

施工事例分析に基づく線路下カルバートの 構造諸元の決定手法

仲山 貴司* 柳川 一心** 岡野 法之*

Analysis of Structural Variables of Box Culverts for Railway Underpasses

Takashi NAKAYAMA Kazushi YANAGAWA Noriyuki OKANO

In recent year, many railway underpasses have been constructed to improve the convenience of areas along railway lines. Because it is a structure that supports a railway, it is designed according to the design standards for railways. In this paper, in order to improve efficiency in the design work, we collected the information of the box culvert of railway underpasses and analyzed the relationship between the depth, the span length and the thickness of the members. As a result, we propose a method for easily deciding the proportions of the box culvert.

キーワード：線路下横断構造物，カルバート，設計，構造計画，事例分析

1. はじめに

近年、交通渋滞の緩和のための踏切の除却や河川氾濫防止のための河川改修などのリニューアルを目的として、図1に示すような線路下横断構造物の建設が数多く実施されている。その施工事例は踏切道改良促進法（1961年）の制定から現在に至るまでの間で1200件以上に及び、今後も増加していくものと考えられている。この背景には、国土交通大臣が指定する緊急に対策が必要な踏切が数多く残されていること、近年の豪雨災害のために河川や水路の改修の要望が高いことなどがある¹⁾。

線路下横断構造物のうち「線路下カルバート」とは、鉄道構造物等設計標準・同解説（開削トンネル）²⁾（以下、開削標準）において、「列車を支持するがその内空を列車が走行しない地中構造物」と定義され、設計に開削標準を準用する場合の取扱いについて必要な事項（特に適用すべきでない事項や適用しなくてもよい事項）が補足的に解説されている構造物である。

線路下カルバートは、開削標準の適用範囲である“鉄道トンネル”には含まれないものの、上記のように開削標準に準用する方法が解説される理由には、「道路と鉄道との交差に関する協議等に係る要領」³⁾において、「道路と鉄道との交差等に関する技術的基準は、道路構造令（昭和45年政令第320号）、鉄道に関する技術上の基準を定める省令（平成13年国土交通省令第151号）及びこれらに準ずる諸基準による。この場合において、当該工事完成後の道路又は鉄道はそれぞれ従前の機能を阻害しない範囲内のものとする。」とされていること、河川

* 構造物技術研究部 トンネル研究室

** 構造物技術研究部 トンネル研究室（現 ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社）

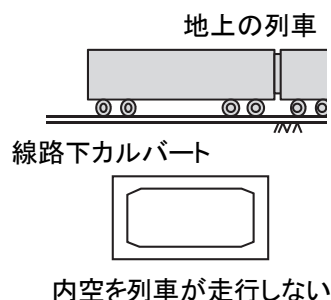


図1 線路下カルバートの例

と鉄道の交差についても同様の要領⁴⁾が定められていることが背景にある。

一般に、トンネルに必要とされる耐荷性能は、トンネルく体の内空側の作用ではなく、トンネルく体の地山側に作用する地表面の上載圧の影響を含む土水圧の大きさによって決定する。そのため、内空利用と地上利用の双方の技術基準を用いて設計した場合には、地上側の技術基準（線路下カルバートの場合には鉄道側の基準）に準じて設定した作用が部材厚や主鉄筋量等の決定要因となる場合が多い。このような背景のもと、本論文では開削標準に準じて線路下カルバートの設計を行う際の作業の効率化を目的として、これまで筆者らが収集してきた施工事例を整理、分析した結果を示す。

施工事例の整理、分析にあたって、線路下カルバートの設計作業では、まず、設計の前提となる与条件から部材厚を仮定し、次に、この部材厚に基づき作用の算定、構造物および地盤のモデル化および構造解析を行い、主鉄筋量を決定する場合が多い。このため、効率的な設計を行うためには、要求性能を満足させやすい部材厚を予め設定することが重要となることから、内空幅や内空高、土被りと各部材厚の関係に着目した。

特集：開削トンネルの設計技術

表1 構造形式別の事例数

構造形式の種類	事例数
ボックス形式	262
下路桁形式	19
トンネル形式	39
その他（複合形式等）	19
合計	339

表2 ボックス形式の施工法別の事例数

施工法の種類		事例数
開削方式	工事桁工法	107
	オープンカット工法	34
	仮線工法	7
非開削方式	URT工法	5
	PCR工法	1
	JES工法	24
	パイプルーフ工法	1
	パイプビーム工法	7
	フロンテジャッキング工法	18
	R&C工法	37
	SFT工法	6
	推進工法	1
	メッセル工法	1
	その他（不明等）	13
	合計	262

2. 分析対象とした施工事例の傾向

筆者らは、鉄道事業者等に対して線路下横断構造物全般の施工事例の調査を1999（平成11）年度と2014（平成26）年度の2回にわたり実施した。この中で、構造諸元のわかるものは339事例であった。本章では、収集した施工事例の傾向を俯瞰する。

2.1 全施工事例に占める構造形式別の割合

収集した線路下横断構造物の構造形式別の事例数を表1に示す。施工事例のうち、本論文で分析の対象とする線路下カルバートの構造形式であるボックス形式は262事例で、全体の約77%であった。

2.2 ボックス形式の施工法別の割合

ボックス形式の施工法別の事例数を表2に示す。開削工法に分類されるオープンカット工法は鉄道の新線建設時に合わせて線路下横断構造物を建設する場合に多く採用されるもので、その他の工法は既設鉄道直下に新たに線路下横断構造物を建設する施工法である。

このうち、線路下横断構造物の完成型が鉄筋コンクリート構造となる工法は、開削工法のほか、非開削工法のフロンテジャッキング工法、R&C工法およびSFT工法が主なものである。これらは、ボックス形式のなかで約83%の218事例であり、全施工事例に対しても約64%を占める。一方、これら以外の非開削工法は線路

表3 分析対象事例の内空の使用目的

内空の使用目的	事例数
道路	123
水路	59
道路・水路	6
不明	1
合計	189

表4 分析対象事例の層・径間数

形状	事例数
1層1径間	123
1層2径間	24
1層3径間	32
1層4径間	10
合計	189

下に連続掘進した角型鋼管等を本設部材として利用するものである。その部材厚は、施工時に角型鋼管等の中に作業員が立ち入ることを想定し、労働省基発第204号（昭和50年4月7日付）に基づいて800mm以上を標準としていることから、分析の対象外とした。また、一般的な鉄筋コンクリート構造の施工事例においても、鉄道との交差角が60°以上の場合または杭付きの場合には、開削標準において特殊な設計条件として取扱っていることから、分析対象から外した。その結果、分析対象事例数は189となった。

2.3 分析対象事例の特徴

分析対象事例の使用目的を表3に示す。使用目的は道路が最も多く、約65%を占める。これらの層・径間数を表4に示す。層数は1層のみで、径間数は1径間が最も多く、約73%を占める。

また、内空幅と内空高の関係を図2に、内部空間の縦横比（＝内空幅／内空高）と事例数の関係を図3に示す。なお、多径間の施工事例の場合は最大幅の径間の値を用いて整理した。図2から、内空高は概ね6mで頭打ちとなるのに対して、内空幅は最大で18m程度の事例も見られるなど広く分布していることがわかる。また、図3から、線路下カルバートが横長（内空幅 ≥ 内空高）となるものが9割以上を占め、その縦横比は1.00～1.75となる事例が多いことがわかる。

3. 施工事例の部材厚の傾向

3.1 上床版に着目した分析

線路下カルバートの設計においては、構造寸法の前提条件として、内空の使用目的により、内空幅、内空高および土被りが決定される。このうち、上床版厚の設定に

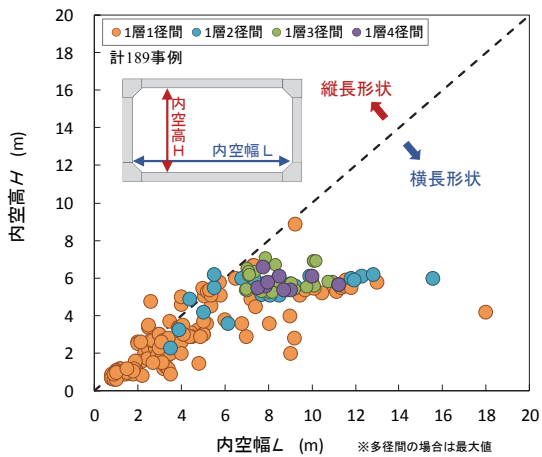


図2 内空幅と内空高の関係

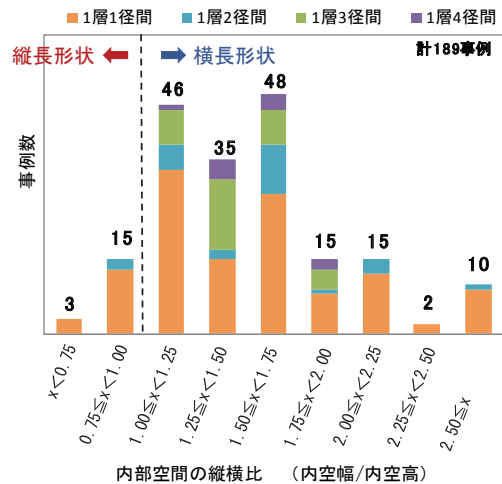


図3 内部空間の縦横比と事例数の関係

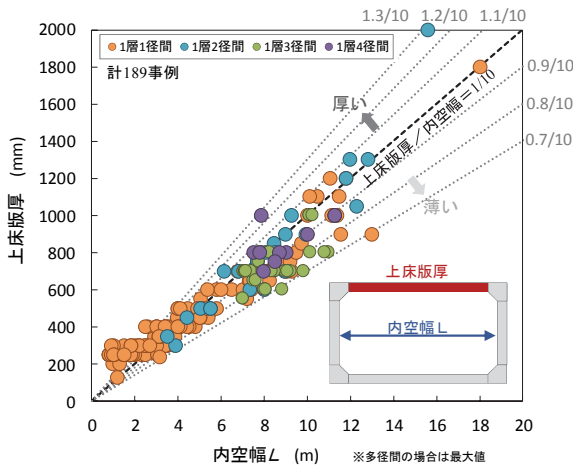


図4 内空幅と上床版厚の関係

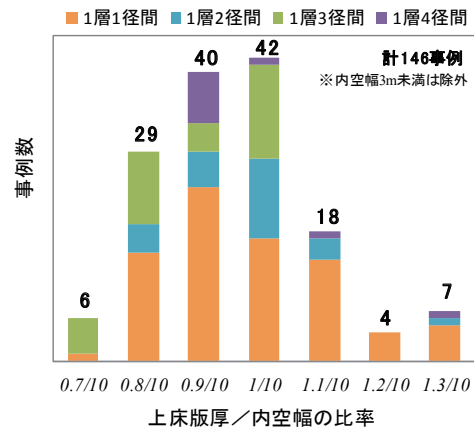


図5 上床版厚／内空幅の比率と事例数の関係

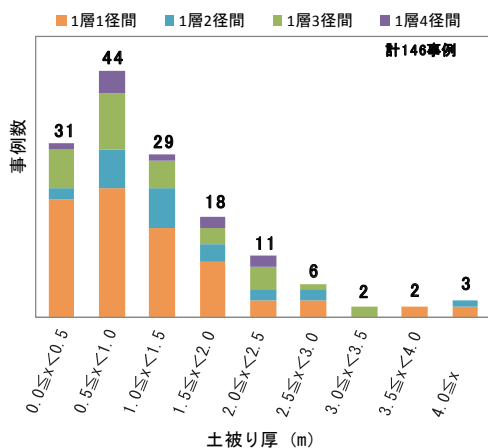


図6 土被りと事例数の関係

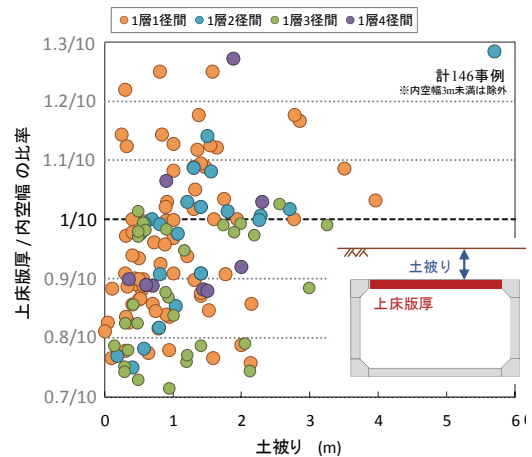


図7 土被りと上床版厚の関係

影響すると考えられる内空幅と土被りとの関係に着目して傾向を整理した。なお、列車荷重の種類も設計の与条件と考えられるが、列車荷重のわかっている事例は概ね設計列車荷重 EA-17であったことから、列車荷重に関する分析には至らなかった。

3.1.1 内空幅と上床版厚の関係

内空幅と上床版厚の関係を図4に示す。線路下カルバートは、内空幅が大きくなるに伴い、同じ作用下でも上床版に発生する断面力が大きくなること、地上の列車荷重に起因した変動作用による土圧の特性値自体も大き

特集：開削トンネルの設計技術

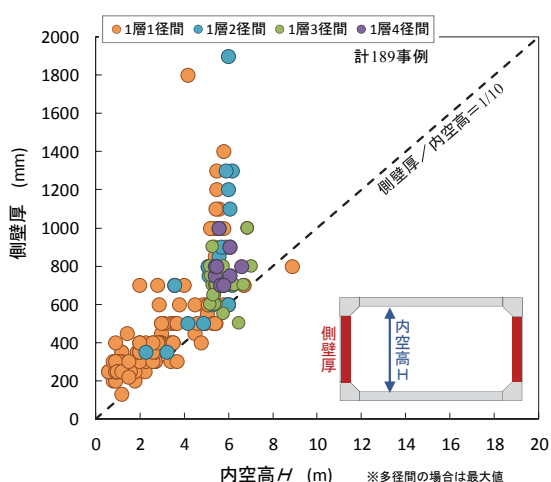


図8 内空高と側壁厚の関係

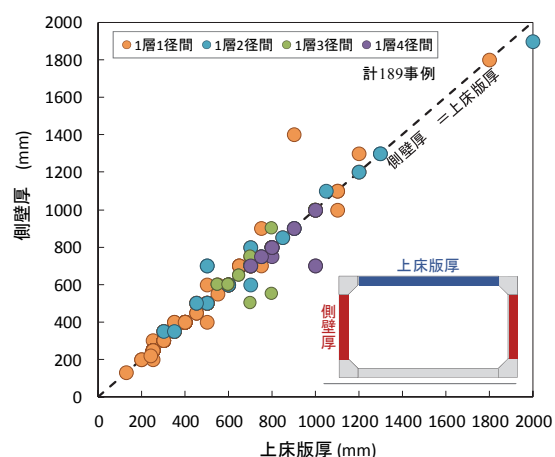


図9 上床版厚と側壁厚の関係

くなることから²⁾、一般には、内空幅の増加に合わせて上床版厚は厚くなる傾向を示すものと考えられる。図4から、内空幅が3m以上の場合に内空幅と上床版厚が比例する傾向がみられるのに対して、内空幅が3m未満の場合には内空幅に関わらず100～300mm程度の部材厚となっていることがわかる。なお、径間数の違いによる差は見られない。

さらに、内空幅と部材厚が比例関係にある146事例(内空幅が3m以上の施工事例)における上床版厚と内空幅の比率(=上床版厚/内空幅)と事例数の関係を図5に整理した。この図から、具体的には上床版厚と内空幅の比率は、1.0/10の割合が最も多く、0.8/10～1.1/10の範囲となる事例が9割近くを占めることがわかる。

これらの結果から、内空幅が3m以上の場合には上床版厚と内空幅の相関が強く、内空幅は上床版厚の設定の目安とできるものと考えられる。

3.1.2 土被りと上床版厚の関係

同じく内空幅と部材厚が比例関係にある146事例を対象として、土被りと事例数の関係を整理した結果を図6に、土被りと上床版厚の関係を図7に示す。

図6から、施工事例の土被りは0～4.0m程度の範囲に分布しており、このうち、0.5～2.0mの範囲となる事例が約62%を占める。図7から、これらの事例においては土被りと上床版厚には明瞭な相関がみられないことがわかる。この理由として、線路下カルバートの設計に用いる永久作用としての土圧には、一般に全土被り圧が採用されるため、土被りが大きくなるのに伴いその特性値が大きくなる一方で、地上の列車荷重に起因した変動作用による土圧の特性値は、土中の応力分散により小さくなること、および、整理した施工事例では土被りが小さいため、地上の列車荷重に起因した変動作用による土圧が支配的と考えられるが、列車荷重の種類に関する分析に至らなかったことが原因として考えられる。いず

れにしても、今回整理した施工事例からは、土被りを上床版厚の設定の目安として利用する関係性は得られなかった。

3.2 側壁に着目した分析

上床版厚の傾向を踏まえ、側壁厚については内空高との関係に着目した。また、線路下カルバートは不静定構造物であるため、上床版厚と側壁厚の比率を保つ必要があることが知られていることから、上床版厚の関係についても傾向を整理した。

3.2.1 内空高と側壁厚の関係

内空高と側壁厚の関係を図8に示す。一般に、線路下カルバートの内空高が大きくなるに伴い、上床版と同様に側壁に発生する断面力は大きくなる傾向を示すが、上床版厚と内空幅のような相関は見られなかった。内空高は6m程度で頭打ちとなるが、側壁厚は6m付近で500mm～2000mm付近まで分布しており、非常にばらつきが大きい。

3.2.2 上床版厚と側壁厚の関係

上床版厚と側壁厚の関係を図9に示す。この図から側壁厚は上床版厚と相関が見られ、ほぼ同じ厚さに設定されていることがわかる。このことから、側壁厚については、内空高よりも上床版厚の設定の目安になるものと考えられる。

3.3 下床版に着目した分析

下床版厚についても、上床版および側壁の傾向を踏まえ、内空幅との関係に着目した。また、上床版厚との関係について傾向を整理した。

3.3.1 内空幅と下床版厚の関係

内空幅と下床版厚の関係を図10に示す。また、下床版厚と内空幅の比率(=下床版厚/内空幅)と事例数の関係を図11に示す。

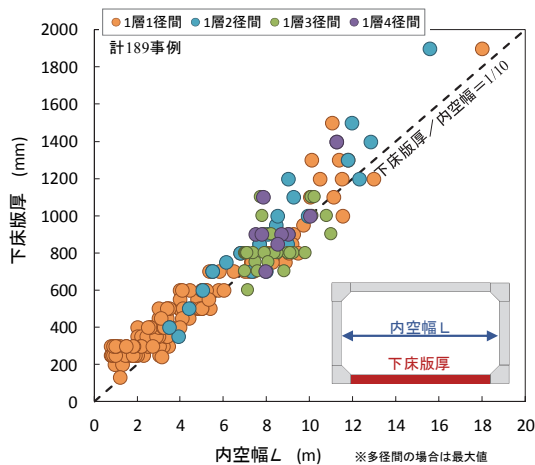


図10 内空幅と下床版厚の関係

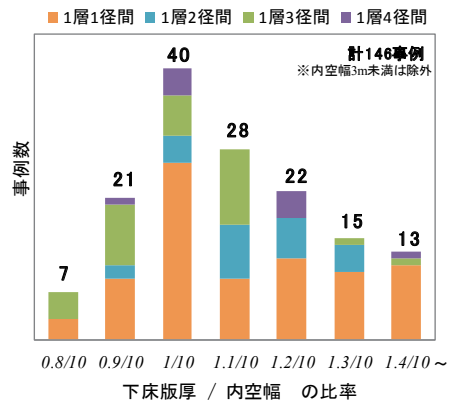


図11 下床版厚／内空幅の比率と事例数の関係

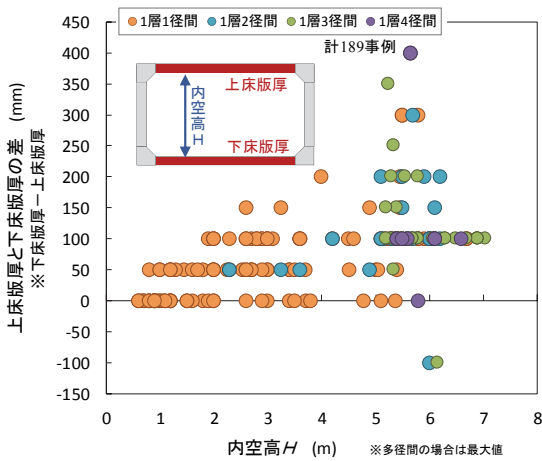


図12 上床版厚と下床版厚の関係

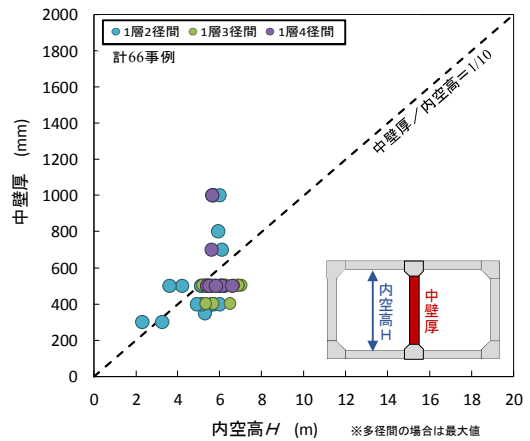


図13 内空高と中壁厚の関係

下床版は上床版への作用と線路下カルバートの自重を地盤反力として受けるほか、揚圧力を受ける。これらによる断面力の増減の傾向は上床版と同様であるが、上床版よりも大きな断面力が発生することから、上床版よりも大きな部材厚が設定される傾向を示すものと考えられる。図10から、内空幅と上床版厚の関係と同様、内空幅が3m未満では内空幅に関わらず100～400mm程度の下床版厚となり、内空幅が3m以上では比例関係があることがわかる。また、上床版厚と内空幅の比率では、その多くが0.8/10～1.0/10に分布していたのに対し、下床版厚と内空幅の比率（図11）では、1.0/10を中心に0.9/10～1.4/10以上まで厚い方に分布していることから、前述した傾向が見られることがわかる。

3.3.2 上床版厚と下床版厚の差と内空高の関係

さらに、上床版厚と下床版厚の差と内空高の関係を図12に示す。この図より、下床版厚は内空高が大きくなるにつれてばらつきが大きくなる傾向にあることがわかる。これは下床版が浮き上がりに対するカウンターウェイト

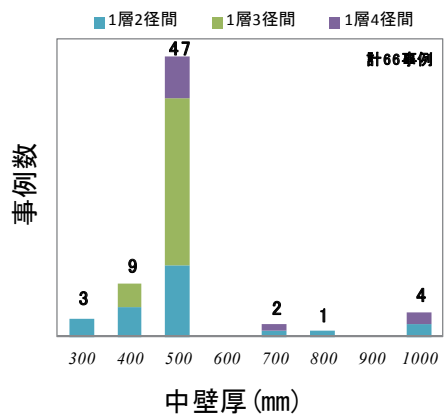


図14 中壁厚と事例数の関係

イトとして利用されることも一因と考えられる。ただし、内空高が3m以上となる事例については、下床版厚が上床版厚+100mmの事例が多くみられ、ばらつきは大きいものの、下床版厚については、上床版厚+100mmが設定の目安になるものと考えられる。

特集：開削トンネルの設計技術

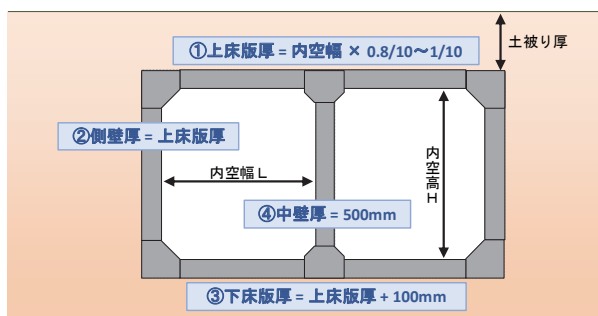


図 15 構造寸法の決定方法（案）

3.4 中壁に着目した分析

中壁については、中壁厚と内空高の關係に着目して整理を行った。なお、この整理についてはボックス形状が1層2径間～1層4径間となる66事例を対象とした。内空高と中壁厚の關係を図13に、中壁厚と事例數の關係を図14に示す。この結果から、中壁厚は内空高によらず、500mmの事例が多いことがわかる。

4. 構造寸法の決定方法の目安

内空幅が3.0m以上の事例分析から得られた知見をまとめると、線路下カルバートは図15のような構造寸法を有している場合が多いことが明らかになった。それぞれの分析においてある程度のばらつきは有するものの、構造解析の前段として、次のように構造寸法を決定することで、既存の線路下カルバートと同程度の主鉄筋量の設計ができる可能性が高いと考えられる。

- ①上床版厚=内空幅×0.8/10～1.0/10と設定
- ②側壁厚=上床版厚と設定
- ③下床版厚=上床版厚+100mmと設定
- ④中壁厚=500mmと設定

なお、これらは2章で示した使用目的等の偏りを受けものであること、また、実際の構造寸法の設定では、従来と同様に設計対象が位置する線路下カルバート近傍の類似事例も勘案することが必要であることに留意頂きたい。

5. おわりに

本論文では、設計作業の効率化を目的に、これまで著者らが収集してきた線路下横断構造物に関する施工事例のうち、一般的な設計条件の鉄筋コンクリート構造の線

路下カルバートの189事例を対象として、内空幅や内空高、土被りと各部材厚の關係を分析した。

施工事例の分析から得られた知見は次の通りである。

- (1) 収集された線路下カルバートは横長（内空幅 ≥ 内空高）となるものが9割以上を占め、その比率は1.00～1.75となる事例が多い。
- (2) 上床版厚は、内空幅が3m以上の場合には内空幅と比例傾向があり、上床版厚と内空幅の比率は1.0/10が最も多く、0.8/10～1.1/10の範囲としている事例が9割近くを占める。内空幅が3m未満の場合には内空幅に関わらず100～300mm程度の部材厚である。
- (3) 側壁厚は、内空高との相関よりも上床版厚との相関が強く、上床版厚とほぼ同じ値に設定されていることが多い。
- (4) 下床版厚は、上床版厚と同様、内空幅に相関がみられた。同じ上床版厚の場合、内空高が高くなるにつれて下床版厚は厚くなる傾向にあり、内空高が3m以上となる事例については、下床版厚が上床版厚+100mmとなっている事例が多い。
- (5) 中壁厚は内空高によらず、500mmの事例が多い。

謝辞

本論文を纏めるにあたり、鉄道事業者等の皆様に線路下カルバートの施工事例に関する情報提供にご協力いただいた。末筆ながら、感謝の意を表する次第である。

文献

- 1) 公益社団法人 土木学会：トンネル・ライブラリー 特殊トンネル工法—道路や鉄道との立体交差トンネル—, 2019
- 2) 鉄道構造物等設計標準（開削トンネル）に関する委員会：鉄道構造物等設計標準・同解説（開削トンネル）最終原案, 2016.3
- 3) 道路と鉄道との交差に関する協議等について、国都街第155号、国道政第74号、国鉄技第178号、平成15年3月20日
- 4) 河川工事に起因して生じる鉄道工事について、国河治第191号、国鉄技第138号、平成14年12月25日
- 5) 柳川一心、今枝潤志、石橋孝通：線路下ボックスカルバートの構造プロポーシオンに関する検討、土木学会 平成28年度全国大会 第71回年次学術講演会 VI-107, 2016