO₂/kg、鉄筋→1.263 kg-CO₂/kg の環境負荷を設定した。

- ②本工事での PET 繊維混入で、500mlPET ボトル換算で 59 万本の PET リサイクルが行える。
- ③使用材料は、全て容易に国内で供給できる。鉄鋼系のように海外需要による原料の調達状況、価格変動に左右されずに、安定した製造・価格維持が可能である。

(2) 今後へ向けての改善点

PET 再生繊維は、今回の混入量であれば練り混ぜ時のスランプロスはなく、また、分散性も良好である。セグメント製作に関しては、従来設備で問題なく製造可能である。

しかし、今後への改善点としては、以下がある。

- ・重く、切羽でのハンドリングが悪い。小口径では結構つらく、適用径の検討が必要である。
- ・縦置きができないため、複数リングのセグメントの運搬が嵩張る。対応機器の検討が必要である。
- ・少量の混入量とは言え、PET 繊維混入はセグメント価格を押し上げる。量産化などで低価格を指向する必要がある。

5. おわりに

本工事は F-NAVI シールド工法を採用し、最大月進量 562.8m の高速掘進を記録することが出来た。また、PET 繊維混入セグメントは高水圧化におけるジャッキ推力増加においてもひび割れを発生させることはなく、高速掘進での繁忙な切羽作業でも割れ欠けの防止が実証された。この PET 繊維は、その性能が評価され、既に他方面（橋梁支柱のひび割れ防止）などでの適用も開始されている。今後は、今回のような全断面圧縮になる大深度(高水圧)の地山だけではなく、浅深度で沖積地盤にも対応出来るように改良を加えたいと考える。なお、PET 繊維混入セグメントは、今回の開発・適用で H21 年度の土木学会環境賞を受賞している。

現在、シールド工法は高水圧、長距離など厳しい条件下での施工が増加している。今回の実績による知見を活かし、両技術の適用範囲をさらに拡大していきたいと考える。

参考文献

- 1) 土木学会第 63 回年次学術講演会
後藤 徹 他「PET 繊維を混入した RC はりの曲げひび割れ性状」2008 年 9 月
- 2) 土木学会第 63 回年次学術講演会
高橋 圭一 他「PET 繊維を混入したコンクリートの曲げじん性と耐衝撃性」2008 年 9 月
- 3) 第 17 回地球環境シンポジウム
柴原 尚希 他「LCA を用いた航空と新幹線の CO₂ 排出量の比較」2009 年 9 月