

【特定テーマ】 バンコク地下鉄建設事業

I. バンコク地下鉄建設事業の環境への影響評価

ーインフラ事業への環境会計の導入ー

II. バンコク地下鉄駅での避難行動シミュレーション¹

III. バンコク地下鉄駅に及ぼす地下水汲み上げに起因する地盤沈下の影響評価²

京都大学大学院 大津宏康（経営管理研究部）

京都大学大学院 勝見 武（地球環境学堂）

【概要】

バンコク地下鉄建設事業は、バンコク首都圏 BMR³（Bangkok Metropolitan Region）における大量輸送交通網の整備を目的として 1995 年に立案されたバンコクマストラランジットマスタープラン M/P（道路交通調整委員会事務局 OCMRT）の一環として、タイ国高速鉄道公社 MRTA（Mass Rapid Transit Authority of Thailand）が実施母体となり、バンコク市内のファランブーン駅からバンスー駅に至る全長約 20km の地下鉄・18 箇所の駅（南線 9.4km・9 駅、北線 10.7km・9 駅）、48ha の車両基地（デポ）を建設すると共に、駅部のエスカレーター・エレベーター等の周辺設備を整備するものである。また、本事業は、第 7 次国家経済社会開発計画（1992～1996 年）並びに第 8 次同計画（1997～2000 年）に沿ってマストラ鉄道網整備の一環としてバンコク中心部に地下鉄を建設することにより、年々深刻化するバンコクの交通渋滞問題を緩和して円滑で効率的な人の移動を実現する一方、大気汚染等の環境問題の改善を図るものである。

本報告は、同建設事業を対象とした特定テーマとして、以下の事項について検討を加えるものとする。

1) テーマ 1

バンコクの交通問題について、環境会計等の定量的手法を用い、事業実施段階を含

¹ 本シミュレーションについては、京都大学大学院工学研究科清野純史准教授から貴重な協力を得た。特に記して感謝したい。

² 本検討に関しては、アジア工科大学（Asian Institute of Technology）の Dr. Noppadol Phienwej から貴重な協力を得た。特に記して感謝したい。

³ バンコク首都圏（バンコク都にサムートプラカン、パトンタニ、サムサコン、ナコンパトムおよびノンタブリの周辺 5 県を加えた地域）

めた環境影響評価を実施する。また同評価を踏まえ、大都市の交通問題と環境影響の関係について新しい分析枠組みを提示し、大規模インフラ事業における環境影響評価の新しい手法について提言を行う。

2) テーマ 2

バンコク地下鉄建設事業は、タイ・バンコクにおいて初めて導入された交通機関であるため、日本に比較して利用者の地下構造に対する認知度は低いと推察される。したがって、安心・安全の観点から今後利用客数が増えれば増えるほど、その安全対策への配慮は不可欠となる。加えて、2005年1月のタイ文化センター駅で起きた車両の衝突事故のような事故は予め想定して事前対策を講じておかねばならず、今後起こりうる事故・災害へのあらゆる事前対策を十分検討しておく必要がある。

このような観点から、本検討では、バンコクの地下鉄駅（バンスー駅）を対象とし、そこで事故や火災・水害などの災害が発生した場合の人間の群集シミュレーションを行い、各避難者の避難状況や出口での避難密度を算出することにより、現在講じられている対策の有効性や今後の課題について検討する。

3) テーマ 3

バンコク首都圏 BMR およびその周辺地域では、1980年以降の急速な経済発展に伴う大量の地下水利用により、帯水砂層の水頭低下に伴う地盤沈下が顕在化していることが報告されている。この地盤沈下は、表層部に堆積する粘土層で生じているものであり長期的に継続するため、現在も収束してはいない。

このため、本検討では、バンコク地下鉄の設計に関する基本概念および現状での地下水汲み上げに起因する間隙水圧の低下状況を勘案し、バンコク地下鉄駅に及ぼす地下水汲み上げに起因する地盤沈下の影響を評価する。

I. バンコク地下鉄建設事業の環境への影響評価

I-1 検討の概要

昨今、環境保全に対する関心は世界的に高まっており、京都議定書に記された CO₂ 等の温室効果ガス削減目標等が世界メディアを賑わせている。一方、開発途上国では経済の急激な発展において環境規制が追従できず、大気汚染等の環境悪化が深刻化している。

本検討で対象とするバンコク地下鉄建設事業は、こうした社会情勢を反映し第7次国家経済社会開発計画（1992～1996年）並びに第8次同計画（1997～2000年）に沿ってマストラ鉄道網整備の一環としてバンコク中心部に地下鉄を建設することにより、年々深刻化するバンコクの交通渋滞問題を緩和して円滑で効率的な人の移動を実現する一方、大気汚染等の環境問題の改善を図るものである。

ここで、近年様々な分野において、温室効果ガスである CO₂ および大気汚染物質である SO_x ならびに NO_x 等の排出を評価すると共に、その発生を抑制する取組みが実施されている。この大気汚染物質の環境影響評価に関して、ライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment、以下 LCA と称す）¹⁾²⁾ という概念が適用されつつある。LCA は、現状では主に工業製品を対象として、そのライフサイクル（製造・使用・廃棄段階）における環境負荷を総合的に評価する概念である。さらに、LCA の環境影響評価においては、事業活動における環境保全のための費用と便益とを、可能な限り定量的（貨幣単位または物量単位）に評価する仕組みとして、環境会計という概念が導入されるにいたっている。

このような状況を踏まえて、本検討で対象とする地下鉄建設事業のような社会基盤施設の建設整備においても、他の事業と同様に事業の実施に伴い環境へ及ぼす負荷・便益を定量的に評価する必要がある。ただし、社会基盤施設の整備は、工業製品と異なり公共性を有した一品生産であること、および環境影響が発生する要因は多岐にわたることに加えて、社会基盤施設は原則的には廃棄と言う概念はなく維持補修を行うことで長期にわたり供用されるという特性を有している。このため、本検討で対象とする地下鉄建設事業での環境影響評価においては、現状での工業製品を対象した LCA あるいは環境会計とは異なる手法を構築することが必要となる。このため、本検討では、製造・使用段階に相当するものとして、地下鉄建設段階および地下鉄操業段階（電力使用）での環境負荷を評価対象とする。なお、地下鉄建設段階の評価においては、前述のように環境影響が発生する要因は多岐にわたることから、個別（場所・時期等）の評価は実施せず、マクロ的な視点から地下鉄建設に伴い発生する大気汚染物質の環境影響評価を実施する。加えて、地下鉄は環境保全に貢献し得る機能（環境便益）も有している。具体的には、地下鉄建設によりこれまで自動車・バス利用者の交通機関シフトにより、大気汚染物質の排出量の抑制が期待されるため、本検討ではこの交通機関シフトによる効果を環境便益として計上する。ただし、この交通機関シフトによ

る環境便益は、地域によって大きく変動するものと推定されるが、本検討では地下鉄建設段階の評価と同様に、バンコク首都圏地域全体を対象としたマクロ的な視点から検討を実施するものとする。

以上に述べた枠組みに基づき、本検討においては、地下鉄建設事業の事業実施段階、および事業実施段階でのバンコクの交通問題を考慮した、環境負荷および便益の両者を総合的に評価できる定量化手法の構築、およびその手法に基づく評価を実施する。また、同評価を踏まえ、大都市の交通問題と環境影響の関係について新しい分析枠組みを提示し、大規模インフラ事業における環境影響評価の新しい手法について提言を行うものである。

I-2 検討の基本方針

図 2.1 は、構築するインフラ構造物の環境負荷・便益評価手法の概要を示している。環境影響を考慮した事業評価手法（環境負荷・便益評価手法）の構築では、事業全体

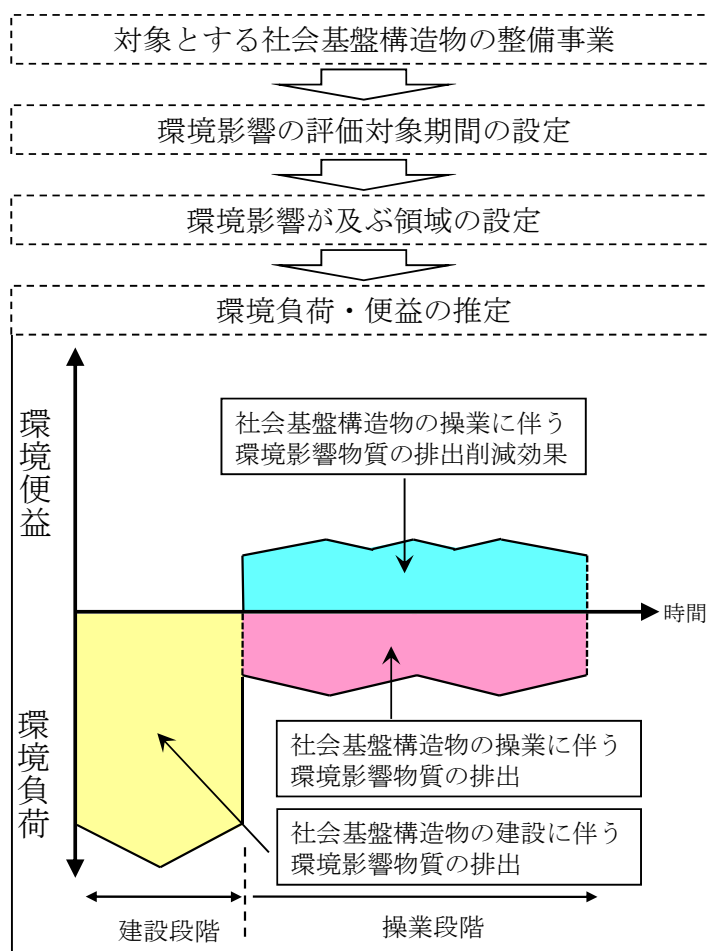


図 2.1 環境負荷・便益評価手法の概要

における環境影響の評価対象期間の設定ならびに事業実施が及ぼす環境影響の領域設定に未確定な要素があり、これらの確定は重要な作業である。構築する環境負荷・便益評価手法では、インフラ構造物の整備事業に着目し、インフラ構造物のプロジェクトライフを考慮した環境影響評価期間を設定する。一方、環境影響領域の設定では、整備事業自体が環境へ直接及ぼす環境影響領域（以後、“ローカルな環境影響”として称する）、ならびに整備事業自体が全産業を網羅した地球規模で捉えられる環境に及ぼす環境影響領域（以後、“グローバルな環境影響”として称する）を、後述する排出係数の概念を用いて各々設定する。さらに、環境影響領域の設定において既往の環境影響評価では、整備事業自体が環境へ及ぼす負の影響（環境負荷）領域を主として評価するものの、本検討ではインフラ構造物の整備事業によって得られる環境への正の影響（環境便益）をも環境影響領域の設定に考慮する。

環境便益に関して、インフラ構造物の操業は社会システムの変化、すなわち周辺環境の変化をもたらすことが期待される。例えば、地下鉄の整備・運行は、自動車交通から鉄道交通へ移動手段の変化を促進し、自動車交通量が減少し、追従して自動車走行速度の上昇が期待できる。よって、自動車交通に伴う環境影響物質排出量は、整備・運行された地下鉄周辺において減少することが期待できる。本検討では、このようなインフラ構造物の操業に付随して生じる環境影響物質排出量の削減効果を環境便益と定義する。

現在、例えば ODA によるインフラ構造物の整備事業では、図 2.1 に示されたインフラ構造物の操業に伴う環境影響物質の排出削減効果（環境便益）を CO₂ 等の排出権取引に利用する議論が活発である。また、一般に総称される“環境に優しいインフラ構造物（エコなインフラ構造物）”の対象は、インフラ構造物の操業に伴う環境影響物質排出（環境負荷）（図 2.1 参照）を低減することである。そこで、構築する環境負荷・便益評価手法では上記 2 項目に加え、インフラ構造物の建設段階における環境負荷を考慮することで、インフラ構造物のプロジェクトライフにおける環境負荷・便益を評価するものである。さらに、インフラ構造物のプロジェクトライフにおいて推定された環境負荷・便益に対する環境コストを用いた環境会計の導入の試みは、インフラ構造物の CO₂ 排出権取引への利用、ならびにエコなインフラ構造物の確立の一助となることが期待される。

I-3 検討の基本方針環境負荷・便益評価手法の構築

3.1 環境影響評価期間の設定

環境負荷・便益評価における環境影響評価期間の設定には、システム境界（境界条件を表す指標）を用いる³⁾。システム境界とは図 3.1 に示すとおり、対象物（例えば、インフラ構造物）のライフサイクル（資材等の製造・調達に始まり、インフラ構造物の建設、操業および廃棄段階）において、いずれのプロセスまでを詳細に検討するかを表す。

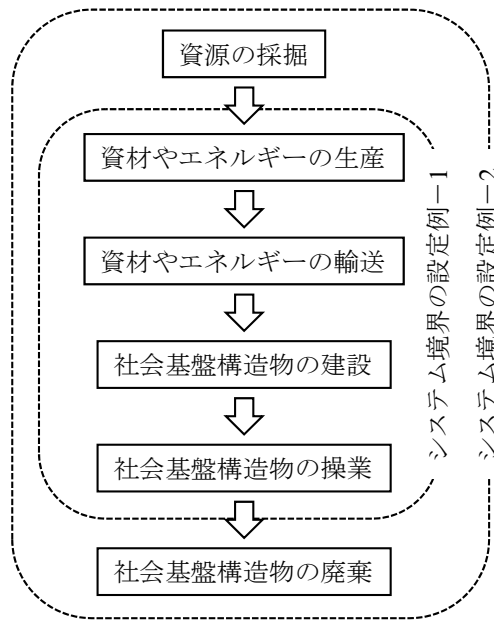


図 3.1 インフラ構造物のライフサイクルにおけるシステム境界の概念

既往の研究⁶⁾では、インフラ構造物の廃棄段階における環境影響は他の段階と比較して非常に小さいとされている。従って、環境負荷・便益評価手法の構築においてもインフラ構造物の廃棄段階における環境影響は考慮しない。また、構築する環境負荷・便益評価手法では、インフラ構造物のシステム境界を建設段階および操業段階に大別して設定する。これより、グローバルもしくはローカルな環境影響領域の設定下、インフラ構造物の建設段階および操業段階における環境影響物質の排出量が各々推定される。

3.2 排出係数と環境影響領域の設定

環境影響を考慮した事業評価手法（環境負荷・便益評価手法）を構築する上で、環境影響物質排出量の推定は必須である。インフラ構造物の整備事業に伴う環境影響物質の排出量の推定においては、インフラ構造物を構成する、または関連する各要素の排出係数を用いる。

排出係数とは要素（例えば、資材、建設機械、燃料あるいは電力）の使用量と環境影響物質排出量を関連付ける係数であり、各要素に対して式(1)で表すことができる。

$$EM_i = E_i \times W_i \quad (1)$$

ここで、 EM_i ：要素 i からの環境影響物質排出量、 E_i ：要素 i の排出係数、および W_i ：要素 i の使用量である。

現在、種々の機関によって様々な要素の排出係数や推定方法が整備されており、排

出係数の推定方法は積上げ法および産業連関分析法に大別される³⁾。本検討では産業連関分析法に準じる。具体的には、インフラ構造物を構成する各要素の排出係数を推定するため、1995年度の産業連関表³⁾を参照するとともに、産業連関分析法に則して各要素の排出係数を決定する。

産業連関分析法では、要素の排出係数を製造、流通および最終消費の各段階や、国内外の消費支出および資本形成等の影響に分けることができ、要素 i の排出係数を式(2)のように表すことができる。

$$E_i = e_{ip} + e_{id} + e_{ic} + \dots \quad (2)$$

ここで、 E_i ：製造・流通・消費等の全工程を考慮した要素 i の排出係数、 e_{ip} ：要素 i の製造に伴う排出係数、 e_{id} ：要素 i の流通に伴う排出係数、および e_{ic} ：要素 i の消費に伴う排出係数である。すなわち、要素 i の排出係数 E_i は各工程において詳細に区分することができる。

表3.1は、インフラ構造物を構成する代表的な要素（資材類としてコンクリートおよび鉄筋、ならびに燃料類としてガソリンおよび軽油）に関して、産業連関分析法³⁾に即し、さらに文献⁴⁾⁵⁾と照合することで推定したCO₂、SO₂およびNO₂の排出係数を示している。一方、同じく代表的な構成要素として挙げられる電力に関しては、生産段階（発電時）においてCO₂、SO₂およびNO₂が発生するものの、流通および消費段階において環境負荷は発生しない。ただし、電力は種々の需要を誘発するポテンシャルを有している⁵⁾。そこで、電力の排出係数 (E_e) には発電時の環境影響物質排出 (e_{ep}) に加え、社会の電力需要を誘発することに起因する環境影響物質の排出（重要誘発排出； e_{em} ）、およびインフラ構造物等の資本形成を誘発することによる環境影響物質排出（資本形成誘発排出； e_{ef} ）を考慮する必要がある。

表3.1 資材類および燃料類の排出係数

(a) CO ₂					
	単位	生産 e_{ip}	流通 e_{id}	消費 e_{ic}	計 E_i
<u>資材類</u>					
コンクリート	t-CO ₂ /t	0.198	0.007	0	0.205
鉄筋	t-CO ₂ /t	0.927	0.014	0	0.941
<u>燃料類</u>					
ガソリン	kg-CO ₂ /L	0.492	0.070	2.321	2.883
軽油	kg-CO ₂ /L	0.308	0.039	2.657	3.004

(b) SO ₂					
	単位	生産 e_{ip}	流通 e_{id}	消費 e_{ic}	計 E_i
<u>資材類</u>					

コンクリート	kg-SO ₂ /t	0.089	0.010	0	0.099
鉄筋	kg-SO ₂ /t	1.466	0.030	0	1.496
<u>燃料類</u>					
ガソリン	g-SO ₂ /L	2.532	0.175	0.035	2.742
軽油	g-SO ₂ /L	1.694	0.077	2.618	4.389

(c) NO₂

	単位	生産 e_{ip}	流通 e_{id}	消費 e_{ic}	計 E_i
<u>資材類</u>					
コンクリート	kg-NO ₂ /t	0.433	0.028	0	0.461
鉄筋	kg-NO ₂ /t	3.294	0.082	0	3.376
<u>燃料類</u>					
ガソリン	g-NO ₂ /L	3.059	0.457	2.566	6.082
軽油	g-NO ₂ /L	2.080	0.231	17.60	19.91

また、表3.2は、CO₂、SO₂およびNO₂に関する産業連関分析法から推定した電力の排出係数の内訳を示している⁵⁾。

表3.2 電力の排出係数

	単位	直接排出 e_{ep}	消費誘発 e_{em}	資本形成誘発 e_{ef}	計 E_e
CO ₂	kg-CO ₂ /kWh	0.424	0.106	0.034	0.564
SO ₂	g-SO ₂ /kWh	0.254	0.159	0.048	0.461
NO ₂	g-NO ₂ /kWh	0.265	0.256	0.094	0.615

なお、表3.1および表3.2に示した排出係数は、いずれも日本での実績に対する産業連関分析法に基づく値であることに留意されたい。言うまでもなく、バンコク地下鉄を対象とする場合には、タイでの実績に基づく排出係数を用いることが望ましいが、現状では産業連関分析法に基づく排出係数が未整備であることから、本検討では、日本での産業連関分析法に基づく排出係数を適用するものとした。なお、日本は現在省エネルギーの先進国であることから、日本の排出係数はタイでの実際の値に比較して小さい値となっているものと推察される。

式(2)に着目し、環境負荷・便益評価手法における環境影響領域を設定する。すなわち、インフラ構造物を構成する種々の要素 i の排出係数を、左辺 E_i で表現する場合はグローバルに捉えられる環境影響領域（グローバルな環境影響領域）を設定することになる。一方、種々の要素 i の使用条件等を考慮して特定の右辺 e_i で表現する場合は、インフラ構造物の整備事業自体が環境へ直接及ぼすローカルな環境影響領域であると定義する。本定義は、インフラ構造物が様々な要素から構成されており、全ての要素に関する製造、流通および消費段階における環境影響物質排出量を把握しなければならない場合（ E_i として示される排出係数を用いる場合）や、例えば建設機械や自動車

からのCO₂排出のような消費段階のみに関する環境影響物質排出量を把握しなければならない場合（ e_i として示される排出係数を用いる場合）もある。

元来、例えば表 3.1 および表 3.2 のように推定された要素 i の排出係数は、技術革新や経済の変化等に依存した変数でなければならない。しかしながら、排出係数は過去の情報等から推定できるものの、排出係数の将来動向を推定することは困難である。そのため、推定された排出係数は時間に依存しない一定値として仮定する。

3.3 環境コストの導入

構築する環境負荷・便益評価手法では、3.1 および 3.2 で述べた環境影響評価期間および環境影響領域の設定の下、インフラ構造物の整備事業に伴う環境影響物質の排出量を推定することができる。さらに、本評価手法は推定された環境影響物質の排出量を、後述する被害費用の原単位を用いて貨幣価値（環境コスト）への換算を試みる。

近年ではCO₂の排出権取引で代表されるように、環境影響物質の排出に対して対価を支払う概念が定着しつつあり、この対価を被害費用¹⁾と呼ぶ。また、環境影響物質の単位排出量に対する被害費用が原単位である。ここで、環境影響物質の被害費用原単位に関しては、現在に至るまで多くの研究が実施されている¹⁶⁾。なお、各々企業においては、様々な研究ならびに排出権取引における市場価格を参考に、自社の社会的責任を明確にするべく、環境影響物質の被害費用原単位を企業独自で設定している。表 3.3 は、CO₂等の環境影響物質の被害費用原単位をまとめている¹⁶⁾。これより、被害費用原単位のばらつきは大きく、統一された原単位として定まっていない現状にある。よって、本研究では既往の研究や企業の算定した環境影響物質の被害費用原単位を参照することで被害費用原単位に変動幅を設定し（表 3.3 参照）、インフラ構造物の整備事業が及ぼす環境影響の貨幣換算（環境コストの導入）を試みる。

表 3.3 環境影響物質の被害費用原単位

環境影響物質	被害費用原単位	
二酸化炭素 CO ₂	2.6～9.6	(円/kg-CO ₂)
二酸化硫黄 SO ₂	67.3～1,010	(円/kg-SO ₂)
二酸化窒素 NO ₂	73.7～113	(円/kg-NO ₂)
メタン CH ₄	16.9	(円/kg-CH ₄)
酸化窒素 N ₂ O	218	(円/kg-N ₂ O)
アンモニア NH ₃	403	(円/kg-NH ₃)
塩化水素 HCL	175	(円/kg-HCL)
浮遊粒子状物 PM _{2.5}	403～1,820	(円/kg-PM _{2.5})
浮遊粒子状物 PM ₁₀	2,450～11,100	(円/kg-PM ₁₀)

なお、表 3.3 に示した環境影響物質の被害費用原単位は、日本での実績に対する産業連関分析法に基づく値であることに留意されたい。すなわち、前述の排出係数と同様に、タイでの原単位が未整備であることから、本検討では日本での値を適用した。

I-4 バンコク地下鉄整備に伴う環境負荷・便益

バンコク地下鉄整備事業ではインフラ構造物としての地下鉄ネットワークを建設および操業するため、資材や燃料を消費することで環境影響物質を排出する。一方、バンコク地下鉄の操業によっては、自動車交通から鉄道交通へと交通手段の推移をもたらす、結果的に周辺域における自動車交通量の減少および自動車走行速度の増加が期待される。これを環境影響の観点から考えると、バンコク地下鉄が整備された場合では、操業段階において元来自動車交通によって排出されていた環境影響物質の排出を削減することができる。よって、バンコク地下鉄の操業は環境に対して便益を供することが期待できる。なお、上記シナリオは温室効果ガス排出権取引等におけるベースライン&クレジットの概念¹⁾に基づく。

表 4.1 は、バンコク地下鉄整備事業において想定される環境負荷および便益に関する要因の一部を示しており、環境負荷・便益評価には様々な項目を考慮する必要がある。なお、本評価ではバンコク地下鉄整備事業における建設段階ならびに操業段階で用いられる資材、燃料および電力に起因する環境影響物質（CO₂、SO₂およびNO₂）の排出を環境負荷、さらに、バンコク地下鉄の操業がもたらす周辺自動車交通量の減少に伴う環境影響物質の排出量削減を環境便益として限定した。

表 4.1 バンコク地下鉄整備事業に伴う環境負荷・便益要因

	環境負荷	環境便益
建設段階	資材、燃料および電力の製造・運搬・消費 作業員の集中動員 周辺域における交通規制（渋滞促進）等	
操業段階	電力の製造・運搬・消費 利用者の集中等	周辺域における自動車交通量の削減

注) 環境負荷・便益の対象には、環境影響物質の排出、騒音、振動ならびに臭気等が挙げられる。

4.1 建設段階における環境負荷

バンコク地下鉄の建設段階における環境影響物質の排出量(環境負荷量)の推定は、グローバルおよびローカルな環境影響領域に区別して実施する。ここで、建設段階における評価対象はトンネル部、駅部、車両および車両基地である。なお、バンコク地下鉄の建設に用いられた各資材、燃料および電力の使用量は表 4.2 に示しており、単価数量表 BOQ (Bill of Quantities) および工期日程等から推定している。

表 4.2 バンコク地下鉄の建設に用いられた資材、燃料および電力量
(a) 資材類

		距離 (m)	単位長さ当り使用量 (t/m)		資材使用量 ($\times 10^3$ t)	
			コンクリート	鉄筋	コンクリート	鉄筋
地下トンネル シールドトンネル	廃土 セグメント	32,003				
		32,003	12.7	0.9	406.4	28.8
開削トンネル (幅 25 m)	廃土 埋戻し 地下連壁 スラブ	337				
		337				
		337	134.4	12.2	45.3	4.1
		337	168.0	15.2	56.6	5.1
開削トンネル (幅 7.5 m)	廃土 埋戻し 地下連壁 スラブ	190				
		190				
		190	94.1	8.5	17.9	1.6
		190	43.7	4.0	8.3	0.8
開削トンネル (幅 5 m)	廃土 埋戻し 地下連壁 スラブ	785				
		785				
		785	94.1	8.5	73.9	6.7
		785	29.1	2.6	22.9	2.1
開削トンネル (幅 5 m)	廃土 埋戻し 地下連壁 スラブ	66				
		66				
		66	94.1	8.5	6.2	0.6
		66	42.6	3.9	2.8	0.3
トラックスラブ トンネル部	コンクリート コンクリート 強化材	32,003	2.2		70.4	
		32,003	1.9		60.8	
		32,003		0.1		3.2
駅部	コンクリート コンクリート 強化材	4,644	9.4		43.7	
		4,644	1.9		8.8	
		4,644		0.1		0.5
地下駅	廃土 埋戻し 地下連壁 スラブ	4,644				
		4,644				
		4,644	134.4	12.2	624.2	56.7
		4,644	168.0	15.2	780.2	70.6
			合 計		2,228.4	181.1

(b) 燃料および電力

	電力消費率	定格出力	総稼動時間	電力使用量
シールドマシン	0.429 (台)	1,000 (kW)	9.60×10^4 (hrs)	4.12×10^7 (kWh)
	燃料消費率	定格出力	総稼動時間	燃料消費量
バックホウ (小型)	0.175 (L/kWh)	100 (kW)	9.60×10^4 (hrs)	1.68×10^6 (L)
バックホウ (大型)	0.175 (L/kWh)	250 (kW)	5.38×10^5 (hrs)	2.35×10^7 (L)
クラムシェル	0.175 (L/kWh)	100 (kW)	3.52×10^5 (hrs)	6.16×10^6 (L)
	燃料消費率	片道輸送距離	輸送土砂量	燃料消費量
ダンプカー	0.0612 (L/km-t)	10 (km)	8.52×10^6 (t)	5.21×10^6 (L)

表 4.3 は、バンコク地下鉄の建設段階においてグローバルおよびローカルな環境影響領域へ排出された CO_2 、 SO_2 および NO_2 量を示している。ここで、グローバルもしくはローカルな環境影響領域は、建設に用いられた各資材、燃料および電力の排出係数を E_i もしくは e_{ic} (電力に関しては $e_{em}+e_{ef}$) と表現することで設定している。

以下に、本算定結果について考察を加える。

まず、CO₂の算定結果において、産業連関分析法に基づき算定されたグローバルな環境影響領域におけるCO₂の排出量（表4.3(a)参照）は、文献3)でまとめられた積上げ法により各土木構造物単体の建設として統合された排出係数（表4.4参照）を別途用いて算出される環境影響物質（CO₂）の排出量と比較した結果、両者のCO₂排出量にほぼ同レベルの値となっている。このことより、本検討において推定されたグローバルな環境影響領域におけるCO₂排出量はおよそ妥当なレベルであると推察される。

表 4.3 バンコク地下鉄の建設段階における環境負荷の推定

(a) グローバルな環境影響領域

	使用量 W	CO ₂ 排出係数 E_i	SO ₂ 排出係数 E_i	NO ₂ 排出係数 E_i	CO ₂ 排出量 $E_i \times W$	SO ₂ 排出量 $E_i \times W$	NO ₂ 排出量 $E_i \times W$
コンクリート	2,230 ($\times 10^3$ t)	0.205 (t-CO ₂ /t)	0.099 (kg-SO ₂ /t)	0.461 (kg-NO ₂ /t)	457 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	221 (t-SO ₂)	1,028 (t-NO ₂)
鉄筋	180 ($\times 10^3$ t)	0.941 (t-CO ₂ /t)	1.496 (kg-SO ₂ /t)	3.376 (kg-NO ₂ /t)	170 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	270 (t-SO ₂)	608 (t-NO ₂)
燃料(軽油)	36.6 ($\times 10^3$ t)	3.000 (t-CO ₂ /kL)	4.390 (kg-SO ₂ /kL)	19.9 (kg-NO ₂ /kL)	110 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	161 (t-SO ₂)	728 (t-NO ₂)
電力	41.2 ($\times 10^6$ kWh)	0.564 (kg-CO ₂ /kWh)	0.461 (g-SO ₂ /kWh)	0.615 (g-NO ₂ /kWh)	23.2 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	19.0 (t-SO ₂)	25.3 (t-NO ₂)
合計					760.2 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	671.0 (t-SO ₂)	2,389.3 (t-NO ₂)

(備考) 表中の排出係数 E_i は、表 3.1 および表 3.2 に基づく。

(b) ローカルな環境影響領域

	使用量 W	CO ₂ 排出係数 e_{ic}	SO ₂ 排出係数 e_{ic}	NO ₂ 排出係数 e_{ic}	CO ₂ 排出量 $e_{ic} \times W$	SO ₂ 排出量 $e_{ic} \times W$	NO ₂ 排出量 $e_{ic} \times W$
コンクリート	2,230 ($\times 10^3$ t)	0 (t-CO ₂ /t)	0 (kg-SO ₂ /t)	0 (kg-NO ₂ /t)	0 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	0 (t-SO ₂)	0 (t-NO ₂)
鉄筋	180 ($\times 10^3$ t)	0.941 (t-CO ₂ /t)	0 (kg-SO ₂ /t)	0 (kg-NO ₂ /t)	0 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	0 (t-SO ₂)	0 (t-NO ₂)
燃料(軽油)	36.6 ($\times 10^3$ t)	2.660 (t-CO ₂ /kL)	2.62 (kg-SO ₂ /kL)	17.6 (kg-NO ₂ /kL)	97.3 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	95.9 (t-SO ₂)	644 (t-NO ₂)
電力	41.2 ($\times 10^6$ kWh)	0.140 (kg-CO ₂ /kWh)	0.207 (g-SO ₂ /kWh)	0.350 (g-NO ₂ /kWh)	5.77 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	8.53 (t-SO ₂)	14.4 (t-NO ₂)
合計					103.1 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	104.4 (t-SO ₂)	658.4 (t-NO ₂)

(備考) 表中の排出係数 e_{ic} は表 3.1 および表 3.2 に基づく。

表 4.4 積上げ法における統合された排出係数を用いた環境負荷の推定

	使用量 W	CO ₂ 排出係数 E	CO ₂ 排出量 $E \times W$ ($\times 10^3$ t-CO ₂)
本体構造物			
シールドトンネル	32,003 (m)	8.84 (t-CO ₂ /m)	283
開削トンネル	1,378 (m)	16.43 (t-CO ₂ /m)	22.6
盛土	328.2 (m)	6.49 (t-CO ₂ /m)	2.13
付帯構造物			
スラブ軌道 ⁴	57,476 (m)	0.29 (t-CO ₂ /m)	16.4

⁴ ここに示すスラブ軌道の延長は、表 4.2 に示すトンネル（シールド・開削）のスラブ軌道に、デポへの引き込み線のスラブ軌道を加えた値を示す。

地下駅	18 (駅)	31,130 (t-CO ₂ /駅)	560
車両基地	1 (箇所)	6,123 (t-CO ₂ /箇所)	6.12
車両			
アルミニウム車両	99 (両)	91.3 (t-CO ₂ /両)	9.04
		合 計	899.3

一方、SO₂およびNO₂については、CO₂のように積上げ法における統合された排出係数が得られていないことから、厳密な意味でその妥当性について検証することは出来ない。しかし、排出量の算定実績が最も多いCO₂を対象とした比較においてその妥当性が確認されていることから、産業連関分析法に基づき算定されたグローバルな環境影響領域におけるSO₂およびNO₂の排出量（表 4.3 (a)参照）の算定結果も妥当であると思料される。

次に、ローカルの排出係数を用いた算定結果について検討を加える。まず、ローカルな環境影響領域における総CO₂排出量（表 4.3(b)参照）は、グローバルな環境影響領域における総排出量（表 4.3(a)参照）のおよそ1/8（103.1/760.2）と小さな値となっている。同様に、SO₂およびNO₂についても、ローカルな環境影響領域における総CO₂排出量（表 4.3(b)参照）は、グローバルな環境影響領域における総排出量（表 4.3(a)参照）に比較して、それぞれ約1/7（104.4/671.0）および約1/3（658.4/2,389.3）と小さな値となっている。

ここで、現状では、環境影響評価においてグローバルな排出係数とローカルの排出係数のいずれかを用いることが妥当であるとの統一的な見解は得られていない。しかし、グローバルな環境影響領域における産業連関分析法と積上げ法でのCO₂排出量の比較に示したように、現状でのLCAにおいてはグローバルな環境影響領域を用いることが一般的である。また、本事業のようにODAという世界規模での事業においては、地球全体としての環境影響物質排出量の制御という観点からの検討が必要であると推察される。しかし、このグローバルあるいはローカルの排出係数のいずれかを用いるかについては、今後の検討課題であると考えられる。

なお、この建設段階での環境影響物質排出量の算定結果については、以下の理由からその排出量自体が多いか少ないかを議論することは適切でないと推察される。すなわち、社会基盤施設の建設段階において関連する各々要素から排出される環境影響物質量は、例えば資材類、燃料類または重機類に関する環境影響物質の排出係数として種々の機関から公表されている。また、個別の建設工法に対する環境影響物質の排出に関する事例報告も見受けられる。しかしながら、環境影響物質の排出量を社会基盤施設の建設段階として総合的に検討した事例は少ないと言える。このため、その数値の大小関係については、後述の環境コストにおいて検討を加えるものとする。

ただし、上記のような制約があるとは言え、バンコク地下鉄で代表されるインフラ構造物の建設に伴うグローバルな環境負荷を低減するためには、再生資源等の製造時

に考慮される排出係数が小さい資材を積極的に使用することが重要であることは言うまでもない。また、**輸送に係る環境への影響という点からは資材の地元での調達も有効であると推察される。**加えて、建設段階における施工条件（工法・機材配置等）による環境影響物質排出量の削減効果に関する検討も不可欠である。

このような再生資材の活用、調達への配慮および施工条件による環境影響への配慮を建設業者に促すためには、**入札評価段階において、現在日本の国土交通省が導入している総合評価方式のように、建設コストの評価点に環境影響評価等に関する技術提案を定量的に評価した技術提案点を加算し、総合的に評価する入札制度の導入が有効な方策になるものと思料される。**

4.2 操業段階における環境負荷および便益

1) 環境負荷

バンコク地下鉄の操業段階における環境負荷は、主として電力消費に起因する。なお、バンコク地下鉄の操業段階における電力消費量は、地下鉄走行および付帯施設運行を合計して約 120×10^3 MWh（2005年度）と実施母体である MRTA より報告されている。また、バンコク地下鉄の電力消費量は、今後も運営本数および車両数の増加等に伴い増大することが予測される。そこで、電力消費量の将来予測には、バンコク地下鉄整備事業の計画段階において予測された運営・維持管理費用の将来動向と同程度に電力消費量も増加すると仮定し、電力消費量の将来動向を図 4.1 に示すように推定した。

表 4.5 は、バンコク地下鉄の操業段階においてグローバルおよびローカルな環境影響領域へ排出された CO_2 、 SO_2 および NO_2 量を示している。ここで、グローバルもしくはローカルな環境影響領域は、建設段階と同様、操業に伴って消費される電力の排

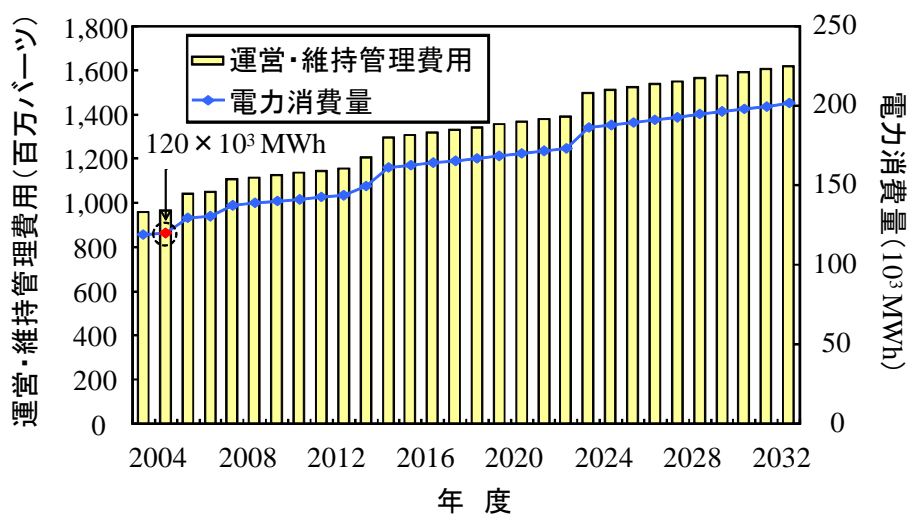


図 4.1 バンコク地下鉄の運営・維持管理費用の将来動向に基づく電力消費量の推定

出係数を E_i もしくは $e_{em}+e_{ef}$ として考慮することで設定している。なお、バンコク地下鉄での検討対象とする操業期間（供用年数）は、事前審査時点での経済的内部収益率 EIRR 算定の費用・便益解析での評価期間に準じて 30 年間として想定している。表 4.5 より、グローバルおよびローカルな環境影響領域においてバンコク地下鉄で評価期間として想定した 30 年に及ぶ操業は、建設段階（表 4.3 参照）と比較して多量の環境影響物質を排出しているといえる。

表 4.5 バンコク地下鉄の操業段階における環境負荷の推定

(a) グローバルな環境影響領域

年 度	電力使用量 W ($\times 10^6$ kWh)	CO ₂ 排出係数 E_e (kg-CO ₂ /kWh)	SO ₂ 排出係数 E_e (g-SO ₂ /kWh)	NO ₂ 排出係数 E_e (g-NO ₂ /kWh)	CO ₂ 排出量 $E_e \times W$ ($\times 10^3$ t-CO ₂)	SO ₂ 排出量 $E_e \times W$ (t-SO ₂)	NO ₂ 排出量 $E_e \times W$ (t-NO ₂)
2004	119	0.564	0.461	0.615	67.1	54.9	73.1
2005 (中略)	120	0.564	0.461	0.615	67.7	55.3	73.8
2033	201	0.564	0.461	0.615	113.3	92.7	123.6
合 計					2,782.4	2,274.3	3,034.1

(備考) 表中の排出係数 E_e は、表 3.2 に基づく。

(b) ローカルな環境影響領域

年 度	電力使用量 W ($\times 10^6$ kWh)	CO ₂ 排出係数 $e_{em}+e_{ef}$ (kg-CO ₂ /kWh)	SO ₂ 排出係数 $e_{em}+e_e$ (g-SO ₂ /kWh) _f	NO ₂ 排出係数 $e_{em}+e_{ef}$ (g-NO ₂ /kWh)	CO ₂ 排出量 $(e_{em}+e_{ef}) \times W$ ($\times 10^3$ t-CO ₂)	SO ₂ 排出量 $(e_{em}+e_{ef}) \times W$ (t-SO ₂)	NO ₂ 排出量 $(e_{em}+e_{ef}) \times W$ (t-NO ₂)
2004	119	0.140	0.207	0.350	16.7	24.6	41.6
2005 (中略)	120	0.140	0.207	0.350	16.8	24.8	42.0
2033	201	0.140	0.207	0.350	28.1	41.6	70.4
合 計					690.7	1,021.2	1,726.7

(備考) 表中の排出係数 $e_{em}+e_{ef}$ は、表 3.2 に基づく。

ただし、前述のように、インフラ構造物を対象とした環境影響物質排出量の算定事例が少ないことから、この操業段階における環境負荷物質の排出量自体が多いか少ないかは議論できない。そのため、以下に参考値として現状でのバンコク地下鉄と東京メトロにおける使用電力の比較を表 4.6 に示す。

表 4.6 バンコク地下鉄と東京メトロにおける使用電力の比較

	電力消費量 (MWh/年) (2005 年度)	総路線長 (km)	単位路線あたりの 電力消費量(MWh/km)
東京メトロ	約 920,000	183.2	5,022
バンコク地下鉄	約 120,000	20.1	5,970

表 4.6 に示すように、バンコク地下鉄における単位路線あたりの電力消費量は、東京メトロに比較して約 19%程度大きい。この要因については、現段階で入手可能な資料では十分な分析は可能ではないが、ここで多少の考察を試みる。

1) 地下鉄車両により消費される電力は、走行車両数、車両のエネルギー効率（回生ブレーキ使用の有無あるいは軽量車両の使用）等の様々な要因に依存するため、現状でのバンコク地下鉄と東京メトロの地下鉄車両により消費される電力を単純に比較することはできない。ただし、現状でのバンコク地下鉄運行車両数は、東京メトロに比較して少ない。また、車両が加速するためのエネルギー効率の関係から、駅間隔が短い場合には電力消費量が大きくなることが知られているが、マクロな比較ではあるが、駅平均間隔は、東京メトロで 0.75~1.20km、バンコクで 1.12km (20.1km/18 駅) とほぼ同等である。このような単純な比較からは、表 4.6 に示す使用電力の単位路線あたりの電力消費量の相違に関して車両は無関係であるとも推察されるが、回生ブレーキ使用の有無あるいは軽量車両の使用等の車両のエネルギー効率という点も配慮すべきと思料される。

2) 1) の事項より、バンコク地下鉄における単位路線あたりの電力消費量が東京メトロより多いことの要因としては様々な事項が想定されるが、その一つとして、地下鉄駅部におけるエアコンの使用が想定される。なお、ここでのエアコンとしては、温度調節のみならず換気立坑からの排気も含む。仮に、エアコンに起因すると仮定した場合に、バンコク地下鉄と東京メトロでの相違として、以下のような事項が挙げられる。

①バンコクおよび東京の年間平均気温は、それぞれ 29.0℃および 15.9℃である。このため、地下駅での単位面積当りでの温度調整としてのエアコンによる電力使用量は、バンコクの方が極めて大きくなる。

②①に加えて、東京メトロの多くの駅は、JR、都営地下鉄および私鉄等の他の鉄道事業者の駅と接続駅となっている。これに関連して、東京メトロ全 168 駅中例えば目黒駅のような地下にホームがある 5 駅程度では、温度調整としてのエアコンによる電力使用量は他の鉄道事業者と分担されていることも、多少電力消費量が軽減されることの一因とも思料される。

③後述する特定テーマⅢ（バンコク地下鉄駅に及ぼす地下水汲み上げに起因する地盤沈下の影響評価）に示すように、バンコク地下鉄は地盤沈下への対応、および施工性に係わる地盤条件を考慮して、その設置深度が地表面から 15~30m（地下 3 階から 5 階に相当）と、単独路線としてはかなり深いレベルに設置されている。

この設置レベルの大小は、東京メトロの設置深度⁵と比較するとその傾向が明らか

⁵東京メトロ各路線の平均深度は、以下の（ ）内数字に示す通りである。

銀座線 (8.82m)、丸の内線 (8.75m)、日比谷線 (12.07m)、東西線 (13.4m)、千代田線 (15.9m)、有楽町線 (17.5m)、半蔵門線 (18.08m)、南北線 (20.33m)、副都心線 (15m)
注) 帝都高速度交通営団「営団地下鉄ハンドブック」に基づき作成

となる。すなわち、脚注 5 に示すように、東京メトロでは、基本的に古い路線は単独で建設されたため設置深度が小さい（8-13m 程度）が、新しい路線は既設路線と交差するために、設置深度が大きくなる（15-20m）になっている傾向が認められる。この地下駅の設置深度が大きくなることは、温度調整としてのエアコンの対応すべき容積、および換気立坑の延長が長くなることによる排気量の増加につながる。このため、バンコク地下鉄より全般的に設置深度が小さい東京メトロと比較した場合には、単純な単位路線での消費電力の比較では、バンコク地下鉄の方が大きくなる可能性があるかと推察される。

なお、バンコク地下鉄においては、各駅のプラットフォームにドアシールドが設置されている。これは、ユニバーサルデザインの観点からの障害者・老人への配慮あるいは安全性の向上への配慮に加えて、省エネを目的として設置されたものである。このことから、ドアシールドにより省エネを図っているにもかかわらず、2) に示すような理由から、表 4.6 に示すように、バンコク地下鉄における単位路線あたりの電力消費量は、東京メトロに比較して大きい結果となっているものと解釈すべきであると推察される。しかし、上記の考察は、前述のように、限定的な情報に基づくものである。しかし、本検討で取り上げた操業段階での電力使用量に起因する環境影響は、環境会計において重要な評価項目となる。このため、今後地下鉄の設置深度および構造に基づく、温度調節および換気立坑からの排気に関するエネルギー効率も重要な検討項目になるものと推察される。

以上の事項から、地下鉄で代表されるインフラ構造物の整備事業では、建設段階における環境負荷が一般的に着目される傾向にあるものの、表 4.3 および表 4.5 を比較すれば、長期に及ぶ操業段階における環境負荷に関しても詳細な考慮が必要であり、建設段階と操業段階を総合的に考慮した環境負荷を評価する必要がある。

2) 環境便益

バンコク地下鉄の操業に伴う環境便益は、地下鉄周辺部における自動車交通量の減少に伴う環境影響物質の排出量削減が挙げられ、自動車交通に伴う環境影響物質の排出量を決定する必要がある。

具体的には、自動車の平均速度と燃料消費量の関係をシャシダイナモ試験等⁷⁾から求め、自動車走行速度、自動車交通量および燃料の排出係数（表 3.1 参照）を用いて、自動車交通が及ぼす環境影響物質の排出量を推定する。ここで、図 4.2 はシャシダイナモ試験から得られた自動車の平均速度と燃料消費量の典型的な関係である⁷⁾。

次いで、バンコク地下鉄が整備された場合（以降、“with”と略す）および整備されなかった場合（以降、“without”と略す）における地下鉄周辺部での自動車交通量および自動車走行速度の情報が必要となる。そこで、with および without における地下鉄周辺部での自動車交通量（削減量）の将来予測には、交通量モデルシミュレーション手法である eBUM（extended Bangkok Urban Model）を適用する。eBUM は、OCMRT

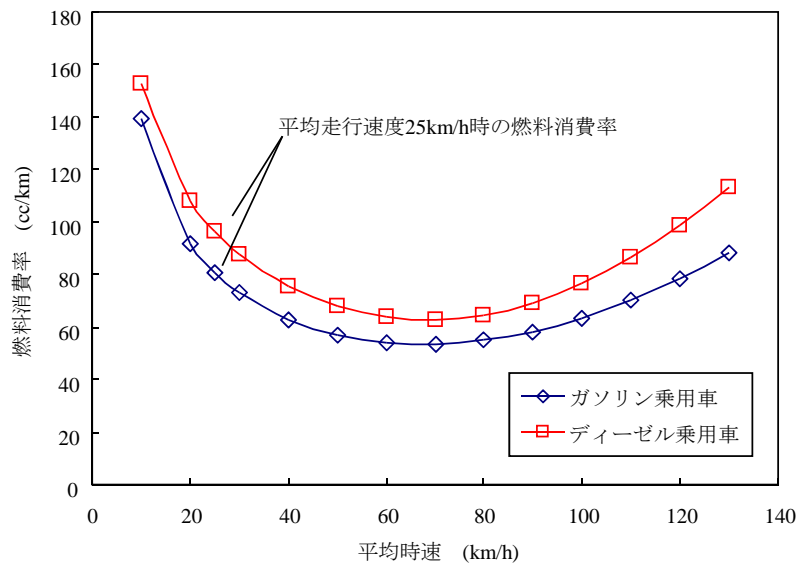


図 4.2 自動車走行における時速と燃料消費率の関係

(タイ道路交通管理委員会事務局) により開発された 4 段階 (発生・集中、分布交通量、分担交通量、配分交通量) を評価するモデルである。この手法を用いて、with において求められた交通容量および交通特性と、実施された交通量調査結果 (バンコク首都圏における交通容量および交通特性等) との整合性を確認した上、without における交通容量および交通特性を導く。この eBUM による 2005 年時点での交通量シミュレーション結果を、表 4.7 に示す。

表 4.7 eBUM による交通量シミュレーション結果 (2005 年)

項目	with	without	変 動
PCU ⁶ -Mkm	197.03	197.42	386,000km/日の減少
PCU-hr	7,667,276	7,701,019	34,000 hr/日の減少
平均速度(km/hr)	25.70	25.64	0.06km/hr のスピードアップ

⁶ PCU : Passenger Car Unit の略, 「乗用車換算台数」の意味であり、様々な車輛の交通車輛台数を乗用車の台数に換算した単位。

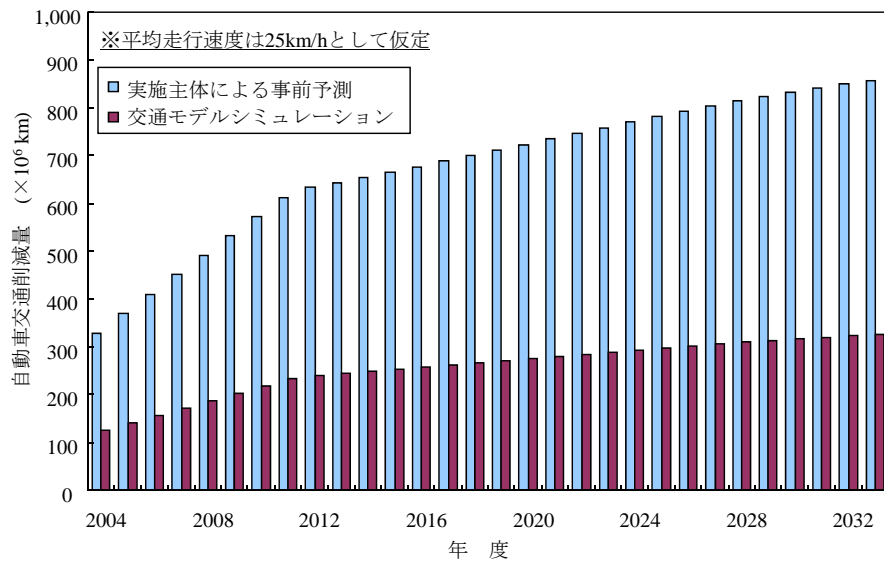


図 4.3 バンコク地下鉄の操業段階における自動車交通削減量の推定

表 4.7 に示すように、2005 年時点での with と without での差異はわずかである。これは、バンコク首都圏における堅調な外部経済の成長により、自動車数が増加したことを反映したものである。なお、表 4.7 に示すシミュレーション結果において、平均速度(km/hr)はほとんど変化していないため、以後環境便益を算定する上での数値としては、自動車走行速度を 25 km/h の一定値として仮定する。なお、eBUM によるシミュレーション結果は 2005 年時点の値であるため、地下鉄周辺部での自動車交通量削減量の予測としては、バンコク地下鉄整備事業の審査段階で予測した 2004～2033 年の交通量削減量の推移傾向と、比例関係を仮定して算定した関係を図 4.3 に示す。

次に、図 4.3 において予測された自動車交通削減量を基本に、自動車走行速度を 25 km/h の一定値として仮定（図 4.2 参照）することで推定された自動車交通に伴う燃料消費削減量を図 4.4 に示している。

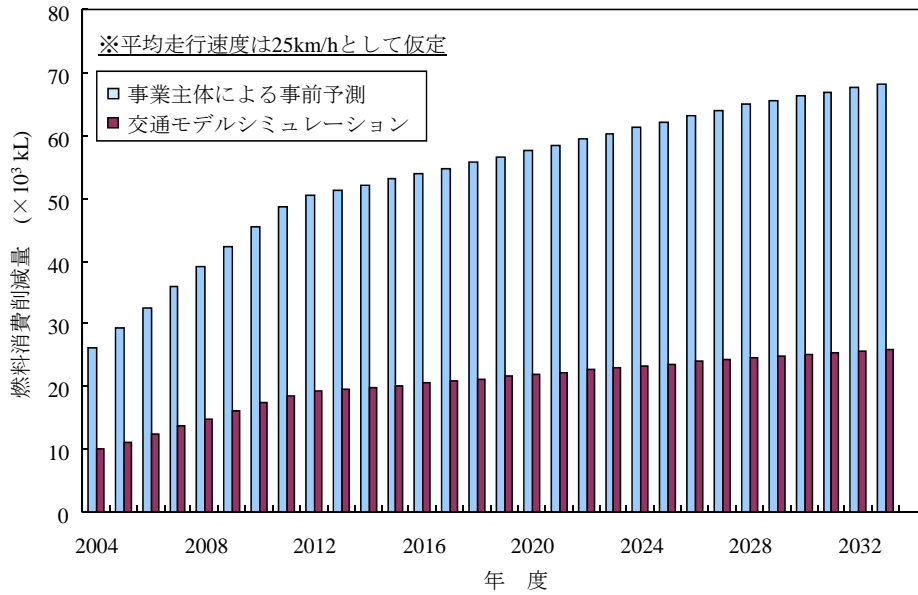


図 4.4 バンコク地下鉄の操業段階における燃料削減量の推定

なお、参照した交通量モデルシミュレーションの妥当性を確認するため、図 4.5 は (i)バンコク地下鉄利用者に対して実施した“地下鉄開業以前に利用していた交通機関”に関するアンケート調査結果（2005 年実施）、(ii)バンコク都における交通手段実績（1994 年実績）、(iii)交通量モデルシミュレーション、ならびに(iv)バンコク地下鉄整備事業の実施主体による事前予測から最終的に推定された自動車交通に起因する CO₂ 排出削減量（年間量）を示している。なお、(i) および(ii)の推定法は、いずれも現段

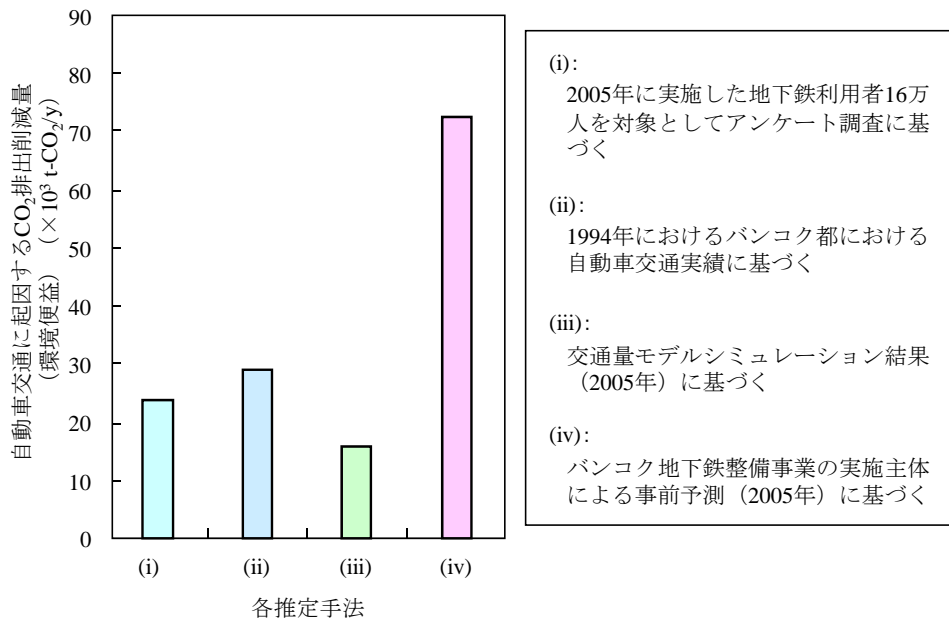


図 4.5 各推定手法を用いた自動車交通に起因する年間 CO₂ 排出削減量

階での地下鉄利用者 16 万人が地下鉄を利用することで削減されたバスおよび自動車（タクシーを含む）による大気汚染物質の低減効果を簡易的に評価したものである。

これより、参照した交通量モデルシミュレーションを用いて最終的に推定される CO₂ 排出削減量は、他の手法から推定される CO₂ 排出削減量と比較してオーダーレベルを伴う違いがないことから、環境影響物質の将来的な排出削減量を妥当に予測できていると思料される。

表 4.8 は、グローバルおよびローカルな環境影響領域において、バンコク地下鉄の操業に伴う周辺自動車交通から排出される CO₂、SO₂ および NO₂ の削減量（環境便益）を表している。なお、表 4.8 の前提として、バンコク地下鉄の操業期間（供用年数）は 30 年間として仮定しており、自動車交通に伴う燃料消費削減量は図 4.4 における交通量モデルシミュレーション結果を用いている。さらに、グローバルもしくはローカルな環境影響領域は、自動車交通に関連する消費燃料（ガソリン）の排出係数を E_i もしくは e_{ic} として表現することで設定している。

表 4.8 (a)より、バンコク地下鉄の操業によって期待されるグローバルな影響領域における環境影響物質の排出削減量（環境便益）は、表 4.5(a)で示された操業に伴う環境影響物質の排出量（環境負荷）と比較して、オーダーレベルを伴う違いがない。

ただし、この結果は、前述のように、本検討がマクロ的な視点からの検討であること、大気汚染物質として 3 つの物質（CO₂、NO₂、SO₂）のみに着目したものであること等、いくつかの課題を有しているに留意されたい。すなわち、自動車からの排出を考慮した場合、被害係数も大きい PM_{2.5} および PM₁₀ について注意が必要である。また、本検討では地下鉄の整備に対して、交通改善効果と運行に伴う電力使用量による影響が相殺されるか、もしくは結果的に CO₂ と SO₂ については負（環境影響増加）となるが、NO₂ に着目した場合、総排出量は抑えられている。さらに、SO₂ についても、全体排出量は増えたとしても、地下鉄整備により、発電所付近での排出は増えるが、道路脇においては排出量が減少し、健康被害の観点からは正（環境改善）の便益を生む可能性もある。

ここで、前述のように、現状での地下鉄整備に伴う交通改善効果の発現が、経済発展に伴う外部効果により当初推定に比較して小さいことから、その環境影響物質の排出削減量（環境便益）は当初の想定に比べて小さい（図 4.4 参照）。このことから、バンコク地下鉄の操業によるグローバルな環境に対して多大な負の影響を与えるものではないと判断される。加えて、今後地下鉄の延伸を含めたマストラ整備に伴う交通改善効果を見込めば、環境影響物質の排出削減量（環境便益）は、確実に操業によるグローバルな環境影響を上回るものと推定される。

一方、表 4.8(b)で示されるローカルな環境影響領域における環境便益（環境影響物質の排出削減量）は、排出量の算定結果と同様に、グローバルな環境影響領域（表 4.8(a)参照）と比較して小さい。この要因として、燃料は消費段階と比較して製造および流通段階において SO₂ および NO₂ を多量に排出する特徴を有するためである（表 3.1

参照)。

表 4.8 バンコク地下鉄の操業段階における環境便益の推定

(a) グローバルな環境影響領域

年 度	燃料削減量 (ガソリン) W	CO ₂ 排出係 数 E_i	SO ₂ 排出係 数 E_i	NO ₂ 排出係 数 E_i	CO ₂ 排出量 $E_i \times W$	SO ₂ 排出量 $E_i \times W$	NO ₂ 排出量 $E_i \times W$
2004	9.9 ($\times 10^3$ kL)	2.88 (kg-CO ₂ /L)	2.74 (g-SO ₂ /L)	6.08 (g-NO ₂ /L)	28.6 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	27.3 (t-SO ₂)	60.5 (t-NO ₂)
2005	11.2 ($\times 10^3$ kL)	2.88 (kg-CO ₂ /L)	2.74 (g-SO ₂ /L)	6.08 (g-NO ₂ /L)	32.2 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	30.7 (t-SO ₂)	68.0 (t-NO ₂)
(中略)							
2033	25.9 ($\times 10^3$ kL)	2.88 (kg-CO ₂ /L)	2.74 (g-SO ₂ /L)	6.08 (g-NO ₂ /L)	74.7 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	71.1 (t-SO ₂)	158 (t-NO ₂)
合 計					1,736 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	1,680 (t-SO ₂)	3,727 (t-NO ₂)

(備考) 表中の排出係数 E_i は表 3.1 に基づく。

(b) ローカルな環境影響領域

年 度	燃料削減量 (ガソリン) W	CO ₂ 排出係 数 e_{ic}	SO ₂ 排出係 数 e_{ic}	NO ₂ 排出係 数 e_{ic}	CO ₂ 排出量 $e_{ic} \times W$	SO ₂ 排出量 $e_{ic} \times W$	NO ₂ 排出量 $e_{ic} \times W$
2004	9.9 ($\times 10^3$ kL)	2.32 (kg-CO ₂ /L)	0.0352 (g-SO ₂ /L)	2.57 (g-NO ₂ /L)	23.1 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	0.350 (t-SO ₂)	25.6 (t-NO ₂)
2005	11.2 ($\times 10^3$ kL)	2.32 (kg-CO ₂ /L)	0.0352 (g-SO ₂ /L)	2.57 (g-NO ₂ /L)	26.0 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	0.394 (t-SO ₂)	28.8 (t-NO ₂)
(中略)							
2033	25.9 ($\times 10^3$ kL)	2.32 (kg-CO ₂ /L)	0.0352 (g-SO ₂ /L)	2.57 (g-NO ₂ /L)	60.2 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	0.913 (t-SO ₂)	66.6 (t-NO ₂)
合 計					1,422 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	21.6 (t-SO ₂)	1,575 (t-NO ₂)

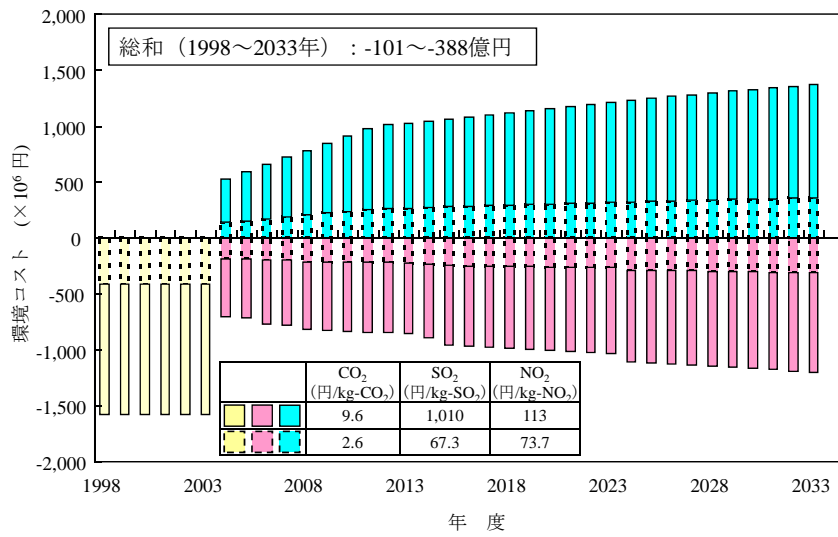
(備考) 表中の排出係数 e_{ic} は表 3.1 に基づく。

I-5 環境コストを導入したバンコク地下鉄整備事業評価

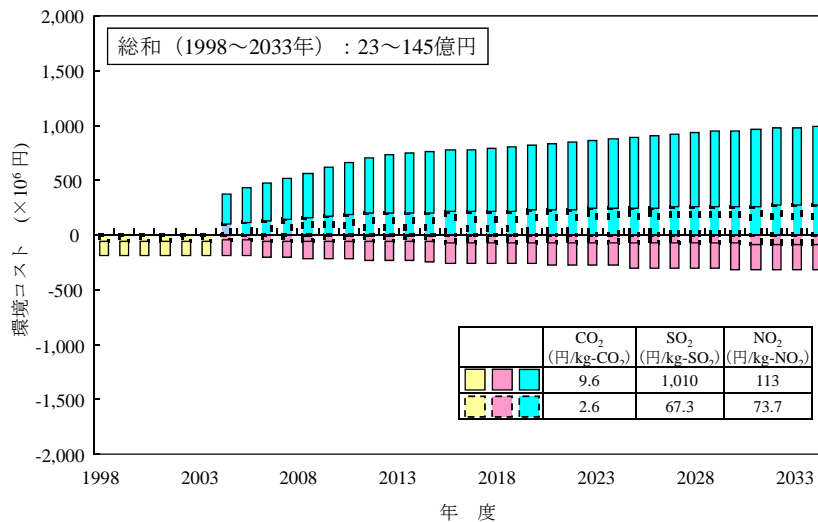
バンコク地下鉄整備事業に関する環境負荷・便益評価では、バンコク地下鉄の建設および操業段階で推定された環境影響物質の排出量を、環境影響物質の被害費用原単位を用いて環境コストとして換算し、環境経済学的な観点から環境影響を考慮したバンコク地下鉄整備の事業評価を試みる。なお、環境影響物質の排出量から環境コストへの換算には、表 3.3 に示す環境影響物質の被害費用原単位を用いる。

図 5.1 は、バンコク地下鉄整備事業に関するグローバルおよびローカルな環境影響領域において推定された環境影響物質 (CO₂、NO₂ および SO₂) の排出量を環境コストとして示している。

まず、バンコク地下鉄整備事業におけるグローバルな環境影響領域を想定した図 5.1 (a) では、評価期間として想定した 30 年に及ぶ操業段階を通して環境コストは正值、すなわち、総合的に環境に対して便益をもたらすことになる。しかし、これに建設段階の環境コストを考慮し、建設ならびに操業段階を合計すると、バンコク地下鉄整備事業は 30 年の操業を想定した場合、101~388 億円の環境会計としては負の値となる。



(a) グローバルな環境影響領域



(b) ローカルな環境影響領域

図 5.1 バンコク地下鉄整備事業における推定された環境コストの推移

一方、ローカルな環境影響領域における環境コストを示した図 5.1(b)では、建設段階において生じる環境コストが操業段階と比較して安価である。従って、建設ならびに操業段階の環境コストを合計すれば、30年の操業を想定したバンコク地下鉄整備事業は23～145億円の環境会計としては正の値となる。

上記のとおり、バンコク地下鉄整備事業が負うべき環境コストは環境影響領域の設定、すなわちグローバルあるいはローカルという領域設定によって異なる結果を得ることとなる。この結果に関する解釈は、以下のように要約される。

1) 地下鉄建設に使用する建設資材および地下鉄操業に関連する電力を、もし地下鉄が

整備されていなくとも生産されていたと仮定すれば、ローカルな環境影響領域を用いることが可能であると解釈される。その結果としての建設段階・操業段階で発生する環境負荷は、地下鉄整備による環境便益に比べて小さいため、環境会計としては正の値と判断される。

- 2) 1) に対して、地下鉄建設に使用する建設資材および地下鉄操業に関連する電力を、地下鉄整備のために生産されたとの仮定すれば、グローバルな環境影響領域を用いることが可能であると解釈される。その結果としての建設段階・操業段階で発生する環境負荷は、地下鉄整備による環境便益に比べて大きいため、環境会計としては負の値と判断される。ただし、この地下鉄整備による環境便益が小さく算定されていることは、現段階での地下鉄整備に伴う交通改善効果の発現が、経済発展に伴う外部効果により当初推定に比較して小さいことに起因することは言うまでもない。
- 3) 1) および 2) の解釈に関連して、ODA によるインフラ構造物建設・整備による環境影響評価においては、前述のように ODA という世界規模での事業においては、地球全体としての環境影響物質排出量の制御という観点から、2) に示したグローバルな環境影響領域を用いて評価を行うことが適切であると推察される。ただし、本検討で環境会計が負の値として判定されたことの課題は、前述の外部経済効果に加えて、環境会計の評価期間の設定によるものとも解釈される。すなわち、現状で LCA の考え方が適用されている工業製品は、そのライフサイクルが極めて短期間であるのに対して、本検討で対象とする地下鉄事業のようなインフラ構造物においては、構造物はほぼ廃棄されることなく長期間に渡り供用される。したがって、インフラ構造物に対して LCA に基づく環境会計を導入するためには、従来の評価手法に加えて長期に渡る環境便益の発現に関する不確実性を考慮することが不可欠の課題となる。

I-6 まとめ

本検討では、LCA 概念を援用し環境影響を考慮したインフラ構造物の整備事業評価に貢献し得る環境負荷・便益評価手法を構築し、その手法をバンコク地下鉄整備事業へ適用することで、その環境影響評価を試みた。本検討で得られた成果は、以下のよう

- 1) インフラ構造物の環境影響評価において、環境負荷および環境便益を定量的に推定する手法を提案した。その結果として、インフラ構造物整備事業が負うべき環境コストは、環境影響領域の設定、すなわちグローバルあるいはローカルという領域設定によって異なる結果を得ることとなる。
- 2) ODA によるインフラ構造物建設・整備による環境影響評価においては、その主旨からグローバルな環境影響領域を用いて評価を行うことが適切であると推察される。ただし、この際の課題は、インフラ構造物はほぼ廃棄されることなく維持補修を繰り返

して長期間に渡り供用されるため、インフラ構造物に対してLCAに基づく環境会計を導入するためには、従来の評価手法に加えて長期に渡る環境便益の発現に関する不確実性を考慮することが不可欠の課題となる。

- 3) 加えて、本検討において環境コスト・環境便益の算定に用いた温暖化ガス等の排出量の原単位は、日本における産業連関分析法に基づく数値を用いたものである。したがって、今後本検討において示したような途上国でのインフラ構造物整備事業への環境会計の導入を図る上では、その実施国における産業連関分析法に基づく原単位の設定が重要な検討課題となる。

参考文献

- 1) 國部克彦、伊坪徳宏、水口 剛：環境経営・会計、丸善、pp.81-90、2007。
- 2) 伊坪徳宏、稲葉敦：ライフサイクル環境影響評価手法、産業環境管理協会、2005。
- 3) 稲葉敦：LCAの実務、産業環境管理協会、2005。
- 4) 井村秀文：建設のLCA、オーム社、2001。
- 5) 日本建築学会：建物のLCA指針、日本建築学会、CD-ROM、2001。
- 6) 道路投資の評価に関する指針検討委員会：道路投資の評価に関する指針(案)、日本総合研究所、pp.77-84、1998。
- 7) 大城 温、松下雅行、並河良治、大西博文：自動車走行時の燃料消費率と二酸化炭素排出係数、2001。

II. バンコク地下鉄駅での避難行動シミュレーション

II-1 検討の概要

大都市中心部の駅舎およびその周辺の整備に伴い、地下駅や地下街、地下道、ビル、デパートなどの地下階は、不特定多数の人々が利用しているため、ひとたび地震災害や水害・火災が発生すれば、そこに居合わせた人々はきわめて危険な状況下におかれることになる。防災計画を立てる上では、このような状況下での群集の避難行動をできるだけ正確に把握し、その危険性を評価する必要がある。このような地下空間における災害時の避難行動を予測するためには過去の被害事例を詳細に調査してその支配要因を抽出し、これに基づいて避難実験や計算機による避難行動シミュレーションを行えばよい。しかし、緊急時を想定した避難実験は実験に危険が伴うことなどの問題点があるため、計算機による避難行動シミュレーションが一般的である。

火災などの災害時における過去の避難シミュレーションの多くは、主として非常口および避難路の通路幅、避難に要する時間、出口までの距離に関する検討が中心である。これは、個人個人の避難行動に関する心理的な面を含めた定量化が困難であるためである。また、定量的な検討の内、避難途中での各避難者に作用する力から避難安全性を評価する手法はほとんど存在しない¹⁾²⁾。人間に作用する力に関する研究は、主に事故防止の観点から安全工学の分野で見られる³⁾が、このような平常時の事故防止の観点からの検討のみならず、避難行動という緊急時における人間行動に着目して避難安全性を検討することも重要である。すなわち、被災時の避難行動において各避難者にどのような力が作用しているかを定量的に解明できれば、混雑状況をあらかじめ予測し、それに対処する構造的、機能的観点から出入口の形状、場所などの平面計画に反映することも可能である。

本報告で対象とするバンコクは、近年のタイの経済成長を反映して地方から人が流入し、そのため特に道路交通に関しては、昼夜を問わず慢性的な渋滞が発生している。この解消のための各種道路整備も行われているが、有効な解決法とはなっていないのが現状である。一方、市中心部を走る地下鉄 MRT や BTS は通勤や通学、観光の足として着実にその乗客数を増やし、交通渋滞解消と環境へ配慮した交通政策推進への一助となっている。しかし、利用客数が増えれば増えるほど、その安全対策への配慮は不可欠となり、2005年1月のバンコク地下鉄タイ文化センター駅で起きた車両の衝突事故のような事故は予め想定して事前対策を講じておかねばならず、今後起こりうる事故・災害へのあらゆる事前対策を十分検討しておく必要がある。

ここでは、バンコク地下鉄バンスー駅を対象に、そこで事故や火災・水害などの災害が発生した場合の人間の群集シミュレーションを行い、各避難者の避難時間や出口での避難密度を算出することにより、現在講じられている対策の有効性や今後の課題について検討を実施した。

II-2 解析の概要

DEM による避難行動モデル¹⁾²⁾は、部屋などの空間から最短出口に向かったり、階段の平面形状を想定し、そこを使用して避難するような単純かつ局所的な対象空間での避難行動を再現したものであった。しかし、避難者同士が対向したり、前方に障害物が存在する場合など、周囲の状況や対象空間が複雑な場合にはあまり現実的でない現象が生じてしまうという欠点を有していた。

ここでは、障害物が存在したり経路が複雑な解析対象空間において各個体要素が各時間毎に目標点を決定し、障害物を滑らかに回避したり、他の人間とすれ違ったり、前方の人間を追い越したりする基本的な人間行動をできるだけ現実的に即して再現できるモデル⁴⁾⁵⁾を用いてシミュレーションを行った。人体平面のモデルを図 2.1 に示す。

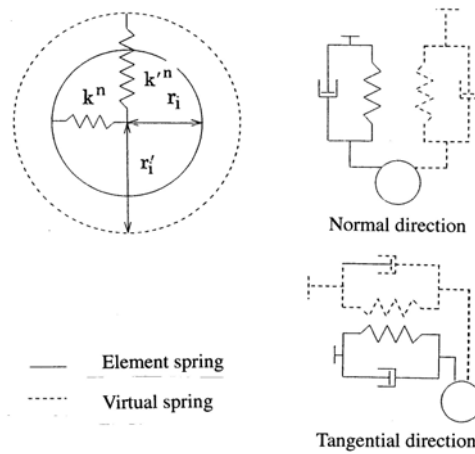


図 2.1 人体の平面モデルと接触ばね及びダッシュポット

2.1 人体モデルと数値解析法

群集を構成する i 番目 ($i=1, 2, 3, \dots, N$; N は総人数) の個体要素の質量を m_i 、この個体要素の x 、 y 方向の変位をそれぞれ x_i 、 y_i とすると、運動方程式は以下のようになる。ただし、人間を対象としているため、回転運動は拘束されているものとみなしているため、モーメントに関する運動方程式は考慮しない。

$$m_i \ddot{x}_i(t) = f_i^x(t) \quad (1)$$

$$m_i \ddot{y}_i(t) = f_i^y(t) \quad (2)$$

ここに、 $f_i^x(t)$ 、 $f_i^y(t)$ は以下に示すように、それぞれ時刻 t における個体要素 i に作用する x 方向および y 方向の合力である。

$$f_i^j(t) = f_k + f_c + f_k' + f_c' + f_{wk} + f_{wc} + f_f + f_a \quad (j = x, y) \quad (3)$$

ここに、 f_k 、 f_c 、 f_k' 、 f_c' は、それぞれ個体要素 i に接触するすべての要素の個体要素バネ・ダッシュポットおよび個体要素仮想バネ・ダッシュポットからの作用力と、接触する壁などの境界からの反力を表す。 f_{wk} 、 f_{wc} は、個体要素が目標点に向かおうとする個体推進力を表す。 f_f 、 f_a は、個体がコーナーを曲がる際に働く遠心力およびそれに対する抗力を表す。

時刻 $t-1 \sim t$ なる Δt 区間内で加速度が一定と仮定すれば、式(1)、式(2)を積分することにより時刻 t における速度、変位が以下のように求められる。

$$\dot{x}_i(t) = \dot{x}_i(t-1) + \ddot{x}_i(t-1)\Delta t \quad (4)$$

$$\dot{y}_i(t) = \dot{y}_i(t-1) + \ddot{y}_i(t-1)\Delta t \quad (5)$$

$$x_i(t) = x_i(t-1) + \dot{x}_i(t-1)\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{x}_i(t-1)\Delta t^2 \quad (6)$$

$$y_i(t) = y_i(t-1) + \dot{y}_i(t-1)\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{y}_i(t-1)\Delta t^2 \quad (7)$$

2.2 目標点の設定

ここでは、各個体要素が目標点を任意に決定できる方法を導入している。目標点の決定に際しては直進と進路変更（右左折など）がある。ここでは、接触判定を容易にするために、経路を数メートルごとのブロックに領域分けしている。そして、例えば直進では、次のブロックと2つ先のブロックの境界線の中点に目標点を定めることによって自然な歩行行動を再現しているが、この目標点のみの行動では個体要素同士が対向したり、前方の障害物を回避する行動を再現できない。そのため、個体要素の周囲の状況変化に応じて目標点を変更する必要があるため、視野領域の概念を導入している。目標点の変更方法には、歩行者が柱などの障害物を回避したり、前方から来る歩行者とすれ違う際の回避行動や、前方にいる歩行者を追い越す行動、個体要素が速い速度でコーナーを曲がる行動などがあり、これらの行動を力学的に規定してシミュレーションを行った。

II-3 各種パラメータの設定

実際の空間を対象に避難行動解析を行うためには、平常時および緊急時における各種パラメータ、例えば個体要素のバネ定数、減衰係数、歩行速度および個体推進力を決定するための加速度などが必要がある。ここでは、DEMモデルのパラメータ決定のために行った過去の簡易実験を基に個体要素バネ定数を決定するとともに、平常時および緊急時における個体推進力を与える加速度および歩行速度も実験から求めた。こ

これらのパラメータを示したものが表 3.1 である。また、京都の地下街で行った買い物客の流動調査を基に、表 3.2 のような属性とその割合、およびその歩行速度を用いている。ここで用いた避難時の歩行速度は既存の歩行速度調査で明らかにされた歩行速度であり、ほぼ 1.0m/sec の値をとっている。

表 3.1 解析に用いた各種パラメータ

解析パラメータ	値
バネ定数 (直交方向) k_n (N/m)	1.26×10^4
(接線方向) k_t (N/m)	6.29×10^3
減衰係数 (直交方向) c_n (Nsec/m)	1.35×10^2
(接線方向) c_t (Nsec/m)	3.02×10^1
仮想バネ定数 (直交方向) k'_n (N/m)	6.62×10^1
(接線方向) k'_t (N/m)	3.31×10^0
仮想減衰定数 (直交方向) c'_n (Nsec/m)	9.79×10^1
(接線方向) c'_t (Nsec/m)	2.19×10^1
物理半径 r (m)	0.259
仮想半径 r' (m)	0.717
単位体積重量 w (N/m ³)	1.69×10^3
計算時間間隔 Δt (sec)	0.01
推進加速度 (m/sec ²)	0.837

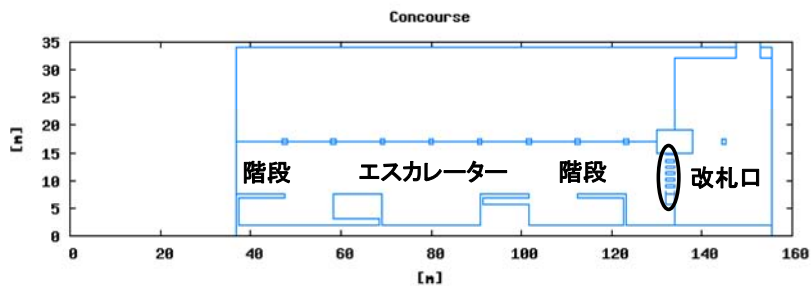
表 3.2 属性ごとの歩行速度とその割合

カテゴリー	性別	歩行速度 (m/sec)	割合 (%)
～ 小学生	男	1.02	1.93
	女	1.09	6.52
中学生 ～ 50 歳	男	1.45	27.45
	女	1.23	40.76
50 歳 ～ 70 歳	男	1.19	5.01
	女	1.04	5.75
70 歳 ～	男	0.99	1.41
	女	0.89	1.76
幼児を抱えた大人	-	0.88	9.22
身体障害者	-	0.75	0.18

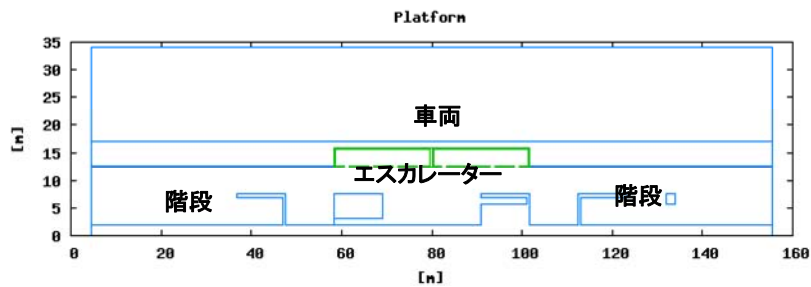
II-4 バンコク地下鉄バンスー駅における避難行動解析

ここでは、バンコク地下鉄バンスー駅を対象に避難行動解析を行った。バンスー駅は、鉄道のバンスー駅に隣接する地下鉄駅であり、延伸の計画はあるものの現時点では市北部に位置する MRT のターミナル駅となっている。地下 1 階のコンコース部と地下 2 階のプラットフォームから成り、プラットフォームにある 2 本の進入線のうち現時では 1 線のみ供用している。プラットフォームとコンコースの間の昇降手段は階段とエスカレーターであり、相対式のプラットフォームのためそれぞれのホームに階段とエスカレーターが 2 機ずつ配置されている。

今回は供用されている片側のプラットフォームとコンコースからの避難を想定して解析を行った。解析に用いたコンコースとプラットフォームの図を示したものが図 4.1(a) および(b)である。



(a)コンコース部 (地下1階)

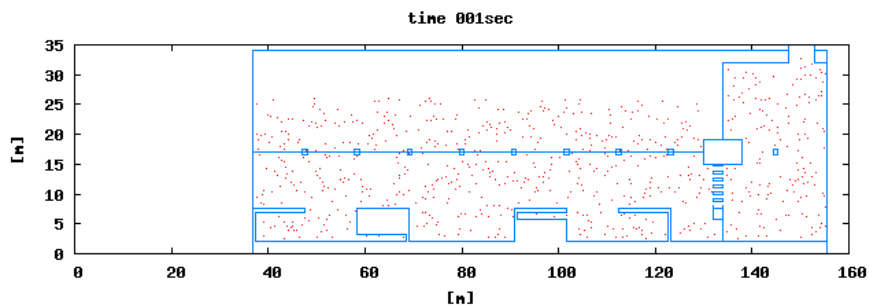


(b)プラットフォーム部 (地下2階)

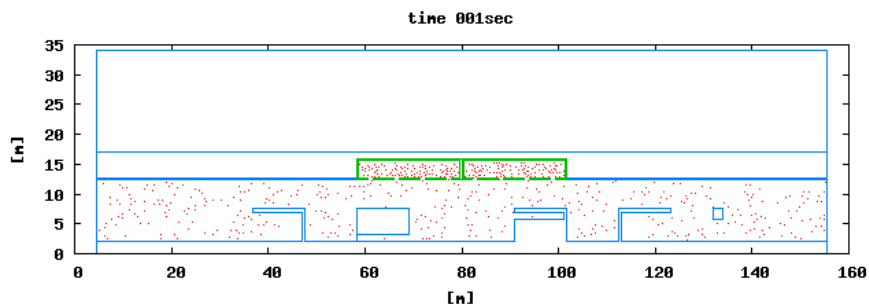
図 4.1 地下鉄バンスー駅のコンコースとプラットフォームのモデル化

駅舎内の滞在人口に関しては、流入・流出乗客の乗り降りなど時々刻々変化するため、最大滞在人口のピーク値を決めることは難しい。MRTA が実施した調査によれば、朝のピーク時(6:00-9:00)におけるバンスー駅の乗客数は、808 人(6:00-7:00)、2,030 人(7:00-8:00)、1,044 人(8:00-9:00)であった。しかし、前述のように、これはある瞬間にプラットフォームとコンコースにいたピークの人口を表すものではない。そのため、こ

ここでは滞留人口（避難人口）を 250、500、750、1,000、1,250 人の 5 通りに変化させ避難行動解析を行った。また、駅に停車した車両は 2 両とした。避難者の初期配置としてはコンコースとプラットフォーム、車両内にランダムに配置させた。避難者の初期配置と解析ケースをそれぞれ図 4.2 と表 4.1 に示す。ただし、車両内には常に 200 人の乗客が乗っているものと仮定した。



(a)コンコース部（地下 1 階）



(b)プラットフォーム部（地下 2 階）

図 4.2 避難者の初期配置の例（避難人口 1,250 人の場合）

表 4.1 各階の避難人口と密度

避難者数 (人)	プラットフォーム (人/m ²)	コンコース (人/m ²)	車両内 (人/m ²)
ケース 1: 250	0.00 (0)	0.02(50)	1.61 (200)
ケース 2: 500	0.04 (60)	0.09 (240)	
ケース 3: 750	0.18 (250)	0.11 (300)	
ケース 4: 1000	0.21 (300)	0.18 (500)	
ケース 5: 1250	0.28 (400)	0.25 (650)	

例えば、ケース 1 の場合は、プラットフォームのホーム上には人は配置されていないが、車両内には 200 人の乗客がおり、またコンコースには 50 人、計 250 人が滞在している。また、ケース 5 の場合は、ホーム上に 400 人、車両内に 200 人の併せて 600 人がプラットフォーム階におり、コンコース階にいる人 650 人と併せて計 1,250 が避難を

開始することになる。避難行動解析に当たっては、条件を簡略化するために、プラットフォーム階では全避難者が同時に最も近い階段かエスカレーターに向かって避難を開始し、またコンコース階の避難者も改札口(出口)に向かって一斉に避難を開始するものと仮定した。すなわち、事故・災害直後に、放送や現場での指示等に従って全避難者が一斉に適切な経路を選択して避難し始める状況を想定している。その際、地下空間内部の変化や、火災・煙の拡大などの要因の影響は考慮しなかった。

図 4.3 は、ケース 4 に対するそれぞれプラットフォームとコンコースにおける各時間毎の避難者の位置を表したものである。プラットフォームでは、避難開始から 20 秒後には階段に比べて幅の狭いエスカレーター付近で滞留が始まっており、これは 100 秒後においても解消されていない。コンコースの改札口では 40 秒後に滞留が生じ始めており、その領域は 100 秒後においても 60 秒後と同じ状態が続いている。

図 4.4 はプラットフォームにおける 40 秒後、コンコースにおける 80 秒後の階段・エスカレーターおよび改札口における混雑状況を示したものである。避難者数が 500 人を越えるあたり(ケース 2)から改札で滞留が生じ始めている。また明らかに総避難者数が多い程、出口での滞留が大規模になることがわかる。

次に、図 4.5 に示す顕著な滞留が生じるプラットフォームの階段・エスカレーター付近およびコンコースの改札口における滞留密度に着目する。図 4.5 に示す各箇所において、プラットフォームの階段における滞留密度は 2-3 人/m²、エスカレーターのそれは 3-4 人/m² であり、また滞留の継続時間は前者が 40-60 秒であるのに対し、後者は 120-140 秒続いている。これは、前述のようにエスカレーターの幅が階段に比べ極端に狭いことが原因である。一方、改札口における滞留密度は 10 人/m² 近くの状態が続いており、避難者数が 1,000 人を越えるケースでは時刻によっては 10 人/m² を越える滞留が生じることになり、これを解消するための臨時出口等の設置が必要になる。

なお、今次調査段階でのタイ国高速鉄道公社 MRTA において平成 20 年 3 月に開催したバンコク地下鉄建設事業事後評価のワークショップにおいて、本検討結果を報告した。この折に、MRTA より、昨年バンコク地下鉄シルキット国際会議センター駅において実施した避難訓練の状況について説明があった。この避難訓練においては、通常上り・下りに分かれているエスカレーターを、避難時には両方とも上りに変更すると共に、改札口においては通常は車いす用に設定されている通路を開放するという措置が採られていることが確認された。このことから、本シミュレーションで示した避難時に利用者にとって最も危険な滞留が生じる箇所に対して的確な対応が図られていることから、バンコク地下鉄駅での安心安全に関する持続性は高いと判定された。

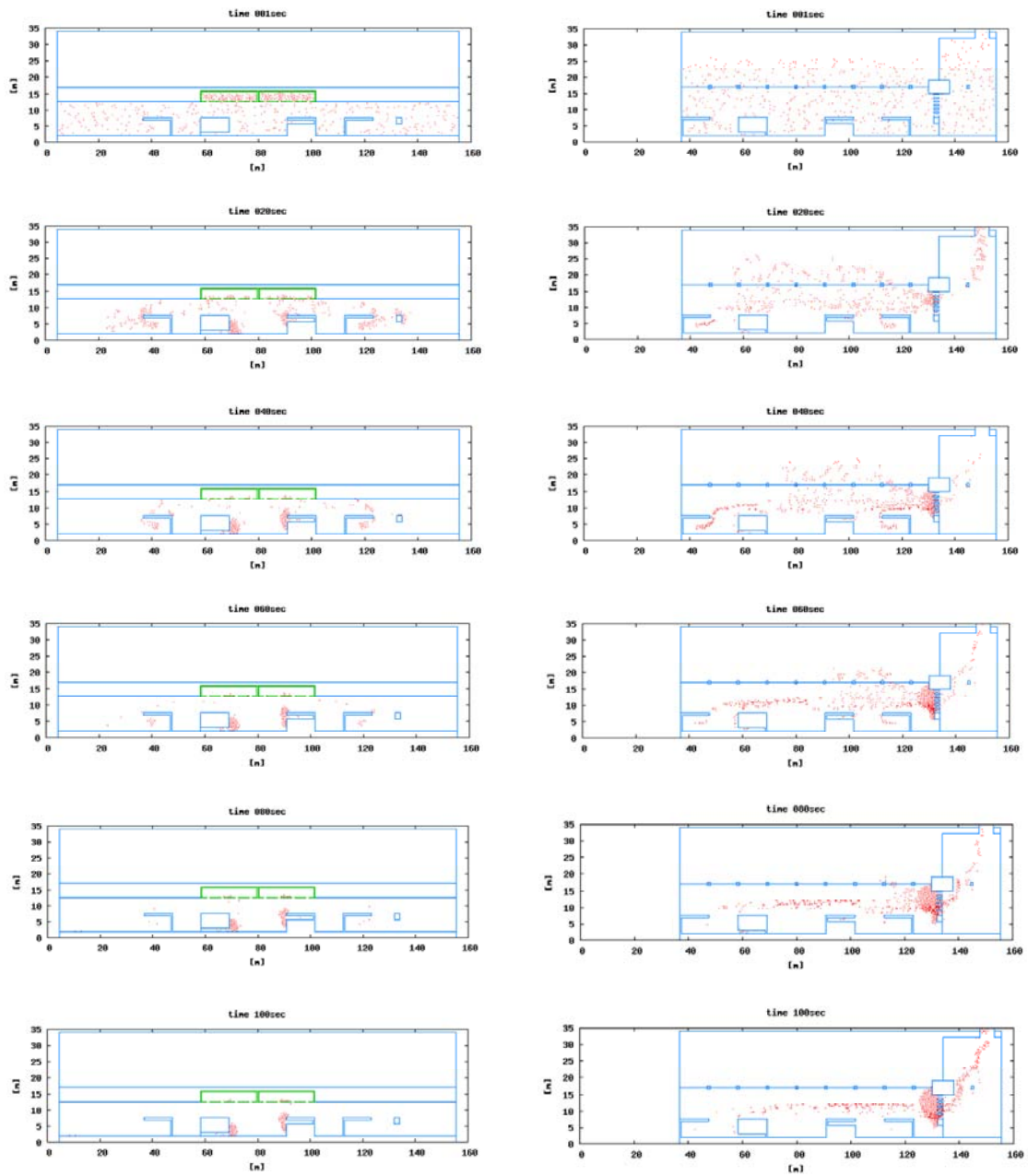


図 4.3 ケース 4 (避難者総数 1,000 人) における避難行動の時間的変化 (上段から避難開始 1 秒後, 20 秒後, 40 秒後, 60 秒後, 80 秒後, 100 秒後 : 左側はプラットホーム階, 右側がコンコース階)

なお、本解析例では、それぞれのシミュレーションケースは一つのサンプルとしての位置づけになる。また避難口も歩行者にとって最寄りの階段やエスカレーターを指定している。つまり、歩行者が避難する方向は 1 方向となるため、歩行者の個体同士の回避行動は評価されているものの、一般的な避難シミュレーションで考慮する対面する歩行者同士の追い越しやすれ違い現象は生じないことになる。このため、本報告

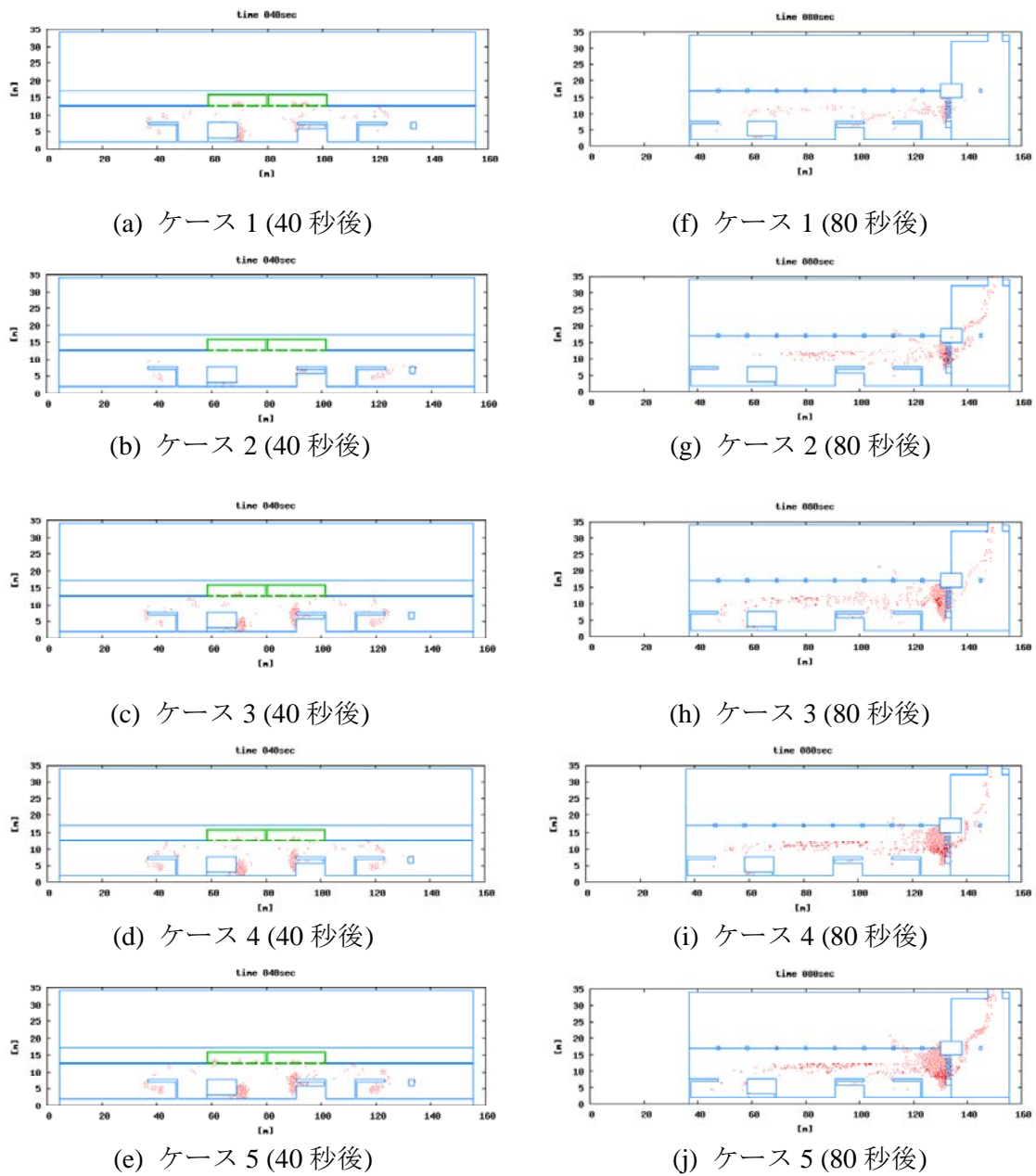
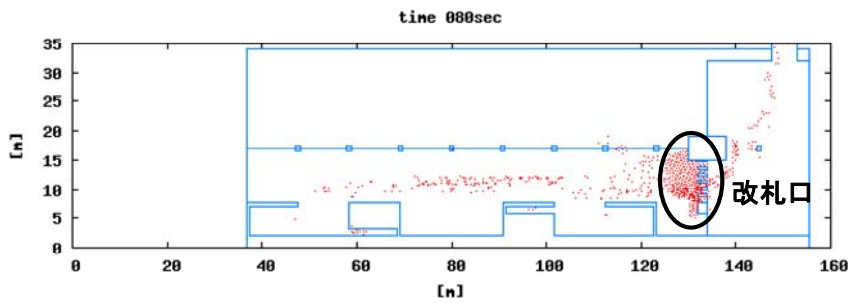


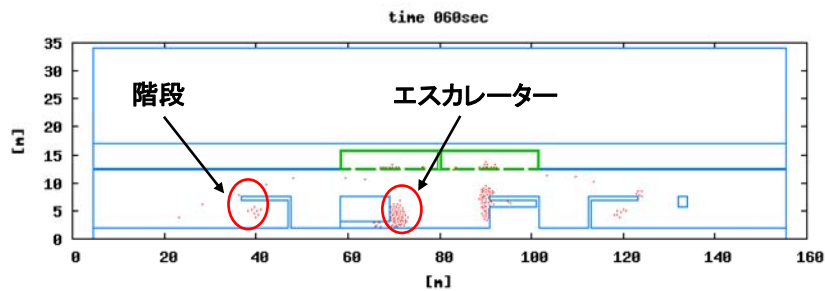
図 4.4 各ケースにおける 40 秒後のプラットホームの状況（左図）と 80 秒後のコンコースの状況（右図）

で扱ったケースはいずれも基本的なケースであり、事故や災害による緊急時の避難行動の特徴を端的に表しているものと解釈される。

したがって、今後より詳細な検討が必要な場合は、周囲の環境（火災による煙の伝播など）からの影響や個体の心理的影響を量的に取り入れた、さらに複雑な避難シミュレーションを行う必要があると推察される。



(a) 滞留密度を算出した改札口の位置 (コンコース部 ; 地下 1 階)



(b) 滞留密度を算出した階段とエスカレーターの位置 (プラットフォーム部 ; 地下 2 階)

図 4.5 滞留密度を算出した位置

II-5 まとめ

本報告では、DEM を用いてバンコクの地下鉄駅における災害時の避難行動解析を行い、その地下鉄駅での避難行動に関する検討を行った。ここで得られた成果は、以下のように要約される。

- (1) 障害物の回避、すれ違い、追い越しなどの人間行動を再現できる DEM モデルを用いて、バンコクの地下鉄駅の一つであるバンスー駅の解析を行った。この結果より、避難者数を変えた 5 つのケースのシミュレーション結果から、プラットフォームのエスカレーター付近では滞留が発生しやすいことがわかった。
- (2) 総避難者数が多い程、出口での滞留が大規模になり、避難者数が 500 人を越えるあたり (ケース 2) から改札で滞留が生じ始める。その際の滞留密度は 10 人/m^2 にも及び、満員電車並みの混雑が改札で発生することがわかった。このため、臨時出口を必要に応じて開放するなど、この高密度の滞留を解消する方策が必要である。
- (3) 上記の課題に関して、今次調査段階での MRTA へのヒアリングにおいて、昨年バンコク地下鉄シルキット国際会議センター駅において実施した避難訓練では通常上り・下りに分かれているエスカレーターを、避難時には両方とも上りに変更すると共に、改札口においては通常は車いす用に設定されている通路を開放するという措置が採られていることが確認された。このことから、本シミュレーションで示し

た避難時に利用者にとって最も危険な滞留が生じる箇所に対して的確な対応が図られていることから、バンコク地下鉄駅での安心安全に関する持続性は高いと判定された。

参考文献

- 1) 清野純史、三浦房紀、瀧本浩一、中嶋庸一：個別要素法(DEM)を用いた群集行動シミュレーション、1994年地域安全学会論文報告集、No.4、pp322-327、1994。
- 2) 清野純史、三浦房紀、瀧本浩一：被災時の群集避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について、土木学会論文集、No.537/I-35、pp.233-244、1996。
- 3) 内田祥哉、直井英雄、三浦武広、松尾幸晴：日常生活の中での人体による衝撃力と板ガラス強度の関係ーその2ー人体による衝撃力の推定および衝撃破壊現象に対する整合性の検討ー、日本建築学会論文報告集、No.302、pp.67-75、1981。
- 4) 清野純史、三浦房紀、八木宏晃：個別要素法を用いた被災時の避難行動シミュレーション、土木学会論文集、No.591/I-43、pp.366~378、1998。
- 5) 清野純史、土岐憲三、犬飼信広、竹内 徹：避難行動シミュレーションに基づく地下街の安全性評価、土木学会論文集、No.689/I-57、pp.31-43、2001。

Ⅲ. バンコク地下鉄駅に及ぼす地下水汲み上げに起因する地盤沈下の影響評価

Ⅲ-1 検討の概要

近年、東南アジア諸国は急激な経済成長を遂げつつあるが、その発展過程において、環境破壊に繋がる様々な課題が顕在化している。例えば、その代表的な事例として、都市部における地下水揚水に伴う地下水環境破壊が挙げられる。

東南アジア諸国での都市部における地下水揚水による地下水環境破壊は、経済発展と極めて密接な関係にあり、以下のような歴史的背景を有している。すなわち、東南アジア諸国における多くの都市部の地質構造は、河川の堆積物による粘性土と帯水砂層との互層からなっており、その帯水砂層から汲み上げられた地下水が、農業用水・生活用水として利用されてきた。この都市部における地下水利用は、経済成長に伴う住宅および工場団地等の建設による都市部の拡大過程で、水道施設の付設に比べ地下水揚水の方が安価であるため、急速に増加してきた。この結果として、過剰な揚水による地下水資源の枯渇およびそれに伴う地盤沈下、さらには生活廃水・工業排水による地下水汚染等が発生した。

東南アジアの諸都市の内、この急激な地下水揚水量の増加に伴う地盤工学的な課題が明らかとなってきた代表的な都市としてバンコク（タイ）が挙げられる。バンコク首都圏 BMR およびその周辺地域では、図 1.1 に示すように 1980 年以降の急速な経済

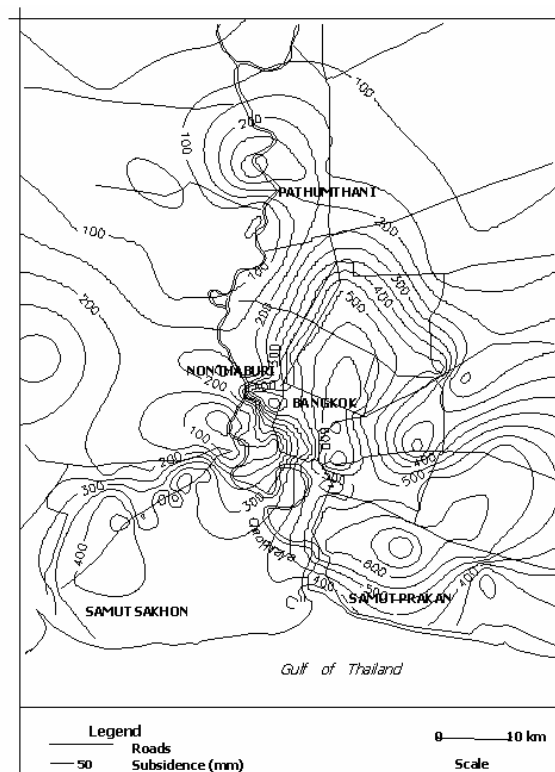


図 1.1 バンコク地区の地盤沈下増分（1978 年～1997 年）¹⁾

発展に伴う大量の地下水利用により、帯水砂層の水頭低下に伴う地盤沈下が顕在化していることが報告されている¹⁾。また、バンコク首都圏 BMR は、チャオプラヤ川という大河周辺に発達し、南側に面するタイ湾の基準海面からの標高が極めて低い平原に位置している。このため、バンコク首都圏 BMR で発生した地盤沈下は、不同沈下¹⁾による構造物被害のみならず、チャオプラヤ川の堤防高を低下させ、雨季での洪水リスクを誘発することに繋がる緊急の検討課題となっている²⁾。

なお、この地盤沈下は、表層部に堆積する粘土層で生じているものであり長期的に継続するため、現在も収束していないが、言うまでもなくバンコク地下鉄はこの地盤沈下が発生した地域に建設されている。

このため、本検討では、バンコク地下鉄の設計に関する基本概念、および現状での地下水汲み上げに起因する間隙水圧²⁾の低下状況を勘案し、地下水汲み上げに起因する地盤沈下が長期的にバンコク地下鉄駅に及ぼす影響について検討を加える。

III-2 地盤沈下の発生状況

2.1 地盤条件

図 2.1 は、バンコク首都圏 BMR を含むタイ中央平原南部の南北断面での水理地質形状を示す。

バンコク地区の地盤条件は、図 2.1 に示すように、地表面下 30m までは、バンコク粘土として一般的に知られる青灰色を呈する海成粘土が全体的に分布しており、その下部は、深度 550m までは粘土もしくは砂質粘土の互層によってほぼ隔たれた八つの主要な被圧帯水層に区分される（以下、この八つの主要な被圧帯水層をバンコク帯水層系と称する）。

バンコク首都圏で地下水揚水が開始されたのは 1900 年代前半であるが、バンコク帯水層系から大規模な取水が行なわれるようになったのは 1950 年代前半になってからである。第 1 層目の帯水層（Bangkok 帯水層、以下 BK と称する。また、他の帯水層についても同様に標記する）の水は元来塩分濃度が高いことに加えて、近年では生活排水等による汚染が顕在化してきたため、給水には不適とされてきた。このため、バンコク首都圏での地下水の利用は、主に第 2 層（Phra Pradaeng 帯水層、PD）、第 3 層（Nakhon Luang 帯水層、NL）、第 4 層（Nonthaburi 帯水層、NB）の 3 つの帯水層に依存してきた。このことは、図 2.2 に示すタイ鉱物資源局（Department of Mineral Resources, DMR）および公共事業局（Public Work Department, PWD）により発表されているデー

¹⁾ 【用語の説明】

不同沈下とは、地表面での 2 点間の水平距離に対する沈下量の差分との比 i （2 点間の沈下量の差 / 2 点間の水平距離；傾斜角）として定義される。一般的には、比 i が 1/500 より大きくなると、後述の図 3.2 に示すように、建物の壁に亀裂（クラック）は発生する、あるいはドアが開閉出来ない等の被害が発生することが知られている。

²⁾ 【用語の説明】 間隙水圧

間隙水圧とは、地盤中の地下水に作用する水圧のことを意味する。

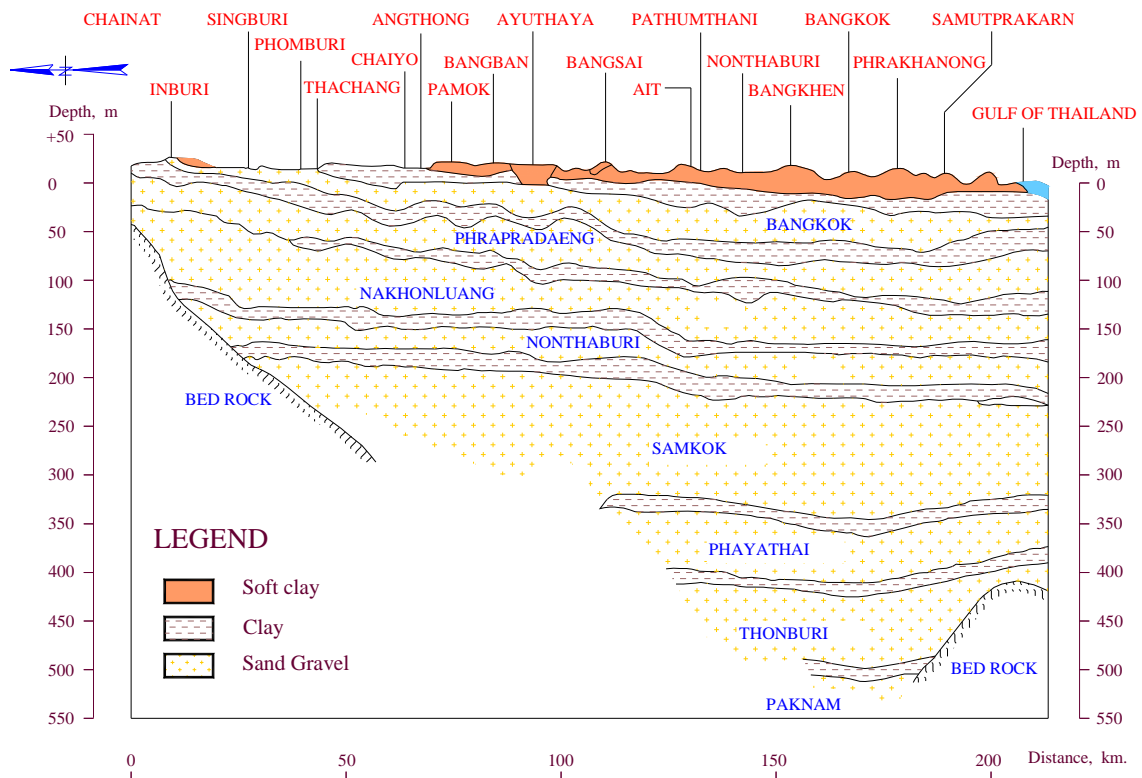


図 2.1 バンコク首都圏周辺地区の主な帯水層を示すタイ中央平原南部の南北断面水理地質形状³⁾

タで、公共・民間を合わせた揚水井戸の総数が 1992 年には 12,000 箇所を超えているが、それらの井戸の 92% が PD 層、NL 層および NB 層の三つの帯水層から取水していることから明らかである。次に、第 5 層 (Sam Khok 帯水層、SK) および第 6 層 (Phaya Thai 帯水層、PT) は、バンコク北西部のパトムターニ (Pathum Thani) 地域において多く利用されつつある。また、第 7 層 (Thon Buri 帯水層、TB) および第 8 層 (Pak Nam 帯水層、PN) は、家庭用井戸に供するには深すぎるため、上部に他の帯水層が存在していないバンコク南部・南西部の地域で工業用途に供されている。

2.2 地下水揚水および地盤沈下の状況

図 2.3 は、1955 年から 2003 年までのバンコク首都圏での地下水取水量の推移を示す。同図に示すように、バンコクで公共上水道供給のために大規模な地下水利用が始まったのは 1955 年で、当時の揚水量は 1 日当たり約 8,000m³ であった。そして、1982 年までには、公共上水道供給のための地下水揚水量は 1 日当たり 447,000m³ まで増加した。これに加えて 1 日当たり約 944,000m³ の民間井戸による揚水により、合計揚水量は 1 日当たり約 140 万 m³ に上った。

その後、1985 年から 1990 年の間は、1983 年に実施された「バンコク首都圏における地下水・地盤沈下危機緩和 (Mitigation of Groundwater Crisis and Land Subsidence in the

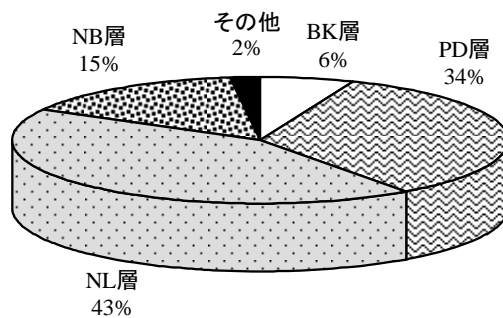


図 2.2 帯水層別揚水井数

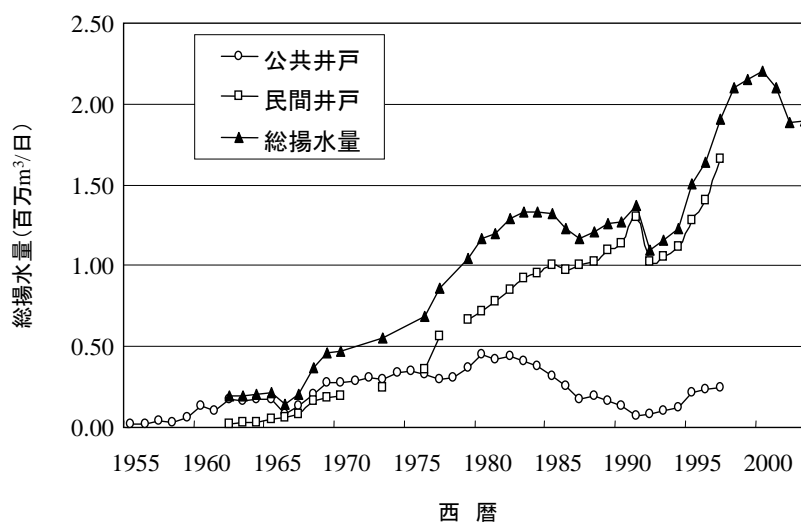


図 2.3 バンコク地区での地下水揚水量の推移¹⁾

Bangkok Metropolis) プログラム」による規制により、公共用地下水揚水量は減少に転じたが、民間井戸からの揚水量は増加を続け、総揚水量はほぼ横ばい状態が継続した。そして、1993年以降のタイにおいて急速な経済成長が発生した、いわゆるタイバブル時期においては、上水道施設の整備が不十分であり地下水に依存せざるを得ないバンコク郊外において数多くの住宅・工業開発事業が開始されたため、総地下水揚水量は再び急激に増加する傾向に転じ、1990年代後半には地下水揚水の全体量は1日当たり200万 m^3 を越えるまでに増加した。

その後、上水道給水ネットワークの拡大に加えて、2000年度にタイ国会で制定された、地下水利用料金の値上げ等の厳格な地下水利用に関する法案の強制執行により、地下水揚水量は多少減少に転じた⁴⁾。しかし、依然として大量の地下水揚水が継続しており、今後も深刻な地下水危機と地盤沈下問題は継続するものと推察される。バンコク地区では、上述の地下水揚水に伴い地盤沈下が発生し、不同沈下による建物の損傷、低地での深刻な洪水の発生等の様々な問題の原因となっており、大きな社会経済的損失を生じてきた。図1.1に示す過去にバンコク首都圏で発生した地盤沈下と、

図 2.3 に示す地下水取水量の推移は、以下のように要約される。

- ・ 図 2.3 に示した地下水取水量の推移において、初期（1933 年～1978 年）段階で地盤沈下が発生した領域は、ダウンタウンの中心であるバンコク地区東部に限定されている。しかし、地盤沈下問題が顕在化してきた 1978 年以降顕著な沈下が発生した地域は、北はパトムターニ (Pathum Thani)、東南はサムットプラカン (Samut Prakan)、西南はサムサコン (Samut Sakhon) まで拡大している。
- ・ 上記の地域は、タイにおける経済発展の初期段階において、多くの住宅・工業開発事業が拡大した地域と一致する。また、図 2.3 に示した地下水取水量の推移からも明らかなように、経済発展の初期段階において地盤沈下が顕在化した要因は、水道施設の付設に比べ地下水揚水が安価であることから、民間による多大な取水がなされたことであると結論付けられる。

III-3 バンコク地下鉄の設計に関する基本概念

前述のように、バンコク首都圏では地下水汲み上げに起因する地盤沈下が生じていることから、図 3.1 の模式図に示すような構造物被害が発生している。

図 3.1 に示すように、バンコク首都圏地域の地盤条件は、表層部に軟弱粘土層が存

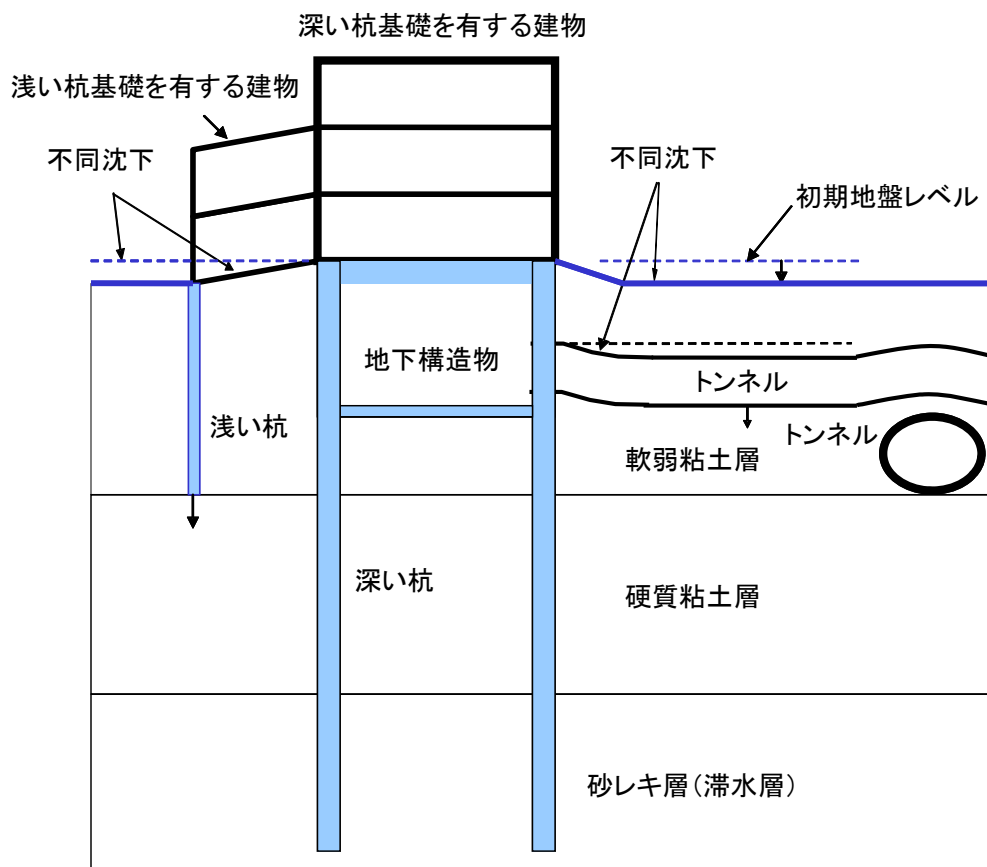


図 3.1 地盤沈下に起因する構造物被害（模式図）

在し、その下部に硬質粘土層および砂レキ層（滞水層）が分布している。なお、図 3.1 に示した砂レキ層（滞水層）は、図 2.1 に示したバンコク滞水層に相当する。そして、顕著な地盤沈下は、上部の軟弱粘土層において発生しており、その下部の硬質粘土層では、その剛性が高いためほとんど沈下は観測されていない。このため、地上構造物においては、軟弱粘土層を支持層とする浅い杭を有する構造物では沈下の影響を受けるが、下部の硬質粘土あるいは砂レキ層（滞水層）を支持層とする深い杭基礎を有する構造物の間に不同沈下が発生するため、図 3.2 に示すような壁にクラックが生じるような被害が発生している。



図 3.2 不同沈下に起因する構造物の被害事例

同様に、トンネルのような地下構造物においても、上部の軟弱粘土層内に構築された場合には、図 3.1 に示すように駅部のような構造物との連結部に不同沈下が生じる可能性があることに加えて、トンネル自体も地盤沈下の影響を受けて圧縮される危険性がある。

このような観点から、バンコク地下鉄においては、上記の地盤沈下の影響を避けることが基本的な設計条件となった。加えて、下部の砂レキ層（滞水層）は極めて透水性が高いため、シールドトンネル掘削および駅部掘削においては湧水が施工上の重大な支障となる。このため、バンコク地下鉄でのトンネルおよび駅部掘削底盤は、図 3.3 に示すように、主として軟弱粘土層下部の硬質粘土内に設定することが基本的な設計条件となった。その具体的な事例として、図 3.4 にバンコク地下鉄北線（タイ文化センター駅～バンスー駅間）の縦断図を示す。同図に示すように、バンコク地下鉄北線においては、ターミナル駅であるバンスー駅を除いて、トンネルおよび駅部掘削底盤は、全般的に地下 15～30m（地下 3～4 階）に配置されている。

上記のような設計方針により、地下水汲み上げに伴う地盤沈下に起因するトンネルおよび駅部に対する影響は軽減が図られている。

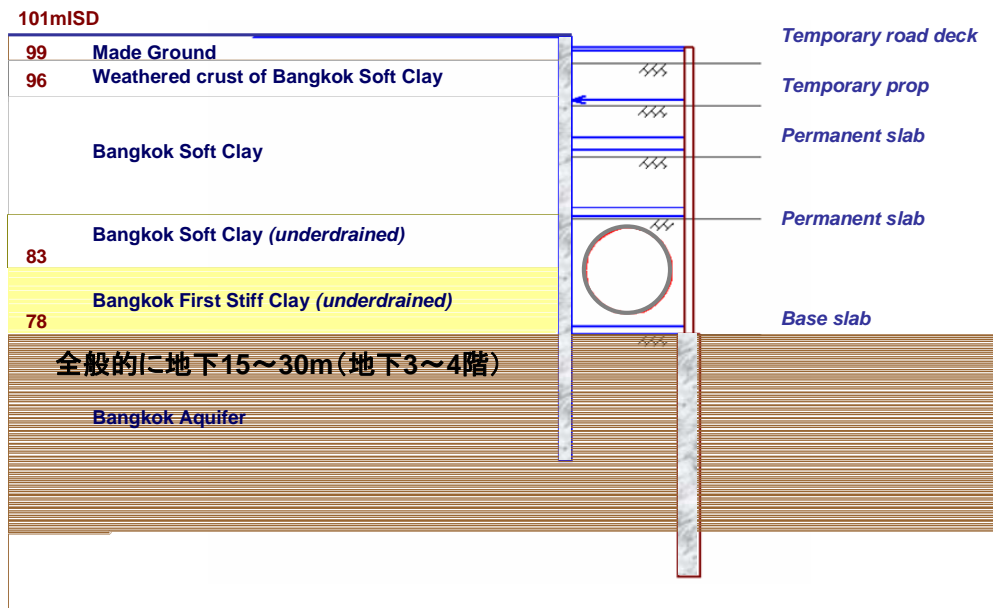


図 3.3 トンネルおよび駅部の掘削深度

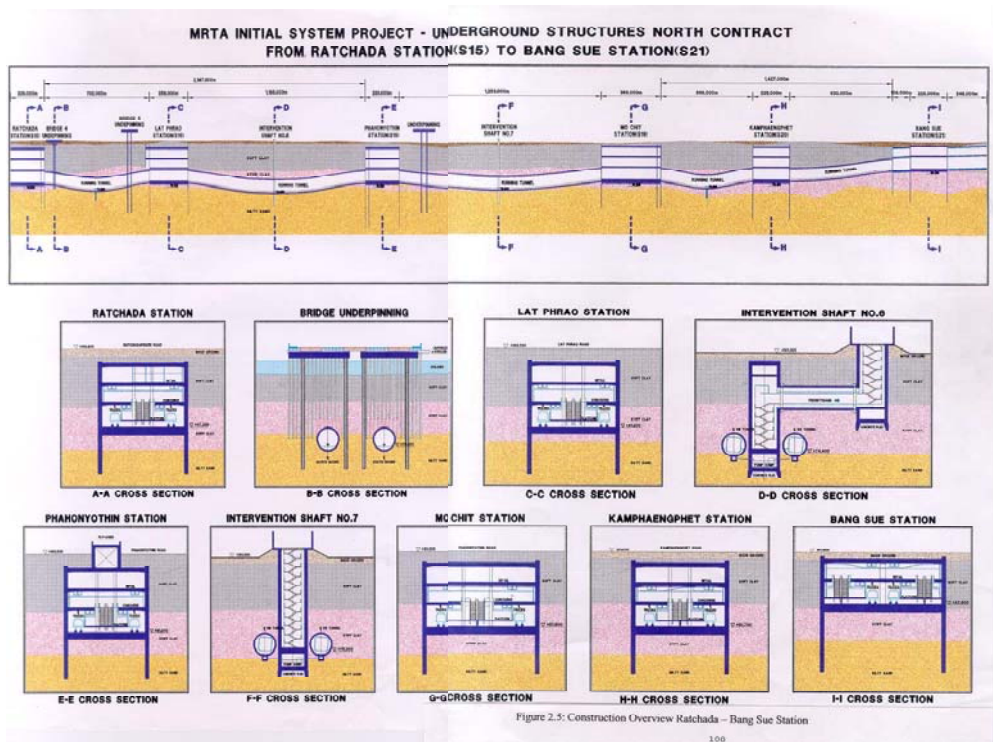


図 3.4 バンコク地下鉄北線（タイ文化センター駅～バンスー駅間）の縦断図

III-4 将来的な課題

前述の地下水汲み上げに起因する地盤沈下の発生メカニズムは、図 4.1 の観測結果に示すように、当初の砂レキ層内の間隙水圧分布は静水圧状態から地下水汲み上げにより砂レキ上面の間隙水圧が 0 に低下し、それに伴い上部粘土層からの間隙水圧低下

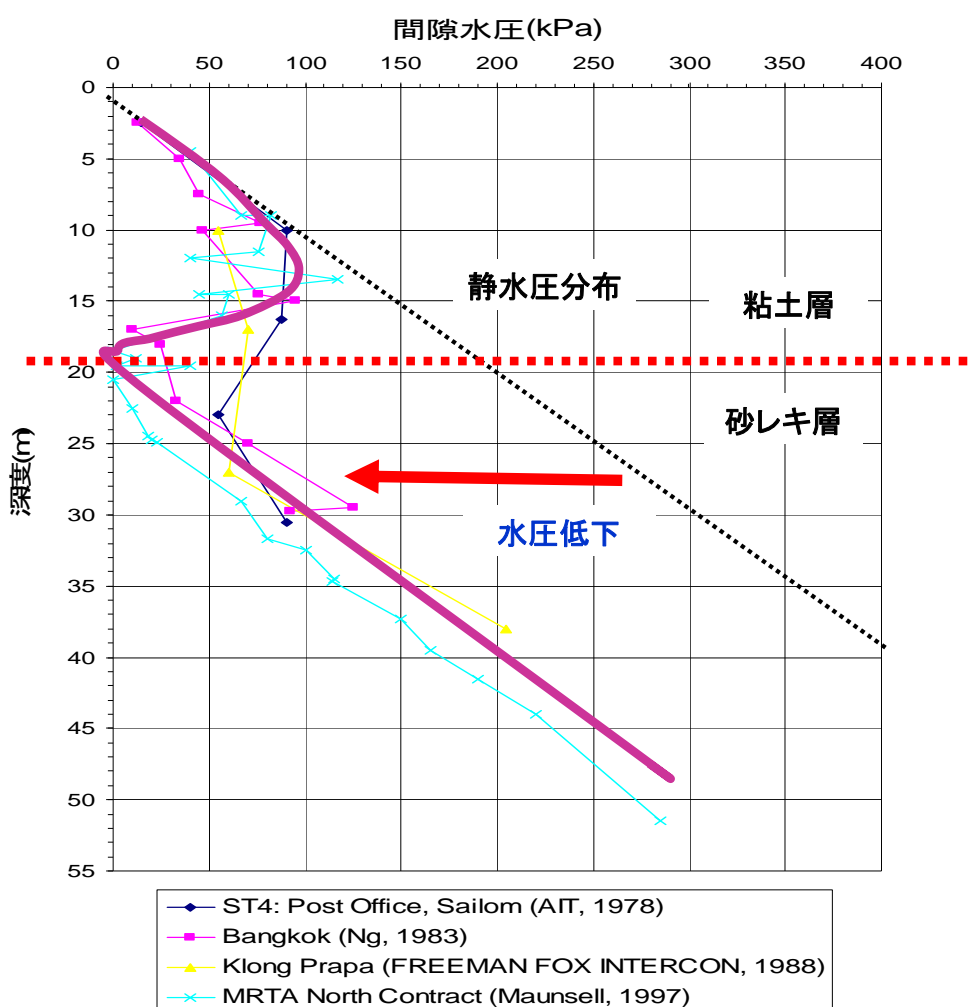


図 4.1 間隙水圧分布

に起因して地盤が圧縮されることによるものであると解釈される。なお、地下鉄が構築された硬質粘土層下部のバンコク滞水層からの地下水汲み上げはほとんど停止されているが、図 4.1 に示す間隙水圧の深度方向の分布の観測結果においては、地下鉄建設段階では依然として水圧低下が生じた状態が継続している。

ここで、バンコクのような地下水汲み上げによる起因する地盤沈下は、これまでにアジア地区の多くの都市において観測されている。日本においても、東京地区および大阪地区では、戦前から高度経済成長期にかけて、主として大量の工業用水用の地下水汲み上げにより地盤沈下が発生したが、その後地下水利用に対する規制の導入により、地盤沈下の発生は抑制された。

ただし、この地下水利用の規制に伴い、東京地区および大阪地区では、図 4.2 の模式図に示すように、間隙水圧が回復することで、その回復水圧が上部の粘土層、および地下構造物に作用する現象が発生している。これに伴い、東京地区および大阪地区

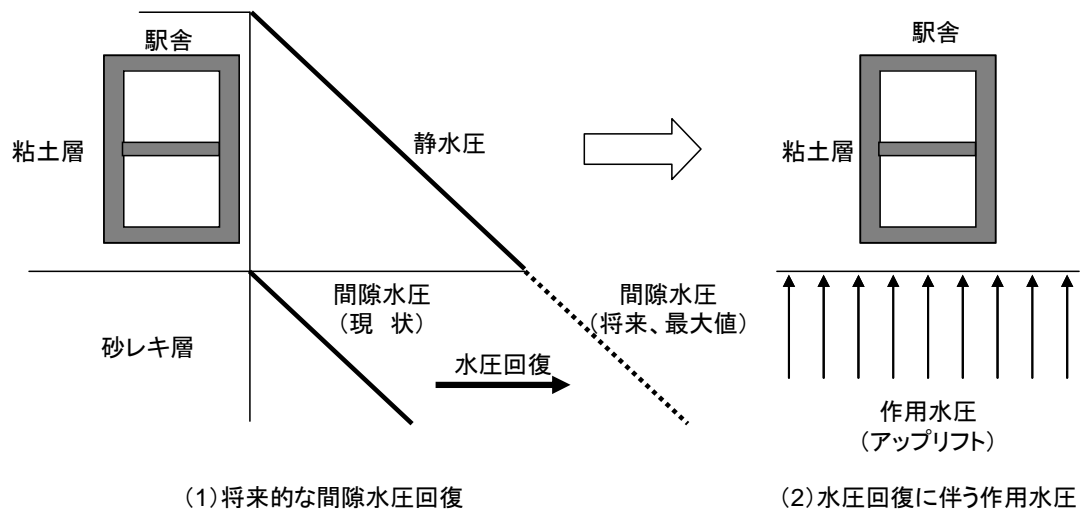


図 4.2 間隙水圧の回復に伴う影響（模式図）

の地下鉄駅あるいは地下街のような地下構造物については、図 4.2 に示す作用水圧（アップリフト）による構造物の浮き上がりに対する対策が検討されるに至っている。

バンコクにおいては、図 4.1 の計測結果に示したように、現状では間隙水圧の回復現象は発生していないが、東京地区および大阪地区での観測結果と同様に、長期的にはバンコク滞水層内の間隙水圧は回復するものと推定される。なお、図 4.2 においては、硬質粘土層内の将来的に回復する間隙水圧が、静水圧状態になり、最大で 200kPa（水深 20m の水圧に相当）程度の水圧が作用する可能性があるとして表現したが、実際にはこれ以下になることに留意されたい³。

このような状況を踏まえて、バンコク地下鉄に関する間隙水圧回復に対する長期的な安定性について、地盤工学の観点から検討を加えることが必要であると推察される。現状で得られている知見を総合した結果としては、以下のような解釈が可能であると思料される。

- 1) 地下鉄および地下鉄駅が設定されている硬質粘土層の変形および浮き上がりについては、当該の硬質粘土層の剛性および強度は比較的高いことから、間隙水圧の回復に伴うリバウンドの影響は小さいものと想定される。
- 2) 駅部については、掘削底版スラブが硬質粘土層内に設定されていることから、水圧の回復に伴う底版スラブへのアップリフトの影響も小さいものと推察される。

しかし、バンコク地下鉄は全長 20km に渡る線状構造物であるため、地盤特性の不均一性（場所ごとに地盤条件が変動する特性）により、間隙水圧の回復することによる影響が部分的には発生する危険性が否定出来ない。このため、日本（東京地区お

³ 【補足説明】

設計においては、回復する間隙水圧の量が明確に予測されない場合には、構造物の重要度を勘案した安全側の値として、最大値を用いることが一般的である。

よび大阪地区)での事例を踏まえ、長期的にこの間隙水圧の回復状況について継続的に監視することが肝要であると推察される。

III-5 まとめ

本検討では、バンコク地下鉄の設計に関する基本概念、および現状での地下水汲み上げに起因する間隙水圧の低下状況を勘案し、地下水汲み上げに起因する地盤沈下が長期的にバンコク地下鉄駅に及ぼす影響について検討を加えた。この結果は、以下のように要約される。

- 1)バンコク地下鉄でのトンネルおよび駅部掘削底盤は、主として軟弱粘土層下部の硬質粘土内に設定する設計方針により、地下水汲み上げに伴う地盤沈下に起因するトンネルおよび駅部に対する影響は軽減が図られている。
- 2)長期的にはバンコク滞水層内の間隙水圧は回復するものと推定される。現状の知見からは、間隙水圧の回復が地下鉄および駅部に及ぼす影響は比較的小さいものと推察されるが、長期的にこの間隙水圧の回復状況について継続的に監視することが肝要であると推察される。

参考文献

- 1)Noppadol Phienwej、大津宏康、Nuttapon Supawiwat、高橋健二：バンコクにおける地下水揚水に伴う地盤沈下、土と基礎、Vol. 53、No. 2、Ser. No. 565、pp. 16-18、2005。
- 2)JICA・RID: The Study on Integrated Plan for Flood Mitigation in Chao Phraya River Basin、Progress Report 2、1998。
- 3) Piancharoen、 P. : Groundwater and Landsubside in Bangkok、Thailand、IAHS. Pub.、No.121、pp.355-364、1997。
- 4)Puapeng、 S. : Groundwater Crisis and Land Subsidence in Bangkok、Proc. of the 3rd Southeast Asian Workshop on Rock Engineering、pp.174-180、2004。