

北海道における構造設計研究小委員会 報告書

—われわれは、いま、橋梁を設計していると言えるか？—

2019年10月31日

北海道土木技術会
コンクリート研究委員会

北海道における構造設計研究小委員会

序

土木構造物の照査方法は、各事業体の技術基準で規定されており、時代とともに改訂を重ね、進歩を続けている。

しかし、照査方法が進歩する一方で、技術者の目は基準の理解に注がれており、構造計画段階では実績に基づいた「構造形式の選定」が行われるのみであり、本来の創造的行為である設計に対する技術者の意識は希薄になりつつある感は否めないのが現状である。

また、照査技術が進歩しても、構築される構造物の形式は大きく変化していないのが実態である。このことは、照査技術が進歩しても数値計算では照査できない構造設計の設計思想（普遍の真理）が存在することを意味しているとも言える。これは、技術基準で記載されない事項が「陰」な形で技術伝承されてきている結果と考えることもできる。

一方、近年、社会資本の長寿命化の観点から橋梁の維持管理が重要な行為となり、橋梁などの損傷状況などを含む情報が蓄積されつつある。これらを活用すれば、建築構造物に見られるような北海道特有の積雪寒冷地域に適した橋梁の構造形態などを見出すことも可能であると考ええる。

また、性能照査型設計体系の導入に伴い、性能の確保や向上に着目した構造形態のあり方に関しても、検討の余地はあるものと考えられる。

本委員会では、これらの現状を踏まえ、照査基準には記載されない構造設計の視点で検討を行い、技術伝承の観点から従来の設計思想を「陽」な形で表し、北海道の地域特性に適し、かつ性能に根差した構造形態等に関する研究を行うものである。

本報告書は、よい設計を行い、よい構造物とするために、その過程も含めて検討した結果を取りまとめたものである。設計は、思考の過程が重要であるため、可能な限り、それらを網羅できるように、敢えて不十分な資料も取り込んである。

なお、本小委員会に参加していただいた委員に感謝するとともに、本小委員会をマネジメントしていただいた古内幹事長、庄司副幹事長、今西 WG 主査、阿部 WG 主査には、心より深く感謝する次第である。

北海道土木技術会 コンクリート研究委員会

北海道における構造設計研究小委員会

委員長 渡辺 忠朋

北海道における構造設計研究小委員会

委員構成

委員長	渡辺 忠朋	北武コンサルタント(株)
幹事長	古内 仁	北海道大学大学院 工学研究院
副幹事長	庄司 和晃	(株)ドーコン 東日本事業本部 東京支店事業部
幹事	斉藤 聡彦	北武コンサルタント(株) 技術部
幹事	坂村 和俊	(株)構研エンジニアリング 橋梁部
幹事	佐藤 京	(独)寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ
幹事	高澤 昌憲	オリエンタル白石(株) 北海道営業所
委員	秋野 薫	(株)シビテック 構造部
委員	浅川 勝貴	岩田地崎建設(株)
委員	阿部 淳一	北武コンサルタント(株) 技術部
委員	石山 信	鉄建建設(株) 札幌支店 土木営業部
委員	伊勢 貴浩	北海道開発局 札幌開発建設部道路整備保全課 (～2016. 5)
委員	市橋 俊夫	大成建設(株) 札幌支店 営業部
委員	伊藤 拓	ドーピー建設工業(株) 技術部北海道グループ
委員	井上 雅弘	(株)長大 札幌支社
委員	今井 隆	(株)ビービーエム 技術審査管理部
委員	今西 修久	(株)エイト日本技術開発 国土インフラ事業部 東京支社国土インフラ部
委員	上田 多門	北海道大学大学院 工学研究院
委員	角間 恒	(独)寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ
委員	片桐 章憲	(株)ドーコン 交通事業本部構造部 (～2016. 2)
委員	川村 力	北海道旅客鉄道(株) 工務部 工事課
委員	菊田 悦二	(独)寒地土木研究所 寒地保全技術研究グループ (2015. 5～)
委員	菊地 智宏	北海道開発局 札幌開発建設部 道路整備保全課 (2018. 6～)
委員	吉川 英行	(株)長大 構造事業本部札幌構造技術部
委員	木村 和之	(株)構研エンジニアリング
委員	古関 恒二	いであ(株) 札幌支店陸圏部
委員	後藤 宏行	北海道開発局 札幌開発建設部 道路整備保全課 (2016. 6～2018. 5)
委員	佐井 拓磨	(株)ドーコン 交通事業本部構造部 (2016. 3～)
委員	齋藤 高浩	東京ファブリック工業(株) 札幌営業所 (～2015. 4)
委員	坂口 淳一	北武コンサルタント(株) 技術部
委員	佐藤 靖彦	北海道大学大学院 工学研究院 (～2017. 3)
委員	鈴木 正良	(株)開発工営社 交通事業本部 交通第2部
委員	田中 雄太	(株)タナカコンサルタント
委員	富澤 幸一	北武コンサルタント(株) 技術部
委員	中村 和己	東日本高速道路(株) 北海道支社道路事業部 保全課 (2017. 4～)

委員	西原 史和	日本工営(株) 札幌支店 技術第一部
委員	橋本 勝文	北海道大学大学院 工学研究院 (～2016.5)
委員	松本 高志	北海道大学大学院 工学研究院
委員	水上 善晴	東日本高速道路(株) 北海道支社 技術部 (2018.9～)
委員	三原 慎弘	(独)寒地土木研究所 寒地保全技術研究グループ耐寒材料チーム (～2015.4)
委員	村山 陽	東日本高速道路(株) 北海道支社 技術部 (～2018.8)
委員	山下 真司	東京ファブリック工業(株) 札幌営業所 (2015.5～)
委員	横田 弘	北海道大学大学院 工学研究院

注) 敬称略. 幹事・委員は五十音順. 所属は当時のもの.

試設計グループA

主査 今西 修久

市橋 俊夫	伊藤 拓	角間 恒	川村 力	菊田 悦二
吉川 英行	木村 和之	古関 恒二	菊地 智宏	後藤 宏行
斉藤 聡彦	庄司 和晃	鈴木 正良	田中 雄太	中村 和己
山下 真司	(松本 高志)	(渡辺 忠朋)		

注) 敬称略. 幹事・委員は五十音順. () はアドバイザー.

試設計グループB

主査 阿部 淳一

秋野 薫	浅川 勝貴	石山 信	井上 雅弘	今井 隆
佐井 拓磨	坂口 淳一	坂村 和俊	佐藤 京	高澤 昌憲
富澤 幸一	西原 史和	古内 仁	水上 善晴	村山 陽
(上田 多門)	(横田 弘)			

注) 敬称略. 幹事・委員は五十音順. () はアドバイザー.

北海道における構造設計研究小委員会 報告書

目 次

1. はじめに	1-1
2. 橋梁の設計の現状と課題	2-1
2.1 設計の段階	2-1
2.2 構造計画	2-2
2.3 設計に関するエッセイ	2-4
3. 橋梁の要求性能と構造特性（よりよい橋梁とは？）	3-1
3.1 はじめに	3-1
3.2 性能照査の考え方	3-1
3.3 橋梁全体系の特性と要求性能	3-5
3.4 構造詳細の配慮と要求性能	3-31
3.5 形式の選定（設計解の選択）	3-43
4. 北海道のための橋梁の試設計	4-1
4.1 目的	4-1
4.2 基本方針	4-1
4.3 設計条件	4-1
4.4 試設計	4-4
5. 北海道においてよい橋梁とは？	5-1
5.1 はじめに	5-1
5.2 積雪寒冷地の特性を考慮した橋の耐久性の確保	5-1
5.3 積雪寒冷地の特性を考慮した橋の新たな機能の創造	5-2
5.4 まとめ	5-2
6. おわりに	6-1

1. はじめに¹⁾

近年、土木学会を始めとして種々の事業体で性能照査型設計体系への移行が進んでいる。性能照査型設計体系は、要求性能を明確にして、その要求性能が満足されることを照査する体系であり、仕様規定型設計体系に比べて、要求性能の規定による構造物の性能の情報開示や、設計の自由度の増加などの特徴を有しているとされている。

性能照査型設計体系における設計作業の役割や特徴に関しては、種々の議論が行われてきている^{2),3),4)}。それらの議論を通じて、本小委員会では、性能照査型設計体系の中で設計作業を、その主旨に鑑みて、以下のように設計と照査に区分して考えることとした（図 1.1 参照）。

設 計：構造物の形式や形状を具現化する行為

照 査：説明責任を果たすために、設計の妥当性を示す行為

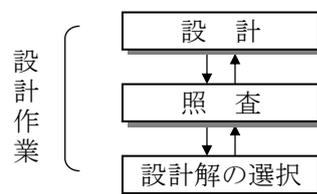


図 1.1 設計作業とその流れ

一般に、設計とは、技術基準に従って計算作業を行うことを指すが、この作業は、ここでいう設計とは本質的に異なることに留意する必要がある。技術基準に従って計算作業を行うことは、ここでは照査と呼んでいる。なお、現状で、設計と照査が混同されているのは、設計の目標が照査を満足させることだけになっている場合に、両者の区別がつかなくなるためと考えられる。

照査の作業は、現状では、技術基準に従って作成されたコンピュータソフトにより実施されており、多くの場合、技術者の判断の入る余地はなく、技術者の技術力は、設計した構造物の照査手法の適用の妥当性の判断のみといっても過言ではない。その結果、技術者の技術力は、技術基準の理解度として考えられる場合が多いことになる。

一方、設計は、設計対象の要求性能、機能、環境、施工、維持管理などの制約条件を考慮した上で、白紙の状態から合理的と考えられる構造形態を具現化する行為であり、創造性が必要とされる。もちろん、その創造性は、設計対象の機能や振る舞いに対する知識と、設計対象の照査技術に対する知識の両方に基づいたものでなければならない。

単に技術者の思いを形に表しても、設計対象に対する知識と照査技術に対する知識に基づいて表したものでなければ、照査を満足できなくて実現不可能となり、多大なる労苦が発生するだけになることに留意すべきである。

このように、「設計」と「照査」に区分して考えると、両者の行為では、技術者に要求される知識が必ずしも一致しないことが分かる。したがって、よい構造物を設計するためには、照査に対する技術はもとより、設計に対する技術も重要であり、ある意味で、設計行為は、照査行為よりも広範囲な技術力と資質を要する作業として位置付けられる。

また、照査は、構造物の振る舞いを精度良く予測する技術が必要とされることになるが、近年のコンピュータの進化を勘案すると、照査を全てコンピュータにより実施できる段階が近未来に訪れるものと想定される。現状でも、照査技術の精度によらなければ、照査行為がコンピュータで実施されている現状を考えると、その状況は容易に想像できる。

そのように考えると、技術者は、創造性のある行為を行う「設計」に、その存在を見いださざるをえないことになると思える。もちろん、照査の技術を向上させるための技術者の存在も、合わせて必要かつ重要であることはいままでもない。

近年、土木学会示方書^{5),6),7)}などで「構造計画」に関する記載の充実が図られているが、これは「設計」の重要性を示唆したものと考えることができる。

なお、本報告書では、設計の重要性を示すために、設計と照査を前述のように定義し、明確に分離して取り扱うこととする。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 104 鉄筋コンクリート構造物の設計システムーBack to the Future IIー，平成 26 年 7 月
- 2) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 20 コンクリート構造物の耐震技術ー現状と将来展望ー，平成 9 年 7 月
- 3) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 48 コンクリート構造物の耐震性能照査技術ー現状と将来展望ー，平成 14 年 12 月
- 4) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 67 地震作用に対するコンクリート構造物の性能照査型設計ー設計と照査の現状と将来展望ー，平成 17 年 9 月
- 5) 土木学会：2007 年制定 コンクリート標準示方書，2008.3
- 6) 土木学会：2009 年制定 複合構造標準示方書，2009.12
- 7) 土木学会：2007 年制定 鋼・合成構造標準示方書，2007.3

2. 橋梁の設計の現状と課題

2.1 設計の段階¹⁾

構造物の設計にはいくつかの段階がある。地震作用に対する設計上の流れを例に、以下に説明する。

構造物の設計は、地震時および地震後において、人命の損失を生じさせるような壊滅的な損傷の発生を防ぐこと、安全を確保すること、および、地域住民の生活や生産活動に支障を与えるような機能の低下を極力抑制することなどを目標としなければならない。

この要求を達成するために、設計対象構造物の機能が社会活動に与える影響範囲を設定し、想定した地震作用に対して地震時および地震後の設計対象構造物の機能保持の程度を定めて、それを満足するように構造物の性能を照査することになる。

鉄道構造物を例にとると、交通手段として設計対象構造物が存在する路線全体に対する要求があり、その結果として、設計対象構造物に対する要求性能が規定されるということになる。そして、設計対象構造物全体としての要求が規定された結果、構造物の構造要素に対する要求が限界状態として規定されることになる。すなわち、地震作用に対する要求性能は、交通ネットワーク要素の一要素としての要求が規定された結果として、構造物に対して規定されたものである。

このような流れに対応して、鉄道事業では、一般に、構造物の設計の段階が、路線計画、概略設計、詳細設計に区分されて実施される（図 2.1）。

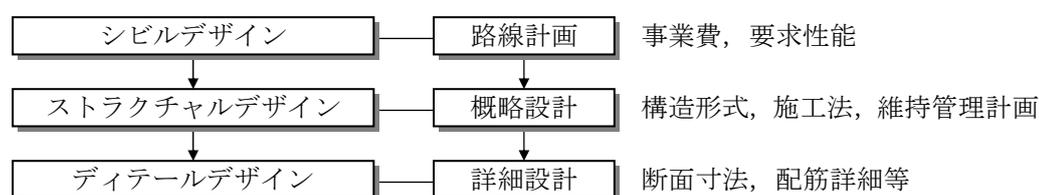


図 2.1 設計の段階

それぞれの段階で、必要とされる情報、技術および精度等が異なるが、よい構造物を設計するためには、これらの流れを理解しておく必要がある。

路線計画段階では、構造形式などを想定して事業規模や事業費を決定する。

概略設計段階では、路線計画で想定した構造形式の妥当性の検証を目的として構造検討を行い、構造形式を決定する。

詳細設計段階では、その構造形式に対して、断面寸法、配筋照査などの構造詳細を決定する。

この流れにおいては、設計対象構造物の要求性能、経済性等を含む制約条件は、詳細設計以前の段階でほぼ確定されている。したがって、ときに概略設計段階においても、路線計画段階と大きく異なる構造形式に変更することは困難であり、ましてや詳細設計段階では、主要な構造形式の変更は不可能となる。その結果として、技術者は、多くの場合、断面形状や配筋詳細などの行為にのみその技術力を発揮することになり、前述の「設計」という行為は、実質的に行う余地がないことになる。したがって、よい構造物を設計するためには、路線計画段階から構造形態の検討に取り組んで、その結果を路線計画に反映させる必要があり、「設計」は、本来、路線計画段階で取り込まれる行為として位置付けることが重要であると考えられる。技術者もそ

れを認識し、路線計画段階で、その創造性を発揮するように努力する必要がある。

なお、これらの概念をより一般化して、設計の段階を、シビルデザイン、ストラクチャルデザイン、ディテールデザインと区分することで、「設計」の重要性も含めて示唆的な考え方が示されたものもある²⁾ので参考にするのがよい。

2.2 構造計画¹⁾

一般の設計作業の流れを図 2.2 に示す。一般の設計作業の中では、構造計画は、構造物の形式、材料、主要寸法、施工条件、維持管理方法などを決定する段階である。

一般の設計作業においては、構造計画が「設計」に該当することになる。設計は、構造計画段階で終了し、その後は技術規準に従った照査という計算行為を行うのみとなる。

したがって、構造計画は、技術者が感性や経験に基づき創造的行為を行なえる唯一の段階である。よい構造物を設計するためには構造計画が最も重要な段階であり、この段階でよい構造物が構築されるか否かが決定されると考えてよい。

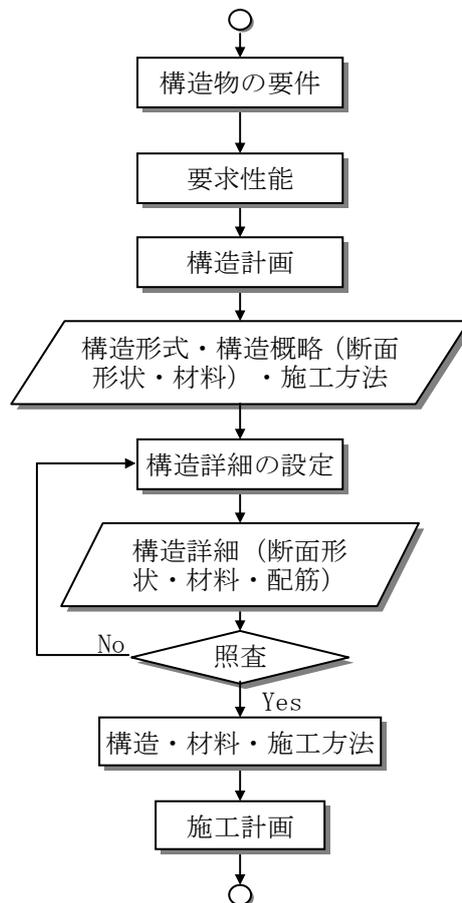


図 2.2 設計作業の流れ

現行の技術規準においては、安全性、使用性、復旧性を満足し、施工方法、維持管理手法、環境（含む景観）に与える影響、経済性などを考慮し、総合的に検討しなければならないことになる。

構造計画では、これらの構造物の要求性能を最も合理的に満足する構造要素で構造物を構成した構造形態を考える設計姿勢を持つことが必要である。

現状では、一般に、従来の実績に基づいて橋梁形式が選定されるのが一般である（表 2.1）。

表 2.1 に基づいて橋梁のスパンのみに着目した実績あるいは経済性に基づいた選定は、設計の創造的行為

表 2.1 標準適用支間（コンクリート橋）

分類	構造形状	断面形状	築設工法	標準支間 (m)																	参考支間 比の目安
				20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260					
橋脚工	橋脚工	橋脚工	橋脚工	5~10															1/10~1/15		
				5~20															1/11~1/16		
				10~15																1/14~1/17	
				10~20																1/15~1/18	
橋脚工	橋脚工	橋脚工	橋脚工	5~24															1/14~1/24		
				18~24															1/18~1/20		
				20~45																1/13~1/18	
				20~40																1/15	
				25~45																1/13~1/17	
				20~30																1/22	
				30~80																	1/17~1/20
				30~80																	1/17~1/20
				5~24																	1/14~1/24
				18~24																	1/18~1/20
20~45																	1/13~1/18				
20~40																	1/15				
25~45																	1/13~1/17				
20~30																	1/22				
30~80																	1/17~1/20				
30~80																	1/17~1/20				
橋脚工	橋脚工	橋脚工	橋脚工	5~24															1/14~1/24		
				18~24															1/18~1/20		
				20~45															1/13~1/18		
				20~40															1/15		
				25~45																1/13~1/17	
				20~30																1/22	
				30~80																1/17~1/20	
				30~80																1/17~1/20	
				50~110																	中間支間 1/15 支間中央 1/25
				50~110																	中間支間 1/15 支間中央 1/25
20~30																	1/22 1/13~1/20				
40~80																	中間支間 1/10 支間中央 1/20				
20~30																	1/22 1/17~1/20				
50~140																	中間支間 1/15 支間中央 1/25				
60~100																	中間支間 1/15 支間中央 1/20				
30~55																	—				
40~80																	中間支間 1/15 支間中央 1/20				
20~30																	—				
30~55																	—				
40~80																	—				
20~30																	—				
30~55																	—				
20~40																	—				
40~50																	—				
エクストラード橋	エクストラード橋	エクストラード橋	エクストラード橋	50~100														中間支間 1/25 支間中央 1/20			
				100~200															中間支間 1/20 支間中央 1/20		
斜張橋	斜張橋	斜張橋	斜張橋	50~100														—			
				50~75															1/40~1/100		
				50~140																—	
アーチ橋	アーチ橋	アーチ橋	アーチ橋	70~250														実用ライズ比 1/4~1/8			
				70~250															—		
				70~250																—	
				70~250																—	

■ 一般的な適用支間 □ 特殊な適用支間

を放棄し、設計者も実績の名の基に思考停止と言わざるを得ない状況である。

設計では、本来、過去の構造物の事例のみにとらわれず、構造計画段階で設計の選択肢や創造性の余地を広く設定することが重要である。

とくに、一部の設計条件が過去の設計事例と異なる場合には、その条件が設計対象に及ぼす影響を検討して、過去の設計事例に対する改善性の有無や程度の検討を行い、最終的な設計案を策定するのがよい。なお、過去の設計事例の改善を行うにあたっては、過去の設計事例の構造形式のみにとらわれることなく、異なる構造形式の適用や異なる構造体の利用など創造性をもって検討することが重要である。

2.3 設計に関するエッセイ

本委員会では、当初、委員および外部からの講師によって以下に示す話題提供がなされ、設計とは何かという切り口で議論が行われた。

- ・耐震設計における構造物の安全性と復旧性に関する一考察（阿部委員）
- ・張出し構造について（井上委員）
- ・海外工事を通して気づいた国内仮設支保工の盲点と海外設計コンサルの無謀（市橋委員）
- ・港湾の施設における設計と維持管理の連係について（横田委員）
- ・鉄道高架化事業（新大楽毛高架橋・旭川高架橋）（川村委員）
- ・構造計画技術を鍛えるために（木村委員）
- ・維持管理をしっかりと考えた構造物設計に向けて（村山委員）
- ・丸鋼を主筋とする橋脚の合理的耐震補強に関する提案（寒地土木研究所 西城能利雄氏）
- ・構造設計で考えること（渡辺委員長）
- ・橋梁予備設計の一事例（庄司副幹事長）
- ・RC床版疲労のモデル化と有限要素解析（松本委員）

議論の場では、立場の違いからときには意見がかみ合わないこともあったが、なかなか理解できないような話になったときは具体的な事例を交えて説明されたりもした。これらの議論は、委員会内ではたいへん有意義なものとなったが、全部を取りまとめて報告書の中に取り込むには難しい。そこで、この節では、話題提供時に行われた設計に関しての本音トークをエッセイ形式で募ったので、以下に掲載する。エッセイは設計に関しての本質的な議論、経験談・失敗談、基準類に関わるもの、主義・主張等、様々な形で表現されている。なお、エッセイには個人の意見が色濃くにじむものもあることに留意していただきたい。

(1) 単純桁と連続桁

近年、複数径間の道路橋においては連続桁形式またはラーメン構造を選択することが殆どであり、単純桁を複数連ねることは極めて稀である。これは数値計算技術の精度向上に裏付けられたリダンダンシーの確保や、メンテナンス部位・部材数の削減、あるいは走行性向上をその理由とする場合が多い。

確かに大規模地震時に塑性ヒンジを設計者の意図通りに発生させ、崩落や使用上致命的な大変形を回避することができれば、公共構造物としての使命のみならず安全性の観点からも意義ある設計成果と言えるのではないか。さらにラーメン構造のように、煩雑な支承構造や、材質の異なる部材の接合部が少なくなれば、メンテナンス上は有利な構造と言えるかもしれない。

しかし、それでも、本当に、単純桁に全く優位性はないのか？

なぜ単純桁が選定されないのか、その最大の理由はリダンダンシーの低さにあるものと思われる。もし

かすると、阪神・淡路大震災におけるショッキングな落橋映像が影響しているのだろうか？だとしたら、話は単純である。落橋しないようにすれば良いではないか。落橋防止構造を工夫し、落橋に対する安全性を大きく向上させれば解決する。

補修が困難な大損傷を受けた場合、ラーメン構造や連続桁は桁の取り換えは可能だろうか？可能だとしても残留応力の問題は解決できるだろうか？

一方、単純桁であれば、何らかの解決策が比較的容易にみつかるのではないか？特に海上や平原に設置された橋梁ならばなおさらである。山間の狭隘な場所であっても、構築できたのであれば、桁の架け替えが不可能ということはまずないであろう。さらに構築後に周囲にビルが立ち並んだ場合であっても、架け替え部の前後の健全部を利用して、何らかの方法が存在するものである。

一方、ラーメン橋や連続桁は桁の架け替えを必要としない設計とすることを前提にしている。であるならば、繰り返しになるが単純桁も架け替えを必要としない設計にすれば良いではないか。

何も、単純桁が絶対的に優れていると主張しているのではない。なぜ単純桁は、はなから選択の土俵に乗せないのか？走行性が全てに優先する選定基準だというならば、ロートルは黙るしかないが・・・

(2) PC 床版の設計

ある橋梁設計部署での若手社員の会話

2年生技師 A「床版の横方向の設計が終わらな～い。応力が収まらな～い。先輩が設定した床版厚、薄すぎませんか？」

5年生技師 B「ボヤくな。床版厚は過去の事例に基づいて設定したから収まるはずだぞ。PC 鋼材の配置高さを少しずつ変化させて何度か計算すれば、勘が鋭くなって解が求まるはずだ」

5時間後

A「先輩、うまくいきました。この床版厚の設定、すごいですね。不静定力とのバランスから少しでも鋼材の曲げ位置や高さを変えると、応力が収まらなくなってしまいます。まさしくギリギリの最適解とはこのことですね。」

B「これが、経験のなせる業さ。飲みに行こうぜ！」

この会話、おかしくありませんか？

PC 鋼材の配置高さを 5 mm 変えただけでも、大幅に応力度が変化する構造とは何なんのでしょうか？解析モデルの設定次第で大きく不静定力が変化する構造とは、工学的にどのように理解したらよいのでしょうか。どのように施工すれば、設計者の意図に沿った構造物ができるのでのでしょうか？PC 配置精度、コンクリート厚ともに mm 単位で精度管理せよということでしょうか？

床版をあと 3 cm 厚くしたら、そんなに重量が増える？地震時にそれほど慣性力が大きくなる？橋の耐久性向上メリットと重量増デメリットを頭の中でどのように整理・納得したの？

(3) 設計について思うこと

土木分野におけるコンクリート構造物の設計のための基本コードとしてコンクリート標準示方書がある。かつて一体となっていた示方書が 1986 年に設計のパートと施工のパートに分かれ、前者は「設計編」と称されるようになった。その後、設計編は 2002 年制定版において「構造性能照査編」と名前を変えた。示方書に性能照査のことは書かれているが設計については何も書かれていないので、「設計編」と称するには問題があるとの議論があったことがその理由である。しかし、「構造性能照査編」の時代は短く、わずか 5 年後の 2007 年制定版では「構造計画」に関する章が追加され、「設計編」に名前を戻して、ようやく本

来の「設計」に関する基本コードであると大きな顔をして言えるようになった。

そうはいつても、示方書の大概の部分は照査に関する事項が規定されており、設計（構造計画）に関する事項にはわずかな分量しか費やしていない。これはやむを得ないことでもある。照査、すなわち計算行為という客観的な手段によって諾か否かを判定することをその目的としているので、マニュアル的にその標準的な手法を提示し易いからである。一方、設計（構造計画）は、留意事項は示せても、精神論としての記述に留まらざるを得ないことも多く、その標準的な手法をマニュアルとして提示できない。なぜなら、設計は文化そのものであり、設計者の創造的思考の賜であるからである。社会インフラとしての構造物に何一つ同じものはなく、それぞれが独自の思考の果てに生み出されなければならないものである。一方で、示方書がそのような状況であることや世の中の設計基準と称されるものの多くが照査についての規定を取り扱っているので、設計＝照査と勘違いしている設計者が多いのではないかと危惧する。

北海道大学名誉教授の角田興史雄先生が、最終講義において次のように我々を諭したことを強烈に覚えている。正確ではないかもしれないが、その概要は、「設計基準ではそれぞれの項目で不等号を満たす（つまり、応答 \leq 抵抗）ことを求めている。設計者は不等号をできるだけ等号に近づけること（応答 \approx 抵抗）がいい設計であると思っている。皆さんは、すべての項目でできるだけ等号に近づけるように設計された構造物が本当にいい構造物だと思うか？」

このような構造物が適切でなかったことは、阪神淡路大震災、東日本大震災などを見ても明らかである。インフラが崩壊した結果、人々の社会活動、経済活動が損なわれ、その後環境にも大きな影響を与えた。いまだに完全には回復されていない。人々の日々の活動を支える構造物が私たちの世界に与える影響は言うまでもなく甚大である。安全性の照査、使用性の照査等だけで済まされるものではない。構造物の社会に与える影響、言い換えれば社会との関わりを理解し、そのためにそれぞれの構造物はどうあるべきであり、それを実現するにはどういう設計（小手先の照査ではない）をすればいいのか、構造物に携わる全員が自問自答しなければならない。

(4) ちょっとした設計上の工夫

僅かな工夫で無駄な出費を大幅に抑えられることがよくある。計画、設計、施工、維持管理といった一連の流れの中で、上流における工夫ほどその効果は大きく現れることが多い。その意味で設計者の責任は重大である。

微妙に（必要性なく）設計形状が異なるために型枠や支保工が転用できなくなったり、配筋が煩雑になることがよくある。平米単価や空立米単価を使用すれば工事発注金額には影響しないと考えられるかもしれないが、この省エネ時代に無駄な材料、労務、コストをかける意義は殆どない。

上記はまだ小さな影響の部類であり、さらに重要な工夫とその責任が設計者にはある。具体事例は別途記述するが、例えば他の部位に比べて極端に壊れやすい部材の強度を若干増すことや、交換し易くする工夫が挙げられる。あるいは通常の設計計算では現れないが、簡単な工夫で応力集中を緩和できないか目配りすることも、極めて重要である。なぜならば、それだけでも橋梁寿命が数十年単位で伸びる可能性があるからである。

本委員会でも重要テーマとした維持管理性においても、実際の管理点検者や補修担当者の視点で確認してみるのが重要である。バラバラの図面に描いたものを合成してみると、ギョギョつということがあられるかもしれない。実際の点検手法や使用機材の配置もイメージしてみるべきである。そのような観点からは、時系列を追って立体的に施工段階をイメージする訓練を日々続けている施工業者の力も、設計段階で役に立つかもしれない。

(5) 日本の橋脚

欧州を旅行すると、はじめのうちは橋脚の細さが気になる。1週間も旅行していると慣れてくる。帰国すると、いきなりぶつとい橋脚が目飛び込んでくる。これって耐震性の問題だけでこんなにも違いが出るの？それとも人間の体形が白人やアフリカ系黒人と農耕民族日本人では異なるから、好みが違うの？

別に太いから悪いなどと言うつもりはない。闇雲に細くして、配筋が異常に過密になることは決して好ましくない。耐震構造を放棄して、免振や制振に頼りすぎる思想も問題がある。日本にだって究極の構造として、ロッキングピアだって存在する。しかし近年はロッキングピアは排除する方向性が強い。

ロッキングピアは悪いのか？例えば橋長 100mで、両橋台が岩着だったら？橋台を基礎岩盤にしっかりと固定（たとえばグランドアンカーを使用する）し、桁が橋台上で所定の移動量以上には動かないようにガッチリ拘束したらどうだろうか？桁、橋脚、基礎が鉛直地震動に対して分離しないようにさえしておけば、ロッキングピアに優位性があるのでは？その発想の延長で、免振でも制振でもない構造であっても、細い橋脚が実現できないだろうか？

(6) 支保工の設計

最近、施工請負業者が仮設支保工の設計を、支保工メーカーや資材レンタル業者に下請けに出すことが多い。それ自体悪い事とは思わないし、アウトソーシングも必要である。しかし、元請責任者の意思や意図が支保工の設計に反映されていることが最低限の必要条件である。それなくして、施工元請業者の存在意義は殆どない。

支保工はあくまでも仮設構造物である。その存在目的は、言うまでもなく本設構造物を一時定に支持することにある。構築途上にある本設構造物は、施工段階で刻々と状態を変化させていく。部材の設置、コンクリートの硬化、プレストレスの導入など、その時々で本設構造物の支持条件や、支保工が支持する荷重が変化する。さらに温度変化や日射の影響、風、クリープ・乾燥収縮等も荷重状態に変化を与える。

施工を請け負う技術者として強く認識すべき重要なことは、本設構造物それ自身は施工途中では極めて不安定な構造であるということである。その不安定で刻々と変化する物を支えるには、単に支保工が頑丈であれば良いというものではない。支保工は、適正な強度と適度なたわみ特性があり、何よりも力の流れが分かり易い構造であることが重要である。その意味で、支保工は外的に静定構造であることが理想ではないだろうか。仮に不静定構造であっても、施工技術者が感覚的に力の流れを捉えられることが重要である。

さらに理想を挙げるならば、左右対称構造が良い。もちろん本設構造物が非対称形であれば、対称構造の支保工など多くの場合無理な注文ではあるが。人間は左右の対称性に関して非常に感受性が強い。恐らく生まれた時から重力に逆らって生活しているため、左右の非対称性が体に大きく負担をかけることを本能的に感じるようになっていっているのだらうと推察される。例えば単純梁構造で非対称のたわみが発生すると、人は敏感にアンバランスを察知できる。それが予定通りの変形ならばOKであるし、予定外であれば早い段階で対処することが可能になる。

あれこれと書いたが、結局、変形を観察することにより、煩雑な計算抜きにどのような力が作用しているのか、瞬時に捉えることができる支保工が、良い支保工なのではないだろうか。

施工時は予想外の荷重が作用しやすいからこそ、リダンダンシーに優れた高次の不静定構造の支保工が良いと主張する人がいるかもしれない。しかしそのような支保工、応力状態が把握しづらく、異常性を察知しにくいばかりか、撤去するときも危険ではありませんか？危険とまではならなくても、本設構造物に思わぬ力を与えてしまったりしませんか？

(7) 「設計は感性」と敢えて言い切ることの真意（ベニスの夜のM先生の問いかけに対して）

■ 設計と感性

□ プロローグ

70年代に、ロックギターのスタイルを確立したとされる、E.クラプトン、J.ベック、J.ページの3人のギターリストがいる。

私は、この中ではE.クラプトンが好きで、今でも ipod に入れて聞いている。

なぜ、3人の中で、E.クラプトンが好きなのか、その理由は分からない。

3人の演奏スタイルの違いを分析すると、E.クラプトンは、他の二人に比べてチョーキング・ビブラートを多用すること、明確なりフレインやテーマを中心に構成されている曲が多いこと、アドリブのフレーズがブルース（ブルーノートスケール）を基本としていること、などがある。

そうすると、私は、そのような特徴を良しとする感性を有しているのだと分析される。

では、なぜ、私は、チョーキング・ビブラートが好きなのか？ブルーノートスケールが好きなのか？を分析しようとする、よく分からなくなってくる。際限なく掘り下げていけば、きっと何か理由があるのだとは思いますが、自分の感性の正体が分かるのかもしれない。（正体をあまり知りたくはないが）

□ 本題

橋梁の設計を考えてみる。

マイヤール、メン、カラトラバ

この3人の中で、誰の、どの橋が好きか？ 仮に好きな橋、良いと思う橋があっても、私は、その理由を、なかなか説明できない。

ただし、好きな橋梁や良いと思う橋梁の形式や環境などの客観的事実を、E.クラプトンのギターフレーズの特徴と同様に分析することは可能だと思う。

その分析結果を用いれば、同じような橋や、それに近い橋を製作することは可能だとも思う（これは、レベル3）。

しかし、分析結果を用いれば、良いと思った橋以上の橋を設計できるか？

と考えると、そのためには、よい設計を選定・分析して、その後、設計者が、如何に創造性をもって分析結果を利用するかが重要と考えてしまい、その創造性は感性に基づくということに帰着してしまう（これはレベル2）。

想像性がある設計者には、よい設計の具現化に対する情報は必要が無いはずである（これはレベル1）。それは、逆に情報そのものが想像の妨げになる場合があるからである。

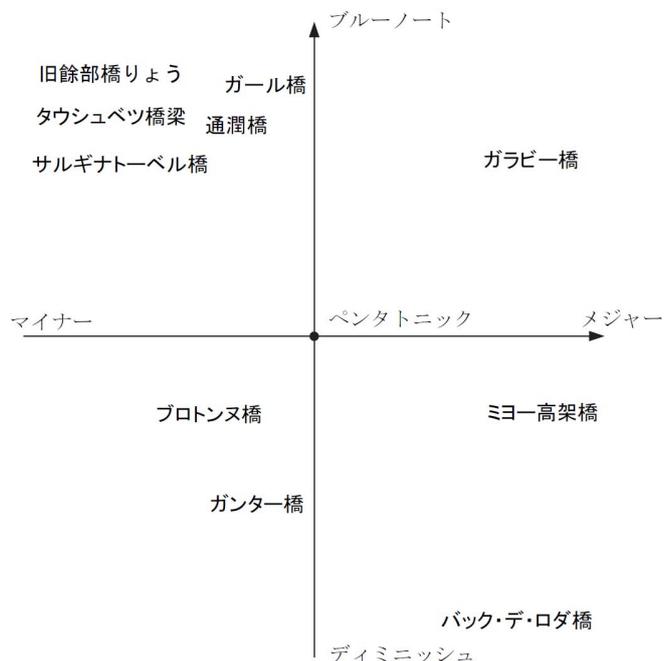
ただし、よい設計を行うために設計者を誘導するための手段として、よい設計を選定・分析して、その客観的事実を明らかにして、これをテクニックとして用いる方法がある。この種のテクニックを必要とする設計者のために、「構造計画のテクニック」などで示すことも重要かもしれない。しかし、これは、言い換えると、良くない設計が行われないようにすることの手段のように思えるし、創造的行為とは言い難いと感じる。

■ よい設計者になるために

□ プロローグ

70年代の3大ギターリストは、三人ともそれぞれ影響を受けたギターリストがいたが、彼らは自分の感性で、影響を受けたギターリストと違ったスタイルを確立した。

たとえば、TOTOのS.ルカサーは、Crusaders



などで活躍したL.カールトンが好きだったが、全く異なる自分のギタースタイルを確立して、現在のギターリストに大きな影響を与えている。

結局、誰かのギターを分析しても、その誰かを超えることは出来ない。超えるためには、分析結果を利用して自分のスタイルを如何に確立するかが重要ということになる。

また、自分のスタイルを確立して、初めて彼らと同じステージに立てるのだと思う。

ただし、この種の人達は、自分のスタイルを確立しようなどということを考えていたのではなく、自分の感性でギターを弾いていた結果、本人以外の人間が勝手に分析してスタイル化したに過ぎない。

□ 本 題

自分のことを橋梁の設計者と言いたい以上は、マイヤール、メン、カラトラバと同じステージに、いつかは立ちたいと考える。そう考えると、やはり創造性ある感性を持って橋梁の設計を行い、設計者としてのスタイルを確立することが必須となるのではないかと考えてしまう。

我が国では、橋梁設計者が存在しないという悲しい現実がある。

バブル時代に、建築家や工業デザイナーが橋梁を手掛け、その名は明示されたことがあったが、土木屋が真に設計を手掛け、設計者が明示された橋梁があるかと問われれば、おそらく皆無であろう。手掛けたとされるのは、国民から負託を受けた発注者のみのである。

この状況を打破しない限り、我が国には、マイヤール、メン、カラトラバのような設計者は、輩出されないと思ってしまう。

ただし、彼らが自分自身で、この橋は「俺が設計した。俺のスタイルはこれだ。」と主張したか否かは不明である。恐らく、3大ギターリストと同じく、本人以外の人達や技術者が、語っているだけのように感じる。

現実を嘆いていても仕方がないので、創造性ある感性を磨き、身につけるために、良いと思える構造物を沢山見て、感じて、分析して、自己の感性に正直な議論を繰り返して行くことが、良い設計者への近道と考える。

(8) 不可能なものは不可能

工事請負者は、煩雑な構造物であっても請けた以上は正当な対価を条件に、てきぱきと構築するべきである。

しかし、不可能なものは不可能である。誰がどのように工夫しても、同じ空間に2本の鉄筋を配置することは不可能である。隙間が15mmしかない場所を20mmの骨材を通すことは無理である。最近ではCIM等の技術により、鉄筋のフシまで考慮した配筋チェックを行えるようになったが、現実には設計段階で全ての干渉をチェックすることは極めて困難である。

では、どうすれば良いか？以下の解決策はダメか？

- ・干渉問題が発生しそうな部位は、設計者は寸法に若干の余裕を持たせる。
- ・干渉する場合に設置位置を優先させる材料（たとえばPC鋼材）を図面に明示する。
- ・鉄筋は必要に応じて、束ねることを許容する旨を、図面に明示する。

日本では束ね鉄筋は見かけないが、外国の図面では頻繁に見かける。もしも束ね鉄筋が強度低下を招くのであれば、その分を考慮した配筋量にしてはどうだろうか。

不可能な設計図面をもとに、適当にごまかして施工する。これは最悪のパターンである。結果、仮に十分な強度、耐久性を有していても、恥のかたまりのような構造物が出来上がってしまう。ましてや要求性能を満たしていなかったら・・・

CADの発達の弊害なのか、昔の職人技の図面のように、何を訴えているのか分かり易い図面を見かけなくなった。なんでもかんでも1枚の図面に詰め込むからなのか、作図者が魂を込めて作成していないからなのかはわからないが、分かり易い図面を作成する技術がないのであれば、諸外国の図面のように、設計者の意図を図面上に文章で書いてはどうだろうか。それで伝わるのであれば解決策の一つではないか。

(9) 予防保全

国内における建設後 50 年以上経過する道路橋は 2018 年で全体の 25%，2023 年では 39%，2033 年では 63%になると予測されている。

このような社会的な背景の下，既設構造物の維持管理は，予防保全型の管理（以下「予防保全」）という考え方が基本となっている。損傷が発生してからの対症療法型の管理（以下「事後保全」）ではなく，損傷の推移を適切に予測し，構造物としての致命的な損傷を未然に防ぐ予防保全に転換することで，軽微な対処で済み，結果的にトータルコストを縮減できるという考え方である。

さて，実際の補修設計の事例である。

事例①

建設から 40 年が経過する鉄筋コンクリート製 T 桁橋。主桁には目立ったひび割れがないものの，塩分含有量試験では，外面から 50mm の位置で塩化物イオン濃度 1.2kg/m^3 を確認，鉄筋位置ではかろうじて 1.2kg/m^3 以下であることを確認。海岸線から 500m という位置関係からも，塩分を多く含む潮風による塩害の潜伏期と判定。

⇒主桁には予防保全の観点から塩化物イオンと雨水を遮断する表面被覆工法を適用し，主桁内部の鋼材腐食を未然に防止した。

事例②

建設から 60 年が経過する単径間非合成 I 桁橋。上部工はこれまで定期的に塗り替えが行われるとともに，B 活荷重対応による主桁・床版の補強は施工済みで，現状目立った損傷はない。一方，橋台パラペット，縦壁には鉛直方向のひび割れが数 m 間隔で確認された。ひび割れ幅は 0.2mm を超えるもので，錆汁はでていないが遊離石灰が確認された。ひび割れの原因は経年的な劣化（一部中性化）したものと推察。

⇒縦壁およびパラペットは予防保全の観点から，ひび割れ注入工+表面被覆工によって，ひび割れ部の閉塞と鉄筋の腐食を未然に防止した。

事例①において，補修のタイミングはまさに今必要であることは誰しもが理解できるところだが，事例②においては，単に予防保全の観点から補修設計を行うべきかは議論があつて良いと思う。対象橋梁や路線の重要度，立地条件によっても意見が分かれるだろう。何も考えず，ただ「予防保全」のくくりで補修設計を行ってしまわず，以下のような疑問を持つべきではないだろうか。

- ・橋台に発生したひび割れの補修は，今，必要なのか？
- ・5 年後(次の定期点検の後)，10 年後ではだめなのか？
- ・顕在化しているひび割れは橋梁として致命的なのか？放置した場合，どのように損傷劣化(中性化)は進展するのか？
- ・予防保全が本当にトータルコストの縮減に寄与するのか？

(10) 誰でもできる設計？

入社 5 年目，ある町の議員さんに言われたことがある。

今の時代，電算が発達しており，「電算さえあれば誰でも設計ができるんだろう」と。空いた口が閉まらないとは，このような状況であり，あまりにも頭ごしに言われて，何も言い返せないことがあつた。確かに構造計算の結果は，入力さえ間違わなければすぐに照査できるため，全てを否定することができない。

土木施設は，構造計画，照査計算，設計図，施工の課程で構築されるが，構造計画がクローズアップされることは少ない。テレビドラマやドキュメント番組では，施工者の苦勞した点をクローズアップするが，計画的なものは少ないと思われる。この議員さんの言葉が，照査計算のことであれば，我々の苦勞も救われる所もあるが，構造計画まで電算でとなればあまりにも設計者は寂しい感じがする。

ここ数年，単に経済性のみで構造計画が行われているのではと，思われることが希に見られる。

(12) 学会の設計基準は要るのか？

「なんで学会が設計基準を作るんですかね。要らないんじゃないですか？」

と言ったら、相手が怒ったことがあった。タイミングも良くなかった。学会の示方書講習会を札幌開催した夜の打ち上げの場だった。次のようなことを言った覚えがある。

「なんで学会が設計基準を作るんですかね。管理者か製作者か設計者か分かりませんが、自分で基準を決めて責任をもってモノを作ればいいじゃないですか。」

「自動車会社は自動車を作るのに学会の設計基準に従って作ってるんですか。公的な衝突安全や排ガス環境規制をクリアするかどうか、一方で消費者が安全性と耐久性に満足してくれるかどうか、それを自社の設計技術で達成しているのではないですか？」

相手の言ったことは正確に覚えていない。すみません。元々のベースが応用力学であり、有限要素解析に卒論時代からなじみがあったため、構造物ごとに解析して設計をすればいいのではないかという考えがあった。自動車はCADからFEAへとシームレスに設計から解析が行われ、衝突解析もされている。飛行機だって数値流体解析が主役だ。実験の代わりにシミュレーションを多用している。そう思っていた。実際のところその業界にいたわけではないので、真実は知らない。自動車や航空業界に対する空想かもしれない。でも良いではないか。隣の話の思考の補助線として考えをめぐらすのは悪くない。人間はアナロジーを元に、少ない知識で多くを理解するのだと思っている。

話を戻すと、ここでは二つの話がある。一つは学会の設計基準の存在理由、もう一つは設計式がいつまで数値解析の上に居られるかという疑問、である。とは言え、二つの話はお互いに絡み合っている気もする。計算機能力の飛躍的な向上により数値解析の普及が進むと設計式を超えた自由度を獲得し、中央的な存在は絶対ではなくなる。

あともう一つ。自動車や飛行機は橋梁に比べると何か自由に設計しているように感じる。メーカーはターゲット層を決めて色々な車を市場に問う。アメリカではオシコシ (Oshkosh) という自作飛行機ショーもあるそうだ。何かうらやましい話だ。

最後に、自分の別の発言を振り返って本稿を閉じる。

「僕は委員会ってあまり好きじゃないんですよね」

やはりタイミングが悪かったようで、その人 (同じ人) の顔色が変わった。その後、部屋の端でひそひそ話になった。この話はまた別の機会にする。二つ合わせて見てみても、自分の発言パターンはあまり変わらないようだ。

(13) 想定外

スマホを見ながらの運転で事故に遭うということをよく聞く。踏切を歩きスマホで渡っていて、電車にはねられたというのもあったと思う。この人たちは、そういった危険を想定していないのだろうか？

最近、想定外という言葉をよく耳にするようになった。

もともとよく使われる言葉なのかも知れないが、原発事故のときから頻繁に登場するようになったような気がする。大津波については、学者が以前から警鐘を鳴らしていたとか、原発の非常用電源が地下に設置されていて水没するような状況にあったとか、震災後しばらく経ってから報道されていたと思う。心理学用語に「正常性バイアス」というのがあるらしい。大きな困難に直面しそうな状況にあるときに、パニックに陥らないためか、あるいは平常心を保とうとしているためなのか「自分は大丈夫だろう」という心理が働くようだ。従来の津波に対する認識もこれと同じ構図だったのかも知れない (もちろん、私もニュースの映像を見るまでは想像できていなかった)。

構造物の設計では、性能照査の原則として「要求性能に応じた限界状態を施工中および設計耐用期間中の構造物あるいは構成部材ごとに設定し、限界状態に到らないことを確認」としているが、字面だけを額面どおりに受け取るとすれば無理な話である。工学を学んだ人ならご存じのように、確率論的な考えに従

えばすべての事象を網羅することはできない。確率的には極めて低いけど、隕石が落ちてくるかも知れないし（衝突荷重？）、水爆実験で巨大怪獣が生まれて街を踏み荒らすかもしれない（最大の作用？）。また、正規分布に従うとすれば、確率密度関数の裾野は漸近線であるから 100%の信頼区間を設けることができない。現実的には、信頼区間を安全係数に置き換えて対応しているが、係数の大小はデータを含む過去の経験と経済性とのバランスで設定されている。問題は、信頼区間の外側の事象、つまり想定外にどのような対応策を講じるかということだと思う。最近の基準類には「冗長性や頑強性を有するように」との記述もされている。先達者らは、今のような懇切丁寧な設計基準がない時代であっても、たくさんのごことを想定して設計していたことが容易に推察できる。普段の生活や仕事ではプラス思考であってもよいが、設計は「正常性バイアス」を取り払う必要がある。

(14) 設計供用期間の功罪

ISO 2394 の影響かどうかわからないが、最近制定された構造物の設計基準においては、設計で想定する期間を設計供用年数あるいは設計耐用年数として設定している。50 年や 100 年といった年数が一般的に用いられるが、この期間は、構造物がその機能を十分に発揮し、人々が安心して利用できるとして設定される期間であるはずである。かつては、コンクリートは半永久的な耐久性を持つ材料であると考えられていたため、設計供用年数なるものは誰も意識していなかった。コンクリートが半永久的であると信じるのは問題であったにせよ、ある限られた期間だけに必要な性能が保証できればよいということだけでなく、できるだけ長く、可能なら半永久的にもつように種々のことが考えられていたのではないかと思う。しかし、設計供用年数が表舞台に登場したおかげで、その本質が忘れられようとしていないだろうか。極端に言えば、設計供用年数が満了した翌日に構造物が使えなくなるというようなことを望んでいる人はいないはずである。したがって、設計供用期間＝寿命ではない。少なくとも設計においてはそのように考えないのがよい。この点から考えると、「老朽化」や「長寿命化」という言い方には大変違和感がある。

設計供用年数は、設計で考慮する地震、風、波浪といった自然作用の再現期間を決める際に必要である。この期間にある規模の作用が構造物に作用する確率（遭遇確率）を考慮して作用の値や作用（荷重）係数が決められている。したがって、こういうことを何も考えずに、単に設計供用期間を延ばして長寿命化が図られたと結論づけるのも尚早である。

構造物をどのくらい使うか、そのためにどのような設計上、施工上、維持管理上の思慮が必要かは、社会のサステナビリティに大きな影響を与える。「設計供用年数」の意味するところをきちんと考えることが必要であろう。

(15) カーディーラーにて（その 1）

店頭飾られている自動車を見ていると、整備士資格を持っている店員から声をかけられた。

店員「お客様、現在お乗りになっている車からメーカーを変更されることをお考えでしょうか」

客「メーカーにこだわらず、私が希望する性能を有する車を探している。」

店員「ほう、どういったご要望でしょうか。当社は自信を持ってお客様のご要望にお応えすることができるのではないかと思います。遠慮なくお申し付けください。」

客「そうですね～。私は運転そのものが好きなので、山道での加速を楽しみたい。高速走行時の安定感も重要だね。」

店員「なるほど、お客様のルックスから推測するに相当スポーツをされていたものとお見受けします……。やはり車もスポーツ感覚で乗りこなされるのですね」

客「まあね。アクセルやハンドル捌きにおいてレスポンスの悪い車はイヤだね」

店員「ということは馬力も相当必要ですね」

客「そのとおり。見た目もオッサンばいのはダメ」

店員「なんとなく求められているイメージがわかってきました。ところで、運転されるのはお客様ご本人がメインでしょうか。」

客「そうです。もちろん普段の仕事にも使うし、家内もちよくちよく乗ることになる。

仕事で使う時は、心が落ち着くようにゆったりとした乗り心地を楽しみたいね」

店員「そうですよね。若者とちがい、ある程度社会的地位を示すようなステータス的な要素も重要ですよ。ね。」

客「あと、家内はいつも燃費を気にしているので、エコな車がいいな。そういう面ではあまり重い車は避けたいね。」

店員「最近のハイブリッドカーは、重量の割にパワーがありますよ」

客「うちは家族4人プラス家内の両親合わせて6人で旅行することもあるので、最低でも3列シートが必須かな」

店員「わかりました。お客様、まずはご要望の優先順位をつけてみませんか？」

店員が最後に発した言葉は当たり前の一語であるが、果たして橋梁設計技術者はこの一言を発しているのでしょうか？以下の会話（その2）のような対応が染みついていますか？

(16) カーディーラーにて（その2）

店頭飾られている自動車を見ていると、いかにも営業マンといった風貌の店員から声をかけられた。

店員「お客様、お車の買い替えをお考えでしょうか。」

客「まあね。今すぐというわけではないけどね。」

店員「もしよろしければ、ご家族の構成や、よく運転される方についてお教え願えませんでしょうか」

客「いいよ。家族は私と妻、中1の息子と小5の娘の計4人。運転するのは8割は自分、残りは妻」

店員「どのような用途と場所でお乗りになりますか。」

客「自宅から〇〇にある会社までの通勤、休日の買い物と、月2回程度のレジャー。」

店員「ありがとうございます。弊社には50年来積み上げてきたノウハウを基に、お客様の生活様式にマッチしたタイプの車を選定するマニュアルがございます。色の選択まで、お客様好みの服装などから推奨させていただけるものと思いますよ。」

客「はあ・・・」

店員「もう少しお客様の好みをお聞きした上で、まずはマニュアルのフローに従って選定させてください」

客「・・・」

(17) カーディーラーにて（その3）

一人のお客さんがお店にやってきた。営業成績が優秀な一人の店員がお客さんに声をかけた。

店員「カーショップDにご来店いただきありがとうございます。お車の買い替えをお考えでしょうか？」

客「うん、運転がしやすく、寒冷地での耐久性に優れる車をさがしているのだけど。」

店員「どのような用途と場所でお乗りになりますか？」

客「自宅から〇〇にある会社までの通勤、休日の買い物とレジャー。それと息子が週に何度か乗ってる感じかな」

店員「なるほど、買い物やレジャーのことを考えると、トランク広めのワンボックスタイプかステーションワゴンタイプがおすすめてですがいかがでしょうか？」

客「いやいや、経済性重視で普通のセダンがいいかな・・・」

店員「なるほど、それでは雪道に強い4WDのセダンタイプで考えましょうか？」

客「いやいや、経済性重視でFFで十分かな・・・」

店員「なるほど、FFのセダンタイプですね。息子さんが時折ご使用になるとのことですが、若者にも人気のあるスポーティーなデザインと走行性を兼ね備えたタイプのセダンはいかがでしょう？」

客「いやいや、見た目とかはあまりこだわりはなくてね、経済性重視で普通のセダンでいいですよ・・・」

店員「・・・となると、この○タイプか△タイプのどちらかになります。○と△の価格差は数万程度で○タイプの方が3%ほどお安くなりますが、△の方が若干車内が広めなのと、当社新技術の衝突安全ボディが標準装備されています。」

客「耐久性や走行性に差はあるのかな？」

店員「耐久性や走行性には差はありません」

客「じゃ、経済性重視で○タイプでいいです」

店員「かしこまりました・・・」

店員の独り言

「これで今月も目標達成だけど、低価格の○タイプばかりだな・・・たまにはSUVタイプの□タイプや、3列シートの◇タイプなんかを売ってみたいなあ・・・うちの社風的に○タイプか△タイプしか売れないのかな・・・××営業部長は、「俺が君ぐらいの時は□タイプや◇タイプなんて月に何十台も売ったもんだ」なあってよく言うけど、時代が違うんじゃないかな・・・営業マンとして、これでいいのかな・・・」

(18) 芸術家と橋梁設計技術者

芸術家と橋梁設計技術者は、置かれたスタンスが似ている面がある。どちらの立場も自分の作品を社会に認めてもらいたいと願い、未永く存続させることを前提としている。逆に大きな違いといえば、社会から必要性を認められたことを前提に創作活動に励むか、自発的に創造して社会に発表するかである。特に公共事業としての橋梁設計は、強制的に徴収した血税を使用するので、自己満足のみにつつまれることは許されない。

芸術家のひとつ、プロの指揮者は、奏でる音の全てに責任を持つことが要求される。高低、音色、テンポ、調和・・・を2時間のコンサートであれ、100人構成のオーケストラであれ、一音一音全て、細部に至るまで責任をもつ。もちろん全体的な構成や雰囲気も大切である。一方、聴衆は雰囲気のみをボンヤリ楽しもうが、演奏細部に拘ろうが自由である。お金を払って聴いて（聞いて）いるのだから、当然である。でも、良い演奏家を生むための必須条件には、良い聴衆の存在があげられる。

プロの橋梁設計者はどうか？設計監理技術者たるもの、材料選定、鉄筋配置1本1本から、全体構造、景観面での印象に至るまで、全てに責任を持ち、自信を持って作品説明やPRできる姿が本来の立場ではないか。なぜこの構造形式を採用したのか、なぜ部材寸法をこのように決定したのか、細部も全体印象も説明できますか？まさか「マニュアルに則り・・・」なんて言いませんよね。音楽家は「尊敬する恩師に教わったとおりに演奏しました」なんて言いませんよ。

でも、最後に一言。設計者も少しは遊び心や自己満足を追求しても良いのでは？ガリ勉君よりもちよつとだけ悪ガキの方が、魅力ありますよね。

(19) 破壊モード

構造物を設計するときに、破壊モードを意識しているか。

設計者が発注者に自信を持って設計成果物を引き渡すことは当然である。まさか破壊するときの事をク

ドクトと説明する人はいないであろう。しかし、想定以上の荷重が作用した場合や、想定外の環境下に置かれた場合、どのような形でこわれていくのかイメージをせずに「しっかり設計しました」と答えているのであれば、設計者失格ではないだろうか？

たとえば自分自身の体を考えたとき、どこに弱点があり、何に気を付けて日々暮らしていくべきか、40歳を過ぎれば誰でも意識するであろう。その自覚を守れるか否かは別である。膝に痛みを感じたことがあれば飛び降りたりしないし、胃が弱ければ食事に気を遣う。そのような部位がなくても、誰でも首が弱いことや、頭をぶつければ危険なことを知っている。

設計者は、その構造物の弱点を最もよく知っていなければならない。そして、どのように破壊するのか、はっきりとしたイメージを何パターンも明瞭に描けることは最低限の要求能力なのではないだろうか。もしも描けないならば、何を持って「要求性能を満たしている」と言えるのだろうか。

(20) 土木技術者のクリエイティビティと大学教育

土木構造物の設計は、決して、大学の授業で教えている構造設計の類ではない。大学で教えているのは、設計に必要な解析法と性能照査法でしかない。設計で最も大切な魅力的な構造物を創造する能力、質の高い構造物が何であるかを理解する能力は、残念ながら、多くの大学のカリキュラムでは教えていない。社会人となって、経験を積んで学んで行けばよいという考え方があることや、大学の教員自身にその能力が備わっている人材が少ないこと、などが理由であろう。私自身もその例外ではなく、欧州の大学教員は実務経験が豊富で、その能力が備わっている人が多い。常々、魅力的な教員と強く感じている。

土木のカリキュラムと比較すると、建築のカリキュラムでは、このような能力を磨く卒業設計などの演習科目が用意されているのではないだろうか。建築にはこの種の創造力のある人材が土木より多いと感じる。創造力のある人材が建築を選ぶのか、教育を通してそのような人材を育成しているのか、鶏と卵の議論になってしまうが、どちらも真実であろう。

土木の人材を、魅力溢れる構造物を創造する能力、さらには、質の高い耐久性のある構造物が何であるかを理解する能力を持つようにするために、まず、大学教育から変えていく必要がある。現状のカリキュラムを見ると学部はかなり過密なので、修士課程において、構造物の構築プロジェクト演習を必修にするのはどうだろうか。ある条件を与えて、構造物を設計させるのである。このためには、学外から実務経験豊富な技術者の協力が必要である。実務経験のある人材を教員として採用するのも選択肢である。演習の成果発表会での討論を通じて、学生だけでなく、教員の能力向上にも役立つであろう。このような教育を地道に継続していけば、建築家・技術者とは一味異なる、クリエイティブな土木技術者が確実に育っていくことと考える。

(21) 精緻になり曖昧さのなくなる世の中と創造性

高大接続改革が進行中である。この改革は、高校教育、大学教育、そして大学入学者選抜の3つを変えていくことで進められている。普通の人が一番気になるのは大学入学者選抜（入試）だろう。ここでは、学力の3要素を多面的に評価しよう、ということになっている。

学力の3要素？

中教審答申によるとこうである。①知識・技能、②思考力、判断力、表現力等、③学びに向かう力、人間性（主体性、多様性、協働性）、これらが学力の3要素だ。これは従来の入試が①の知識・技能に偏っていたという反省によっている。

反省、すばらしい。改善、日本人のお手の物だ（った？）。改革後の受験生は3要素を評価される。「あなたは、知識A、思考力B、判断力C、主体性C、協働性C」、 「君は、知識C、思考力B、判断力A、主

体性 A, 協働性 C」, という感じになるのか. なかなかのディストピアっぷりに思える. あれもやれ, これもやれ, そして測ってあげる, と. そして評価は人物のより多くの側面をカバーし.... やれやれと思う人も出てくるだろう. いや, 出ないか. 若者は従うしかない.

世の中のある物事を細かく要素に分解して, 要素を理解すれば, 元の複雑な物事の性質や振る舞いを理解できるはずだ. これは還元主義の考え方である. 多くの場合はパワフルな考え方である. 物質, 分子, 原子, 素粒子, もしくは, 構造, 部材, 材料と, 用語を持たずに蒙昧に陥るといことなくテクニカルコミュニケーションがクリアになり, 方針がブレークダウンされてより専念しやすい KPI に変わるのはこの考え方のおかげである, と思う.

しかし, 人物評価にあてはめたり, 創造的行為にあてはめたり, 設計行為にあてはめたりすると, 途端にやる気をなくすのはなんなのだろうか. 創造的作物にこのような評価方法はそぐわないとだれもが思うだろう. やろうとするのは説明責任がある誰かだけだ. 設計もしかりではないか.

たとえば, ある学校が「自主」, 「努力」, 「友愛」という校是を掲げている. これの達成度を測るべく, 校是の具体的実践とか獲得を項目として決める. そして評価する. 曖昧さのなくなる世界, 達成目標がクリアに共有される世界, それはいいことである側面はある. 一方で, 「自主」, 「努力」, 「友愛」の意味が何であるか考え続け, 現状の世界に対するこれらの校是の在り方を考え, 世界に働きかける意思は大きく失われるであろう. 校是そのものの力も失われる感じがしないでもない. クラーク博士は, たくさんの校則などいらない, Be a gentleman で十分といったではないか.

でもスポーツにだって客観的な, セイバーメトリックスのような統計的評価があり, PITCHf/x のようなハイテクな評価方法がある. なのにスポーツマンにはまだまだディストピア感はないように思わないでもない (違うかもしれないが). これはなぜだろうか. こんな評価はただの手段か外野の雑音で, いつでも裏をかき相手を出し抜けるところで戦っているからか. 未熟な評価手法を無視できるような地平がまだまだ広がっているということだろうか.

精緻になる入試の評価も手段と思えるか出し抜ける部分が残されているうちはいい. これが目的となり完璧となるとたまらない. これに従わず蛮勇を持って河を越える人たちに, 違う入試区分か, 違う国に行くか, 大学行かずに学問・技術を積む, 研究できる, ような道も欲しい.

ここまでつらつらと書いてきて, 冒頭をよく見ると学力は「力 (N)」であることに気づいた. 「仕事 (N・m)」ではないのだ (当たり前だ). だったらこのままでもいいのかも. 以上, ある春の日の妄想であった.

(22) シンプル、ナチュラル、オリジナル

先日 JAL の機内誌に「そのとおり!」という文章をみつけた. 私がこよなく愛する浅田次郎氏が 10 年間にわたり連載しているエッセイ「つばさよつばさ」の一節である. 浅田次郎氏は言わずと知れた小説家であり, やくざ者のお笑い小説から“人間の生きざま”を考えさせられる小難しい小説まで, 変幻自在に筆をあやつる少し怪しくあぶない大先生といった印象が一般的なのではないだろうか. 私にとっては月が変わるたびに掲載される「つばさよつばさ」が, 味気ない出張のささやかな楽しみになっている.

以下 2019 年 5 月号からの抜粋.

『心がけることは, シンプル、ナチュラル、オリジナル. すべての物作りに共通する要素である. 簡明であり, 自然であり, おのれに忠実でなければならぬ. しかしそれはたいそう難しいことであるが, 正しくは簡明たれ自然たれ忠実たれと, 願ひ続けるのである。』

何を小難しいことをと思われるかもしれないが, これは浅田氏が原稿締切前の追い込み時に自分で“ごった煮スープ”を作る際の心得を, 少しおちゃらけて表現したものである. その続きを少し紹介すると『その間にジャガイモをレンジでチン. これには異論も多かろうが, はっきり言って私はジャガイモが好きだ. . . .』

シンプル、ナチュラル、オリジナル。これはまさしくクリエイターの本質ではないだろうか。橋梁の設計に置き換えると、

シンプル：ゴタゴタした飾り付けは橋梁設計の本質の部分には不要。欄干の飾り付け等を全否定するつもりはないが、それは芸術家の範疇。あなたが“橋梁設計者兼芸術家”との自負があるなら挑戦すればよい。

ナチュラル：構造力学に適った構造を実現すべき。シュライヒやカラトラバの作品は一見奇抜に思われるかもしれないが、それまで具現化されなかった構造美を実現したと言える面もあるのではないか。

オリジナル：最近の北海道内のPC道路橋が皆、数種類の分類に行儀よく納まっているように見えてしまうのは私だけ？

話は変わるが、セヌ川に架かる橋はファンが多い。おそらく芸術美があるからだけではなく、一橋一橋に個性があるからこそ、専門家も一般人も惹きつけて止まないであろう。想像するに各橋の設計と施工には、相当なコストがかかっていると思われるが、果たして Value/Cost は低いであろうか？賛成多数でありながらも賛否両論をいつまでも引き出すことこそが魅力なのではないだろうか。

一方、ドイツのコッハータール橋のようなシンプルな構造美も捨てがたい。構造美のみを追求することも決して破綻にはつながらない。例えば流体力学を徹底的に研究した結果生まれた新幹線の先端車両の形状や、F1カーのフォルムは、まさか美しさや格好良さを評価されることを第一義としたわけではないだろう。橋梁設計においても、少し材料費や施工費を忘れて、構造美を徹底的に追及してみたらおもしろいトレンドに発展する可能性はないだろうか。そこから日本の設計者ならではのオリジナリティが生まれるらどんなに誇らしいことであろうか。

(23) 自戒の念

世間一般の人々は、橋梁の設計・施工技術を素直に称賛してくれることが多い。「どうしてあのようなものを設計できるの？すごい！」「両側から張り出し施工してうまく合うのは不思議」などと言われれば気持ち良い。「大したことはないですよ」と答えながらも本音は「どんなもんだい！」とドヤ顔を隠せない。

橋梁を知らない土木技術者からも、「橋梁ってすごいですね。カッコイイし、綺麗だし、土木の花形ですね」と言われることがよくある。確かに完成後に全景が見える格好良い土木構造物の代表格が橋梁とダムである。その意味からも橋梁技術者の責任は重大である。

橋梁技術者として誇を持つのは良いことである。プライドがない技術者などろくなものではない。でも、橋梁技術者って本当にすごいのか？他の分野の土木技術もしっかりと勉強していますか？ましてや土木以外の科学技術にどれだけ視野を広げていますか？

この数年、毎年のように大規模自然災害が日本のいたるところで発生している。殆どの自然災害で人命救助の次にまず直面するのが、土砂対策、特に水を多く含んだ土砂による被害からの応急復旧である。橋梁技術者も土木屋のはしくれであるならば、その場に居合わせたら何らかの判断と対策を講ずることが責務であろう。しかしあまりにも知識が乏しい人が多いのではないだろうか？下手に土砂を除去すると2次災害が発生しそうな状況では、まず何をすべきか、どのような工法が選択肢としてあるのか、必要な重機や資材は何なのか、資機材が制限される中で何ができるのか、果たして橋梁技術者が緊急時に頼れる存在に成り得るだろうか？でも、世間一般の人々から見れば、ダム屋も橋梁屋も同じ「土木屋さん」なのである。

エリート医学部教授が、飛行機内の緊急アナウンスで「お医者様がいらしたら近くの客室乗務員にお知らせ願います」とのアナウンスに、寝たふりを決め込むのと同じ状況に陥っていませんか？

(24) 橋梁技術者である君へ

好きこそものの上手なれ、という言葉がある。好きなことは熱心に努力するため、どんどん上達する、そんな様を表現している。確かに、「面白さ」を感じながら「楽しく」取り組むことができれば成長は早いだろう。

さて、皆さんはどうだろうか。橋梁に関わる仕事に「面白さ」を感じている？ 愉快で可笑しいという意味ではなく、興味のある面白さのこと。

私は第4回研究小委員会（2015年5月25日）において、「橋梁計画技術を鍛えるために」という題で、建設コンサルタントとしての技術提案の醍醐味と達成感・充実感について、（手前味噌ながら）自分の業務実績を通してお話させて頂いた。

技術提案と言っても奇をてらうようなものは主義に合わない。そのため、与条件の中で実現可能性を重視したスタンスで向き合うわけだが、いつも大事にしていたのは技術者（橋梁屋）としてのイマジネーションや直観力だった。結局、暗黙知の領域ではある。

皆さんには既往の解決策にとらわれない、自由かつ柔軟な発想力も身に付けてもらいたいと思うのだが、まず現場に足を運ぼう。

■現象を自分の目で見る

災害現場に行ったことがあるだろうか。地震や洪水で橋梁が壊れる。表現は不適切かもしれないが、まさしく野外実験だ。実験室の模型ではない、フルスケールの構造物が巨大な作用に応答する。新たな弱点や課題が明らかになり、現実的な提案にもつながる。頻繁に起きては困るが、災害対応業務に関わり自分の目で見て考えることが、提案力を鍛えてくれる。

■完成後の橋は責任を持って見守る

自分が設計した橋の「その後」はどのようになっているのか、工夫した構造やディテールの効果は発揮されているのか。思わぬ劣化や変状はないか、構造物を生み出した技術者としての責任を持って見守りたい。会議室でのディスカッションも大切だが、計画・解決力を鍛えてくれるのは現場だ。

好きでなければ力もつかないよね、ということではなく、いかに興味が持てる「面白さ」を見出すか、だと思う。手計算、手書きの仕事で育った私は、とくに「ものをつくっている」ということが実感でき、それを「面白い」感じながら取り組めたのかもしれないが。

随分若い時にお世話になった方が、「METHOD コンクリート構造の力学」という書籍を出版された。全編が手計算の範囲で説明される線形領域の構造力学であるが、人にはうまく説明できないことも具体的な数値を示しながら分かりやすく書かれている。皆さんにもお薦めしたい「面白い」一冊だ。ぜひ「面白い」、「好き」、「上手」となるよう、技術を鍛えていってほしい。

いい年をしてワクワクしながらページをめくる私は、「下手の横好き」だが。



(25) 後世に誇れる仕事

施工業者は歩留まりの悪い仕事はやりたくない。より正確に言うならば、儲からない仕事は避けたい。当然である。

その一方で橋梁技術者は、地図に残る仕事、後世に自信を持って誇れる建造物を計画・設計し構築したい。そのような構造物は大抵の場合、技術的に困難であり手間もかかる上に失敗のリスクも大きい。しかし技術面で苦勞してこそ、技術者としてのより大きな醍醐味があり、より強い達成感が味わえる。逆に、何の苦勞もなく出来上がった構造物で後世に誇れるものは稀である。

ならば、以下のように考えるべきではないだろうか。

設計者は「必要」と思う構造形式、構造形態、使用材料、景観設計を追求する。それを発注者に設計者の意思と責任において明瞭に説明し、その必要性を訴え、説得する。

発注者は工事費も含めて納得した上で詳細設計、工事を発注する。勿論パターン化しても差障りのない構造物や部位は標準化して安くすべきである。一方、その独自性にこだわるべき事項や新技術導入には、設計者、発注者ともに真正面から向き合うべきである。工事費算定においても、積算体系や前提がないからと言って現実から目を逸らした理不尽な査定は行うべきではない。（ただし新技術導入にあたって、一企業のコマーシャルリズムのために公共発注機関が費用を全て肩代わりすることは問題である）そして工事請負者は請け負った以上は、威信にかけて責任を持って誇れる成果物を完成させることが大前提となる。出来ないならば最初から入札に参加すべきではない。

ここまで書いてみると当たり前の事ばかりである。なぜ多くの場合、まるで高度成長期の建売住宅みたいな一様な設計が圧倒的に多くなってしまおうのだろうか？会計検査制度の問題？？

(26) 土木技術者への手紙

拝啓

熟練技術者たる自分へ

照査技術は、研究の伸展やコンピュータの進化も相まって、数値解析による方法へと向かっています。

熟練者の世代は、照査が難しくなったと指摘し、計算に頼るな！と主張しています。

新しいことに警笛を鳴らすのが、高貴な有識者の仕事だと言わんばかりにです。

高齢化社会となり、その種の発言が勢いを増しているように感じます。

若手技術者や世間が、その警笛を信じることで、どれだけの損失が起きているかと不安になることはありませんか？

今の世代は、あなたの時代より何倍も生産しているのですよ。

あなた方は、コンピュータによる作業で、途方もなく生産力が向上していることを知っていますか？

そもそもスマホ世代に「コンピュータという道具に頼るな！」みたいな話が通じるはずもないのですが。

あなた方の新人のころの机の景色と作業の内容を思い出し、今と比べて下さい。

気が付くはずです。時代の進化を。

そして、

「あなた方の功績はすでに十分知っています。ですので、われわれを見守って下さい。そして、われわれの成長を期待して下さい。」の聲が聞こえませんか？

「ならば、自分で追い越せ！」などと、問題の転換を図るようなことは言わないで下さい。

そして、お願いがあります。

「過去に縛られるな、未来を目指せ！」と言って下さい。それが老婆心と言うものです。

かつて、この国は、そう言って成長してきたし、あなた方が、その恩恵を受けて来たのだから。それを伝えて下さい。

敬具

前略

若手技術者殿

「盲目的に信じるな！」

今の構造物は、過去からの産物です。すべてが正しい訳ではないのです。

先人たちの知恵が具現化された結果に過ぎないのです。

「構造物は、予想より早く劣化しているではないですか？」

「維持管理に苦闘しているのは、誰のせいですか？我々は、新しい橋を作らずに、生涯、あなた方が作った橋を、直し続けるのですか？」

と、せめて問いかけてみて下さい。

熟練有識者から反省の弁ぐらい欲しいものですよ。沢山、構造物を作って維持管理を次の世代に託すのですから。

しかし、嘆いてばかりもいられません。

ならば、これからの技術者は、コンピュータという道具を最大限に活用して、多くのシミュレーションを行い、その結果をもとに想像力を働かせて下さい。

そうすれば、先人たちの形式知や経験論など、瞬時に打ち破ることができるはずです。

先人たちが達成したことを、短期間に達成できるのですから。

そして、その先に見えるものを、少ないチャンスを生かして具現化して下さい。

「新しい橋を作らせてもらえるチャンスが欲しい！先人たちの技術を継承するためにも。」と熟練技術者や世間にお願ひしましょう。

きっと、皆が納得する仕組みを考えてくれるはずですよ。

草々

執筆者一覧：市橋 俊夫，上田 多門，木村 和之，坂村 和俊，庄司 和晃，古内 仁，松本 高志，横田 弘，
渡辺 忠朋（五十音順）

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 104 鉄筋コンクリート構造物の設計システム—Back to the Future II—，平成 26 年 7 月
- 2) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 81 コンクリート構造物の耐震設計—時空間における設計の課題と近未来像—，平成 20 年 7 月

3. 橋梁の要求性能と構造特性（よりよい橋梁とは？）

3.1 はじめに

土木構造物は公共的な使用目的を有し、市民の文化的生活や安全を守る上で重要な責務を担っている。そのため、万が一破壊が生じたり使用不能の状態に陥ったりすれば、修繕費のみならず経済的活動に及ぼす損失は大きい。また、土木構造物はほとんどの場合は多数の構造物の集合体であり、1つの構造物が使用不能になることで、施設全体の機能が損なわれる。土木学会コンクリート標準示方書では性能照査型の設計法を取り入れているが、構造物の用途・機能を果たすための要求性能として耐久性、安全性、使用性、復旧性および環境性を設けている。本委員会では、コンクリート標準示方書の性能照査の考え方をベースとして議論した。以下に本委員会における試設計を行うための性能照査の考え方を概説する。

3.2 性能照査の考え方

3.2.1 供用期間と設計耐用期間

供用期間と設計耐用期間の定義は、以下のとおりである。

供用期間：事業者が定める構造物を供用する期間。

設計耐用期間：環境条件、耐久性、維持管理の方法、経済性等を考慮して合理的に定められる期間。

本委員会では、試設計の与条件として供用期間を設定する。この場合、図 3.2.1 に示すように構造物の設計耐用期間を供用期間と同等以上に設定するか、もしくは一部の部材の設計耐用期間を供用期間以下に設定し、取り替えの判断を構造計画の段階で計画的に行うことができる。

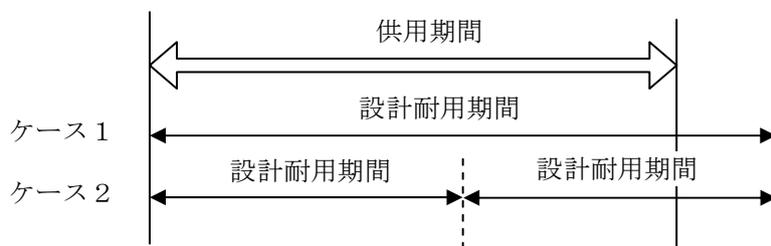


図 3.2.1 設計供用期間と設計耐用期間のイメージ

3.2.2 要求性能の分類例と相互関係

構造物の物理的特性に対する要求性能は、安全性、使用性、復旧性の3つである。耐久性は、図 3.2.2 に示すように、材料劣化が物理的特性に関する要求性能を損なわないための性能に位置づけられている。すなわち、耐久性は安全性、使用性、復旧性のような独立した性能ではなく、設計耐用期間中に環境作用に起因した材料劣化による不具合が生じないことを確保し、この前提が満足されているもとの、物理的特性の要求性能に関する照査を行う方法がとられている。したがって、耐久性は性能の変化を時間の関数として評価することができ、維持管理における性能の評価とも連動する。

施工性に関する検討は、構造物の製作、施工時の安全性および確実性および設計図書に示された構造物の要求性能を満足するようにするための施工計画を立案することである。

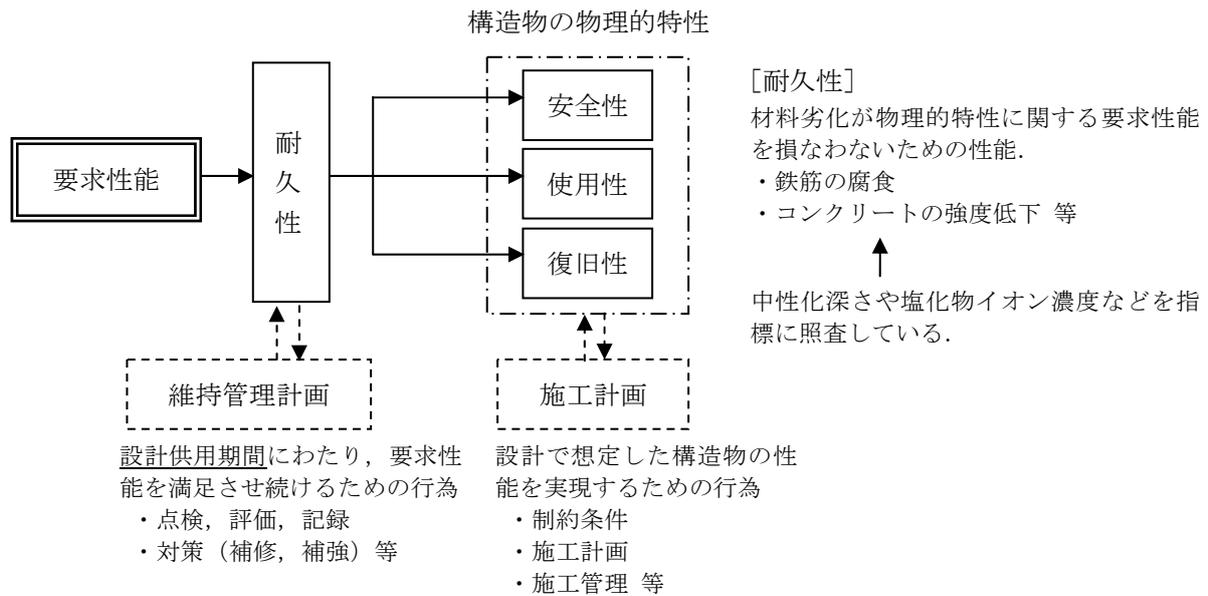


図 3.2.2 要求性能の相互関係

3.2.3 設計作用

構造物の性能照査は、施工中および設計耐用期間中に想定される作用を、要求性能に対する限界状態に応じて適切な組合せのもとに考慮しなければならない。コンクリート標準示方書においては、設計作用は作用の特性値に作用係数を乗じて定めている。作用に関する用語の定義は以下のとおりとなっている。

作 用： 構造物または部材に応力や変形の増減，材料特性に経時変化をもたらす全ての働き

作用の特性値： 構造物の施工中または設計耐用期間中のばらつき，検討すべき限界状態および作用の組合せを考慮した上で設定される作用の値

作用係数： 作用の特性値からの望ましくない方向への変動，作用の算定方法の不確実性，設計耐用期間中の作用の変化，作用の特性が限界状態に及ぼす影響，環境の影響の変動等を考慮するための安全係数

設計作用： おおのこの作用の特性値にそれぞれの作用係数を乗じた値

設計作用について荷重作用を例にとれば，その変動性について「永久荷重」「変動荷重」「偶発荷重」に分類される。構造物が橋梁である場合には，死荷重の他，プレストレス力，常時の土圧や水圧が永久荷重として作用し，活荷重や衝撃荷重が変動荷重として作用する。偶発荷重は設計耐用期間中にまれにしか作用しないが，作用すれば重大な影響を及ぼす荷重である。変動荷重と偶発荷重は想定する限界状態に応じて取捨選択して組み合わせることとなる。安全性の検討においては，確率分布に基づいて十分に大きな値が設計荷重として設定されているが，これまでの災害事例に見られるように設定された設計作用が必ずしも全ての事象に対して安全性を担保しているわけではない。

性能照査において，「想定を超える」作用に対する議論となることがある。例えば，偶発作用である地震力に対して「作用として設定した L2 地震動を超える地震の場合には・・・」という議論である。

この場合の性能照査は，どのように取り扱うべきであろうか。想定を超える作用を，また作用として考えるのであれば，当初の作用の設定方法の問題になり，作用自体を見直してしまえばそれまでである。

しかし，これまでの慣例で，L2 を超える地震動を改めて作用として設定することは，一般的な設計では極めて稀である。このため，コンクリート標準示方書においても，安全性の照査の中で，「構造物の安全性を

より向上させるためには、「一部の部材が断面破壊の限界状態に達しても構造物全体の崩壊が生じないような構造とすることが望ましい」となっており、冗長性（リダンダンシー）^{※1}や頑健性（構造ロバスト性）^{※2}という特性で評価している。

性能照査において、想定以上の作用に対する評価にはその扱いを十分に留意する必要がある。

※1 冗長性（リダンダンシー）：部材の損傷もしくは破壊後も構造全体系の耐荷力もしくは機能を維持する能力

〔関連用語〕 構造システム、フェールセーフ、余裕度、安全率

※2 頑健性（構造ロバスト性）：作用や構造特性のばらつきに対して構造物の安全性や機能性を保持できる能力

〔関連用語〕 外乱変動、構造変動

3.2.4 各性能照査の留意点

本委員会において議論された各性能照査の留意点を以下に記す。

(1) 耐久性

- 耐久性の定義は、材料の劣化による性能の経時的な低下に対して構造物が有する抵抗性である。
- ただし、評価が結論ではなく、設定した環境における評価結果によって性能（材料劣化によって不具合が生じない）を満足するための対応策を立案することも含めることとした。
- 対応策の例として、劣化に対して抵抗性の高い材料の使用、表面処理、防錆処理などが考えられる。

(2) 安全性

- 安全性の定義は、構造物が使用者や周辺住民の生命や財産を脅かさないための性能である。
- 試設計では、構造体の安全性（耐荷力、安定）に対しては、通常の仕様に準拠した設計方法で所定の性能を満足していると考え、検討を省略してもよいこととした。
- 想定外の設計作用に対して、冗長性（リダンダンシー）、頑健性（構造ロバスト性）をどのように捉えるか？
→「安全性をより向上させる」という観点は、設計作用の考え方とも連動する。例えば、地震の頻発する地域において「想定以上の地震力を考える」ということではないと考える。現行の設計体系では、設定した設計作用に対して部材が断面破壊の限界状態には達しないことが照査されているはずである。このような設計（照査）に対しても「一部の部材が断面破壊の限界状態に達しても構造物全体の崩壊が生じない」ということが「安全性をより向上させる」ことになり、冗長性（リダンダンシー）や頑健性（構造ロバスト性）としての評価につながる。
- リダンダンシーという観点では、連続桁形式よりは不静定次数の高いラーメン形式の方が、同じラーメン形式でも T ラーメンよりは 3 径間以上の連続ラーメンの方が「安全性がより高い」という考え方もある。

(3) 使用性

- 使用性の定義は、構造物の使用者や周辺の人が快適に構造物を使用するための性能である。
- 試設計では、通常の仕様に準拠した設計で所定の性能を確保していると考えられるため、使用性の検討を省略してよいこととした。
- ただし、伸縮装置に起因する走行性については評価に挙がることもある。

(4) 復旧性

- 復旧性の定義は、地震の影響等の偶発作用等によって低下した構造物の性能を回復させ、継続的な使用を可能にする性能である。
- 復旧性は、地震の影響等の偶発作用等により構造物の性能低下が生じた場合、性能回復が容易であることを示す性能である。したがって、構造物の修復性のみならず、被災後の点検のしやすさ、復旧資材の確保、復旧技術の向上等のハード面や、復旧体制等のソフト面の整備の有無に大きく左右するとされている。
- 試設計では、地震の影響による「修復性」に重点を置くこととした。
- 被災後の供用に対する安全性（構造物の安全性）の判定では、損傷個所の想定と判定方法を着眼点とする。
- 被災直後の車両走行は、以下の供用パターンを考慮する。
 - ①緊急車両のみの通行（減速あり）
 - ②工事車両，物資搬送車両，一般車両（減速あり）
 - ③工事車両，物資搬送車両，一般車両（通常走行）
- 被災後の点検のしやすさについて、以下の議論があった。
 - ①被災後の点検 → 損傷箇所，方法が明確になっているか？
 - ②橋脚基部の損傷の考え方 → 土中部ですぐに確認できないことをどう考える？
ただし，支承の損傷の有無，残留変位などから判定可能かとの意見があった。
 - ③復旧方法 → 想定する損傷と復旧方法（工法，調達，工期，工費）が明確になっているか？
また，被災後の施工の制約条件を設定できるか？

(5) 施工性

- 施工に関する検討は、構造物の製作性、施工時の安全性ならびに確実性および設計図書に示された構造物の要求性能を満足するように施工するための計画を立案することである。
- したがって、施工性とは、「良い」、「悪い」ではなく、想定される制約条件をどのように構造計画に反映させるかである。
- 施工の制約条件を満足する施工方法（構造形式）、品質を確保するための対応策等を検討することとした。
- 構造計画においては施工の制約条件をすべて抽出する必要がある。

(6) 維持管理性

- 構造計画においては、構造物の重要度、設計耐用期間、供用条件、環境条件および維持管理の難易度等を考慮し、供用中の維持管理が容易になるように考慮しなければならない。
- したがって、試設計のポイントは維持管理性が「良い」、「悪い」ではなく、維持管理が容易となるような構造を工夫した上で、「維持管理計画」が立案可能であることにある。本委員会では、橋梁形式ごとに以下の観点で整理することとした。
 - ①環境条件による材料劣化，自然災害や偶発的な荷重作用によって生じた不具合と点検方法
 - ②性能の低下度合いに応じた補修・補強・更新等の容易さ
 - ③維持管理が容易でない部位がある場合の対応策
- 点検計画は、「不具合が生じることを前提とした点検」なのか「不具合が生じないことを前提とし

た点検」なのか。

- コンクリート標準示方書では、予定供用期間中の要求性能を満足するように設計、施工された場合の維持管理は、「目視点検を主体とした日常点検あるいは定期点検のみで十分となる」とされている。

(7)環境性

- 環境性の定義は、自然環境、社会環境への適合性に関する性能である。
- 試設計では、省略してよいこととした。

(8)経済性

- 構造計画においては、構造物のライフサイクルコスト（LCC）の観点から経済性を検討しなければならない。
- LCC の考え方に課題はないか（設計耐用期間 100 年程度のものと、明らかにそれ以上の耐用期間をもつ材料の違いを表すことができないのではないか（LCC100 年の壁）。

3.3 橋梁全体系の特性と要求性能

3.3.1 概要

より合理的に橋梁の計画を行ううえでは、設計者は選択した橋梁の形状がどのような特性をもつのかを把握し、様々な観点からより合理的な形状を具現化することが望ましいと考えられる。本節では、このような橋梁の形状を具現化するための一試みとして、橋梁形式の違いにより、どのように橋梁全体系の特性が異なるのかを要求性能をもとに試行錯誤的に検討した内容を示す。

3.3.2 要求性能

前述のように橋梁の物理的特性に対する要求性能は一般に、安全性、使用性、復旧性、および耐久性がある。橋梁形式の違いにより、これらの要求性能がどのように異なるのかを検討した。なお、各要求性能は、道路橋示方書に示される照査を満足することは前提条件とした上で、想定以上の外力に対する安全性に対する冗長性、維持管理のし易さ、地震後の修復性等について検討した。各要求性能に対して検討した項目を下記に示す。

(1)安全性

a)構造物全体系としての崩壊

部材や部位の損傷や破壊によって、橋梁全体系としての破壊（落橋）に対する安全性

B)利用者に対して

橋梁を使用する利用者（人や自動車）に対する安全性

c)第三者に対して

橋梁周辺の人命や財産に与える影響で、かぶりコンクリートの剥落による被害など

(2)復旧性

a)地震直後の点検作業

地震直後に橋梁の使用の可否を判断するための作業

b)地震後の本復旧作業

地震により被災した橋梁の機能を早期に回復するための作業

(3)耐久性

a)材料劣化

部材や部位の材料劣化に対する抵抗性

b)点検作業

常時の維持管理における橋梁点検の作業性

c)補修作業

維持管理における材料劣化にともなう補修の作業性

このほか、橋の要求性能としては「使用性」もあるが、これは道路橋示方書を満足した設計を行うことにより、要求性能も満足されるとし、上記の3つの性能についてのみ着目することとした。

3.3.3 橋梁形状

橋梁形状の違いにより、3.2 に示した要求性能がどのような影響を与えるのかを検討した。ただし、橋梁形状については、アーチ橋や斜長橋、エクストラード橋などの他の形式の橋梁を含めると議論が発散するため、下図に示す単純桁、連続桁、ラーメンの3形式に限定した。またスラブ桁や箱桁などの上部工の形式を含めると複雑化するため、ここでは上部工形式については検討しないものとした。

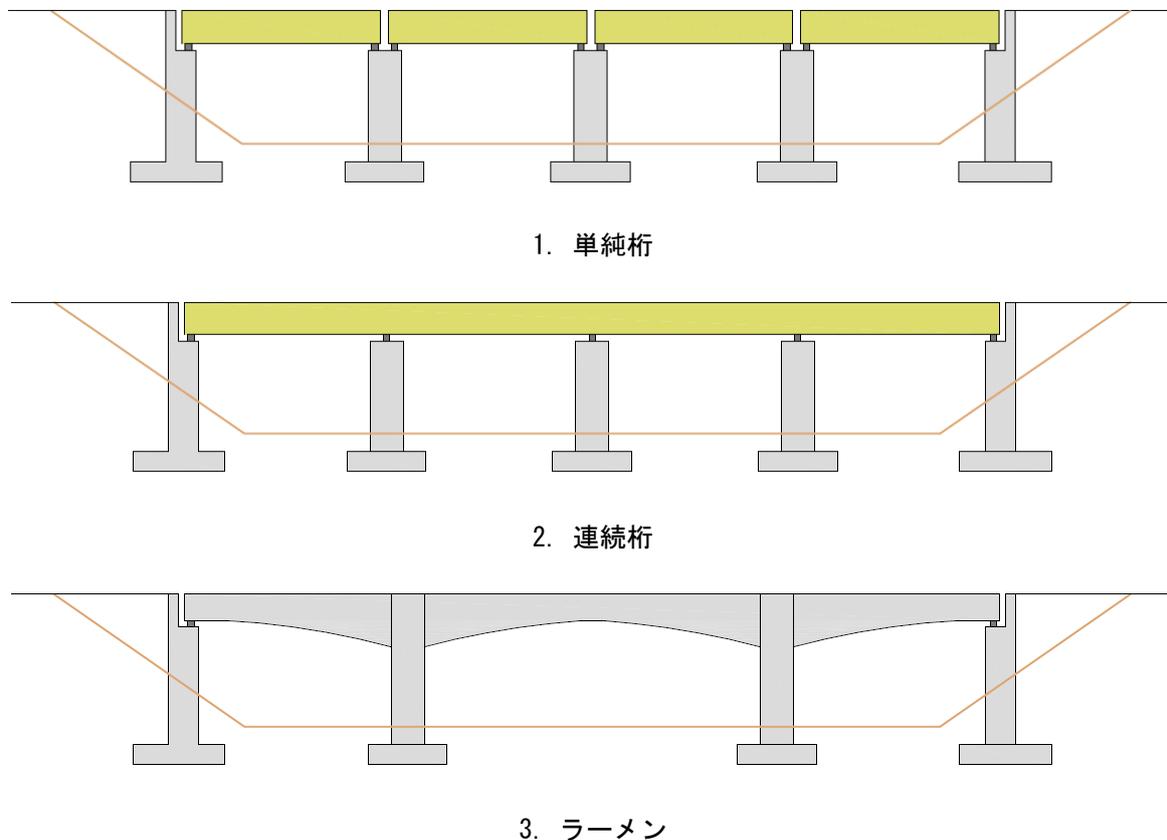


図 3.3.1 検討した橋梁形状

3.3.4 検討結果

設定した橋梁形状の違いが、要求性能の各項目にどのように影響するのかを検討した結果を下記に示す。

(1) 安全性

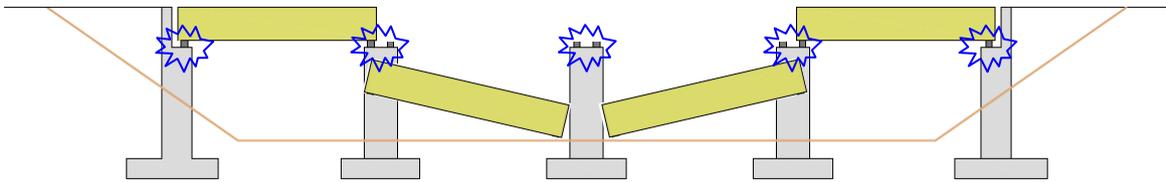
1) 構造物全体系としての崩壊

a) 支点部の損傷に対して

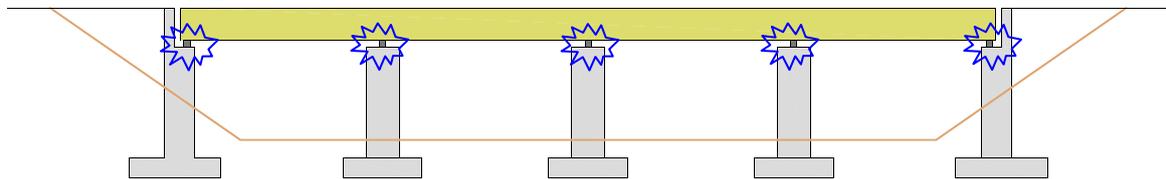
☞ 着眼点

設計想定以上の外力等の作用により支点部が損傷した場合、単純桁では1支点部の損傷により落橋へ繋がるリスクが高くなる。連続桁では1支点部が損傷しても桁全体が連続しているため落橋のリスクは小さい。さらにラーメン橋では支点部が橋台のみであるため、落橋に対するリスクは最も低くなると考えられる。

単純桁：構造が単純で支点部の損傷による落橋の危険性が高い



連続桁：支承形式であるが中間支点の損傷による落橋の危険性が低い



ラーメン：不静定次数が高く構造的に落橋は生じにくい

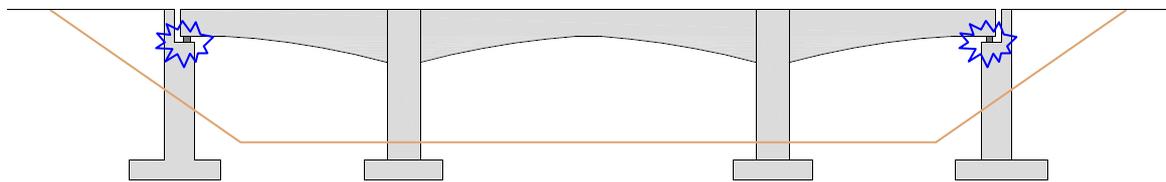


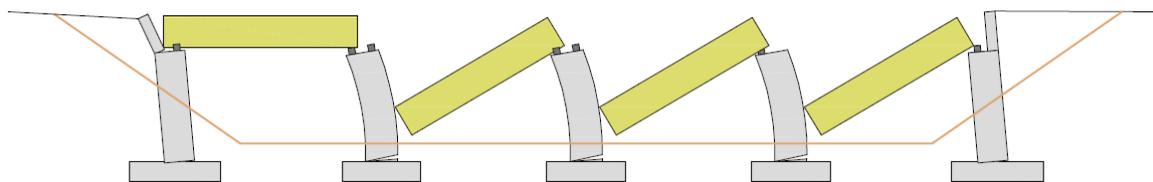
図 3.3.2 支点部の損傷に対して想定されるリスク

b) 下部工の過大な変形に対して

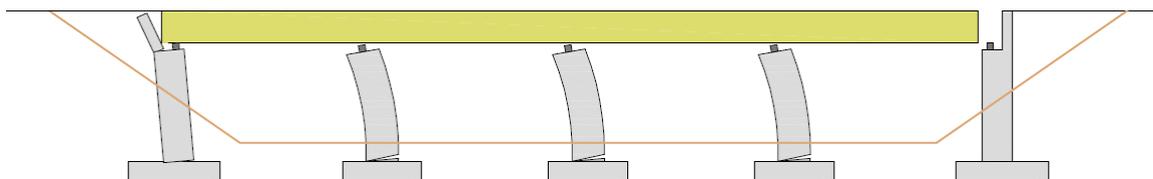
☞ 着眼点

設計想定以上の外力等が作用し1つの橋脚に過大な変形が生じた場合、単純桁では落橋へ繋がるリスクは高くなるが、連続桁では桁全体が連続しているため落橋のリスクは小さい。ラーメン橋は桁橋と下部工の損傷位置が異なり、1つの下部工に過大な変形が生じようとしても、下部工と上部工が一体となり挙動するため、構造物全体の崩壊のリスクは最も低くなると考えられる。

単純桁：1つの下部工の崩壊が構造物全体の崩壊につながる



連続桁：1つの下部工が崩壊しても構造物全体は崩壊しにくい



ラーメン：不静定次数が高く1つの下部工が崩壊しても構造物全体は崩壊しない

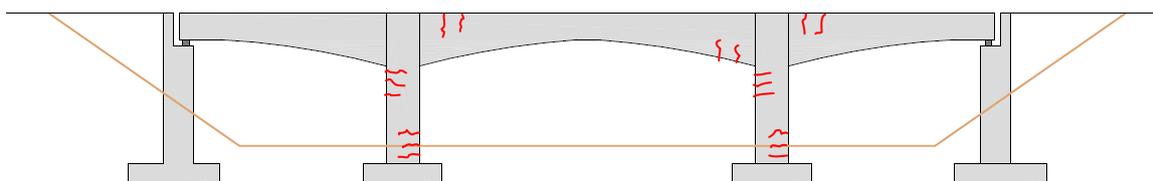


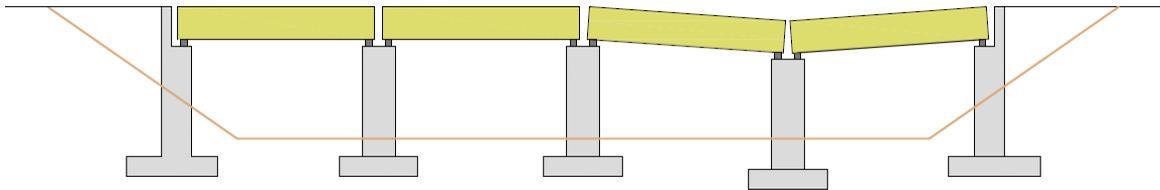
図 3.3.3 下部工の過大な変形に対して想定されるリスク

c) 不等沈下に対して

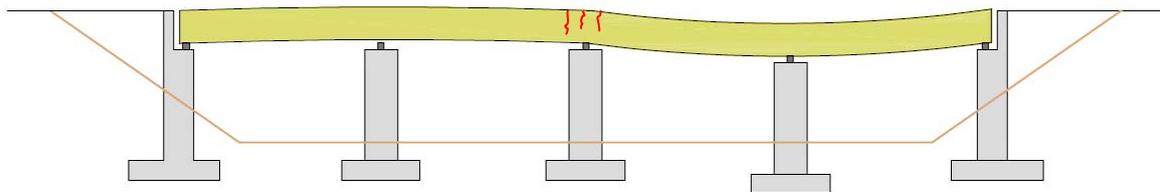
☞ 着眼点

基礎の不等沈下が生じた場合、単純桁では1つの橋脚の不等沈下の影響が支持する桁のみとなり、他径間の桁への影響は小さく、構造全体系で考えた場合、その影響は限定的となる。一方、連続桁では桁が連続しているため、1つの橋脚の不等沈下が支承部を介して桁全体に影響する。ラーメンでは橋脚の不等沈下が直接上部工に作用するため、場合により橋梁全体を再構築しなければならない。不等沈下が生じる恐れがある箇所では、単純桁の方が最も構造全体へ影響するリスクを低減できると考えられる。

単純桁：上部工への影響が単径間に限定するため構造全体系への影響は小さい



連続桁：全径間の上部工に影響するが支承部を介して間接的である



ラーメン：全径間の上部工に直接的に影響する

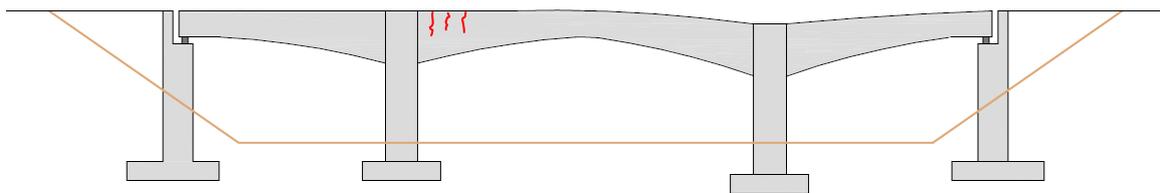


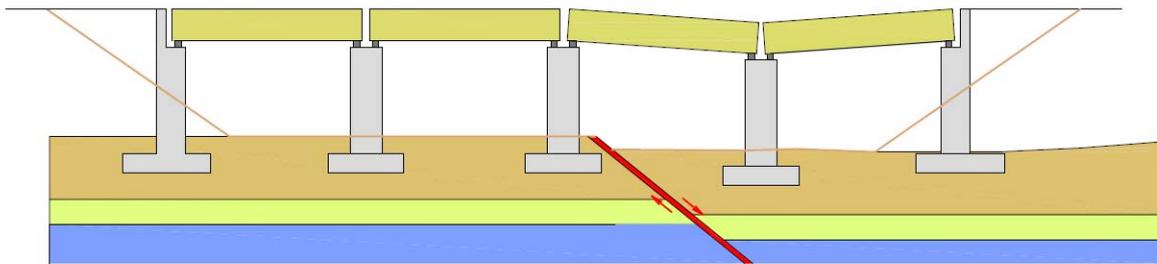
図 3.3.4 不等沈下に対して想定されるリスク

d) 断層に対して

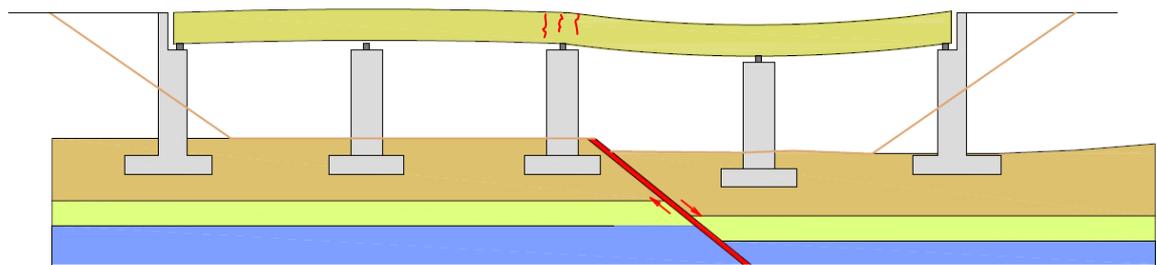
☞ 着眼点

断層を跨ぐ位置に架橋する場合、もし断層変位が生じたら、単純桁では断層を跨ぐ桁のみが変形し、他径間の桁への影響は小さく、構造全体系で考えた場合、その影響は限定的となる。一方、連続桁では桁が連続しているため、断層変位が支承部を介して桁全体に影響する。ラーメンでは断層変位が下部工より直接上部工に作用するため、場合により橋梁全体を再構築しなければならない。断層を跨ぐ位置にある箇所では、断層変位が構造全体へ影響するリスクを単純桁が最も低減できると考えられる。

単純桁：断層変位の影響が単径間に限定するため構造全体系への影響は小さい



連続桁：断層変位の影響が橋梁全体系に影響する



ラーメン：断層変位の影響が橋梁全体系に影響する

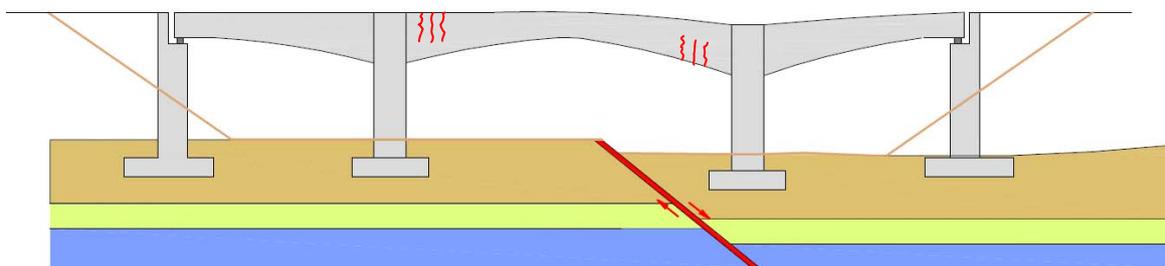


図 3.3.5 断層に対して想定されるリスク

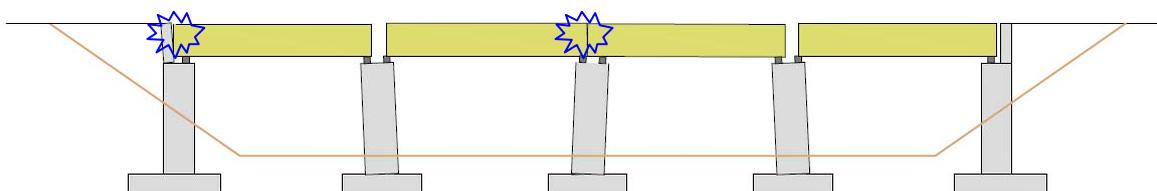
2) 利用者に対して

a) 桁端衝突

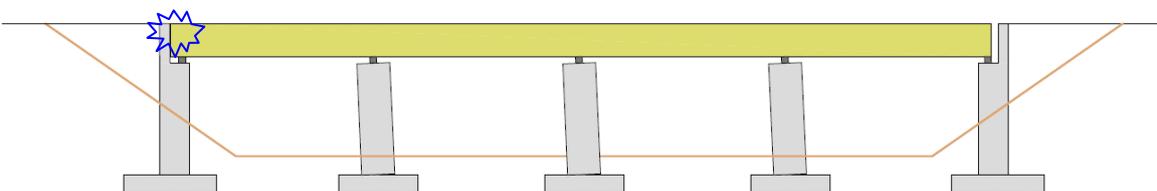
☞ 着眼点

設計想定以上の地震や地盤変位等により、桁端が衝突する損傷したことを想定した場合、損傷した桁端部に車両が乗り上げるなどによる、利用者の走行安全性低下のリスクが考えられる。単純桁は各支点部に桁端があるため、桁端が損傷する箇所が多くリスクも最も高いと想定される。連続桁、ラーメンは桁端が端支点のみであり、走行安全性低下のリスクは小さいと考えられる、ただし、衝突エネルギーは単純桁に比べ大きくなると想定され、損傷は単純桁よりも連続桁やラーメンのほうが大きくなることも考える必要がある。

単純桁：各桁の端部で地震時の衝突による損傷が生じ走行安全性が低下するリスクが高い



連続桁：桁端は端支点のみで地震時の衝突による走行安全性低下のリスクが低い



ラーメン：桁端は端支点のみで地震時の衝突による走行安全性低下のリスクが低い

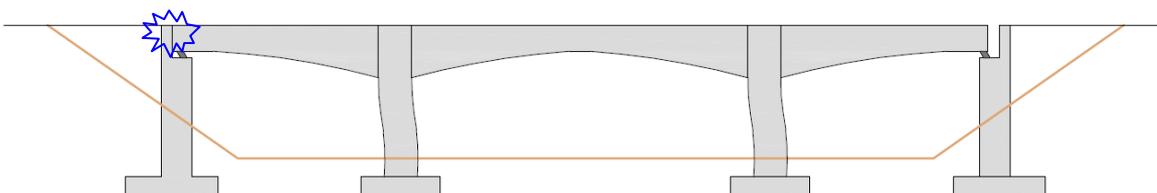


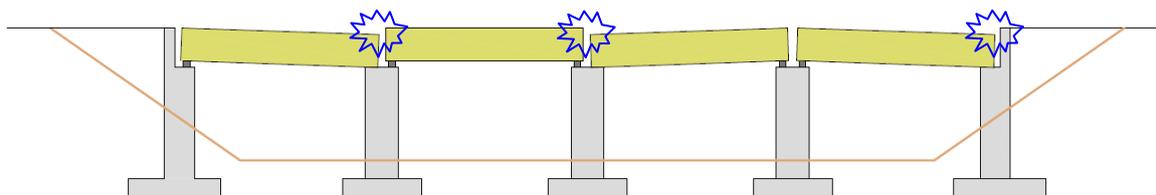
図 3.3.6 桁端衝突に対して想定されるリスク

b) 支承の損傷

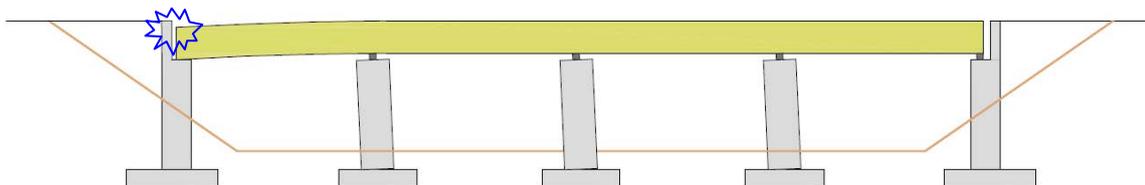
☞ 着眼点

支承が設計想定以上の外力等により損傷した場合、段差が生じて利用者の走行安全性が低下するリスクが考えられる。単純桁は掛け違い部が多く、段差が生じるリスクも大きくなり、連続桁、ラーメンは支点部が桁端のみであるため、リスクは小さくなると考えられる。

単純桁：掛違い部が多く支承の損傷時に段差等による走行安全性へのリスクが大きい



連続桁：支承損傷時の段差等が桁端部のみで生じるため走行安全性のリスクが小さい



ラーメン：支承損傷時の段差等が桁端部のみで生じるため走行安全性のリスクが小さい

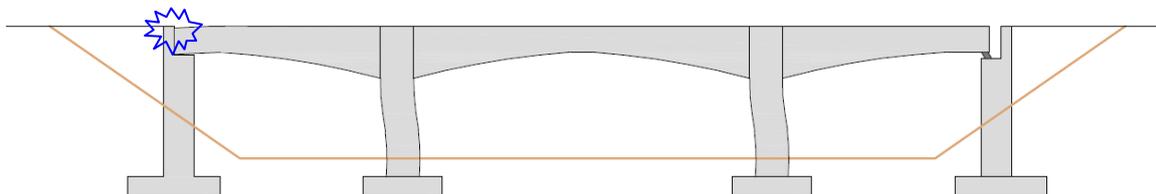


図 3.3.7 支承の損傷に対して想定されるリスク

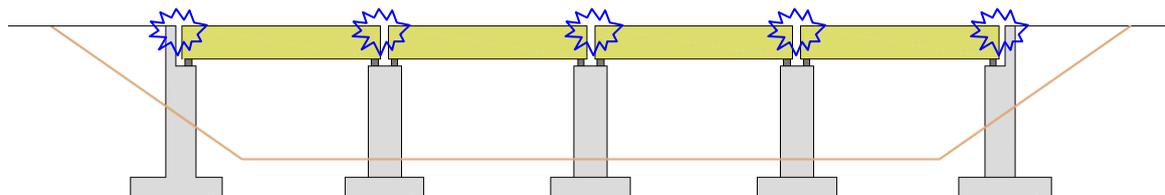
c) 伸縮装置の破損

☞ 着眼点

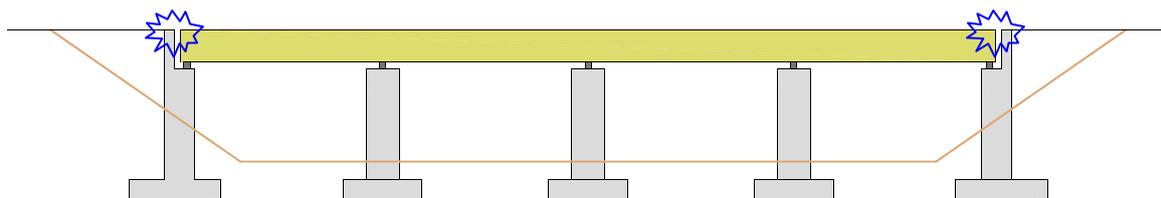
伸縮装置が設計想定以上の外力等により損傷した場合、損傷した伸縮装置に車両が乗り上げるなどの利用者の走行安全性が低下するリスクが考えられる。単純桁は伸縮装置が多く、損傷が生じるリスクも大きくなるが、連続桁、ラーメンは伸縮装置が桁端のみであるため、リスクは小さくなると考えられる。

□ 橋梁形状と要求性能

単純桁：掛違い部が多く伸縮装置の破損による走行安全性へのリスクが大きい



連続桁：伸縮装置は桁端部のみで破損による走行安全性のリスクが小さい



ラーメン：伸縮装置は桁端部のみで破損による走行安全性のリスクが小さい

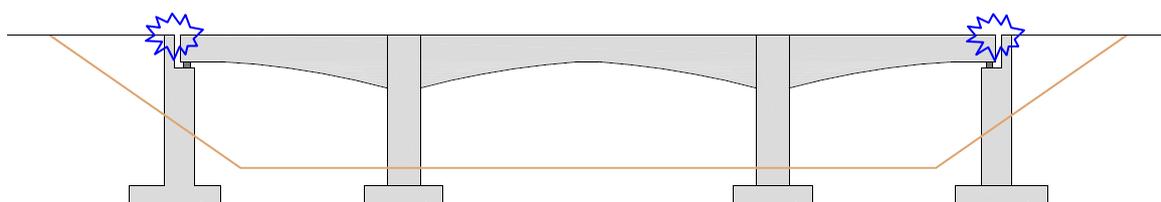


図 3.3.8 伸縮装置の破損に対して想定されるリスク

3) 第3者に対して

a) コンクリート片の落下

☞ 着眼点

材料劣化等に生じるコンクリート片の落下により、構造物周辺の人命や財産に影響するリスクが考えられる。これは、単純桁、連続桁、ラーメンともに可能性がありリスクは同じである。ただし、適用する上部工形式によりリスクは異なる。また、桁下利用する場合やこ線橋にはリスクを検討する必要があるが、河川橋においてはリスクは低い。

単純桁：材料劣化によるコンクリート片の落下の可能性はある。

連続桁：材料劣化によるコンクリート片の落下の可能性はある。

ラーメン：材料劣化によるコンクリート片の落下の可能性はある。

(2) 復旧性

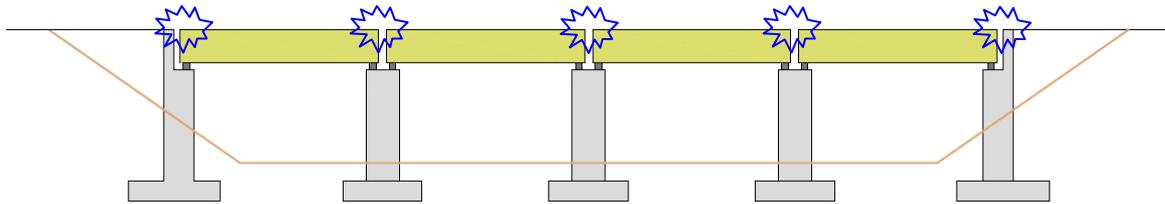
1) 地震直後の点検作業

a) 路面の段差・遊間

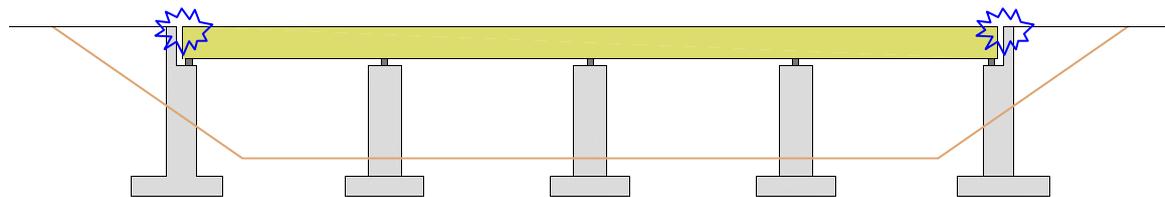
☞ 着眼点

大地震発生直後に、橋梁の使用の可否を判断するには、地震直後の点検作業が容易である必要がある。路面の段差や遊間が生じていないことを確認するには、単純桁であれば各径間ごとに確認する必要があり、また段差や遊間が過大であれば車両の乗り入れも困難であるため、点検作業性が悪いと考えられる。連続桁、ラーメンであれば路面の段差や遊間の確認は端支点部のみで作業性が良いと考えられる。

単純桁：径間毎に確認する必要があり作業性が悪い。過大な場合に車両の乗り入れが困難



連続桁：橋台部のみ確認で作業性がよい。過大な場合に車両の乗り入れが困難



ラーメン：橋台部のみ確認で作業性がよい。過大な場合に車両の乗り入れが困難

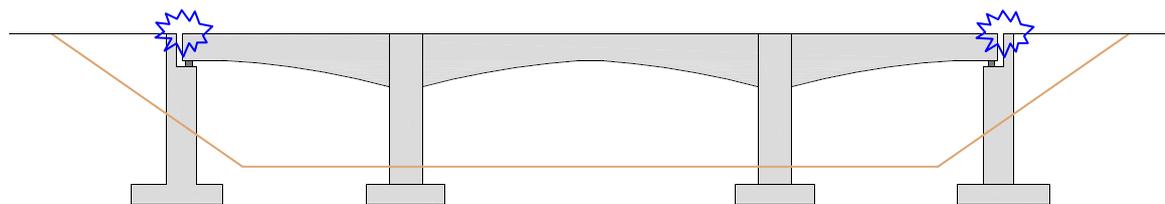


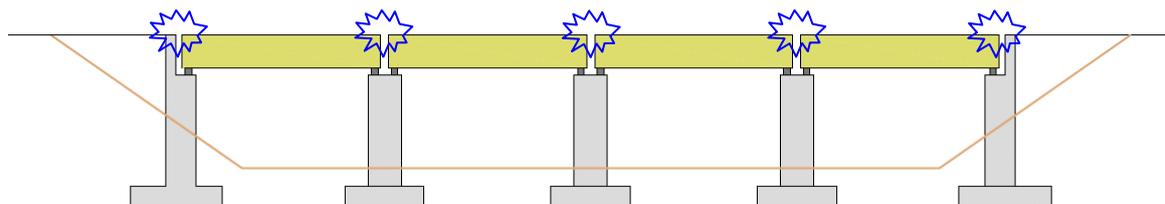
図 3.3.9 路面の段差・遊間に対して想定されるリスク

b) 上部工の点検作業

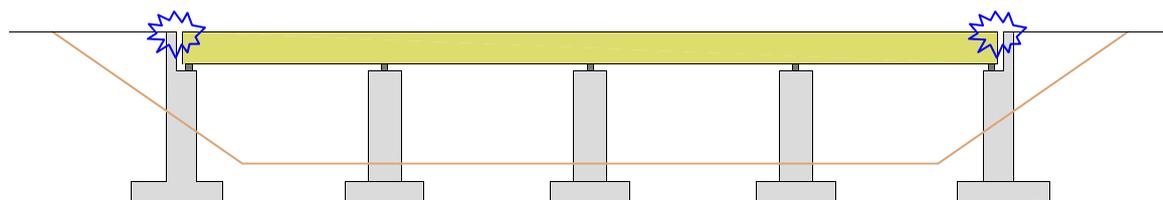
☞ 着眼点

上部工の地震直後の点検は、桁橋であれば桁端部の衝突となる。（支点部は別途、支点部の点検として検討する。）そのため、単純桁の場合は各支点部で点検する必要があり、作業に時間を要する。連続桁であれば端支点のみとなるため、作業性が良い。一方、ラーメンは柱頭部近傍で上部工にも損傷が生じることが想定されるため、上部工の点検も行う必要があり作業時間は多く必要となる。

単純桁：桁端毎に確認するため作業が煩雑



連続桁：橋台部の確認のため作業性が良い



ラーメン：柱頭部近傍に損傷が生じるため点検が必要

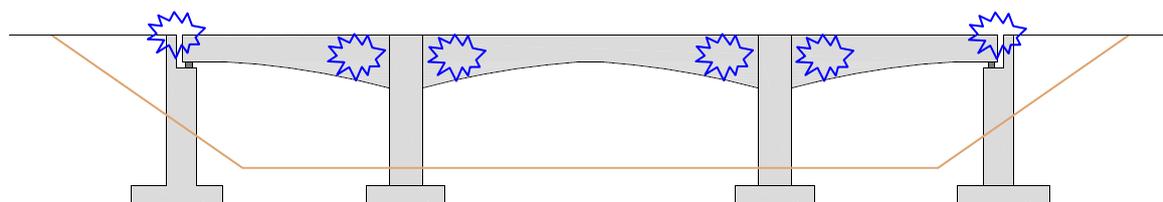


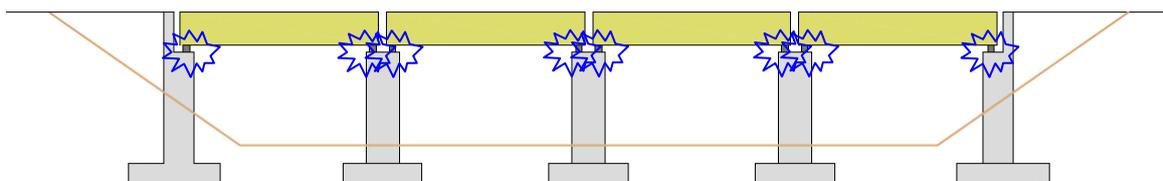
図 3.3.10 上部工の点検における作業性

c) 支点部の点検作業

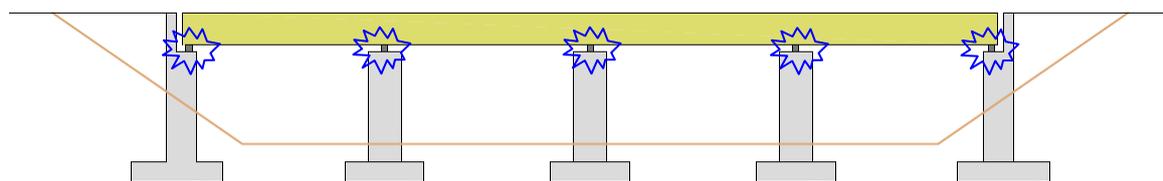
☞ 着眼点

支承および支承取り付け部近傍の下部工および上部工の地震直後の点検は、設置される支承数に左右される。単純桁が最も支承数が多く作業に時間がかかる。連続桁は単純桁に比べ支承数は少ないものの、下部工毎に点検が必要である。ラーメンは橋台部のみで最も点検に時間を必要としない。

単純桁：桁端毎に確認するため作業が煩雑



連続桁：下部工毎に確認するため作業がやや煩雑



ラーメン：橋台のみの確認で容易

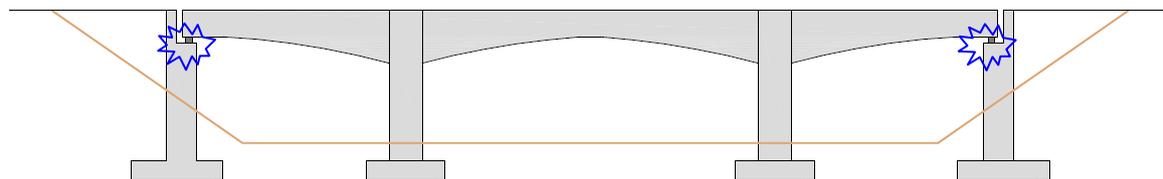


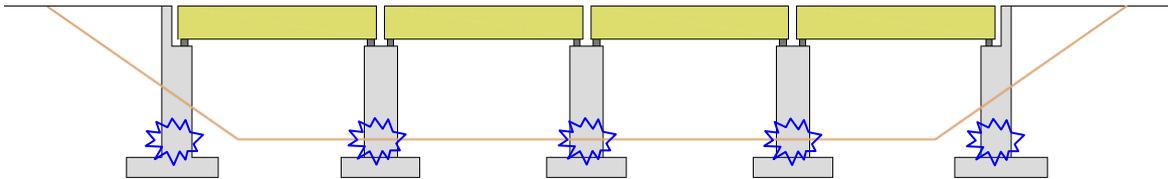
図 3.3.11 支点部の点検における作業性

d) 下部工の点検作業

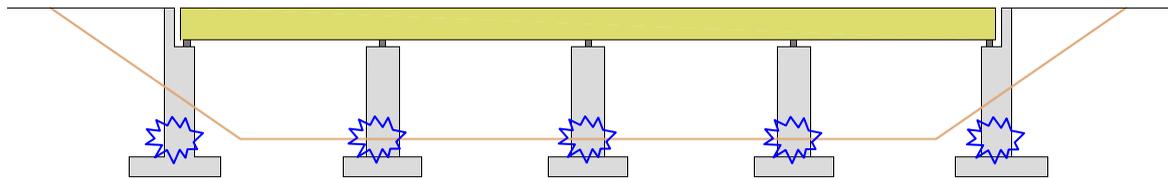
☞ 着眼点

下部工の地震直後の点検は、桁橋であれば橋脚基部のみの点検でよい。単純桁と連続桁では同一の点検効率となる。一方、ラーメンは柱上下端部で損傷するため、それぞれの箇所を点検するための時間が必要となる。

単純桁：基部のみ損傷で点検数は少ない



連続桁：基部のみ損傷で点検数は少ない



ラーメン：柱頂部と基部の損傷確認が必要

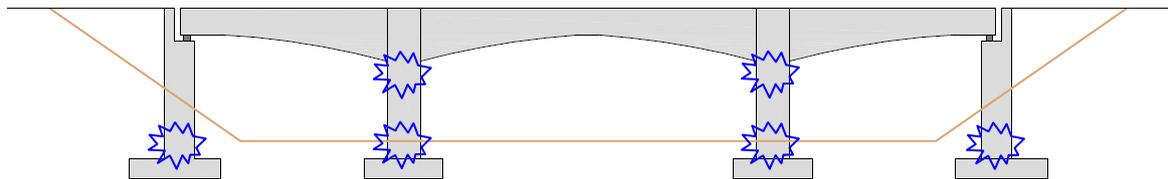


図 3.3.12 下部工の点検における作業性

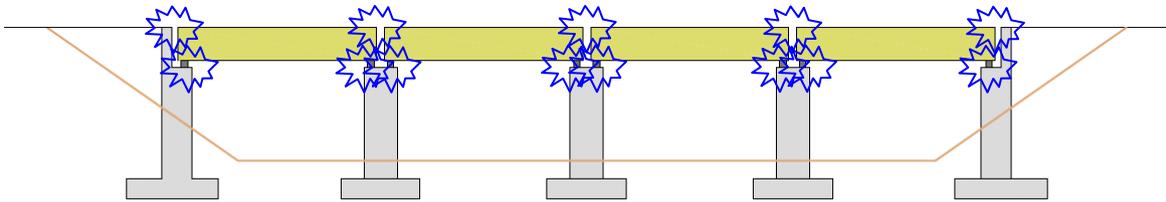
2) 地震後の本復旧作業

a) 上部工の損傷による復旧作業

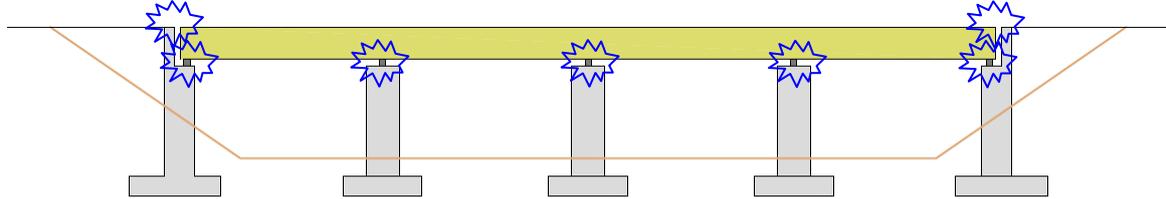
☞ 着眼点

桁橋の地震による上部工の損傷として、桁端の衝突と支承取り付け部の損傷が考えられる。単純桁は桁端と支承数が多く、多くの桁端や支承周りが損傷した場合、復旧にも多くの時間を要する。一方で損傷が甚大であれば、桁そのものの交換は容易である。連続桁は桁端が端部のみで、支承数も単純桁に比べ少なく、同程度の損傷であれば復旧時間は少ない。ただし損傷が甚大であれば、桁の交換は難しく上部工の再構築が必要となる。ラーメンは桁端および支承が端部のみで、これらの復旧に必要な時間は最も少なくなる。一方、柱頭部近傍の上部工にも損傷が生じることが考えられ、損傷が甚大であれば上部工のみならず、下部工を含めた再構築が必要となり復旧には多大な時間を要する。

単純桁：桁端や支承部の作業性が悪いが、桁の交換が容易



連続桁：桁端や支承部などの作業性が悪い。桁の交換は難しい



ラーメン：桁の損傷が過大な場合には復旧が困難

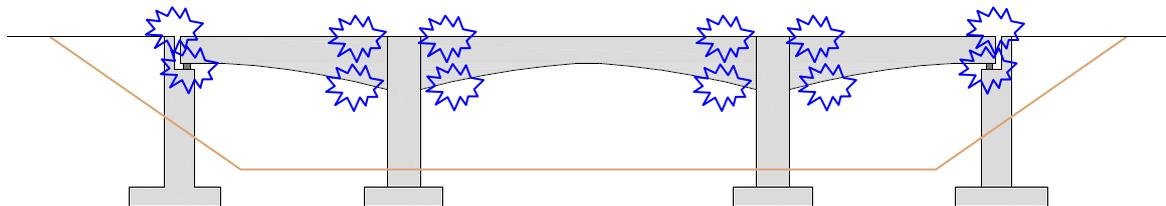


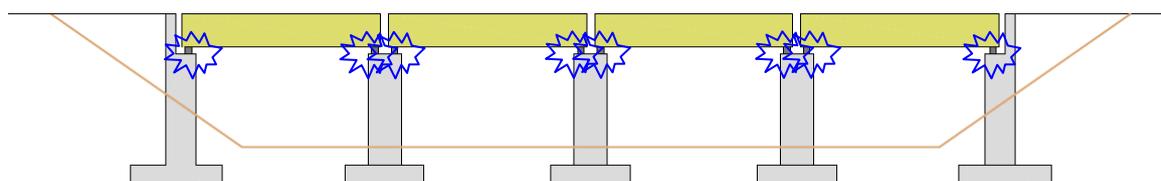
図 3.3.13 上部工の損傷の復旧に対する作業性

b) 支承部の損傷による復旧作業

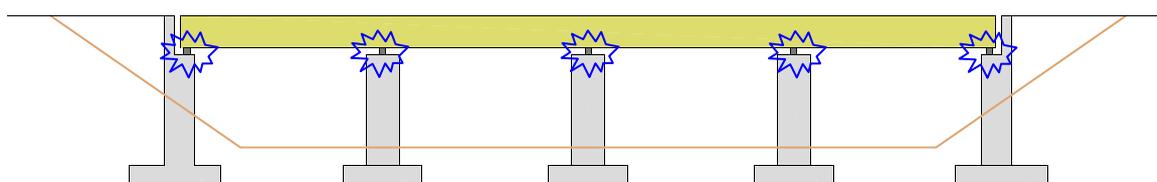
☞ 着眼点

地震により支承部が損傷した場合、ジャッキアップにより支承を交換する必要があり、ジャッキアップの容易さが復旧作業の容易さに繋がる。単純桁であればジャッキアップは比較的容易であり、復旧作業は最も容易である。一方、連続桁は同時に全ての支点をジャッキアップする必要があり、復旧作業には多くの労力を要する。ラーメンは橋台部のみ支承があるため、支承数は少ないものの、ジャッキアップにより上部工と下部工に応力が伝達されるため、復旧は困難であると考えられる。

単純桁：ジャッキアップが比較的容易で支承の交換が可能



連続桁：ジャッキアップが容易ではなく支承の交換に労力が必要



ラーメン：ジャッキアップが容易では無く支承部(橋台)の交換に労力が必要

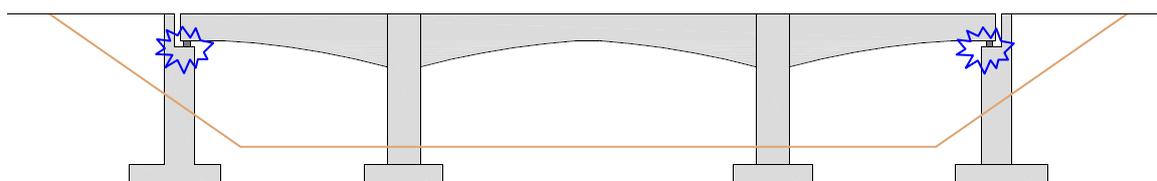


図 3.3.14 支承部の損傷の復旧に対する作業性

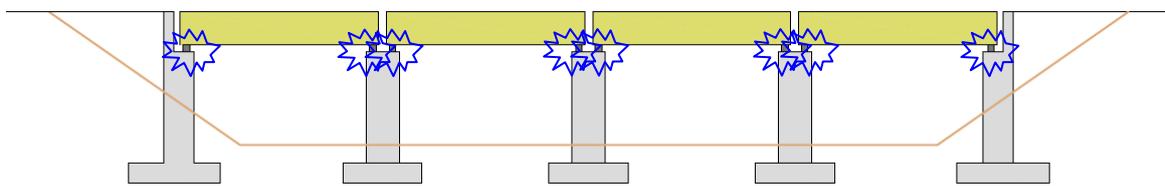
c) 段差・遊間異常に対する復旧作業

☞ 着眼点

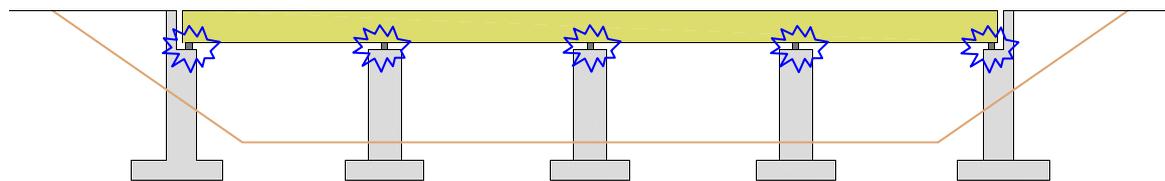
地震により路面に段差や遊間が生じ、その要因が桁の移動によるものであれば、桁を基の位置に移動する必要がある。ジャッキアップの容易さが復旧作業の容易さに繋がる。単純桁であればジャッキアップは比較的容易であり、復旧作業は最も容易である。一方、連続桁は同時に全ての支点をジャッキアップする必要があり、復旧作業には多くの労力を要する。ラーメンは上部工と下部工が剛結されており、桁の移動の要因は下部工の変状に起因するものであるため、復旧は困難であると考えられる。

□ 橋梁形状と要求性能

単純桁：桁の移動が要因の場合、ジャッキアップが比較的容易で桁の移動が可能



連続桁：桁の移動が要因の場合、ジャッキアップが容易ではなく桁の移動に労力が必要



ラーメン：桁の移動が要因の場合、下部工に起因するため復旧が困難

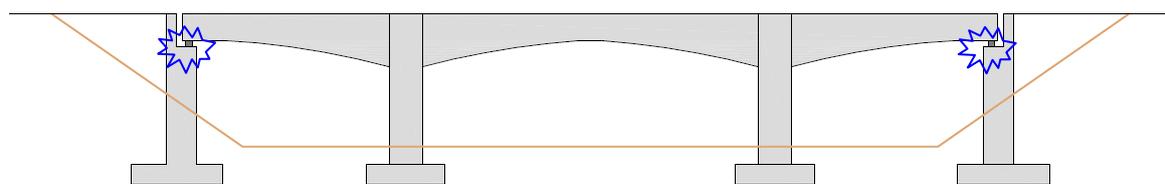


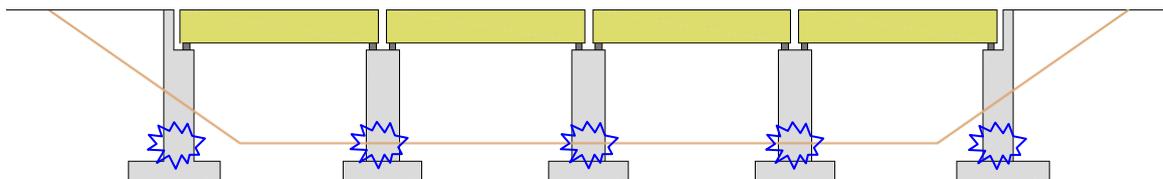
図 3.3.15 段差・遊間異常の復旧に対する作業性

d) 下部工の損傷に対する復旧作業

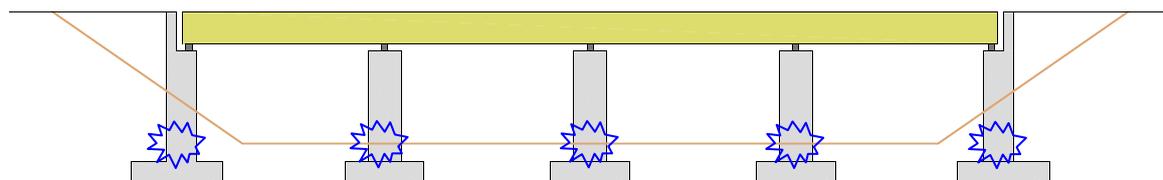
☞着眼点

地震により下部工が損傷した場合、損傷が甚大であれば桁を仮受けし、下部工を復旧する必要がある。桁橋であれば橋脚基部のみの損傷であり、特に単純桁であれば復旧の対象とする下部工に関連する上部工のみを仮受けすれば良く、作業性は良い。一方、連続桁は仮受けが難しく、復旧作業に多くの労力が必要となる。ラーメンは柱上下端部に損傷が生じ、損傷が甚大であれば復旧は困難であると考えられる。

単純桁：基部のみ修復。損傷が過大な場合は桁の仮受けが容易で補修や再構築が容易



連続桁：基部のみ修復。損傷が過大な場合は桁の仮受けが容易ではなく復旧作業に時間が必要



ラーメン：柱頂部と基部の2か所の修復が必要な場合に復旧作業に時間が必要で、損傷が過大な場合は復旧が困難

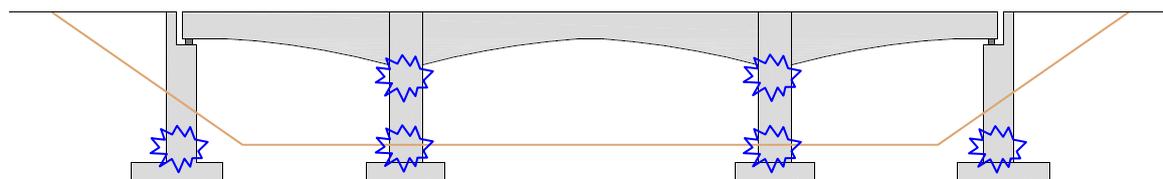


図 3.3.16 下部工の損傷の復旧に対する作業性

(3) 耐久性

1) 材料劣化

a) 上部工の材料劣化

☞ 着眼点

上部工の材料劣化は、単純桁、連続桁、ラーメンなどの橋梁形式で優劣は無く、上部工の形式により優劣が決定される。

単純桁：橋梁形式にはよらない。

連続桁：橋梁形式にはよらない。

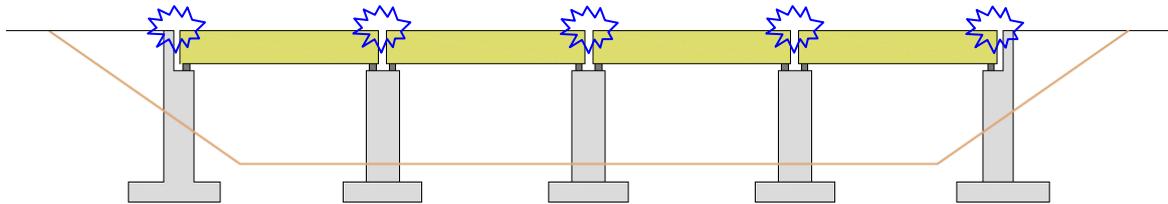
ラーメン：橋梁形式にはよらない。

b) 桁端の材料劣化

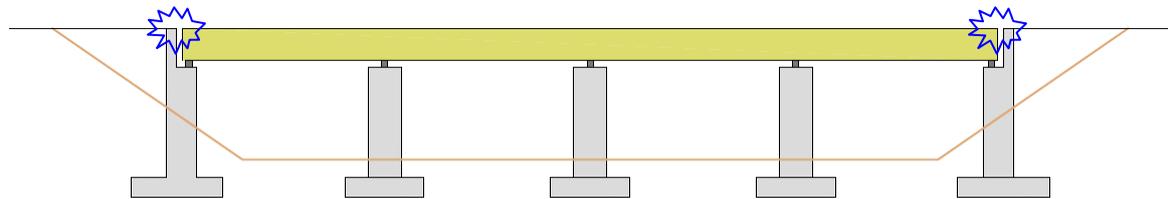
☞ 着眼点

橋面の雨水などの水分が伸縮装置周辺より移動し、桁端周辺の劣化因子の一つとなっている。単純桁は支点部それぞれに桁端があり、桁端の劣化箇所が多く材料劣化のリスクが高い。連続桁およびラーメンは端支点のみ桁端があるため、材料劣化のリスクは単純桁に比べ低い。

単純桁：端支点および中間支点掛違い部の伸縮装置からの漏水による劣化箇所が多い



連続桁：伸縮装置は端支点のみで劣化箇所が少ない



ラーメン：伸縮装置は端支点のみで劣化箇所が少ない

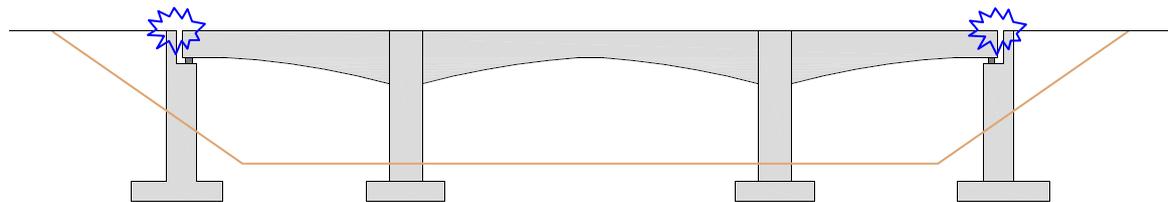


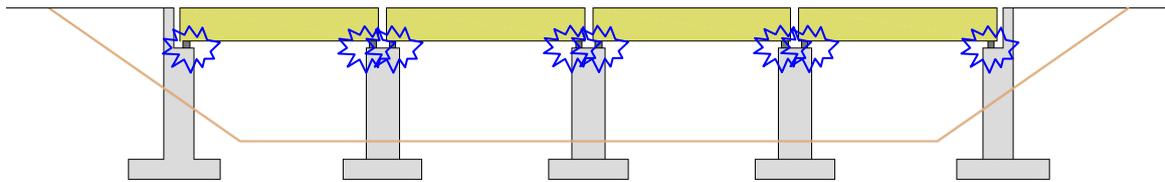
図 3.3.17 桁端の材料劣化のリスク

c) 支承部の材料劣化

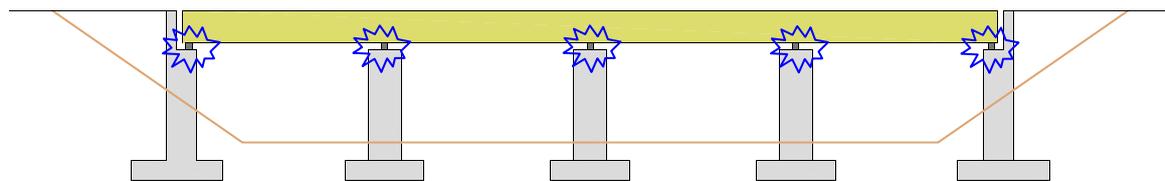
☞ 着眼点

橋面の雨水などの水分が伸縮装置周辺より移動し、桁端周辺と共に支承部周辺の劣化因子の一つとなっている。単純桁は支承数が最も多く、支承部周辺の材料劣化のリスクが高い。連続桁は単純桁に比べ支承数が少なく、中間支点部では橋面からの劣化因子が移動しにくく、支承部の材料劣化のリスクは低い。ラーメンは端支点のみであるため、支承部の材料劣化のリスクは最も低い。

単純桁：支承数が多く劣化箇所が多い



連続桁：各下部工に支承が配置され劣化箇所が比較的多いが、中間支点の橋面からの劣化因子が移動しにくい



ラーメン：支承は端支点のみで劣化箇所が少ない

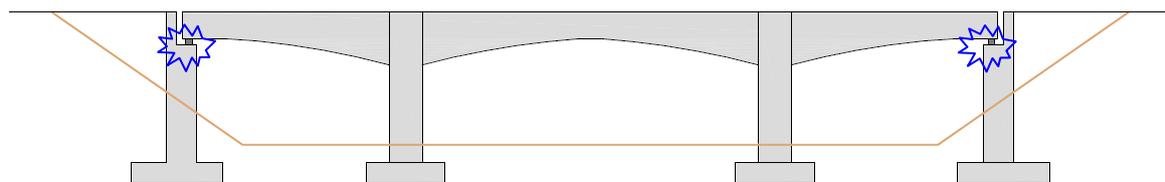


図 3.3.18 支承部の材料劣化のリスク

d) 下部工の材料劣化

☞ 着眼点

下部工の材料劣化は、単純桁、連続桁、ラーメンなどの橋梁形式で優劣は無い。

単純桁：橋梁形式にはよらない。

連続桁：橋梁形式にはよらない。

ラーメン：橋梁形式にはよらない。

2) 点検作業

a) 上部工の点検作業

☞ 着眼点

点検作業の容易性は、単純桁、連続桁、ラーメンで優劣は無く、上部工の形式により優劣が決定される。

□ 橋梁形状と要求性能

単純桁：橋梁形式にはよらない。

連続桁：橋梁形式にはよらない。

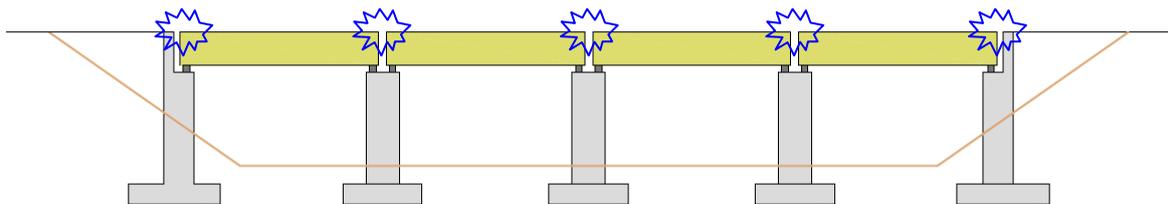
ラーメン：橋梁形式にはよらない。

b) 伸縮装置の点検作業

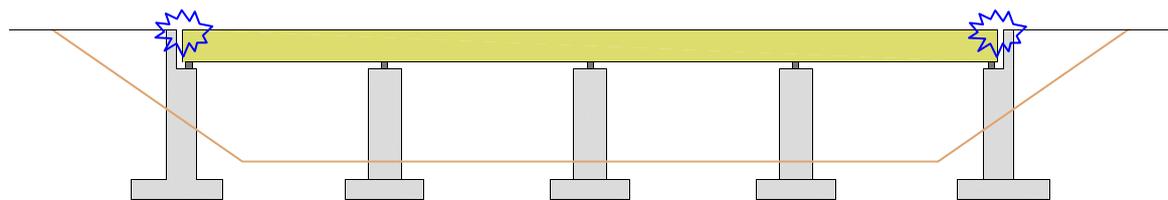
☞ 着眼点

伸縮装置の劣化を確認するための目視作業において、単純桁では支点毎に伸縮装置が起点側と終点側で設置されている。連続桁、ラーメンは端支点のみであり点検作業が容易となる。

単純桁：支点毎に点検が必要



連続桁：端支点のみの点検で、作業が容易



ラーメン：端支点のみの点検で、作業が容易

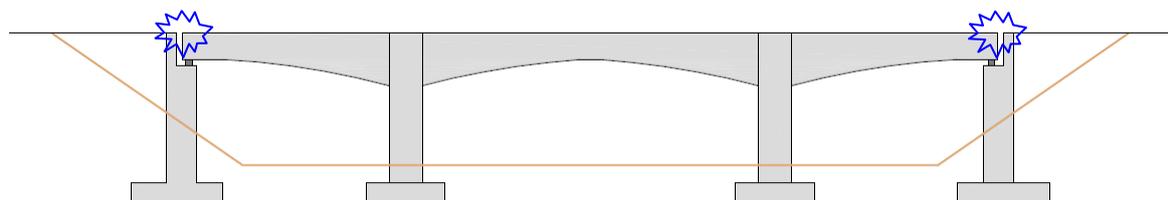


図 3.3.19 伸縮装置の点検に対する作業性

c) 下部工の点検作業

☞ 着眼点

下部工の点検作業性は、単純桁、連続桁、ラーメンなどの橋梁形式で優劣は無い。

単純桁：橋梁形式にはよらない。

連続桁：橋梁形式にはよらない。

ラーメン：橋梁形式にはよらない。

3) 補修作業

a) 上部工の補修作業

☞ 着眼点

補修作業の容易性は、単純桁、連続桁、ラーメンで優劣は無く、上部工の形式により優劣が決定される。

単純桁：橋梁形式にはよらない。

連続桁：橋梁形式にはよらない。

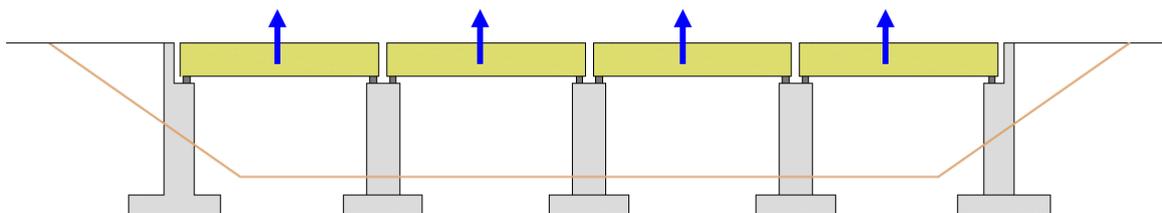
ラーメン：橋梁形式にはよらない。

b) 上部工の更新作業

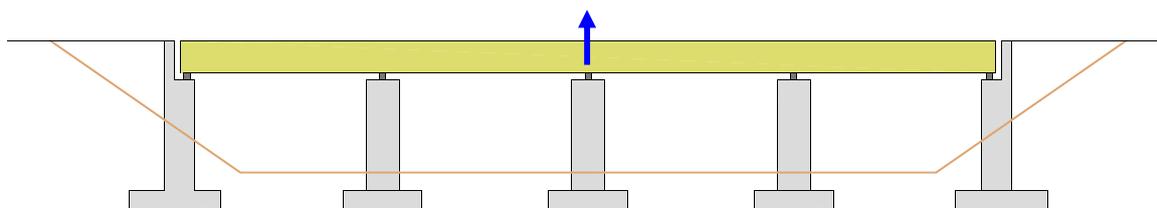
☞ 着眼点

上部工の補修が困難で更新が必要となった場合、単純桁はジャッキアップにより桁の交換が可能である。連続桁はジャッキアップが可能であるが、桁全長を再構築する必要があり、桁の交換には時間を要する。ラーメンは橋梁全体を再構築する必要があり、多大な時間を要する。

単純桁：ジャッキアップが可能で桁交換が可能



連続桁：連続桁の桁交換は困難



ラーメン：ラーメン構造であり桁交換は不可能

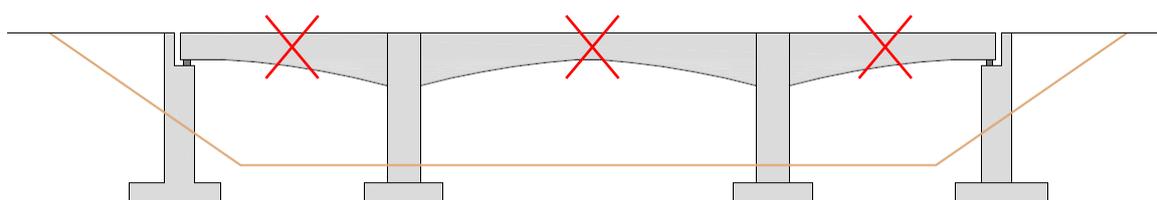


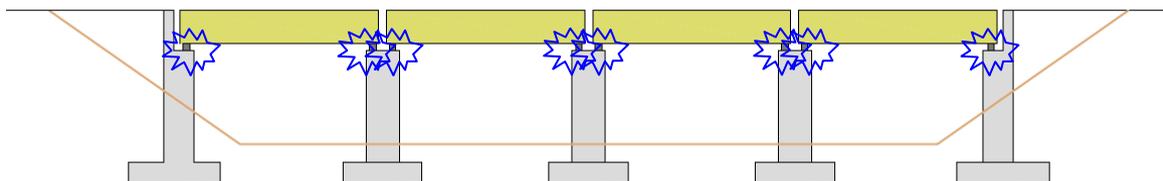
図 3. 3. 20 上部工の更新に対する作業性

c) 支承部の補修作業

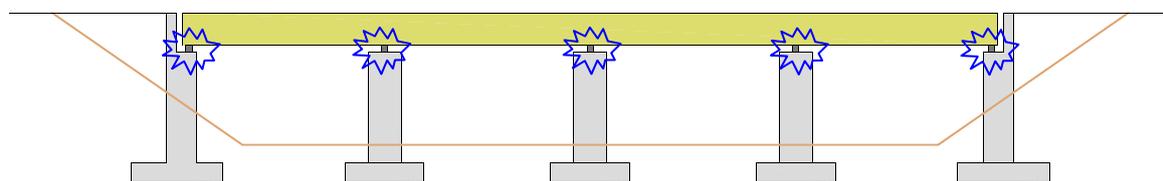
☞ 着眼点

単純桁では支点毎に支承が起点側と終点側で設置され、作業空間が狭く、支承内側の補修作業性が悪い。
連続桁では支承は橋脚毎にあるが、作業は比較的容易。ラーメンは端支点のみであり補修箇所が少ない。

単純桁：支承数が多く補修箇所が多い。支承内側への補修作業が困難



連続桁：支点毎に支承はあるが支承の補修作業は可能



ラーメン：ラーメン構造であり支承部の補修は橋台のみ

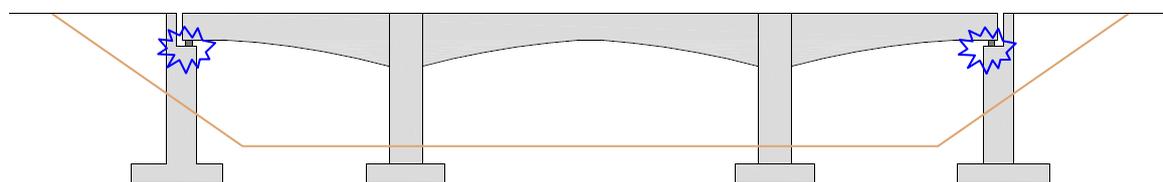


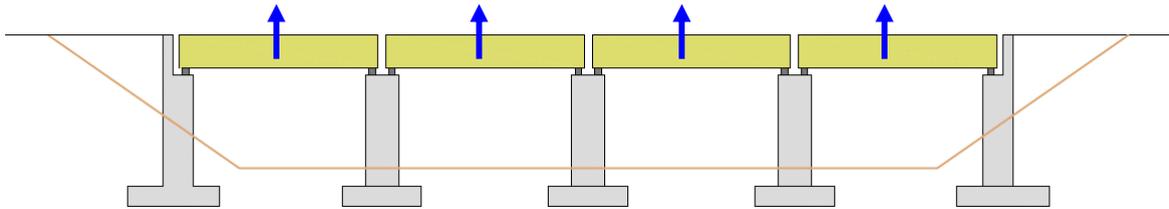
図 3. 3. 21 支承部の補修に対する作業性

d) 支承の更新作業

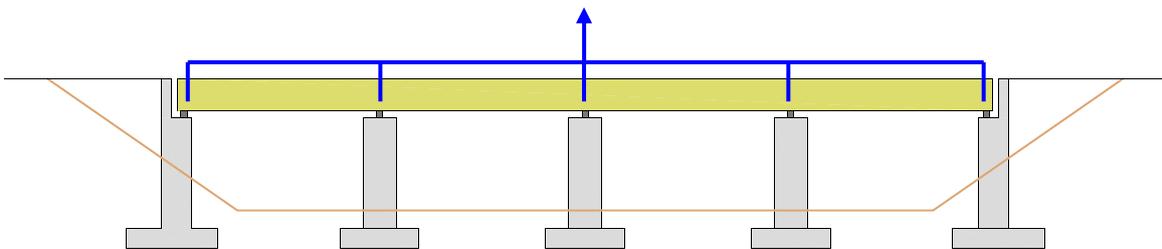
☞ 着眼点

支承が材料劣化により補修が困難で更新が必要となった場合、単純桁はジャッキアップにより支承の交換が可能である。連続桁はジャッキアップが可能であるが、全支点でジャッキアップする必要があり、支承の交換は可能であるが多大な労力と難しい作業を要する。ラーメンはジャッキアップが困難であり、支承の交換が難しい。

単純桁：ジャッキアップが可能で支承の交換が可能



連続桁：全ての支点でジャッキアップが必要で支承の交換が困難



ラーメン：ラーメン構造であり支承交換は極めて難しい

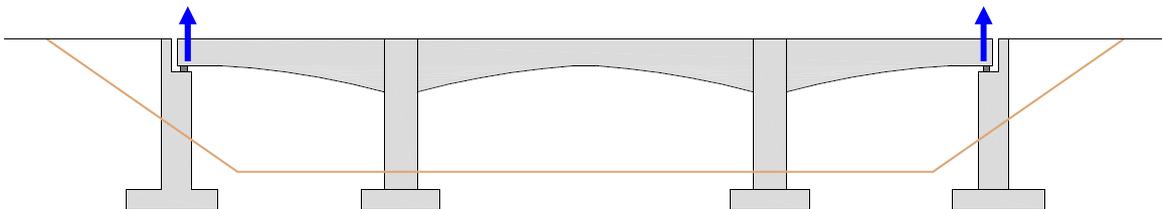


図 3. 3. 22 支承の更新に対する作業性

e) 下部工の補修作業

☞ 着眼点

補修作業の容易性は、単純桁、連続桁、ラーメンなどの橋梁形式で優劣は無い

□ 橋梁形状と要求性能

単純桁：橋梁形式にはよらない。

連続桁：橋梁形式にはよらない。

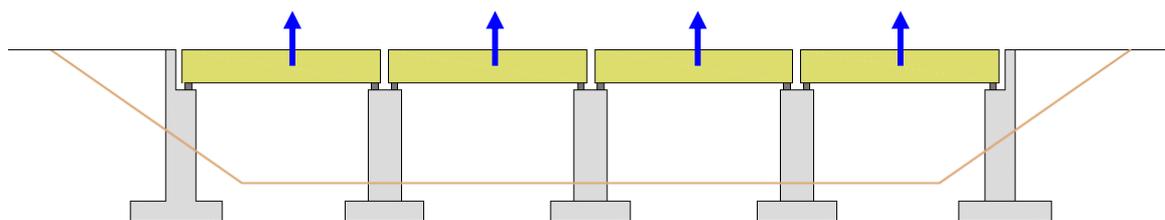
ラーメン：橋梁形式にはよらない。

f) 下部工の交換作業

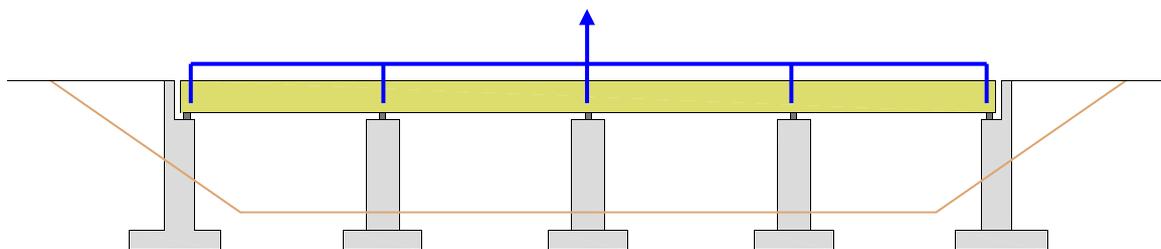
☞ 着眼点

下部工が材料劣化により補修が困難で更新が必要となった場合，単純桁であれば更新の対象とする下部工に関連する上部工のみを仮受けすれば良く，作業性は良い．連続桁は仮受けが難しく，下部工の更新作業には多くの労力が必要となる．ラーメンは下部工のみの再構築は難しく，橋梁全体の再構築が必要となる．

単純桁：桁の仮受けが容易で下部工の再構築が可能



連続桁：桁の仮受けが容易ではなく，再構築可能であるが作業は困難



ラーメン：下部工のみの再構築は難しい

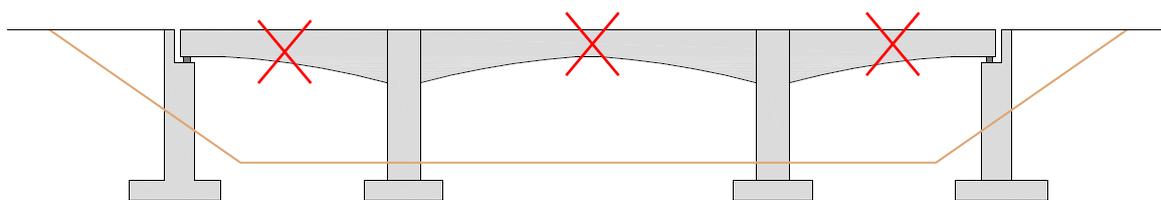


図 3. 3. 23 下部工の交換に対する作業性

3.4 構造詳細への配慮と要求性能

3.4.1 概要

橋梁の設計では、橋梁全体の性能を橋梁を構成する各部材の性能で代表させ、各部材が3.1や3.2で述べられている要求性能を満足するよう形式や形状及び材料など構造詳細を定めていく。ここでいう各部材とは、上部構造や下部構造及び上下部構造接続部と、これらを構成する床版・桁・下部構造躯体・基礎・支承・伸縮装置等である。橋梁の計画にあたっては、前節の橋梁全体系の特性とともに、各部材の構造詳細と要求性能について把握することによって、より合理的な構造を提案できると考えられる。このようなことから、本節では、構造詳細の配慮と要求性能について、北海道の環境条件（積雪寒冷地であること、凍結防止剤が多く散布されること）を前提に、委員会で検討した内容を示す。

3.4.2 要求性能

ここでは部材ごとに要求性能を考えることから、着目する性能や着目点を次に示すとおりとし、構造詳細の改善策の検討を念頭に整理した。特に、耐久性は他の性能に影響を及ぼすものであることから、これについて重点的に検討している。なお、3.2同様、各要求性能は道路橋示方書に示される照査を満足していることを前提としている。

(1) 耐久性

材料劣化（コンクリートの物質透過性による塩害・凍害、鋼材の腐食）に対する抵抗性。

- 問題点：安全性、使用性、復旧性等の経時変化に対する抵抗性であり、基準に従い設計することで本来はこれが満足されているはずであるが、部材形状や細部構造の配慮不足により、実際は供用期間内での補修・補強や部材の取り替え及び架け替えが行われている。
- 着目点：構造面及び材料面での材料劣化への抵抗性の向上。

(2) 維持管理性

点検・診断や補修・補強及び交換・更新における作業性。

- 問題点：基準に思想は示されているが、形式や構造詳細に応じて様々な配慮が必要であり、これらの具体については明確にされていない。
- 着目点：維持管理の作業時の容易さ・確実さ・周辺への影響。

(3) 復旧性

地震により被災した場合の機能回復のための作業性。

- 問題点：維持管理性同様、具体については明確にされていない。
- 着目点：地震直後の点検の容易さ・確実さ、通行可否判断の容易さ、補修・補強作業の容易さ・確実さ・周辺への影響。

(4) 安全性

構造体の安全性及び機能上の安全性。

- 問題点：構造物の安全性をより向上させることが望ましいが、どの程度向上させるかについて明確ではない。
- 着目点：構造体の冗長性や頑健性。利用者に対する安全性。第三者に対する安全性。

3.4.3 構造詳細への配慮

前述の要求性能に対し、1)床版、2)桁、3)下部構造躯体、4)基礎、5)支承、6)伸縮装置、7)その他（地覆、防水、排水装置、防護柵）の部材について検討した結果を次に示す。

(1) 耐久性

1) 床版

a) 現状の問題点

床版は、凍結防止剤を含む水が浸入することで生じる内部鋼材の腐食やそれに伴うコンクリートのひび割れ及び剥離（塩害）、床版上面に浸入した水の凍結融解の繰り返しにより生じる土砂化（凍害）、塩害や凍害の複合現象、により供用期間内に補修や打ち替えが必要となることがある。対策としては、床版上面の防水層及び床版水抜きを設置、張出し床版下面への伝い水防止のための水切り、が既に行われているものの、十分ではない。水の浸入をより抑制でき浸入した水に対する抵抗性の向上を図ることができる構造にする必要がある。

b) 改善策

水の浸入を防ぐためには、透水性の小さい舗装の採用や舗装端部の密着性を高める必要がある。舗装としては基層に不透水で防水層も兼ねることができるグースアスファルトを用いることができればよいが、コンクリート床版への適用は研究段階である。これ以外の方法として次のことが考えられる。

- ・ 透水係数が非常に小さく不透水と見なすことができるフラットボトムの基層への採用
- ・ 舗装端部には成型目地を設けるものの密着性は施工の良否にもよるため、防水層を地覆や壁高欄に沿って舗装面まで立ち上げる
- ・ 横断の低い側の舗装端部に舗装内に浸入した水の排水を兼ねる排水溝の設置

これらに配慮しても水の浸入を完全に防ぐことは難しく、床版上面が水潤した状態に長期間さらされる可能性があるため、浸入した水に対する抵抗性を向上させる方法も同時に考慮する必要がある。抵抗性の向上には、構造と材料の両面から物質透過性を小さくすることを考えなければならない。構造面では物質透過性に影響するひび割れを生じにくくすることが重要であり、次のようなことが考えられる。

- ・ 輪荷重載荷位置を考慮した桁配置により活荷重による曲げモーメントを低減する構造
- ・ 引張応力を低減するために床版厚を増加する構造
- ・ ひび割れを許容しないPC構造

材料面での配慮としては次のようなことが考えられる。

- ・ 緻密なコンクリートとするための高強度化（例えば通常のRC床版であれば $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ の使用、PC床版であればプレキャスト化による $\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$ の使用）
- ・ 凍結時の移動水分の逃げ道を確保できる空気量の確保（6%程度）
- ・ 表層品質改善のための含浸材やコンクリート塗装による表面被覆
- ・ 塗装鉄筋や防食PC鋼材およびPEシースの使用による内部鋼材の防食

以下に床版の耐久性向上に配慮した構造詳細事例を示す。



図 3.4.1 耐久性向上に配慮した一事例（左：舗装端部処理，右：舗装端部排水溝）

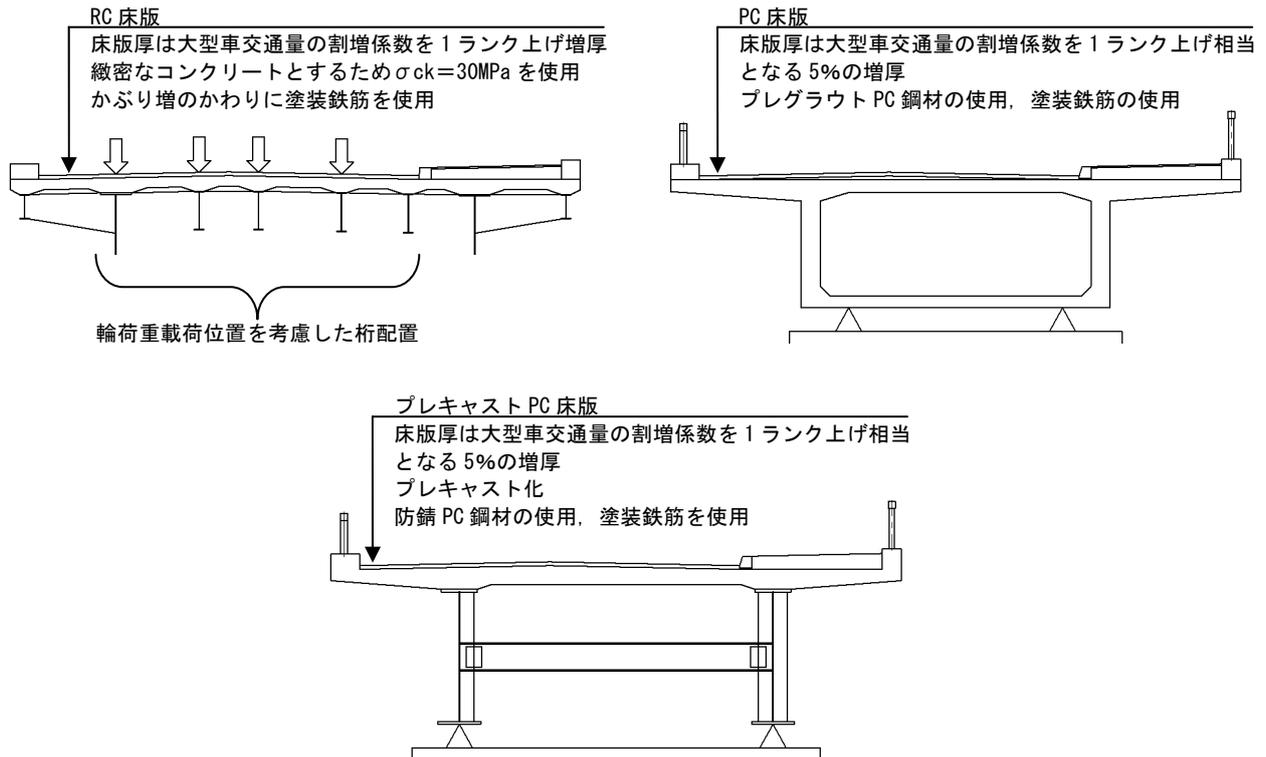


図 3.4.2 耐久性向上に配慮した床版の一事例
（左上：RC床版，右上：PC床版，下：プレキャストPC床版）

2) 桁

a) 現状の問題点

桁は、凍結防止剤を含む水が橋面から地覆や桁端を伝って来ることや車両の走行で巻き上げられた凍結防止剤を含む路面水の付着による塩害、それらの水や雨水による凍害、により供用期間内に断面修復や防錆及び大規模な補修が必要となることがある。これらは、伸縮装置や地覆端部からの漏水、排水柵・排水管や床版水抜き・水抜きパイプからの漏水など、水処理の不具合に起因することが多い。また、桁の表面積が大きく塩分の付着しやすい断面形状や塵埃が堆積しやすい断面形状を採用しているなど、塩害や凍害の影響を受けやすい構造に対する配慮が十分でないことも多く、これらを改善する必要がある。

b) 改善策

水処理と桁の構造面及び材料面のそれぞれに対して、塩害や凍害に対する耐久性向上を図ることが重要である。水処理の不具合の改善策としては次のようなことが考えられる。

- ・ 伸縮装置の止水構造を二重にするとともに地覆部まで止水構造を配置すること

- ・ 止水構造内に入射した水を排水する水抜きを設置とその流末の排水管への接続
- ・ 漏水が生じた際に桁に伝わらないよう水切りの設置
- ・ 排水桷+横引き管ではなく鋼製排水溝として漏水の原因となる個所の削減

上記も万全ではないことを前提に、PC 桁の場合の構造面の配慮としては次のようなことが考えられる。

- ・ 表面積が少なくシンプルな桁形状（箱桁、場所打ち中空床版）
- ・ 床版張出量の大きな桁形状（箱桁）
- ・ 鋼材かぶりの増加
- ・ 外ケーブル構造
- ・ 標準的な桁高支間比から決まる桁高より高い桁高（過密な鋼材配置を回避して施工性を向上させコンクリートの品質向上を図る）

コンクリートの材料面での配慮は床版と同様である。

鋼桁の場合の構造面の配慮としては次のようなことが考えられる。

- ・ 表面積が少なくシンプルな桁形状（箱桁、少数主桁）
- ・ 塗膜の弱点となるボルト継手部のない現場溶接継手構造
- ・ 塗膜の弱点となる足場用吊金具の常設をしない構造

鋼桁の材料面での配慮は次のようなことが考えられる。

- ・ C-5 塗装系+下塗り 1 層増しや金属溶射+塗装及び超高耐久塗装の採用
- ・ 桁端部等、特に腐食環境の良くない部位へのアルミやステンレスの採用
- ・ 桁端部等、特に腐食環境の良くない部位をあらかじめ取替可能な構造とする

以下に桁の耐久性向上に配慮した構造詳細事例を示す。

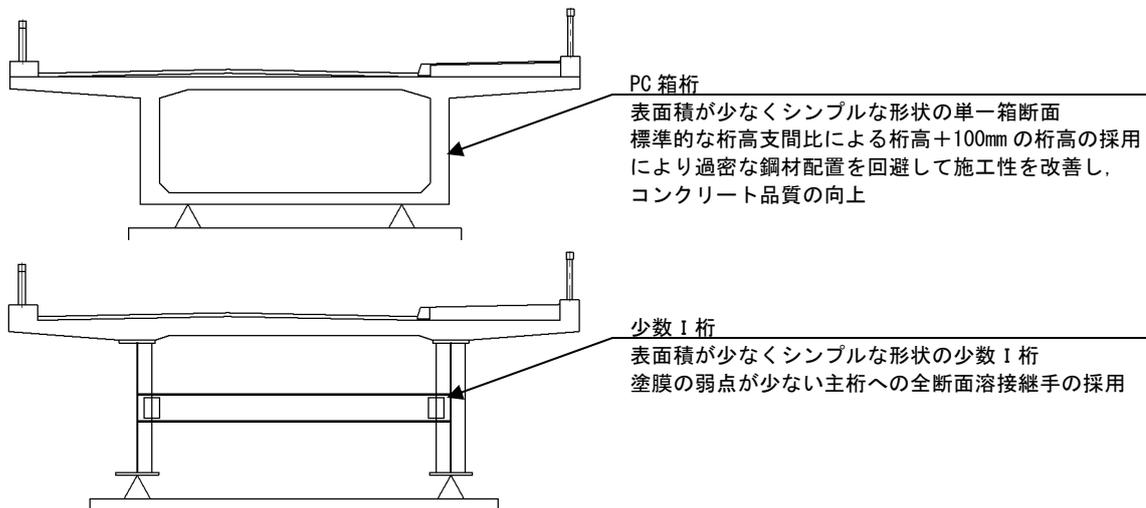


図 3.4.3 耐久性向上に配慮した桁の一事例（上：PC 箱桁，下：少数 I 桁）

5) 下部構造躯体

a) 現状の問題点

下部構造躯体は、桁同様、凍結防止剤を含む橋面水などによる塩害やそれらの水や雨水が橋座面に滞水することによる凍害、により供用期間内に断面修復や大規模な補修・補強が必要となることがあり、これ

らは水処理の不具合に起因することが多い。表面積が大きく塩分の付着しやすい形状や塵埃が堆積しやすい橋座形状など、配慮が不十分なことも多く、これらの改善が必要である。

b)改善策

水処理に対しては桁と基本的に同様であるが、その他に構造面では次のようなことが考えられる。

- ・ 橋座の橋軸方向あるいは橋軸直角方向に排水勾配を付す（3%以上）
- ・ 表面積が少なくシンプルな形状（表面積の少ない張出式橋脚、梁のない壁式橋脚）
- ・ 張出が大きい上部構造形式の採用による橋座の橋軸直角方向幅の最小化（雨水や漏水による滞水が生じにくい構造）
- ・ 断面を大きくすることによる過密配筋の解消，あるいは高強度鉄筋の採用による過密配筋の解消で施工性を改善しコンクリート品質向上
- ・ 常時偏心が生じない構造
- ・ 断面を大きくして引張応力を小さくしひび割れの発生を低減する構造

材料面の配慮事項は床版や桁のコンクリートと同じである。

以下に下部構造躯体の耐久性向上に配慮した構造詳細事例を示す。

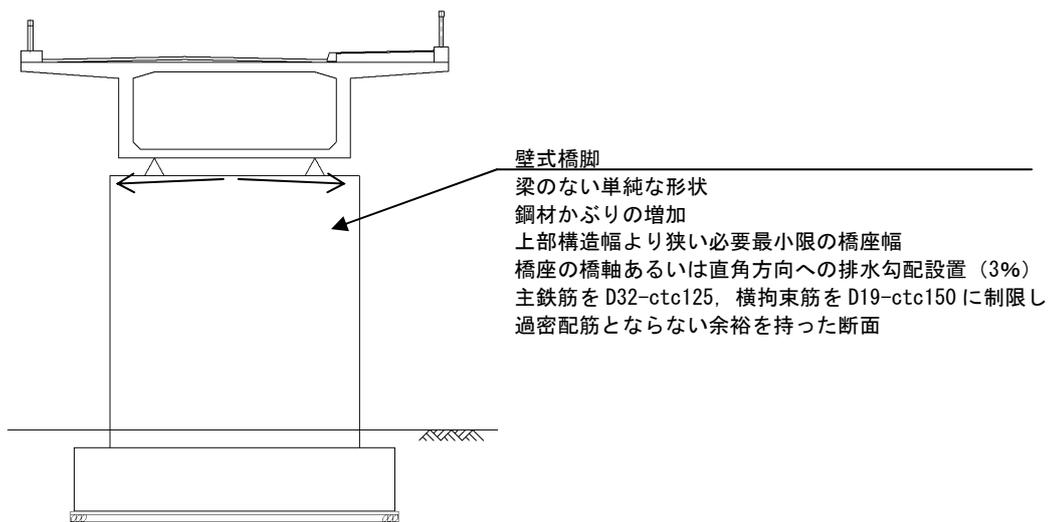


図 3.4.4 耐久性向上に配慮した下部構造躯体の一事例

6)基礎

現状，材料劣化による顕著な問題はないが，耐久性をより高めるためには，鋼材かぶりを増加させ施工誤差に対する余裕を確保しコンクリート品質を向上させるよう配慮する。

7)支承

a)現状の問題点

支承を設置する橋座面は，桁と同様に伸縮装置や地覆端部及び排水施設等からの凍結防止剤を含む水の漏水や滞水及び土砂の堆積により，塩害や凍害を受けやすく，橋梁の損傷の多くはこの部位に発生している。支承部は狹隘であるが水平力分担構造などが設けられることもあり，より滞水や土砂だまりが生じやすい環境であり，他の部位に比べて材料劣化が早いことに注意する必要がある。

b)改善策

水処理の不具合に対する改善策は桁と同じであるが，水処理は完全ではなくいずれ漏水が生じるため，

それを前提に構造面及び材料面の配慮をする必要がある。構造面では次のようなことが考えられる。

- ・ 滞水や土砂堆積対策としての橋座面の排水勾配
- ・ 滞水や土砂堆積した場合に支承に直接影響を与えないための台座コンクリート設置
- ・ 支承部の風通しを良くするための桁下から橋座面の空間確保
- ・ 支点上横桁や横梁で支持することによる支承数削減
- ・ 上下部構造剛結による支承の省略

材料面での配慮事項は鋼桁と同じである。以下に支承の耐久性向上に配慮した構造詳細事例を示す。

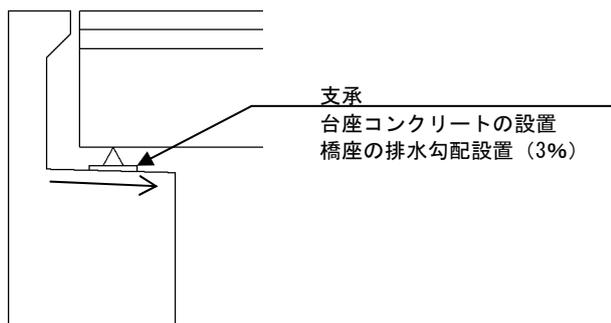


図 3.4.5 耐久性向上に配慮した支承の一事例

8) 伸縮装置

a) 現状の問題点

伸縮装置は本体に比べ、止水構造に損傷が生じることが多く、漏水が生じることが多い。また、伸縮装置端部（地覆部）における止水構造が不十分な場合には、地覆部からの漏水が生じることがある。伸縮装置からの漏水は、桁や下部構造躯体及び支承などの損傷の要因となることに留意する必要がある。

b) 改善策

伸縮装置の設置個所数が少なくなるよう連続桁構造やジョイントレス構造を採用することとともに、次のようなことが考えられる。

- ・ 止水構造の多重化と地覆部の止水処理
- ・ 定尺の製品を用いる場合は製品の継ぎ目からの漏水があるため、止水構造は全幅員一体とする
- ・ 漏水した場合に桁や下部構造への直接の水のまわりを防止する桁端やパラペットの水切り

以下に伸縮装置の耐久性向上に配慮した構造詳細事例を示す。

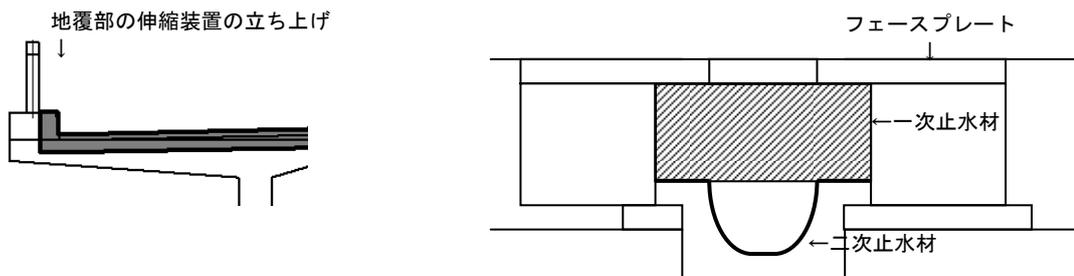


図 3.4.6 耐久性向上に配慮した伸縮装置の一事例

9) その他（地覆、防水、排水装置、防護柵）

その他の部材については、次のような改善策が考えられる。

- ・ 地覆は鋼材かぶりの増加や天端排水勾配の設置（幅員内側向き）
- ・ 防水は防水層だけでなく不透水性の舗装（フラットボトム）をあわせた水浸入対策の多重化
- ・ 排水装置は横引き管を設けない鋼製排水溝の採用

なお、地覆の材料面での配慮事項は床版や桁のコンクリートと同じである。排水装置や防護柵の材料面での配慮事項は鋼桁の材料面の配慮事項が参考になる。

(2) 維持管理性

1) 床版及び桁（上部構造）

a) 点検・診断

点検・診断の作業性を向上させるためには、点検しやすい構造、点検のための施設を有すること、点検のための施設を補完する他の方法を有すること、に配慮が必要である。

点検しやすい構造は、点検対象となる部位や部材が少ないシンプルな形式の少主桁構造や版構造及び単一箱桁構造などである。これらと逆の構造が点検しにくい構造であるが、床版下面や主桁が被覆され直接コンクリートの状態を目視できない構造もこれに該当する。また、添架物は点検の支障となるため設置しないことが望ましいが、設置する場合は点検作業を考慮した配置計画を行い、作業性を確保する必要がある。

点検のための施設として、上部構造には縦断方向検査路を設ける。複数の主桁からなる上部構造の場合は各桁間への設置、床版張出の大きい上部構造の場合は張出床版下への設置、あるいは常設足場を兼ねた桁カバーの設置、が考えられる。桁高の高い箱桁の場合は桁内検査路の設置も考えられる。ただし、検査路自体の維持管理も必要なため、橋梁点検車や高所作業車により点検する範囲を明確にしたうえで設置箇所を定めるとともに、アルミ合金やFRPを用いた検査路とするなど、検査路の材料劣化に配慮する必要がある。また、桁端部や支承部近傍は漏水や滞水による損傷が生じやすいため、桁端とパラペットとの間や桁下面と橋座面との間に点検のための作業空間を確保する必要がある。

点検のための施設を補完する他の方法としては、橋梁点検車や高所作業車の利用がある。橋梁点検車や高所作業車による点検は桁下に作業空間が必要となるため、交差物件の建築限界や桁下利用計画を踏まえた点検範囲の設定に留意する。橋梁点検車を利用する場合、歩道幅員によっては歩道部に点検車を配置することや点検車のアウトリガーのみ歩道部に配置することもあるため、これらに配慮した橋面構造（セミフラットタイプ、歩車道境界防護柵を設置しないか容易に着脱可能な防護柵）も考慮する必要がある。なお、橋梁点検車等の利用は交通規制など周辺への影響が大きいことにも留意する必要がある。

b) 補修・補強

補修・補強の作業性を向上させるためには、補修・補強しやすい構造、補修・補強のための作業空間を有すること、に配慮が必要である。

補修・補強のしやすい構造は、自動車荷重を直接支持する床版と床版を支持する桁のようにそれぞれの機能が明確に分かれた構造、補修・補強に必要な部材をあらかじめ設けた構造、である。前者はコンクリート系床版を有する非合成の鋼桁、後者は補修・補強用の予備孔を設けた外ケーブル構造のPC箱桁、などが考えられる。上部構造を構成する部材が鉄筋コンクリート構造や鋼構造の場合はプレストレストコンクリート構造や合成構造に比べて補修・補強の難易度は高くない場合もあるため、このような構造を採用することが考えられる。

補修・補強のための作業空間を確保するためには、部材が少なくシンプルな構造が適しており、損傷の生じやすい桁端部や支承部近傍は作業性を考慮した桁遊間や桁下空間とする必要があり、点検の作業性向上と同様の配慮が重要である。

c) 交換・更新

交換・更新の作業性を向上させるためには、交換・更新を前提とした構造、交換・更新のための作業空間を有すること、に配慮が必要である。

上部構造本体を交換・更新を前提とした構造とすることは合理的でないが、損傷による交換の可能性のある床版は、非合成とすることが考えられる。また、鉄筋コンクリート構造とすることで部分的な交換・更新が容易となる。

作業空間についても交換・更新を前提としないが、補修・補強と同様の配慮について検討しておくのがよい。

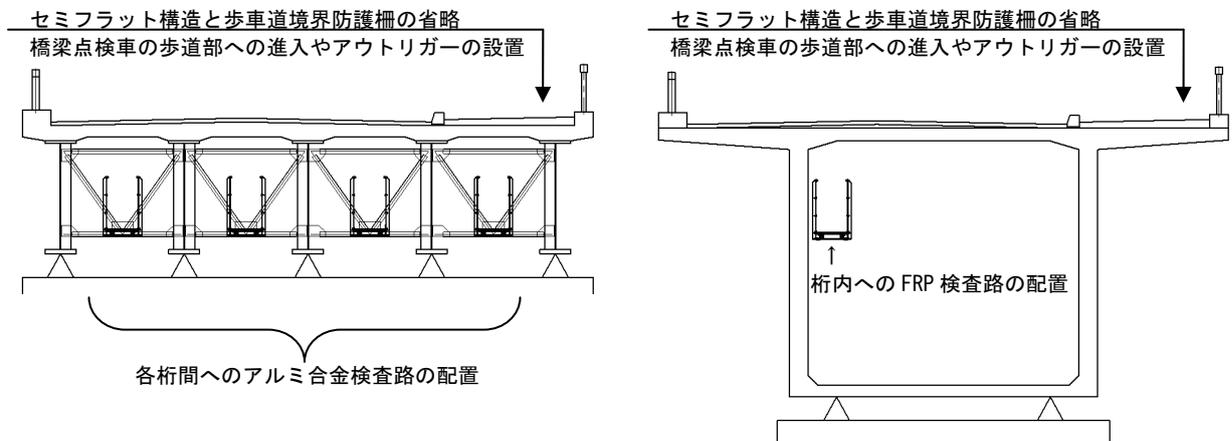


図 3.4.7 維持管理性に配慮した上部構造の一事例
(左：RC 床版非合成鋼鉄桁，右：PC 箱桁)

2) 下部構造躯体

a) 点検・診断

点検しやすい構造は、点検対象となる部位や部材が少ないシンプルな壁式橋脚や逆 T 式橋台である。ただし、部材の表面積が大きくなることや基礎への影響があるため、最小限の橋軸直角方向幅となるよう上部構造の主桁幅が狭くなるような配慮も併せて考える必要がある。

下部構造躯体には橋座部に横断方向検査路を設けることにより損傷の多い部分の点検が容易になるが、交差物件の条件から設置が難しい場合には、橋座面に横断方向への移動の空間を確保し手摺を設けるほか、橋梁点検車や高所作業車による点検可能範囲も踏まえ、設置場所と範囲を決める必要がある。

b) 補修・補強

補修・補強のしやすい構造は、点検同様シンプルな壁式橋脚や逆 T 式橋台である。点検での配慮事項と同じく橋軸直角方向幅を最小限とすることで補修・補強の作業空間の確保や周辺への影響を少なくすることが可能となる。

c) 交換・更新

下部構造躯体は交換・更新が生じないよう維持管理（補修・補強）する。

3) 基礎

土中構造物で近接目視点検が困難なため維持管理の不要な構造となるよう設計することを前提とし、維持管理性に対する特段の配慮は行わない。

4) 支承

a) 点検・診断

点検しやすい構造は、部材数の少ないゴム支承や高面圧のコンパクト支承であるが、支承内の不可視部に重要部材を設けない構造である必要がある。また、支承高を極端に低くしたコンパクト支承は目視点検しにくいことから、構造上の制約がない限り避けることが望ましい。

橋座部に横断方向検査路を設けるとともに、桁下面と橋座面との間に適切な空間を確保する必要がある。特に断面の大きな箱桁の場合は、台座コンクリートの設置などにより 500mm 以上の空間を確保することが望ましい。

b) 補修・補強

橋座面のジャッキアップスペースの確保やジャッキアップ用ブラケット設置スペースの確保、ジャッキアップ受点補強や受点位置及び受点反力の明示、について配慮することで補修・補強がしやすい構造となる。

c) 交換・更新

補修・補強と同様の配慮に加え、支承のアンカーボルトはナット式とすることで交換・更新が容易となる。

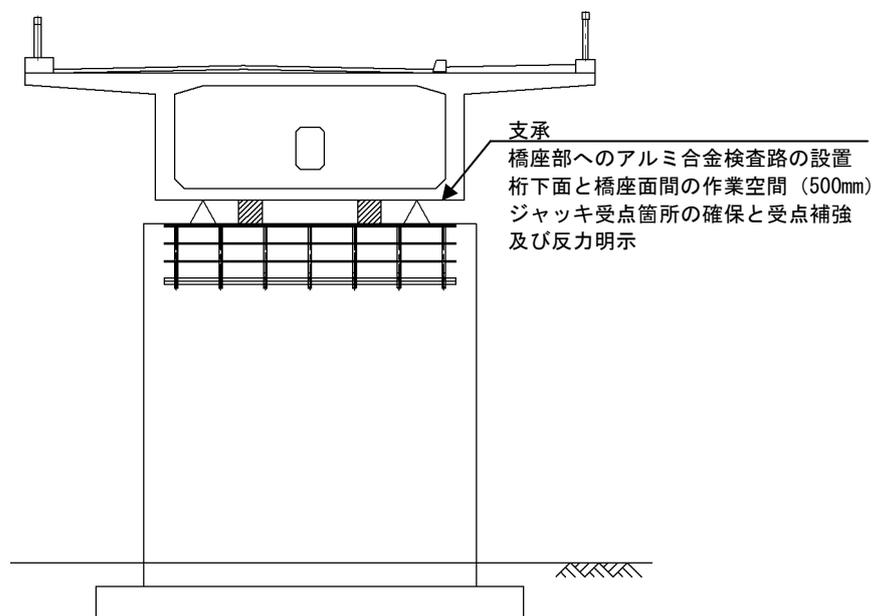


図 3.4.8 維持管理性に配慮した支承の一事例

5) 伸縮装置

a) 点検・診断

伸縮装置は本体の損傷だけでなく止水構造の劣化が他の部材の損傷の要因となることから、この部位の点検が容易にできるよう配慮することが重要である。多くの伸縮装置の二次止水が伸縮装置下面に設置されているため、伸縮装置の下の桁端とパラペットの間に点検のための空間を確保することで点検の作業性

が向上する。

b) 補修・補強

伸縮装置の補修は多くの場合が止水材の補修であるため、点検と同様に作業空間を確保する配慮が必要である。止水材のみの補修が容易に行えるよう定期的な取り換えを前提として、伸縮装置下面に樋をボルトで固定する構造や乾式止水材を伸縮装置下面の桁遊間に挿入する構造を採用することが考えられる。

c) 交換・更新

取替を前提とした、床版や桁及びパラペットにボルトで固定する構造が考えられる。

6) その他（地覆，防水，排水装置，防護柵）

地覆，防水，排水装置，防護柵はいずれも橋面からの維持管理が基本であり，部材数が少なく単純な構造となるよう配慮が必要である。ただし，排水装置のうち横引管は橋面からの維持管理ができないため，橋面からの維持管理が可能な鋼製排水溝を用いることが考えられる。

(3) 復旧性

1) 床版及び桁（上部構造）

a) 点検・診断

地震後の供用可否を速やかに判断するために，地震時に損傷が生じやすく供用性に影響する桁端や支点及びその近傍の点検が容易となるよう配慮する必要がある。それには，橋面から橋座，桁下から橋座，端支点から中間支点，の各経路からのアクセスを確保しておく必要があり，昇降梯子や縦断方向検査路及び横断方向検査路や橋座の手摺を設置するとともに，これらの間の動線を確保する。

b) 補修・補強

維持管理性の支承の補修・補強と同様の配慮が必要である。損傷発生箇所そのものを少なくするためには桁端部や支点の数が少ない連続桁構造が望ましいが，一方で上部構造に変位が生じた場合の補修は単純桁構造のほうが容易である。復旧性だけでなく耐久性や維持管理性も含め，対象橋梁の架橋条件を踏まえて優先すべき事項を決める必要がある。

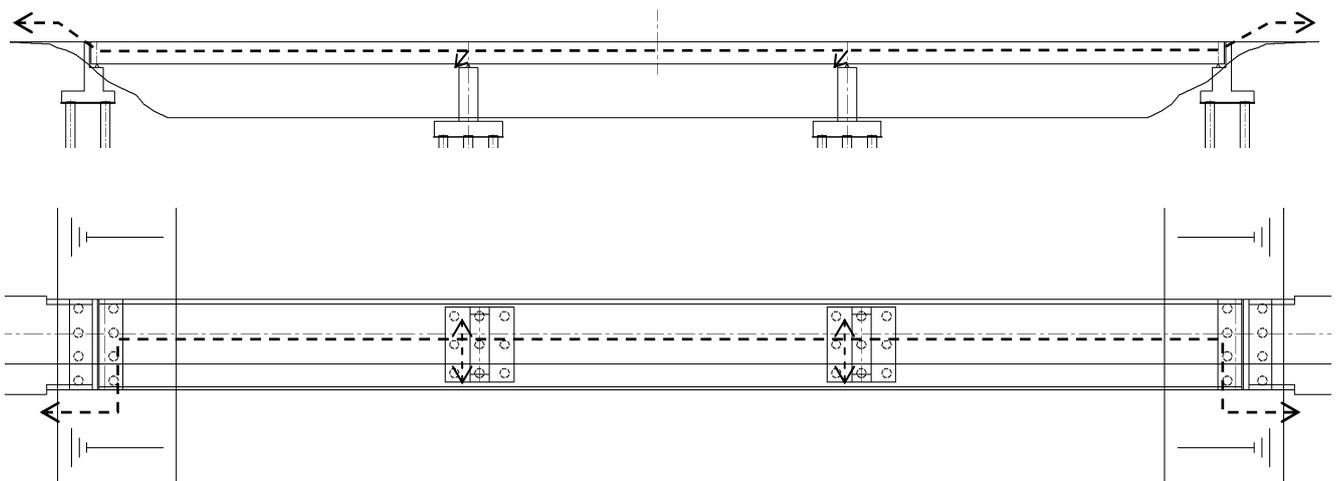


図 3.4.9 復旧性に配慮した上部構造の一事例（地震後点検用検査路動線確保）

2) 下部構造躯体

地震時に損傷が発生する箇所（塑性ヒンジ）を点検・診断・補修・補強の容易な部位（橋脚の地表面上の位置）にコントロールする。また、免震構造により主たる変形を支承部に集中させる。これらにより、地震後に着目すべき部位を絞り込み、供用可否判断の迅速化を図ることができる。

3) 基礎

基礎は補修・補強を前提とした設計としないが、設計を超える作用があった場合に、ボアホールカメラや高周波衝撃弾性波法等による損傷確認方法を検討しておくことで地震後の供用可否判断の迅速化を図ることができる。

4) 支承, 5) 伸縮装置, 6) その他（地覆, 防水, 排水装置, 防護柵）

維持管理性の配慮事項に同じ。

(4) 安全性

1) 床版及び桁（上部構造）

a) 冗長性・頑健性

冗長性や頑健性を高めるためには、部材の損傷に対する補完性や作用や抵抗側の変動に対応可能な構造とする必要がある。それには、上部構造を多くの部材で構成することや、抵抗に寄与する部材を断面に見込まずに設計することなどが考えられる。多主桁構造や床版の抵抗を見込まない非合成桁及び上部構造断面方向がラーメン構造となる PC 箱桁がこれらに該当する構造である。部材に着目すると、太径の鋼材を数少なく配置するのではなく、細径の鋼材を多く配置する断面の方が冗長性を高めることができる。

一方、上部構造を多くの部材で構成することは、耐久性や維持管理性とトレードオフとなる面もあることから、優先すべき事項を明確にしてそれぞれで配慮すべき構造を取捨選択する必要がある。

疲労が問題となるコンクリート床版を有する鋼桁は応力の変動が小さくなるよう配慮するのがよい。床版では最小必要版厚で断面が構成できるよう鋼材配置をするのではなく、細径の鋼材が過密配筋とならない配置としたときに必要となる版厚で断面を決める。鋼桁は桁高支間比から決まる桁高より高い桁高とすることが考えられる。

b) 利用者に対する安全性・第三者に対する安全性

上記 a) での配慮事項や、耐久性の床版及び桁の配慮事項と同様である。安全性の前提となる耐久性の高い構造とすることにより、利用者だけでなく部材の剥離・落下による第三者に対する安全性も向上させることができる。

2) 下部構造躯体

a) 冗長性・頑健性

同じ耐力であっても塑性変形性能の大きい断面構成とするのがよい。そのためには、横拘束筋で取り囲む内部コンクリートを施工に支障ない範囲で小さくするとともに、軸方向鉄筋の負担する荷重が大きくなりすぎないように太径の鉄筋を密に配置して断面を小さくするようなことは避ける方がよい。ただし、過度に靱性に頼った構造とならないよう注意が必要である。

b) 利用者に対する安全性・第三者に対する安全性

上記 a) での配慮事項や、耐久性の下部構造躯体の配慮事項と同様である。安全性の前提となる耐久性の高い構造とすることにより、利用者だけでなく部材の剥離・落下による第三者に対する安全性も向上させることができる。交差物件や桁下利用がある場合の塑性ヒンジの発生箇所は、第三者被害の生じにくい低い位置とするか、ラーメン構造で柱上方に塑性ヒンジが生じる場合は、その部分にのみ剥落防止対策を施

すことについても検討する必要がある。

3) 基礎

基礎は塑性化させない設計を基本とし、橋脚を上回る耐力を確保する。

4) 支承

a) 冗長性・頑健性

構造面では、支承の機能を鉛直荷重支持と水平荷重支持に分離することで、機能一体支承に比べ冗長性を高めることができる。機能一体支承の場合は、段差防止構造のような別構造を設けておくのがよい。支承数を過度に少なくしないという方法もある。ただし、いずれも橋座面に多くの部材が配置されることになるため、維持管理性や復旧性など、他の性能とのバランスや優先すべき事項を考慮し、構造を決定する必要がある。

材料面では、鋼材に比べて脆性的な破壊が生じにくいゴムを主要部材に使用するのがよい。ただし、ゴムを用いた地震時水平力分散支承や免震支承は鋼製支承に比べて平面形状が大きくなることも多いため、橋座面の部材配置を踏まえ、構造面同様他の性能との関係を考慮したうえで使用材料を決めるのがよい。

橋台も含めてすべての下部構造で地震時水平力を分散する構造（多点固定・弾性固定）や免震構造及び上下部剛結構造、可動支承と制震ダンパーを組み合わせた制震構造、これらを組み合わせた構造が考えられる。また、耐力の階層化により損傷や破壊順序をコントロールした設計を行い、冗長性や頑健性に配慮する。

b) 利用者に対する安全性・第三者に対する安全性

利用者に対しては段差防止構造により損傷が生じた場合の通行性に配慮する。第三者に対しては、支承に設ける固定装置が損傷し飛散しないよう、ワイヤーやチェーン等による落下防止策を講じておく必要がある。

5) 伸縮装置

a) 冗長性・頑健性

大規模地震時には損傷を許容しており、冗長性や頑健性への特段の配慮は行わない。しかし、耐久性に影響する漏水に対する対策は重要であり、耐久性のところでも示した通り、止水構造の多重化や漏水した場合に直接桁や下部構造に水が伝わりにくい構造、支承部の排水勾配や台座の設置など、複数の部材で複数の対策を同時に講じておくのがよい。

b) 利用者に対する安全性・第三者に対する安全性

利用者に対しては損傷時に路面に突起物が突出しにくい構造（楯構造ではなく横ビーム構造とするなど）、第三者に対しては支承同様に損傷時に部材の落下しないことに配慮した構造とする。

6) その他（地覆、防水、排水装置、防護柵）

大規模地震時には損傷を許容しており、冗長性や頑健性への特段の配慮は行わない。ただし、利用者に対する安全性・第三者に対する安全性は、支承や伸縮装置と同様の配慮が必要である。

3.5 形式の選定（設計解の選択）

橋の設計では、前述までの検討のとおり種々の性能を満たす多くの橋の形式から、ひとつの橋の形式などを選定することになる。

ひとつの橋の形式を選定するために、設計者の意思を決定する指標を定めて、その優劣に基づいて選定するのが基本となる。

その場合の基本的な考え方と流れを以下に示す（図 3.5.1）。

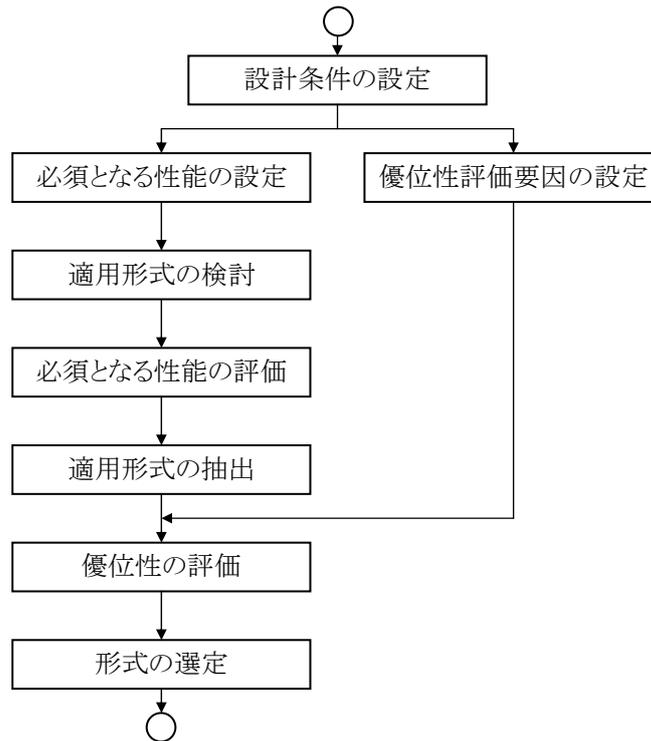


図 3.5.1 形式選定の流れ

① 設計条件を確定する。

一般に設計条件には、以下の事項がある。使用材料、橋長、構造形式、施工法など検討時点で確定できない条件は、変数として検討する。なお、これは設計問題としては、設計変数となることを意味する。

■ 路線条件

- ・ 道路規格
- ・ 幅員構成（暫定、完成）
- ・ 計画交通量
- ・ 道路幾何構造（平面・縦断線形など）
- ・ その他

■ 橋梁概略条件

- ・ 路線上の架橋位置
- ・ 橋梁延長（概略：橋梁一般図）

- ・幅員構成（暫定，完成）
- ・幾何構造
- ・その他

■ 橋の重要度

■ 設計供用期間

■ 架橋位置特有の条件

- ・交差物件（道路，鉄道，河川，航路等）による制約条件
- ・地形・地質条件（地すべり，軟弱地盤，断層等）
- ・周辺状況（民家，支障物等）
- ・その他（関係機関との協議結果，地元要望等）

■ 維持管理に関する条件

② 構造物が保有しなければならない必須となる性能を設定する。これは，設計問題としては制約条件となることを意味する。

一般に，安全性，使用性，復旧性とする。

③ 必須となる性能を満たす多数の構造物を比較して，その優位性を評価する要因を設定する。これは，設計問題としては目的関数となることを意味する。

一般に，経済性，環境性，施工，維持管理の確実性や容易さ，リスクに対する冗長性・頑健性などとする。

ここで，施工や維持管理の確実性や容易さは，工事費や維持管理費として経済性として考慮できるものについては，経済性に含めて扱うのがよい。

また，リスクには，性能照査での，条件の見込み違いや，設定を上回る作用などが生じたときの事象がある。

④ 必須となる性能を満たす構造物から，性能の満足度を考慮して，優位性が最も高い構造物を選定する。

4. 北海道のための橋梁の試設計

本章は、前章で整理した橋梁の要求性能と構造特性を踏まえ、北海道における橋梁の試設計を行ったものである。試設計を行う上での優先的な要求事項は「積雪寒冷地において維持管理の観点から優れた橋」とした。

4.1 目的

本委員会の趣旨である「北海道環境下での良い設計」を具現化するために、例として寒冷地における「維持管理のしやすい橋梁」（耐久性および維持管理性に重点を置いた橋梁）の観点から試設計を行い、本来橋梁設計の中で考慮すべき事項、踏むべき思考過程を陽な形で示すことを目的とするものである。

4.2 基本方針

橋梁の設計を行う上で設計者が最も注意を払わなければならない事項のひとつに、その橋の立地条件がある。例えば、河川を跨ぐ橋、道路・鉄道を跨ぐ橋、谷合を跨ぐ橋、海上に計画された橋や都市内に架かる高架橋など、橋にはそれぞれ多種多様な立地条件があり、それら立地条件に応じて要求性能を満足させるため配慮事項がある。それら全てをここで取り上げることは不可能であるため、ここではあくまでひとつの立地条件を設定し、積雪寒冷地における維持管理性に優れた橋を志向する一事例を示すものである。立地条件はあえて特殊な条件は排除し、試設計結果に汎用性を持たせるとともに、特殊条件の有無を想定する場合のベースとなることを期するものとした。

本試設計は、以下の要領で実施する。

- ・計画路面高と現地盤との高低差が 10m の場合と 30m の場合の 2 ケース（その他の条件はすべて同一）について試設計を行う。
- ・試設計では、橋梁計画および構造計画までを行う（数値計算までは行わない）。
- ・評価項目は、耐久性（劣化や損傷が起こりにくい）、維持管理性（点検、補強・補修、交換・更新のしやすさ）、復旧性および安全性に着眼する。
- ・維持管理の優れた橋を志向することで低下した他の要求性能についても検討を行う。

4.3 設計条件

本試設計における設計条件を以下に示す。

道路区分	: 第 4 種第 2 級
設計速度	: 50km/h
計画交通量	: 5,000 台/日・方向（大型車交通量 1,000 台以上/日・方向）
地形条件	: 起終点が斜面（切土法面）で中間部は平坦な地形
交差条件	: 交差物件はなし ⇒ 将来、桁下利用の計画有り
気象条件	: 平均気温 10℃, 最高気温 34℃, 最低気温 -10℃, 年間降水量 1,200mm, 年間日射時間 1,700 時間, 年間降雪量 335cm, 年間平均風速 3.5m/s, 最大風速 17.5m/s

⇒ 冬期は除雪および凍結防止剤が散布される道路

- 設計供用期間 : 100 年
- 地域区分 : B2 (c z=0.85 c I z=1.0 c II z=0.85)
- 塩害対策区分 : II (地域区分 B)
- 橋の重要度 : B 種の橋 (地域の防災計画上, 緊急輸送路として利用する道路で代替路はない)
- 橋 長 : 150m
- 斜 角 : 90 度
- 幅 員 : 総幅員 12.0m 有効幅員 11.0m (車道部 8m 歩道部 3m)

下図に幅員構成図を示す。

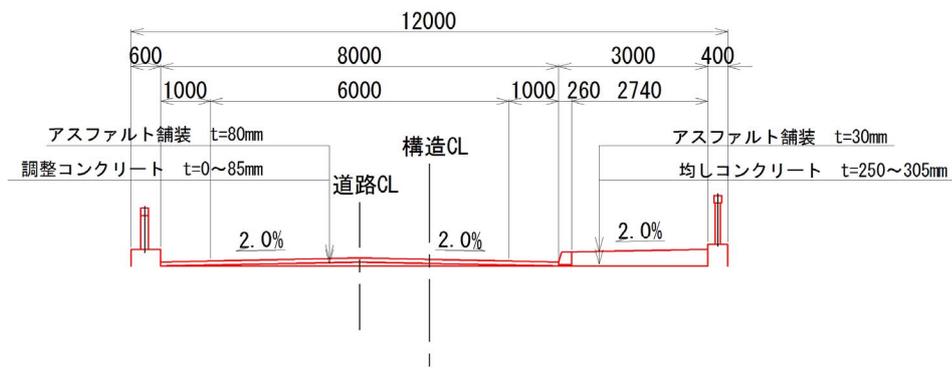


図 4.3.1 幅員構成

- 平面線形 : R = ∞
- 縦断線形 : ↗ 4.00% (VCL50) ↘ 4.00%
- 横断勾配 : ✓ 2.00% ↘ 2.00%
- 計画路面高 FH : 地盤と計画路面高の高低差 10m, 30m の 2 ケースを考える

【ケース 1】 支持層は深度約 15m の洪積層 (地盤種別: II 種地盤)

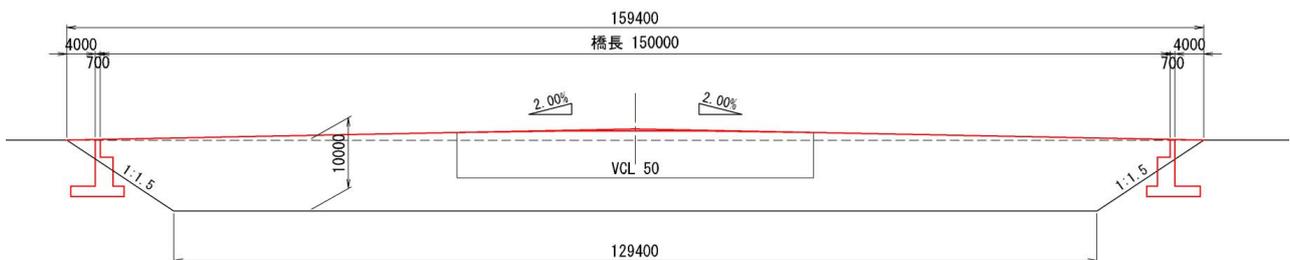


図 4.3.2 地盤と計画路面高の高低差 10m の場合の側面図

4.4 試設計

試設計は、前節に示す基本条件下における【ケース1】および【ケース2】のふたつの立地条件を対象に実施する。試設計においては、道路橋示方書に示される橋の性能を満足するなかで、設計者がより合理的であると考えられる構造形式の具現化を行うことを考える。

4.4.1 試設計を行う上での考慮すべき事項

□ 設計条件から考慮すべき事項

①計画交通量：疲労耐久性に留意するとともに、将来の維持更新時における現況交通への影響に配慮した構造計画が必要である。

②地形：計画路面高と現地盤との高低差は上部構造を支持する下部構造（中間橋脚）高に影響する。現地盤が比較的平滑な場合は、下部構造を均一な高さで計画ができるため、上部構造の反力は極力均一になるような橋梁形式、支間割の計画が望ましい。一方、現地盤が変化に富む場合には、下部構造の施工計画ならびに上部構造の架設計画に留意した橋梁形式、支間割の計画が必要となる。

③交差物件：橋梁と交差する道路や鉄道の有無、供用後の桁下利用の有無は、橋梁計画（橋梁形式の選定、支間割等）上の制約のみならず、将来の維持管理、第三者被害、被災後の復旧性等に留意が必要となる

④気象：雪荷重や温度変化による影響を適切に設計で考慮するとともに、凍害や凍結防止剤による塩害などへの留意が必要になる。

⑤路線の重要度：被災後の道路機能の早期回復、上部構造の維持更新時の通行止めの可否などに留意が必要となる。

⑥環境：沿岸線からの距離など、飛来塩分の有無に応じた構造計画に留意が必要である。

⑦地盤：地盤特性は基礎の計画上の制約になるとともに、不等沈下の可能性や断層の有無など、橋梁計画において留意が必要である。

□ 作用の不確実性から考慮すべき事項

⑧材料劣化因子：雨水と積雪寒冷地における凍結防止剤および海岸線から飛来する塩分等の浸透による材料劣化に留意した構造計画が必要である。具体には以下が考えられる。

(a)劣化因子が供給されにくい構造形式の採用

(b)劣化を許容する一方で維持更新しやすい構造形式の採用

⑨地震：設計想定以上の地震動に留意した構造計画が必要である。具体には以下が考えられる。

(a)落橋の危険性を最小限とする橋梁形式およびフェイルセーフ構造の計画

(b)早期に復旧を可能とする橋梁形式および細部構造の計画

□ 将来の状態から考慮すべき事項

⑩桁下利用：桁下を道路や多目的スペースなどの将来計画の有無に応じて、材料劣化によるコンクリート片の落下のリスク軽減や、劣化因子の遮断などを念頭においた構造計画が必要である。

⑪維持管理・更新：材料の経年的な劣化に伴う定期的な維持管理を念頭においた構造計画が必要である。また、設計供用期間を超えた後の路線の継続使用に鑑み、将来の部材の更新作業に配慮する必要がある。この際、当該路線における代替ルートの有無（通行止めの可否）に留意が必要である。

4.4.2 ケース1の試設計（Aグループ）

（1）試設計上の考慮事項

表 4.4.1 ケース1の試設計上の考慮事項

考慮事項	試設計で考慮する内容
① 計画交通量	・比較的交通量が多い路線であるため、 <u>疲労耐久性の高い構造</u> とする必要がある。
② 地形	・計画路面と現地盤の高低差は 10m のため、一般的な <u>クレーン架設や固定支保工による施工</u> が可能である。 ・橋脚高が 10m 未満と低いことから、剛構造は不利で <u>支承構造が基本</u> となる。
③ 交差物件	・交差物件がないため、桁高制限や施工上の制約はない。
④ 気象	・凍害や凍結防止剤による塩害の影響を受ける環境にある。
⑤ 路線の重要度	・重要度の高い B 種の橋であり、地震による損傷が限定的なものにとどまり、速やかに機能回復できるよう復旧性に配慮する必要がある。 ・地震後の損傷の発見およびその損傷の修復の容易さに対する配慮が必要である。
⑥ 環境	・飛来塩分はないものとして構造計画を行う。
⑦ 地盤	・II 種地盤の B2 地域であり、L2 地震のタイプ I・II のいずれが厳しくなるかは橋梁形式による。基礎形式は杭基礎とする。
⑧ 材料劣化因子	・凍結防止剤を多く散布するため、 <u>橋面および支点部における維持管理の確実性および容易さに配慮</u> する必要がある。
⑨ 地震	・路線の重要度に鑑み、想定以上の地震動に対して <u>落橋および復旧性に留意</u> する。 ・慣性力を複数の下部構造に分担させる地震時水平力分散構造を基本とする。
⑩ 桁下利用	・将来、桁下を道路や多目的スペースとして利用される予定であるため、材料劣化によるコンクリート片の落下（ <u>第三者被害</u> ）のリスクを抑える必要がある
⑪ 維持管理・更新	・鋼部材の防食機能や付属物などの <u>定期的な維持管理作業</u> に配慮する。 ・代替ルートのない中での設計供用期間 100 年を超えた当路線の機能確保に留意する。

(2) 試設計

設計 A

[橋梁形式]

鋼 3 径間連続鋼桁橋 (RC 床版) : 支間割 3×50.0m = 150m

[選定要因]

設計条件における地形、地盤および交差条件への適合性を考慮した。

- 地形特性より、クレーン架設が可能な上部工形式を採用
- 地盤特性より上部工反力が小さい鋼橋形式を採用
- 交差条件として、支間割および建築限界に制約がないことから、鋼 I 桁+RC 床版の組み合わせを採用
※支間や桁高に制約がある場合は桁形式に箱桁、床版形式に鋼床版などの適用を検討
- 路線の重要度と耐震設計の観点より、地震時慣性力を複数の下部構造に分担させる地震時水平力分散構造 (連続桁+弾性支持) を採用

[注意すべき事項]

- 1) 繰返し荷重による床版ひびわれに対する維持管理・更新
- 2) 床版における凍害および塩害 (凍結防止剤) に対する方策
- 3) 支点部における雨水および凍結防止剤に対する方策
- 4) 鋼桁の防食機能の劣化と腐食に対する方策

次頁に試設計の結果を示す。試設計上の主だった構造計画事項および従来設計からの改善点を朱書きで示した。当試設計結果における性能評価の結果を下表に示す。

表 4.4.2 (ケース 1) 試設計 A における性能評価

評価	優	劣
耐久性	<ul style="list-style-type: none">・床版、桁、下部構造躯体の材料劣化に対する耐久性向上 (100 年)。・床版の疲労耐久性向上 (100 年)。・上部構造より狭い橋座幅で橋座部の耐久性向上。	<ul style="list-style-type: none">・部材が多く溶接部位が多いことから主桁の疲労耐久性低下。
維持管理性	<ul style="list-style-type: none">・各桁間、橋座部、桁端部の点検作業性向上。・横引排水管をなくすことで維持管理性向上。	<ul style="list-style-type: none">・桁の部材数や表面積が多く点検や補修の容易さが低下。
復旧性	<ul style="list-style-type: none">・損傷個所の把握と速やかな供用可否判断を実現。・補修補強しやすい単純な下部構造形状。	<ul style="list-style-type: none">・桁の部材数が多く補修補強のための空間確保が容易ではない。
安全性	<ul style="list-style-type: none">・多主桁構造で非合成桁であるため冗長性や頑健性が向上。	
経済性		<ul style="list-style-type: none">・材料費の増加。・桁の部材数が多く塗装塗替え工費が増加。

設計 B 【設計 A の代替案】

【橋梁形式】

鋼 3 径間連続鉄桁(少主桁)橋 (PC 床版) : 支間割 $3 \times 50.0\text{m} = 150\text{m}$

【選定要因】

設計条件における交通量, 地形, 地盤および交差条件への適合性を考慮した.

- 計画交通量および凍結防止剤散布に対し, 床版の材料劣化抵抗性を向上させた床版形式を採用
- 地形特性より, クレーン架設が可能な上部工形式を採用
- 地盤特性より上部工反力が小さい鋼橋形式を採用
- 交差条件として, 支間割および建築限界に制約がないことから, 鋼 I 桁+PC 床版の組み合わせを採用
- 路線の重要度と耐震設計の観点より, 地震時慣性力を複数の下部構造に分担させる地震時水平力分散構造 (連続桁+弾性支持) を採用

【注意すべき事項】

- 1) 床版における凍害および塩害(凍結防止剤)に対する方策
- 2) 橋面および支点部における凍結防止剤などの材料劣化因子に対する方策
- 3) 鋼桁の経年的な腐食
- 4) 代替ルートがない条件下における将来の床版の更新方法

【設計 A からの改善点】

【床版】

- ・ 所要の空気量(AE 剤)と水セメント比の確保
- ・ 防錆 PC 鋼材の使用
- ・ プレキャスト化
- ・ 塗装鉄筋
- ・ 床版厚の 5%増し

【主桁】

- ・ 3 主桁の少数主桁構造
- ・ 標準的な桁高支間比+100mm の桁高による余裕の確保
- ・ 各桁間へのアルミ合金検査路の設置

【下部構造躯体】

- ・ 壁式橋脚
- ・ 橋座排水勾配の設置
- ・ 橋座部アルミ合金検査路の設置

【支承】

- ・ 台座コンクリートの設置
- ・ 桁下面と橋座面間の作業空間確保 (500mm)

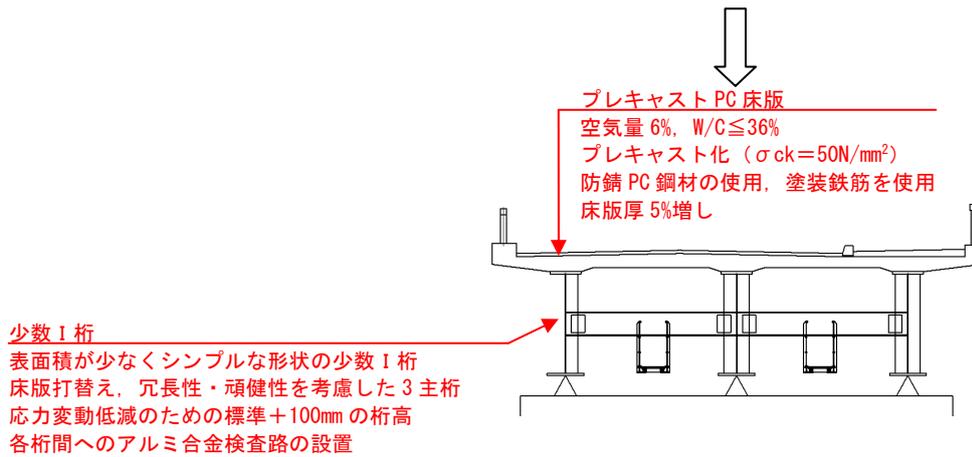
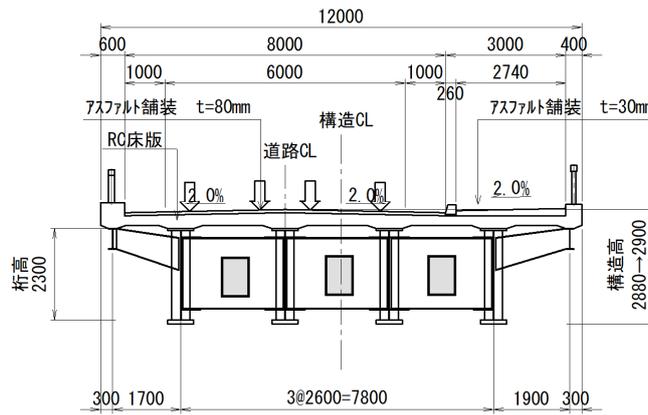


図 4.4.2 (ケース 1) 試設計結果 (B)

当試設計結果における性能評価の結果を下表に示す。

表 4.4.3 (ケース 1) 試設計 B における性能評価

評価	優	劣
耐久性	<ul style="list-style-type: none"> 床版, 桁, 下部構造躯体の材料劣化に対する耐久性向上 (100 年) . 床版の疲労耐久性向上 (100 年) . 上部構造より狭い橋座幅で橋座部の耐久性向上. 	
維持管理性	<ul style="list-style-type: none"> 桁内, 橋座部, 桁端部の点検作業性向上. 主桁形状がシンプルで部材数が少なく横引排水管もなくすることで維持管理性向上. 	<ul style="list-style-type: none"> 最小主桁数*より多く表面積が大きい.
復旧性	<ul style="list-style-type: none"> 損傷個所の把握と速やかな供用可否判断を実現. 補修補強しやすい単純な下部構造形状. 	
安全性	<ul style="list-style-type: none"> 最小主桁数より主桁数が多いため, 冗長性や頑健性を確保 	
経済性		<ul style="list-style-type: none"> 材料費および維持管理費の増加.

※床版の最大適用支間および主桁の設計上, 2 主桁での断面構成が可能

設計 C 【設計 A・設計 B の代替案】

【橋梁形式】

PC 3 径間連続箱桁橋 (PC 床版) : 支間割 $3 \times 50.0\text{m} = 150\text{m}$

【選定要因】

設計条件における交通量, 地形, 交差条件および維持管理・更新への適合性を考慮した.

- 計画交通量および凍結防止剤散布に対し, 床版の材料劣化抵抗性を向上させた床版形式を採用
- 地形特性より, 固定支保工架設が可能な上部工形式を採用
- 交差条件として, 支間割および建築限界に制約がないことから, PC 箱桁+PC 床版の組み合わせを採用
- 路線の重要度と耐震設計の観点より, 地震時慣性力を複数の下部構造に分担させる地震時水平力分散構造 (連続桁+弾性支持) を採用
- 定期的な維持管理 (再塗装等) が不要な PC 橋形式を採用

【注意すべき事項】

- 1) 床版における凍害および塩害 (凍結防止剤) に対する方策
- 2) 橋面および支点部における凍結防止剤などの材料劣化因子に対する方策
- 3) 上部構造の死荷重増に対する基礎設計上の合理性確保

【設計 A からの改善点】

【床版・主桁】

- ・ 所要の空気量 (AE 剤) と水セメント比の確保
- ・ ポリエチレンシースおよび防錆 PC 鋼材の使用
- ・ 塗装鉄筋の使用
- ・ 床版厚の 5% 増し
- ・ 標準的な桁高支間比+100mm の桁高による余裕の確保
- ・ 外ケーブル予備孔の配置

【下部構造躯体】

- ・ 箱幅と同程度の橋脚幅
- ・ 壁式橋脚
- ・ 橋座排水勾配の設置
- ・ 橋座部アルミ合金検査路の設置

【支承】

- ・ 台座コンクリートの設置
- ・ 桁下面と橋座面間の作業空間確保 (500mm)

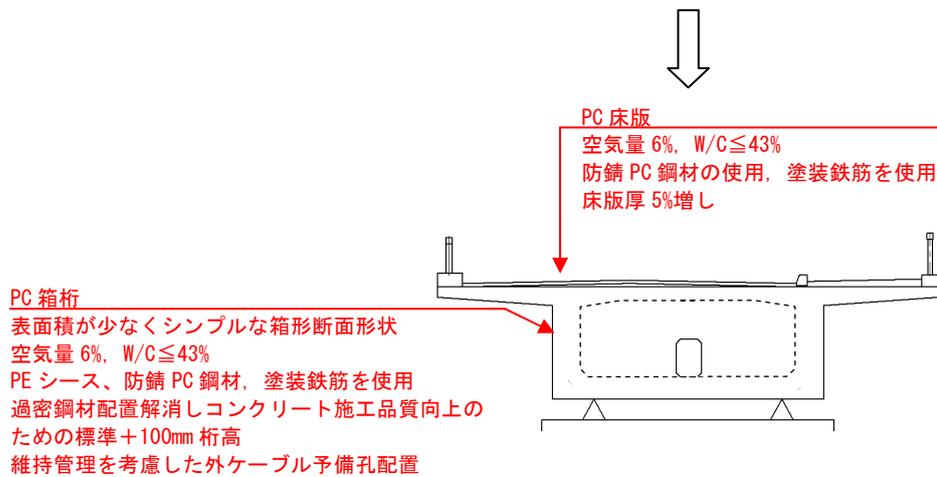
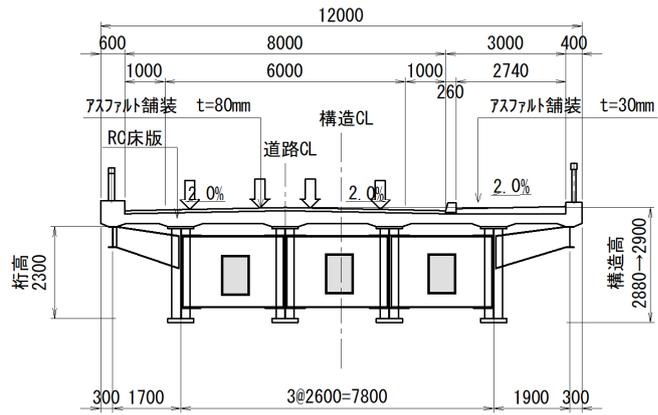


図 4.4.3 (ケース 1) 試設計結果 (C)

当試設計結果における性能評価の結果を下表に示す。

表 4.4.4 (ケース 1) 試設計 C における性能評価

評価	優	劣
耐久性	<ul style="list-style-type: none"> 床版, 桁, 下部構造躯体の材料劣化に対する耐久性向上 (100 年) . 床版の疲労耐久性向上 (100 年) . 上部構造より狭い橋座幅で橋座部の耐久性向上. 	
維持管理性	<ul style="list-style-type: none"> 桁内, 橋座部, 桁端部の点検作業性向上. 主桁形状がシンプルで部材数が少なく横引排水管もなくすることで維持管理性向上. 	<ul style="list-style-type: none"> 桁の重量が重くジャッキアップ作業が容易ではない.
復旧性	<ul style="list-style-type: none"> 損傷個所の把握と速やかな供用可否判断を実現. 補修補強しやすい単純な下部構造形状. 	<ul style="list-style-type: none"> 桁の重量が重く上部構造に変位が生じた場合のジャッキアップ作業が容易ではない.
安全性	<ul style="list-style-type: none"> コンクリートウェブを有する箱桁断面のため, 断面剛性は高く, 冗長性や頑健性を確保 	
経済性	<ul style="list-style-type: none"> 材料費, 維持管理の縮減 	<ul style="list-style-type: none"> 現場作業量の増加 (工期延伸) に伴う現場管理費および間接工事費の増加.

4.4.3 ケース2の試設計 (Bグループ)

(1) 設計上の考慮事項

試設計においては、道路橋示方書に示される橋の性能を満足させるとともに、設計者がより合理的であると考えられる構造形式の具現化を行うことを考える。

□ 設計条件から考慮すべき事項

①計画交通量：

検討は「省略」する（上部工形式は問わない）。

②地形：

橋脚の構造高が高く、耐震設計上、橋脚に作用するモーメントが大きくなるため、地震時に作用するモーメントを上部構造に負担させることで、構造の合理化が図れるラーメン形式が効果的であり「3径間連続ラーメンPC箱桁」が考えられる。

また、谷と谷が連続する山岳地であるが、谷間には主桁が十分に製作できる施工ヤードが確保されているため、桁形式においては「4径間PCコンボ橋」が考えられる。

③交差物件：

山岳地であるため、道路や鉄道、公園等の第三者被害を及ぼす交差物を跨いでいないため、第三者被害の検討は「省略」する（上部工形式は問わない）。

④気象：

凍害や凍結防止剤による塩害の影響を受ける環境にある。作用の不確実性から考慮すべき事項（⑧材料劣化因子）として検討する。

⑤路線の重要度：

緊急輸送道路等に指定されている重要路線であるため、万が一被災した場合においては地震後に早期に機能を回復できる「連続桁」や「単純桁」が考えられる。

⑥環境：

山岳地であることから、飛来塩分による塩害環境の検討を「省略」する（上部工形式は問わない）。

⑦地盤：

比較的良好で不等沈下は生じにくい地盤であるため、不等沈下による検討を「省略」する（上部工形式は問わない）。

※断層：

活断層等の断層のずれは確認されておらず、断層の検討を「省略」する（上部工形式は問わない）。

□ 作用の不確実性から考慮すべき事項

⑧材料劣化因子：

積雪寒冷地域で凍結防止剤を大量に散布するため、橋面から浸透する水分・塩分による材料劣化が懸念され、劣化因子の供給量は推定が難しい状況である。

(a)劣化因子が支点部に供給されにくく、材料劣化が生じにくい構造形式が効果的であり、伸縮装置部からの漏水が少ない「連続桁」や「ラーメン橋(PC箱桁)」の選定が考えられる。

(b)劣化因子が支点部に供給されやすいため、ジャッキアップによる支点部の交換が比較的容易な構造形式には、「単純桁」の選定が考えられる。

⑨地震：設計想定外の地震動の作用

(a)落橋の危険性を最小限とする形式には、上下部工を一体構造としている「ラーメン橋(PC箱桁)」の選定が考えられる。また、複数径間の桁が連続していることで落橋の危険性が少ない「連続桁」の選定も考えられる

(b)径間毎に上部構造を分離しているため、被災箇所が限定的となり、早期に復旧が可能となる「単純桁」の選定が考えられる。

□ 将来の状態から考慮すべき事項

⑩桁下利用：

将来的に、桁下を道路や多目的スペースとして有効利用されることが考えられる。材料劣化によるコンクリート片の落下のリスクを抑えるため、劣化因子が支点部に供給されにくい構造形式で、材料劣化の抵抗性が高い「連続桁」や「ラーメン橋(PC箱桁)」の選定が考えられる。

⑪更新：

緊急輸送道路等に指定されている重要路線で代替ルートもないため、構造物の設計耐用期間を超えた後も路線を継続的に使用する必要がある。このため、径間毎に上部構造を分離しており、更新作業が合理的に行える「単純桁」の選定が考えられる。

(2) 試設計

設計 D

[橋梁形式]

PC 4 径間コンポ橋 (単純桁 4 連) : $4 \times 37.5\text{m} = 150\text{m}$

[選定要因]

- 緊急輸送道路等に指定されてる重要路線で代替ルートもないことから、地震等の作用の不確実性と将来の更新を考え、部材の取り換えや更新作業が早期に行える形式を選定した。
- 上部工形式と支間割は、施工可能で最も経済的となるものを選定した。

[注意すべき事項]

- 1) 伸縮装置の劣化等により漏水が生じると、コンクリートの材料劣化因子が支点付近に作用しやすく、支点部の劣化が懸念されるため、定期的な点検が必要である。
- 2) とくに、掛け違い部は支点部の損傷が確認しづらいため注意が必要である。
- 3) 設計想定外の地震動が作用した場合、段差が生じる等して、通行止めにより緊急輸送路の機能が果たせなくなるリスクが高いため、地震後の点検には注意が必要である。

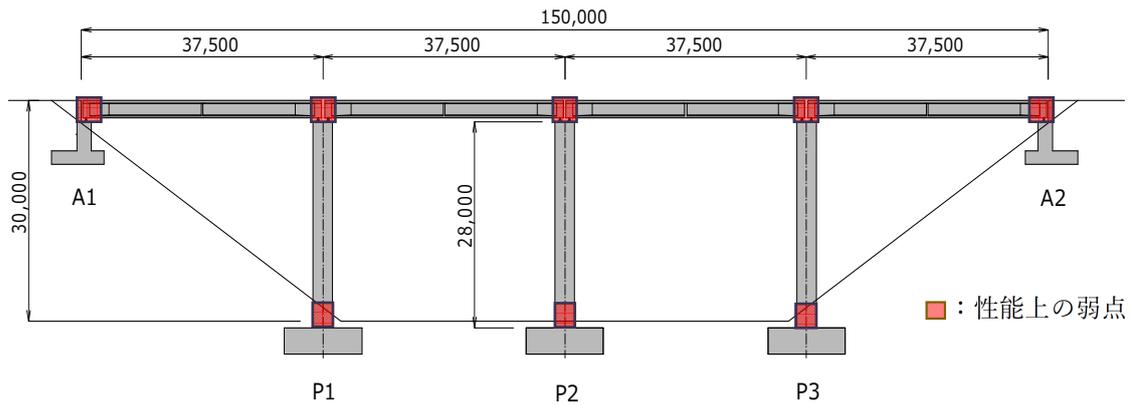


図 4.4.4 (ケース 2) 試設計結果 (D)

安全性	復旧性	維持管理	良 ↑ ↓ 悪
①落橋のリスクが高い ②段差による走行安全性が低下 ③過大な残留変形による走行安全性が低下	①桁のジャッキアップが可能であるため、変状した径間のみ交換が容易 ①地震後の支承部の点検箇所が多い ②橋脚基部が地中部の場合、地震後の点検が困難 ③ハイピアのため基部の確認作業が煩雑	①支承の交換が容易 ②桁の部分架け替えが可能 ①支点が多く点検が煩雑 ②ジョイントが多く点検が煩雑 ③支承部、伸縮装置などのジョイント部の維持管理が煩雑	

- 改善点**
- ・ 桁を連結あるいは桁かかり長を長くして落橋防止対策を行う
 - ・ 支点部の維持管理が容易となるように点検施設を整備
 - ・ ジャッキアップポイントを整備

設計 E

[橋梁形式]

PC 3 径間連続ラーメン箱桁橋 : 40.0m + 70.0m + 40.0m = 150m

[選定要因]

- 積雪寒冷地域の山間部であり、維持管理の容易さを考え、支承が最も少ないラーメンを選定した。
- 緊急輸送道路等に指定されている重要路線であるが、更新期や大きな変状が生じた場合には仮橋を設置できる場所が確保されているため、維持管理、経済性を重視した形式を選定した。
- 高橋脚であり、地震時に作用するモーメントを上部構造に負担させることで、構造の合理化が図れるため、より経済的となる。
- 設計想定外の地震動が作用しても落橋のリスクは低い。
- 凍結防止剤の散布が想定されるため、床版の材料劣化の抵抗性を高め、かつ桁内部より点検が可能となる「PC 箱桁」を選定した。
- 支間割りは張出し架設の施工が可能で、最も経済的となるものを選定した。

[注意すべき事項]

- ① 橋台部の支承に材料劣化が生じた場合、ジャッキアップが困難なため、場合によっては大規模な改修が必要であり、橋台支点部の維持管理に留意が必要である。
- ② 設計想定外の地震により部材に甚大な損傷が生じた場合、補修が困難であり、再構築に時間を要するため、長期間の通行止めとなるリスクがある。
- ③ 橋梁の更新においても、再構築の間は長期間の通行止めになるため、周辺住民の利便性が大きく低下する。

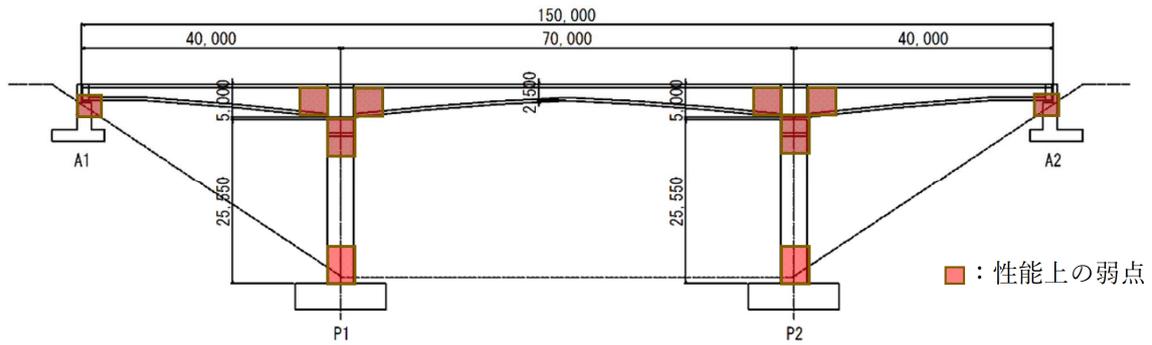


図 4.4.5 (ケース 2) 試設計結果 (E)

安全性

復旧性

維持管理

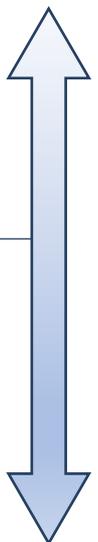
①地震後の支承部の点検箇所が少ない

①支承, ジョイント部が少なく劣化部位が少ない
②支承が少なく点検が容易

①橋脚の上下端および桁の確認作業が必要で煩雑
②過大な損傷が生じた場合, 復旧が困難であり, 再構築となる

①ジャッキアップが難しく支承の交換が困難

良



悪

■改善点

- ・橋脚の上端の点検が容易となるように点検設備施設を整備または計画
- ・支承の劣化を防止するための対策を行う

5. 北海道においてよい橋梁とは？

5.1 はじめに

北海道の橋は、積雪寒冷地という自然環境にある。そこに着目した橋梁の姿の考察を試みる。

なお、ここでは、車両の荷重としての特性は、設計基準で定められた性能を満たす観点では、北海道で特徴となるものはないと考えることとする。

5.2 積雪寒冷地の特性を考慮した橋の耐久性の確保

積雪寒冷地の特性を考慮した場合、橋の耐久性に対して凍害や塩害が重要な要因となり、車両の走行性を確保するための融雪剤による塩害の影響も重要な要因として考える必要がある。

凍害は、水分の凍結融解により生じる現象であり、融雪剤による塩害も水分の浸透による凍害と複合して生じる現象である。

また、北海道では、アルカリ骨材反応も水分の浸透による凍害と複合して生じる特徴がある。

これらを勘案すると、温暖地に比べて水分の浸透が橋の耐久性に与える影響は大きいと考えるのが自然である。

そのため、温暖地の橋と同様の耐久性を確保するためには、水分の浸透による影響を温暖地の橋に比べてより詳細に検討した設計が必要との考えに至る。

その場合の基本的な考え方として、土木学会コンクリート標準示方書 2017 年版，設計編の一節を記す。

2.2 構造物の耐久設計

構造物には荷重作用と環境作用が複合して作用することを考慮して、耐久性を満足するように、使用材料の特性、構造詳細、および構造システムを設計において定めなければならない。

【解説】 構造物には、常に荷重作用と環境作用が複合して作用し続ける。そのような状況において耐久性を確保するためには、使用材料の特性、構造詳細、構造物を構成する構造部材および装置等の構造システム等、総合的に耐久性を満足する方法を検討し具現化する必要がある。構造物の耐久設計は、用途・機能に応じた検討が不可欠である。以下に橋梁を例として、耐久設計の考え方を示す。

道路橋の床版は、雨水、凍結融解、塩化物イオン等の環境作用と、車両走行による繰返し荷重の作用の両方の影響を受けるため、それぞれの作用が単一で生じる場合に比べて、耐久性が大きく低下することが明らかになっている。耐久性を確保するためには、単に、一つの環境作用に対してコンクリートの材料としての抵抗性を高める方法のみでは、他の作用に対しては十分でない場合がある。そのため、排水勾配や排水設備の設置により路面の排水性を高めたり、防水工を設置するなどして雨水や塩化物イオン等の劣化因子の侵入を制御したり、かぶりを大きくすることによる劣化因子に対する抵抗性の向上と繰返し荷重の作用に対する耐荷力の向上等、種々の方法を併用することで、環境作用と荷重作用に対する耐久性を確保するのがよい。

また、構造物を構成する装置も、構造部材と同様に耐久性を確保する必要がある。特に、支承は上部構造の荷重を下部構造へ伝達する重要な装置であり、構造部材と同様に耐久性を確保することが重要である。したがって、支承には、環境作用に対して抵抗性が高い材料を用いるか、防錆等の対策を検討する必要がある。また、桁の接合工や伸縮装置から雨水が浸入し、支承部は劣悪な環境となりやすい。そ

のため、接合工や伸縮装置の排水性能の有無に関わらず、支承本体の耐久性の確保のみならず、桁座面に排水勾配を設け排水性を確保し、支承の直下に台座を設けるなどして、雨水等の劣化因子に対する抵抗性を高めるのがよい。

伸縮装置の耐用期間は、構造物本体に比べて短いのが一般である。そのため、構造物の供用期間中に伸縮装置の損傷や劣化により、桁上面の雨水が流下し、支承部の劣化を招くことが想定される。その場合、車両の走行性は確保されていても、伸縮装置の止水性の確保の観点から伸縮装置の交換が行われることが多く、伸縮装置の交換のための切削部および境界部から雨水の浸入や流下を招くこともある。そのため、伸縮装置の本来の機能は車両の走行性の確保であることを考慮し、伸縮装置の設計にあたっては、橋面の排水計画、伸縮装置の耐用期間と止水性の程度、支承部の耐久性の対策等、構造システム全体として考慮して、総合的に検討するのがよい。

この一節から、劣化因子の複合作用に対する対応の必要性と、それに対する多重防護等、構造システムとしての冗長性や頑健性のある対策と設計が重要であることが読み取れる。

なお、コンクリートの使用セメントを含む配合についても、積雪寒冷地特有の検討を行うことで、材料としての耐久性（劣化抵抗性）を向上させることは可能であることが明らかになっている。

5.3 積雪寒冷地の特性を考慮した橋の新たな機能の創造

暴風雪時の車両の走行安全の性能を向上させるとした場合、橋梁の構造を中路、下路構造（図 5.1）、防雪柵を設置した構造（図 5.2）なども検討の余地がある。なお、防雪柵が設置されれば橋梁内の風速は低下し、見通しの改善につながる可能性が高いとするシミュレーション結果もある。

地震時においても、一般には盛土構造より橋梁構造の方が耐震性能が高いため、橋に緊急避難場所としての機能を持たせることも可能である。

このように考えれば、北海道の積雪寒冷地の自然環境による暴風雪時、地震時の緊急避難場所としての橋の新たな役割を見出す可能性を考えることもできる。

5.4 まとめ

ここで示した積雪寒冷地という環境に対する抵抗性を向上させる耐久的な橋とすること、暴風雪時の走行安全性の向上、避難場所としての機能を有する橋は、本報告書で示した技術や既往の技術を積極的に利用することで十分に可能である（図 5.3）。

これらは、前述の構造計画など設計において性能や指標の意思決定を明確にすることで、容易に実現可能となることを我々は認識する必要がある。

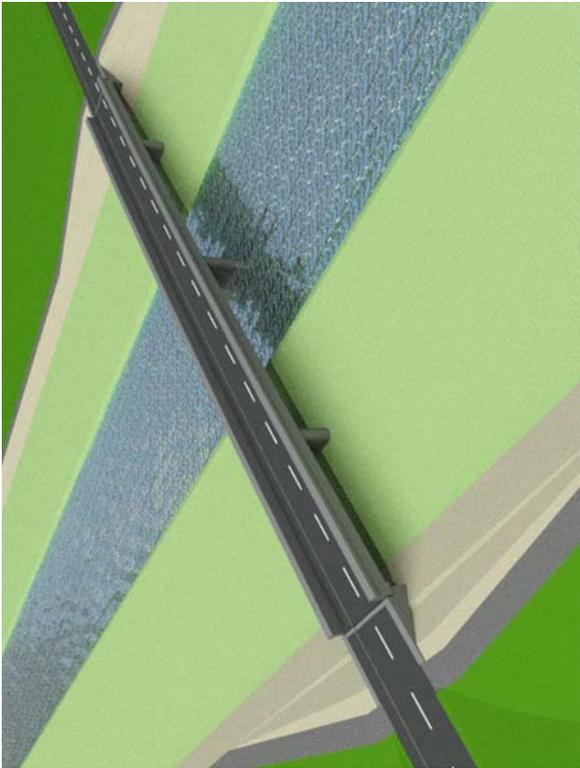
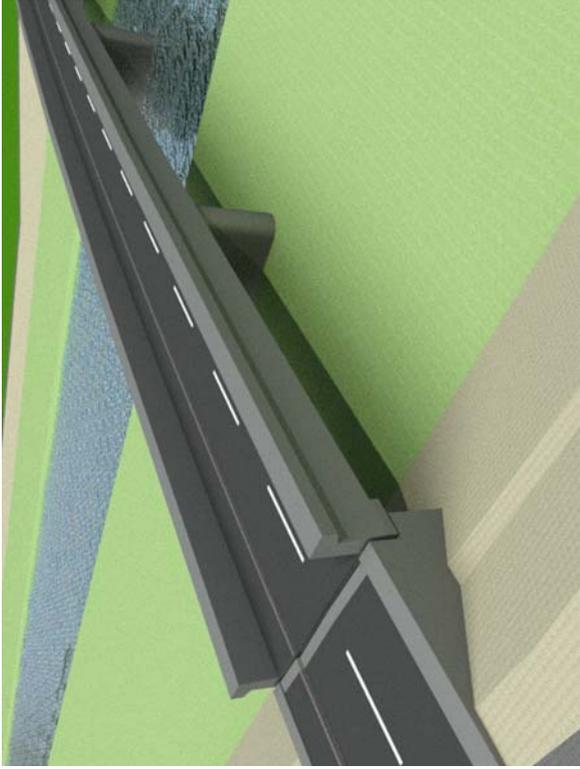


图 5.1 暴风雪时的走行安全性の向上を目的とした橋（下路桁橋）

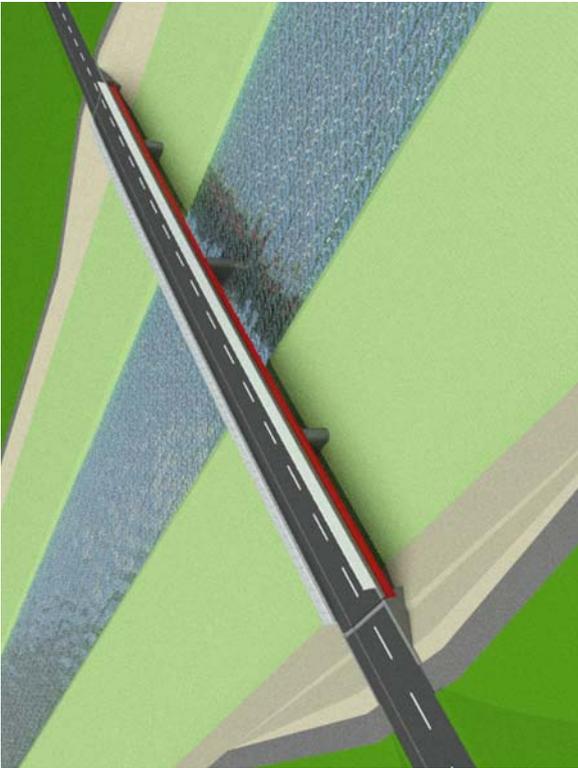
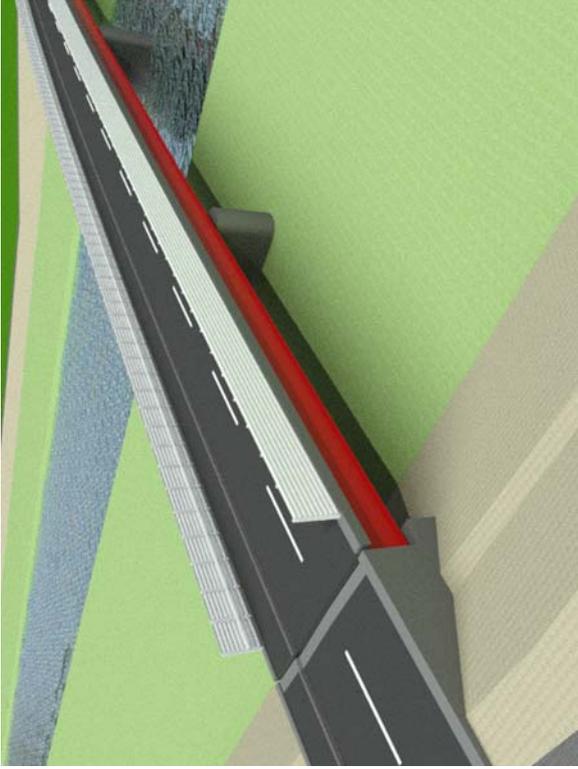


图 5.2 暴风雪时的走行安全性の向上を目的とした橋（防雪柵を設置した橋）

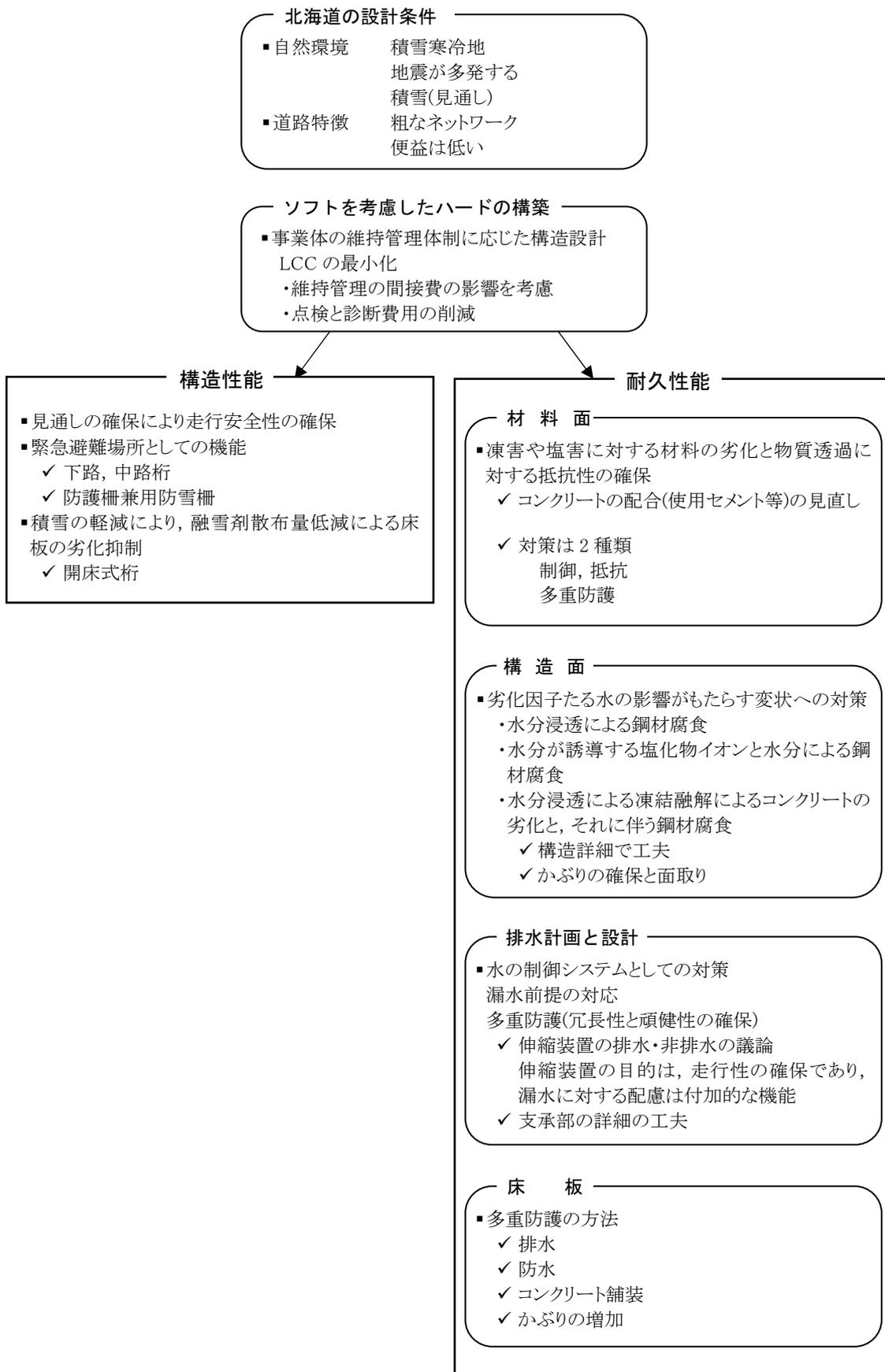


図 5.3 北海道にとってよい橋梁とするための検討事項

6. おわりに

設計は創造的で自由な行為であり、主観的であってよい。一方で、性能の照査は、客観的でなければならない。

土木構造物は公共の財産であるため、主観的であってはならないとの主張が当然のごとくある。

しかし、現在の土木構造物の設計基準では、設計の自由度を制約する規定は皆無であることを我々は認識しておく必要がある。仮に主観的に設計された構造物が、客観的な性能の照査を満足しているにも関わらず不具合が生じたとすれば、それは性能の照査技術に問題があるのである。

では、現状の必ずしも十分ではない照査技術でなぜ不具合が生じていないのか？理由は明確である。先人達の経験によって不具合が生じた構造物が設計されなくなったからである。だからと言って創造的行為を放棄する必要性は無いはずである。

性能の照査技術や計算環境が進化し、経験に立脚せずとも不具合の発生が推定できる時代に入ったのだから。

であれば、ここで初心に帰り、設計を創造的行為として積雪寒冷地の橋梁の姿を想像してみてもどうか？

そこにこそ、ローカルの技術者の存在価値があるのであろうから。そして、なにより想像をめぐらせた創造的設計は楽しいものなのだから。

本委員会の取り組みが、なんらかの契機になれば幸いである。

北海道土木技術会コンクリート研究委員会資料 第162号

平成28年度～令和元年度 北海道における構造設計研究小委員会報告書
—われわれは、いま、橋梁を設計していると言えるか?—

発行日：令和元年10月31日

編著：北海道土木技術会コンクリート研究委員会 北海道における構造設計研究小委員会

発行：北海道土木技術会コンクリート研究委員会 ISBN978-4-938676-62-7C3051

事務所：(株)ドーコン

札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1 TEL (011)801-1540 FAX (011)801-1541

印刷：(株)HRC 研究所

ご注意：当該出版物の内容を複製したり、他の出版物へ転載する場合には、
必ず北海道土木技術会コンクリート研究委員会の許可を得てください。
