

付録 6

道路橋床版の健全性評価方法の 検討と解析的評価事例

目 次

《付録6》道路橋床版の健全性評価方法の検討と解析的評価事例.....	付 6- 1
1. はじめに.....	付 6- 1
2. 定量化にむけた課題の抽出.....	付 6- 2
2.1 前提.....	付 6- 2
2.1.1 対象とする性能と限界状態.....	付 6- 2
2.2 健全性評価事例と評価指標の選定.....	付 6- 3
2.2.1 性能と数値評価指標.....	付 6- 3
2.2.2 調査文献の傾向.....	付 6- 5
2.2.3 健全性の定量化にむけた指標選定.....	付 6- 11
2.2.4 たわみの計測事例.....	付 6- 12
2.2.5 調査文献による事例.....	付 6- 13
2.2.6 たわみによる劣化度評価例.....	付 6- 17
2.2.7 複合劣化の事例.....	付 6- 20
2.3 定量化に向けた課題.....	付 6- 21
3. 複合劣化による構造性能の低下の把握.....	付 6- 28
3.1 前提材料劣化における現象の整理.....	付 6- 28
3.1.1 はじめに.....	付 6- 28
3.1.2 塩害による劣化パラメータ.....	付 6- 28
3.1.3 ASR による劣化パラメータ.....	付 6- 38
3.1.4 凍害による劣化パラメータ.....	付 6- 41
3.1.5 劣化パラメータのまとめ.....	付 6- 43
3.2 検討手法.....	付 6- 44
3.2.1 示方書の変遷と対象とした床版の概要.....	付 6- 44
3.2.2 板理論に基づくたわみの計算.....	付 6- 47
3.2.3 コンクリート標準示方書による耐荷力の計算.....	付 6- 47
3.2.4 松井式による耐荷力の算定と疲労寿命の計算.....	付 6- 48
3.2.5 FEM.....	付 6- 50
3.2.6 解析におけるパラメータ.....	付 6- 52
3.3 使用状態に関する検討.....	付 6- 53
3.3.1 複合劣化を仮定したたわみの計算.....	付 6- 53
3.3.2 FEM によるたわみの計算.....	付 6- 63
3.3.3 使用状態と劣化パラメータの関係まとめ.....	付 6- 73
3.4 終局状態（耐荷力、疲労寿命）に関する検討.....	付 6- 75
3.4.1 コンクリート標準示方書に基づく耐荷力の計算.....	付 6- 75
3.4.2 松井式による耐荷力の計算.....	付 6- 81
3.4.3 FEM による耐荷力の計算.....	付 6- 84

3.4.4 終局耐力と劣化パラメータの関係まとめ	付 6- 84
3.5 終局状態（疲労寿命）に関する検討	付 6- 85
3.5.1 松井式による疲労寿命の計算	付 6- 85
3.5.2 FEM による疲労寿命の計算	付 6- 88
4. 点検結果と定量化指標の関連付けの試み	付 6- 97
4.1 点検結果を用いた RC 床版の残存耐荷力および残存寿命の評価	付 6- 97
4.1.1 はじめに	付 6- 97
4.1.2 点検での診断区分と劣化過程の関係	付 6- 98
4.1.3 たわみを用いた大まかな疲労寿命評価	付 6- 98
4.2 点検結果を用いた評価の手順	付 6-100
5. おわりに	付 6-102

付録 6 道路橋床版の健全性評価方法の検討と解析的評価事例

1. はじめに

本報告では、2012年6月に出版された道路橋床版の維持管理マニュアル（案）の改訂にあわせ、マニュアル本編第3章3.2床版評価区分に対して、定量的な構造性能評価との関連性を明らかにすることを目的に、調査研究活動を行ったものである。したがって、2012年版マニュアルのある部分を改訂するというよりも、現マニュアルに追加する解説資料として成果をとりまとめることを念頭に、2014年4月より2015年9月の間に、「床版の健全性を限界状態に基づき定量的に定義し、評価・管理水準を定める」ことを目標として議論を行った。

しかしながら、道路橋床版が繰返し作用による損傷だけでなく塩害やASRなどの環境作用による劣化を伴って損傷した（複合劣化）状態では、構造部材としてどの程度の性能を有しているのかを定量的に評価するのは容易ではない。本報告ではこの問題に取り組むため、第1ステップとして各委員から限界状態や評価指標とその限界値について意見出し、第2ステップとしてこれまでの損傷評価事例を収集しリスト化、第3ステップとして、ステップ2のリストと解析などで種々の条件下での床版の限界状態（損傷状態）と評価指標およびその限界値の関連付け、という過程を経ている。

以上の調査研究活動で得られた成果は、主として3つのパートにわけてとりまとめた。

はじめに、定量化にむけた課題の抽出を行った。健全性、損傷度等の用語の定義、対象とする複合劣化の定義などを明確にしたのち、本報告で耐荷力、たわみ、疲労寿命に着目することにした経緯を説明した。そのうえで、現状のマニュアルによる評価区分を、学術文献あるいは調査によって得られた実床版の情報にあてはめ、他の定量化指標と結びつけられるのかを検討した結果を述べた。以上が2章の内容である。

次に、複合劣化による構造性能の低下の把握をおこなった。特にコンクリートに関しては、実構造の損傷を考える上で避けては通れない荷重以外の材料劣化の影響（塩害、ASR、凍害）をどのように構造性能評価にどう取り込むのか。文献調査をもとに構造解析に用いるパラメータを整理するとともに、その検討根拠を示した。これにもとづき、複合劣化を生じた床版を想定し、既往の実験にもとづく床版の評価式にもとづく耐荷力および寿命の計算、版理論によるたわみの計算、FEMによるたわみおよび寿命の計算を行った。以上が3章の内容である。

最後のパートでは、3章の結果をもとに、目視による評価区分と、本報告で検討した定量的な構造性能評価の関連付けを行った。本報告で検討した条件は実現象のごく一部であり、また数値の信頼性については今後の検証を経なければならないものと認識しているが、少しでも実務に資する具体的、定量的な資料を提示するため、議論を尽くした。以上を4章とした。ここで示される定量化指標の数値は、その算出条件を十分に勘案のうえ参照されることが望まれる。

2. 定量化にむけた課題の抽出

2.1 前提

2.1.1 対象とする性能と限界状態

検討対象とする性能と限界状態を表-付 6.2.1 に示す。本報告では構造安全性、耐久性に対する検討を行うものとし、公衆安全性や社会・環境適合性については検討対象外とした。また、使用性を走行安全性という意味でとらえる場合、その評価は床版というよりも舗装の評価となってしまうことについて議論を行った。その結果、舗装の変状は必ずしも床版の変状に起因するとは限らず、舗装に不具合があっても床版自体は健全であることも考えられることから、使用性は走行安全性でなく、あくまで床版本体のたわみや振動に着目して検討することとした。その際、実橋の床版の変形や振動は桁の剛性や桁との結合条件に大きく影響をうけると考えられるが、それらを考慮すると検討条件が複雑となるため、考慮しないこととした。

表-付 6.2.1 検討対象とする項目の整理

要求性能	限界状態	評価指標
構造安全性	断面破壊	耐荷力, 剛性 (変形) 材料強度, 振動数, たわみ, ひび割れ密度, 厚さ, 水平ひび割れの有無 等
	疲労破壊	耐荷力, 剛性 (変形) 材料強度, 振動数, たわみ, ひび割れ密度, 厚さ, 水平ひび割れの有無 等
使用性 (走行安全性)	ポットホール発生 (舗装)	ポットホール発生頻度と箇所数 舗装のひび割れ密度 等
	路面の滞水	床版本体上面の平坦性 等
耐久性	疲労破壊	耐荷力, 剛性 (変形) 材料強度, 振動数, たわみ, ひび割れ密度, 厚さ, 水平ひび割れの有無 等
	鉄筋腐食	塩化物イオン量, 電位, 鉄筋断面積 等
	コンクリート劣化 (凍害, ASR)	コンクリートの動弾性係数, 圧縮強度, 透気・透水性・吸水性 等
公衆安全性	第3者被害	かぶりコンクリートのはく離有無, 面積等
社会・環境適合性	振動, 騒音の発生等	景観, 騒音, 振動, 環境負荷

2.2 健全性評価事例と評価指標の選定

2.2.1 性能と数値評価指標

対象とした道路橋床版の構造安全性・耐久性などの性能に対し、点検結果を基に表-付6.2.2に示す4つ(健全、予防保全段階、早期措置段階、緊急措置段階)の判定区分を標準として損傷の種類に基づき評価を行っている。当該損傷を橋梁定期点検要領(平成26年6月 国道交通省道路局 国道・防災課)では、表-付6.2.3に示す9つの対策区分で判定するなど健全性の診断を行っている。また、前回の当マニュアルにおいては、道路橋床版に着目したことから表-付6.2.3の9つの対策区分をA, B, C, E, Sの5つの対策区分に簡略化しているので参考とする。よい。

表-付6.2.2 判定区分

区 分	定 義	
I	健全	道路橋の機能に支障が生じない状態。
II	予防保全段階	道路橋の機能に支障が生じないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。
III	早期措置段階	道路橋の機能に支障を生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態。
IV	緊急措置段階	道路橋の機能に支障を生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態。

表-付6.2.3 対策区分の判定区分

対策区分	判定の内容
A	損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない。
B	状況に応じて補修を行う必要がある。
C1	予防保全の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。
C2	橋梁構造の安全性の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。
E1	橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある。
E2	その他、緊急対応の必要がある。
M	維持工事に対応する必要がある。
S1	詳細調査の必要がある。
S2	追加調査の必要がある。

橋梁定期点検要領(平成26年6月 国道交通省道路局 国道・防災課)では、健全性の診断と対策区分の判定は、あくまでそれぞれの定義に基づいて独立して行うことが原則であるが、一般には判定区分と対策区分の関連性を表-付6.2.4のような対応となる」と記載しているので参考とするのがよい。

表-付6.2.4 対策区分の判定区分

判定区分	対策区分
I	A, B
II	C1, M
III	C2
IV	E1, E2

実橋の健全性定量指標の適性検討において、どのような指標の基に評価しているか、新たに指標選定に向けた文献調査を行った。文献調査をするうえでの着眼点としては、実橋の床版劣化における床版性能や橋梁点検において健全性を設定するうえでの床版各部位に対する点検項目、その手法などは表-付 6.2.5 に示すようにまとめることができ、RC 床版の各部位での数値指標に基づき、たわみ、ひび割れ、コンクリート強度、弾性係数、動弾性係数、塩化物イオン量、ASR 骨材、中性化深さに着目し実施した。

表-付 6.2.5 評価指標とデータ特性一覧表

点検部位	点検項目	手 法	数値指標 の検討	健全性定量評価のための指標としての適性検討					指標のピックアップ (事例収集用)		
				正確性	費用 (左：直工費(機器込) 右：仮設備費)	技 能	そ の 他	判 定	関係する 性能	残存寿命 検討	
床版下面	ひび割れ	近接目視と写真撮影	ひび割れ密度 ひび割れ幅 ひび割れ間隔	○	安い	足場費	技術が必要	定期点検	有効な指標	① 構造安全性 ② 耐久性	○
		遠望からの 撮影+画像解析	△	高い (機器・ソフト)	足場費	熟練技能 不要		有効な指標			
	鉄筋露出 剥離	近接目視	面積、損傷深さ 鉄筋断面減少量	○	安い	足場費	技術が必要	定期点検	有効な指標	① 構造安全性 ② 耐久性	○
	漏水	近接目視	面積、漏水位置	△	安い	足場費	熟練技能 不要	定期点検	不適(数値で 表現するのは 難しい)	① 耐久性	
	遊離石灰	近接目視	面積	△	安い	足場費	熟練技能 不要	定期点検	不適(数値で 表現するのは 難しい?)	① 耐久性	
	ひび割れ	超音波	ひび割れ深さ	○	高い (機器・ソフト)	足場費	技術が必要		有効な指標	① 構造安全性 ② 耐久性	
	コンクリート 密度	打音法	波形(振幅, 反射時間ほか)	△	高い (機器・ソフト)	足場費	技術が必要	計測値にば らつき多い	不適 (ばらつき)	① 耐久性	
	たわみ	変位計(ひずみ式) レーザー変位計	変位	○	高い (機器・ソフト)	足場費	技術が必要	臨時点検	有効な指標	① 構造安全性 ② 耐久性	○
	鉄筋腐食	自然電位法	電位、腐食範囲	○	高い (機器・ソフト)	足場費	技術が必要		有効な指標	① 耐久性	
	微細ひび割れ (剛性低下)	吸水試験	時間当たりの 吸水量	○	高い (機器・ソフト)	足場費	技術が必要		有効な指標	① 耐久性	
微細ひび割れ (剛性低下)	小型起振機	波形(振幅, 反射時間ほか)	△	高い (機器・ソフト)	足場費	技術が必要	開発中・ 適用事例少	有効な指標	① 耐久性		
床版上面	たわみ	重錘落下法 (FWD, IIS)	変位、剛性	○	高い (機器・ソフト)	規制費	技術が必要	臨時点検	有効な指標	① 構造安全性 ② 耐久性	○
	ひび割れ	近接目視と 写真撮影	ひび割れ密度, ひび割れ幅, ひび割れ間隔	○	安い	規制費	技術が必要	臨時点検	有効な指標	① 構造安全性 ② 耐久性	○
	鉄筋露出 剥離	近接目視	面積、損傷さ、 鉄筋断面減少量	○	安い	規制費	技術が必要	臨時点検	有効な指標	① 構造安全性 ② 耐久性 ③ 使用性	
	砂利化	近接目視	砂利化範囲, 砂利化深さ	○	安い	規制費	技術が必要	臨時点検	有効な指標	① 構造安全性 ② 耐久性 ③ 使用性	○
	上面劣化	電磁レーザー探査	(剥離/鉄筋露出/ 砂利化)の面積	△	高い (機器・ソフト)	規制費	技術が必要	臨時点検	不適 (ばらつき)	① 構造安全性 ② 耐久性 ③ 使用性	○
サンプル 調査	調査項目	手 法	数値指標の 検討	定量化指標としての適性検討					指標のピックアップ (事例収集用)		
				正確性	費用 (左：直工費(機器込) 右：仮設備費)	技 能	そ の 他	判 定	関係する 性能		
(コアより)	塩化物イオン 含有量	電位差滴定法	イオン含有量	○	高い (機器・ソフト)	-	技術が必要	臨時点検	有効な指標	① 耐久性	
	残存膨張量	促進養生試験	残存膨張量 (ひずみ)	○	高い (機器・ソフト)	-	技術が必要	臨時点検	有効な指標	① 耐久性	○
	圧縮強度	一軸載荷試験	圧縮強度	○	高い (機器・ソフト)	-	技術が必要	臨時点検	有効な指標	① 構造安全性 ② 耐久性	○
	弾性係数 ポアソン比	一軸載荷試験	弾性係数, ポアソン比	○	高い (機器・ソフト)	-	技術が必要	臨時点検	有効な指標	① 構造安全性 ② 耐久性	○

表-付 6.2.5 の評価指標とデータ特性一覧表では、実橋において構造安定性、耐久性、使用性などの床版性能を確保するうえで、定期点検や臨時点検での近接目視による床版上下面のひび割れ、鉄筋露出・鉄筋腐食、コンクリートはく離、漏水、砂利化や床版のたわみ、コンクリートコア採取による塩化物イオン含有量、圧縮強度など、各種器具によるサンプル調査が必要であることを記載した。また、各種点検項目に対しての健全性評価判定には熟練した技術が必要であることを示している。

以上のように実橋において床版の健全性を評価するためには、高価な機器の使用や道路・河川上の足場設置、現道に対する交通規制などに伴う費用規模の大小や熟練した技術者が必要になる。このため、材料劣化における現象とその現象に対する一つの健全性定量化に向けた解析を3章に記載しているので参考にするるとよい。

2.2.2 調査文献の傾向

事例調査では、道路橋床版の調査や評価に関する200稿程度の論文を集め、実橋床版についての調査が行なわれている65編について、表-付 6.2.6 の様式で整理を行なった。整理した文献65編の概要を表-付 6.2.7 に示す。事例調査では、以下のような傾向が見られ、その都度、調査項目が決められ、判定方法なども統一はされていない。また、定量的に余寿命を予測し、対策への言及まで行われている事例はほとんど見られない。

- i) FWDによる床版のたわみを健全性評価等に用いる研究が行なわれている。
- ii) ひび割れの調査事例は多く、床版下面のひび割れ密度やコア抜きによる水平ひび割れの調査の事例が見られる。
- iii) 調査項目は、橋梁毎に実施項目に差が見られる。たわみ、ひび割れ調査のほか、寒冷地では塩化物イオン濃度 (CL-) やアルカリシリカ (ASR) の調査が行われている傾向にある。また、コンクリート強度や弾性係数を調査も実施されている。
- iv) 余寿命予測は、年数まで予測しているのは文献 調-1 の1事例のみである。なお、耐荷力を相対比較している事例はあるものの実施事例は少ない。

表-付 6.2.6 事例調査表の事例

文献 No.	調-1	調査担当					
タイトル	23 年供用した RC 床版の損傷実態・残存疲労寿命と維持管理との関係に関する基礎的研究						
著 者	石井孝男, 谷倉泉, 庄中憲, 國原博司, 松井繁之						
出 典	土木学会論文集 I 巻 537/I-35, pp.155-166, 1996.4						
調査項目	たわみ	ひび割れ	コン強度	弾性係数	Cl-	ASR	中性化
	0.142mm [*]	7.6~9.1m/m ²	23.9N/mm ²	19,400N/mm ²	0.54kg/m ³	—	1.06cm
その他の調査	ポアソン比：0.19／引張強度：3.19 N/mm ² ／上鉄筋平均かぶり：35mm／下鉄筋平均かぶり：25mm／鉄筋腐食：なし／静的載荷実験による押し抜きせん断耐力：35.9tf／たわみによる劣化度：0.816						
対象床版の概要	供用年数	準拠道示	路線（地域）	橋梁形式	その他の特徴		
	23 年	推定 S39	東名御殿場	鋼ばん桁	H3 年に床版を切り出し		
判断	判定（損傷グレードなど）		余寿命予測の有無と内容			対策への言及有無と内容	
	損傷度 A (JH 基準) 損傷が著しい。緊急な補修が必要。		1.57 年 輪荷重走行試験により推定			なし	
特記事項	<p>4 橋分の撤去 RC 床版について損傷度の評価、内 1 橋について残存寿命を評価した研究</p> <p>ひび割れ密度やたわみによる劣化度等からはまだ使用限界内であったが、輪荷重走行試験による S-N 曲線より残存寿命は 1.57 年となり、残存寿命がほとんどない結果となっている。実橋床版の疲労寿命を縮める要因としては、貫通ひび割れ、水および実交通荷重の影響が特に大きいと言及している。</p> <p>※たわみは、切出し床版の静的載荷試験での荷重 1tf あたりの値を示す</p>						

表-付 6.2.7 事例調査の概要表

文献 番号	地域	調査項目							判定	余寿命予測	対策への言及	概要	
		た わ み	ひ び 割 れ	コ ン 強 度	弾 性 係 数	C L	A S R	中 性 化					
調-1	神奈川	○	○	○	○	○	—	○	損傷が著しい	1.57年	無	撤去床版の損傷度評価	
調-2	東京	○	—	—	—	—	—	—	健全	無	無	FWDによる判定	
調-4	名神	—	○	—	—	—	—	—	損傷度 5~33%	無	無	ひび割れ図より損傷度 を評価	
調-10	東北	○	○	—	—	—	—	—	C~E※	無	無	FWDによる判定 ※NEXCO 基準	
調-11	東北	○	—	—	—	—	—	—	たわみによる 損傷度を算出	無	使用限界につ いて言及	FWDによる判定	
調-13	東京	○	○	○	○	—	—	—	たわみによる 劣化度 0.3~ 0.6 未満	無	無	FWDによる判定	
調-15	東京	○	—	—	—	—	—	—	補強効果あり	無	無	落下たわみ測定機による 補強効果の確認	
調-23	北海道	—	○	—	—	—	—	—	床版下面ひび 割れ	松井式	BMSに反映	BMS劣化予測のための 因子検討	
調-25	—	—	—	—	—	—	—	—	無	無	無	RC中空床版橋	
調-29	福井	○	○	○	○	—	○	—	無	耐荷力低下 大	床版取り替え	水平ひび割れが生じ耐 荷力低下が大きい	
調-30	阪神高 速	○	○	○	○	—	○	—	床版下面	耐久性と耐 荷性で評価	防水層+鋼板 接着	耐荷力は低下してい ないが、ASR対策にて補強 を実施	
調-35	沖縄	—	○	○	—	○	—	—	無	無	無	沖縄県の調査事例	
調-36	北陸	—	—	—	—	○	○	○	無	無	無	土砂化コンクリートの 構成物質の分析	
調-39	寒冷地	—	○	—	—	—	—	—	無	無	無	橋梁全体の健全度評価	
調-44	兵庫	○	○	—	—	—	—	—	無	無	下面増厚	貫通ひび割れとB活荷 重対応で補強	
調-45	東名	○	○	—	—	—	—	—	無	無	樹脂注入	上面増厚はく離面への 樹脂注入	
調-47	—	—	—	—	—	—	—	—	無	無	無	上面の電磁波レーダ調 査	
調-48	—	—	—	—	—	—	—	—	無	無	無	上面の赤外線サーモグ ラフィー調査	
調-51	—	○	—	—	○	—	○	—	疲労、塩害、 ASR、凍害	無	無	無	鉄筋コンクリート床版 の損傷事例と調査
調-53	—	○	○	○	—	—	—	—	ひび割れ密 度、たわみ劣 化度	無	無	無	輪荷重走行試験による 評価
調-54	—	○	—	○	—	—	—	—	水平ひび割れ	無	無	無	水平ひび割れへのエポ キシ樹脂注入
調-55	名古屋	—	—	—	—	—	—	—	無	無	無	長版内部の事前調査	
調-57	北海道	○	○	—	○	—	—	—	無	無	比較的健全	非破壊検査による健全 度評価手法	
調-60	北陸	—	—	—	—	—	—	—	無	無	無	鉄筋腐食の実態調査と 評価	
調-61	北陸	○	○	○	—	○	○	○	有	無	有	北陸自動車道における 床版の損傷事例と対策	

文献 番号	地域	調査項目							判定	余寿命予測	対策への言及	概要
		た わ み	ひ び 割 れ	コ ン 強 度	弾 性 係 数	C L	A S R	中 性 化				
調-62	北陸	—	○	○	—	○	—	○	下面5判定, 上面3判定	無	無	下面5×上面3のマトリックスで健全度を区分
調-63	積雪寒冷地	—	○	—	—	○	—	—	独自判定AA ~Cの4段階	無	有	上面増厚の再劣化に対する調査・検討
調-74	中央道 富士吉 田線	○	○	—	○	—	○	—	塩害の損傷度 評価	無	有	凍結防止剤の散布により損傷したRC床版の健全度評価と補修対策
調-75	島根県	○	—	○	○	○	—	○	無	無	無	ひび割れなくはく離・はく落, 劣化調査と試験体による載荷試験実施
調-82	北陸, 東北	—	○	○	—	○	—	○	無	無	無	RC床版の土砂(砂利)化に対する分析結果
調-85	九州	○	○	—	—	—	—	—	無	無	無	20年目, 23・26年目の評価・判定方法による事例紹介
調-90	—	—	○	—	—	—	—	—	無	無	無	床版疲労概要, 床版内部への水の浸入についての実橋事例紹介, 床版抜け落ち防止の考察
調-91	—	—	—	○	—	—	—	—	無	無	無	X線造影撮影法によるコンクリート強度推定, EPMA法等, 新たに取り入れた方法の紹介
調-97	北海道	—	○	—	—	—	—	—	無	無	無	北海道におけるRC床版の点検データを環境条件により分類しその劣化傾向を考察
調-104	—	○	○	—	—	—	—	—	無	無	無	モニタリング調査事例報告. 気温の上昇によるアスファルト舗装の剛性低下に伴う床版たわみ振幅の増加
調-107	阪神高速管内	○	—	—	—	—	—	—	A~Cの3ランク	疲労寿命の 相対比較	無	鋼板接着補強RC床版の損傷実態およびはく離発生要因について取りまとめ
調-108	長野県	—	—	—	—	—	—	—	無	無	無	床版の土砂化と水平ひび割れについて, 打音法と電磁波レーダ法の検知手法を検討
調-110	阪神高速梅田 入路	○	○	—	—	—	—	—	cランク	無	無	水張り輪荷重走行試験, ひび割れ密度と損傷度の関係
調-111	岐阜県	—	○	○	○	○	○	○	無	無	無	RC床版の劣化調査事例の検証
調-115	東京都	—	—	—	—	—	—	—	無	無	無	小型FWDを用いた舗装面のたわみと衝撃による評価

文献 番号	地域	調査項目							判定	余寿命予測	対策への言及	概要
		た わ み	ひ び 割 れ	コ ン 強 度	弾 性 係 数	C L	A S R	中 性 化				
調 -116	—	—	—	—	—	—	—	—	無	無	無	床版の振動モードと固有周波数の特定. 反共振周波数による損傷の特定.
調 -119	—	○	—	—	—	—	—	—	劣化度による判定	無	無	たわみは速度計で上面から計測
調 -120	—	○	△	—	—	—	—	—	たわみの劣化度	無	界面への接着剤塗布	施工目地に着目した上面増厚の輪荷重走行試験. 各種対策による補修補強効果の検証
調 -122	積雪寒冷地	—	—	○	○	○	—	○	無	無	無	各種材料試験と補強後の応力頻度測定, 補強前後の主桁と床版の衝撃振動試験
調 -128	札幌市	—	○	—	—	—	—	—	無	無	無	3次元レーダを用い床版内部劣化の時間的進行を把握するための追跡調査
調 -130	岩手県	○	—	—	—	○	—	—	5段階評価(点検時)	有	無	松井式に塩害による低減係数を仮定し耐疲労性を評価.
調 -131	岩手県	—	—	—	—	○	—	—	無	腐食発錆限界の寿命推定	無	化物イオン濃度の測定を行い, 塩化物に対するRC床版の寿命評価
調 -137	北陸地方	—	—	—	—	—	—	—	無	無	無	舗装面から打音法を行い, 舗装はく離や床版上部劣化の可能性を検討.
調 -139	国道57号	—	—	—	—	—	—	—	無	無	無	地中レーダ探査機を用いた床版上面のかぶりコンクリートの劣化状況の確認
調 -140	北陸地方の高速道路	—	○	○	—	○	—	○	無	無	疲労劣化で取替えた床版を調査	塩分濃縮について測定. 比較的健全な部位のコアを用いた塩分促進試験.
調 -142	一般国道8号	—	○	—	—	—	—	—	床版下面のひび割れ:d判定	無	床版部分打替え, 断面修復を実施	電磁波レーダの判定結果と橋梁下面点検から床版打替え位置を決定
調 -143	—	—	—	—	—	—	—	—	無	無	無	RC床版の内部欠陥を検出する装置の研究
調 -144	—	—	○	—	—	—	—	—	無	無	無	撤去RC床版に対して, As舗装有無等の条件にて水を張って漏水の有無の検討.
調 -146	—	—	—	—	—	—	—	—	無	無	無	RC床版の設計・施工法についての解説.

文献 番号	地域	調査項目							判定	余寿命予測	対策への言及	概要
		た わ み	ひ び 割 れ	コ ン 強 度	弾 性 係 数	C L	A S R	中 性 化				
調 -147	—	—	—	—	—	—	—	—	無	無	無	RC床版の疲労、塩害、ASR、凍害についての損傷や評価法についての解説
調 -150	北海道	—	○	—	—	—	—	—	旧土研判定 I～IV	有	無	多数の実橋床版の点検データを分析したもの
調 -154	中国地方の高速道路	—	○	—	—	○	—	—	無	無	無（取換決定しているため）	舗装上面からの浮き、はく離の調査で打音も多配列レーダーも十分ではないとの結論。
調 -155	北陸地方の高速道路	—	○	—	—	○	—	—	有 鉄筋腐食のグレード	無	無	取替が決定した床版の調査
調 -156	岩手県	—	—	—	—	○	—	—	有	無	無	凍結防止剤散布環境下での健全性評価（塩分浸透の確認）の手法の検討例
調 -174	北陸地方の高速道路	○	○	○	○	○	—	—	有 たわみに基づく健全度評価	無	無	格子解析でのたわみと計測たわみを比較した健全度の評価例
調 -175	—	—	—	—	—	—	—	—	無	有	有	交通量等を加味して点数化し、対策優先順位の提案。
調 -181	—	—	—	—	—	—	—	—	無	無	無	赤外線を用いた舗装表面からの損傷検知技術の検討
調 -182	北陸地方	—	—	○	—	○	—	○	無	無	無	中性化深さ、中性化速度係数について構造種別や調査部位別に分析
調 -183	兵庫県	—	○	—	—	—	—	—	無	無	無	評点法による健全度評価に関する研究
調 -191	北陸地方	—	—	—	—	○	—	—	床版パネル判定	無	無	塩害損傷過程ごとに維持管理方法を提案 凍結防止剤による RC 床版の塩害について損傷メカニズムを提案

2.2.3 健全性の定量化にむけた指標選定

(1) 耐力力、たわみ、疲労寿命の関係

床版の健全性を限界状態に基づき定量的に定義し、評価・管理水準を定めるために、適切な指標について検討を行った。実際の橋梁床版維持管理の現場では、不具合を発見した場合に対策の方法また対策を行うにあたって優先順位を決定するための指標が必要である。

そのためには、指標を構造安全性（断面破壊あるいは疲労破壊）に対する余裕度とするのか、使用性（走行安全）に対する余裕度とするのかについては議論が分かれるが、ここでは、構造安全性（断面破壊あるいは疲労破壊）と使用性（走行安全）には一義的な関係があるものと仮定することにした。また、使用性の指標としては、たわみを採用することとした。たわみは、その原因が何であっても（凍害やASRによるコンクリート自体の性能低下あるいは塩害による鉄筋腐食等）、荷重の繰返しによる損傷と同様、損傷の進行とともに増加する数値であるため、複合劣化の総合的な指標として採用可能と考えた。

構造安全性に関する限界状態同士の関係については、一般的に断面耐力力が大きい部材はそれに比例して疲労耐力力も大きいことから、断面耐力力と疲労寿命は比例（あるいはそれに近い）関係にあるとみなし、検討をすすめるものとした。この際、既設床版の評価を前提とすれば、断面耐力力とは診断時点の残存耐力力、疲労寿命は診断時点以降の余寿命と認識することができる。

たわみについては、直接計測の実績のほか近年の非接触センサの技術の発展も期待されること、また間接的ではあるが振動計測等からも求められることから、床版の健全性を限界状態に基づき定量的に、評価する指標になり得るものと判断し、本報告の調査研究の中心となる指標として選出した（既設床版の残存耐力力や余寿命の計測は、破壊を伴う実験にて確認する必要があるため、維持管理上の指標として採用するのは現実的でないことは明らかである）。ただし、断面耐力力（あるいは疲労耐力力）とたわみ（剛性）の関係は明確なのか、たとえば、たわみが初期の2倍になったとき、残存耐力力はもとの半分になるのかという疑問は残る。部材が曲げ破壊型なのかせん断破壊型かによっても、残存耐力力とたわみとの関係は異なるのではないかと。この点については3章にて検討を行うものとした。以上をまとめると、下記のとおりとなる。

- i) 本調査研究の目的は、床版の健全性を限界状態に基づき定量的に評価する手法を提示することである。
- ii) 構造安全性（断面破壊あるいは疲労破壊）と使用性（走行安全）には一義的な関係があると仮定する。
- iii) 構造安全性の定量的指標は断面耐力力であり、使用性の定量的指標はたわみである。
- iv) たわみは、その原因が何であっても、損傷の進行とともに増加する。複合劣化の指標となり得る。
- v) 既設床版の評価を前提とすれば、断面耐力力とは診断時点の残存耐力力、疲労寿命は診断時点以降の余寿命と認識することができる。
- vi) 残存耐力力と疲労寿命の関係性は、比例に近いものと推定できる。
- vii) 残存耐力力とたわみの関係性については不明確であるため、本報告にて検討を行い、第3章にまとめる。

2.2.4 たわみの計測事例

(1) たわみに着目した論文

実橋においての RC 床版劣化損傷評価事例についての文献調査は、以下の団体等の文献からたわみ、ひび割れ、コンクリート強度、弾性係数・動弾性係数、塩化物イオン量、ASR 骨材、中性化深さ、など7項目の評価指標に着目し実施した（表-付 6.2.7 参照）。

文献調査を行った主な団体の文献

- i) 公益社団法人 土木学会
- ii) 公益社団法人 日本コンクリート工学会
- iii) 公益社団法人 日本材料学会
- iv) 一般財団法人 土木研究センター 等

文献調査のうち、外観調査あるいは、ひび割れ密度の調査が行われ、たわみの実測結果が記載されている文献は以下の5文献のみであった。

その記載概要は下記のとおりである。

文献 調-1：23年供用した RC 床版の損傷実態・残存疲労寿命と維持管理との関係に関する基礎的研究

- i) 撤去床版（S39年準抛床版）を用いた載荷試験結果
- ii) ひび割れ密度とたわみによる劣化度との記載はあるが変状グレードの対比記載無し

文献 調-10：FWDによる既設 RC 床版のたわみ量と床版の性状

- i) 実橋床版（S48年準抛床版）の調査結果、FWDによるたわみ測定
- ii) 床版たわみ、ひび割れ密度、損傷度ランクの記載あり

文献 調-11：FWDによる既設 RC 床版の健全度評価手法の一提案

- i) 実橋床版（S48年準抛床版）調査結果、FWDによるたわみ測定
- ii) たわみによる劣化度により床版健全度を評価

文献 調-196：FWDを用いた既設 RC 床版の健全度評価手法に関する一提案

- i) 実橋床版（S48年準抛床版）調査結果、FWDによるたわみ測定
- ii) FWD測定と静的載荷試験結果との相関性
- iii) 舗装劣化がある場合、舗装の局部変形が生じ床版下面に比べ路面のたわみ量が大きくなる場合がある
- iv) 外観目視点検結果と床版たわみ量に差異が見られる場合がある
- v) 床版たわみ量が大きい場合は床版上面の砂利化・コンクリートのブロック化、たわみ量が中程度の場合は、コンクリート上面に水平ひび割れが生じている状況、たわみ量が小さい場合、コンクリートは健全であった
- vi) 床版損傷度と先鋭度に着目した健全度の評価

文献 調-53：道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案

- i) 実橋床版（S39・S48年準抛床版）測定結果、荷重車による載荷試験
- ii) たわみによる劣化度とひび割れ密度の相関性の記載
- iii) 損傷ランクとたわみによる劣化度との関係性の記載

上記の文献 調-1、文献 調-53では、たわみによる劣化度とひび割れ密度に相関関係があることが記載されているが、対象とする床版の変状グレードとたわみによる劣化度との関連性については言及していない。文献 調-10と文献 調-11を比較した場合に、パネル別の損傷度ランクとたわみによる劣化度の関係が示されて

いるが、両者にあまり相関関係は見られないようである。

これは、文献 調-196 で細部に関して詳細な記載がされているが床版たわみが床版下面の外観目視点検で判断できない床版上面の砂利化・コンクリートのブロック化や内部の水平ひび割れ等の影響を受け、目視による床版下面の劣化度判定結果と床版たわみ量に乖離が見受けられた結果であるとしている。

2.2.5 調査文献による事例

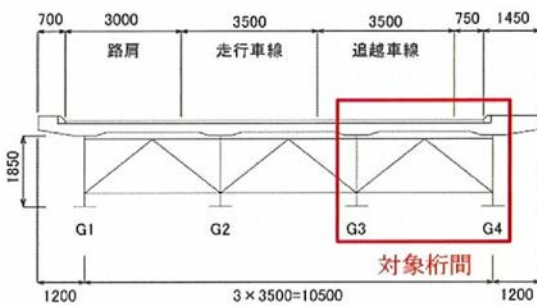
(1) FWD 試験によりたわみが計測された事例

2012 年版マニュアルによる損傷評価と文献調査をもとに、代表的な文献 調-196：「FWD を用いた既設 RC 床版の健全度評価手法に関する一提案」を取り上げ以下に示す。

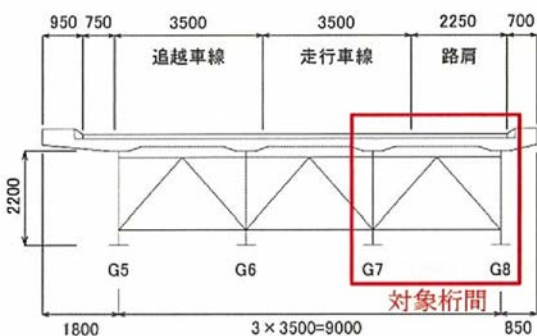
実橋の諸元および各橋梁での床版たわみ計測（たわみセンサー）位置を表-付 6.2.8 および図-付 6.2.1 に示す。なお、FWD 試験法によるたわみの計測には図-付 6.2.2 に示す試験機が使用されている。

表-付 6.2.8 対象橋梁諸元^{調-196}

橋梁名	路線名	構造形式	橋長	舗装厚	測定時気温	測定時路温	測定時期
松塚川橋	東北自動車道	鋼単純非合成鉄桁	32.9m	75mm	13℃	10.4℃	H24.11
吾妻橋	東北自動車道	PC 単純合成桁 3 連 鋼 4 径間連続非合成鉄桁	248.3m	60mm	13℃	7.8℃	H24.11



(a) 松塚川橋（下り線）



(b) 吾妻橋（上り線・鉄桁部）

図-付 6.2.1 対象橋梁^{調-196}

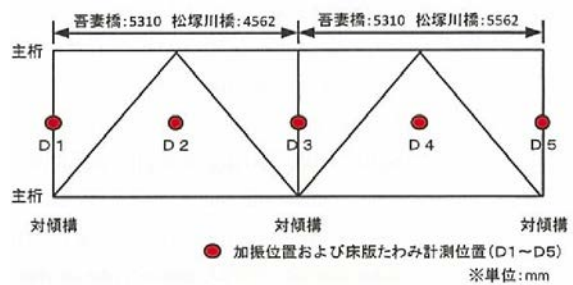
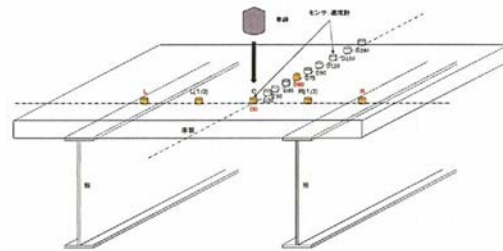


図-付 6.2.2 FWD 試験機^{調-196}

文献 調-196 では、FWD 試験時の加振位置における床版たわみ量 (G1-G2 桁間) と目視による床版劣化度判定結果の対比において図-付 6. 2. 3 に示されるように床版下面の外観目視点検結果と床版変位量に差異が認められ、パネル判定 E で床版の変位量が大きい箇所では、床版下面に著しい損傷が確認されないが、橋面舗装下の床版上面に砂利化等が生じており、目視により確認することが不可能な劣化が進行していると推察する旨の記載がある。

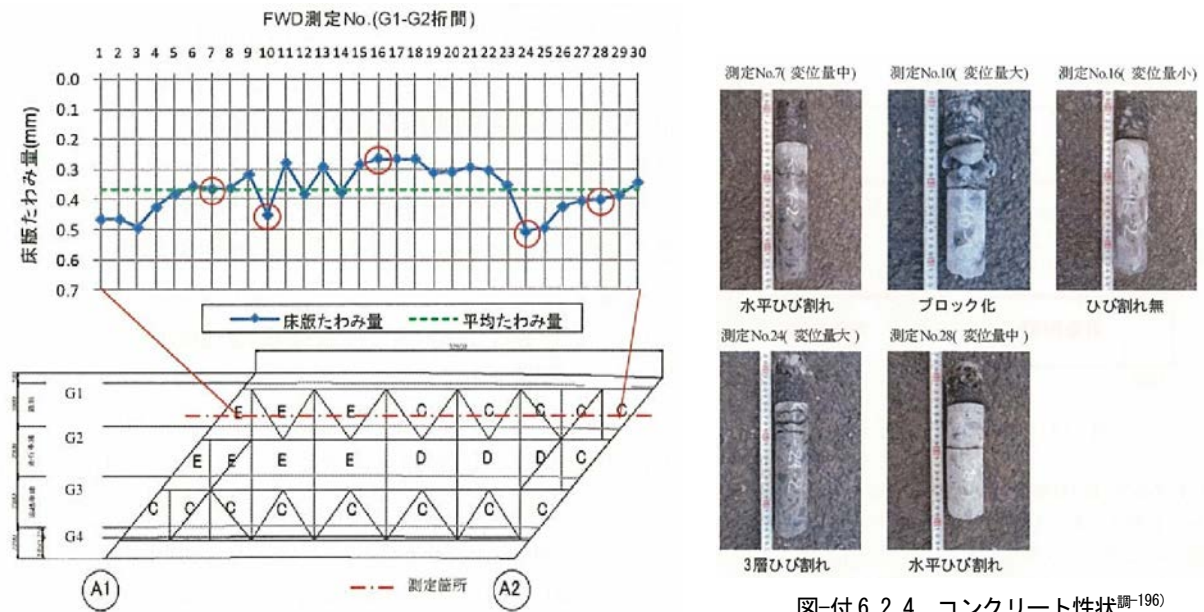


図-付 6. 2. 3 床版たわみ量と目視による劣化度判定^{調-196)}

目視では確認できない床版上面のコンクリートコア (図-付 6. 2. 4) より、たわみ量が大きいと判断された測点 (No10, 24) の床版上面は、コンクリートのブロック化や3層ひび割れといった著しい損傷を受け、中程度 (全体たわみ量の平均程度) と判断された測点 (No7, 28) ではコンクリート上面に水平ひび割れが生じている状況で、たわみ量が小さい測点 (No16) では、コンクリートに損傷が生じておらず健全であることが確認されたとあり、このように、コンクリートコア試料の劣化状況と健全度には関係性があるが、目視による床版下面の劣化度判定結果と床版たわみ量には乖離が見られる。

以上のように、本マニュアルにもとづく損傷評価と文献等による損傷した実床版とを照し合せることは、変状グレード判定とたわみ実測値・たわみによる劣化度との関係を記載している文献の数が少なく、たわみによる劣化度に影響を及ぼすと考えられる水平ひび割れの発生有無・劣化による床版断面の減少・腐食による鋼材質量の減少・コンクリートの弾性係数低下など、複合的な要因による劣化損傷が生じているため、複合劣化による構造的な性能低下の定量化は現在難しく、今後、定性的な変状グレードを定量化するためには実橋においてたわみを測定している橋梁について橋梁定期点検時の損傷度判定と劣化要因等を計測した調査結果を収集し、分析・研究する必要がある。

(2) 活荷重によるたわみが計測された事例

論文調査の範囲では、床版の活荷重によるたわみを計測した事例は少なく5編であった。文献での報告はないが、九州自動車道 M 橋では、コンクリート物性調査や非破壊検査のほかに、床版のたわみについて実測値と構造解析値 (非合成, 合成) を比較することで健全性の評価が行なわれている。たわみ計測と鉄筋応力計測に関するヒアリングの結果を以下に示す。

1) 対象橋梁

橋梁形式：鋼4径間連続非合成鈹桁橋（鋼製横梁付）・・・計測は下り線で実施

床 版：床版厚 220mm, $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$, 床版支間 3.24m

竣 工：昭和50年3月（床版打設 S49.7）

補 強：平成7年8月 上面増厚 50mm（全厚 270mm+As 舗装 50mm）

載荷試験：平成10年1月～3月

計 測：床版変位と鉄筋応力

2) 載荷試験

a) 目的

載荷試験は、橋梁に車両が載荷された際に生じる主桁のたわみおよび鉄筋応力を把握することを目的に実施されている。

静的・動的挙動を把握するため、i) 試験車載荷試験、ii) 一般車両走行時連続測定を実施

b) 計測位置

計測位置は図-付6.2.5に示すように、主桁変位を4箇所、床版変位を2箇所、主鉄筋と配力筋応力を各2箇所とした。

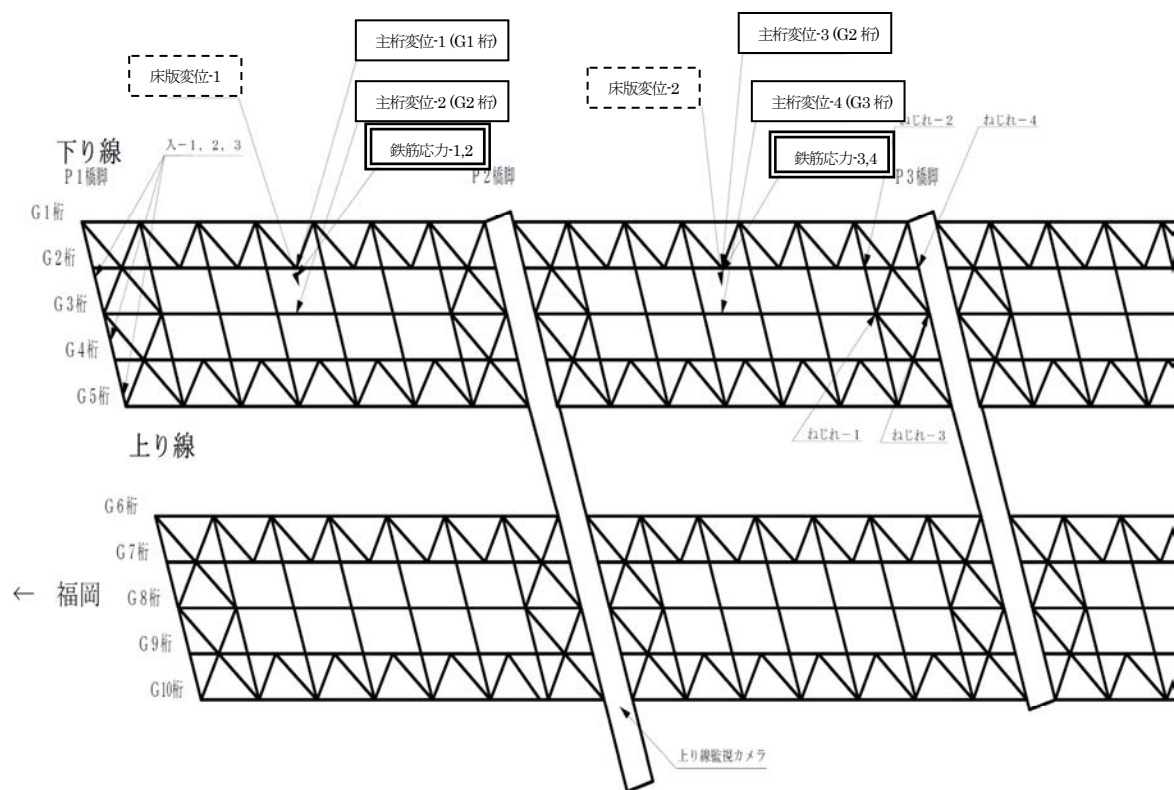


図-付6.2.5 計測位置図

c) 主桁のたわみ

実測値と構造解析値（非合成構造，合成構造）の比較を表-付 6.2.9，表-付 6.2.10 に示す。主桁のたわみ値は非合成桁よりも合成桁の方が，実測値と一致する傾向である。

表-付 6.2.9 実測値と非合成構造解析値の比較表

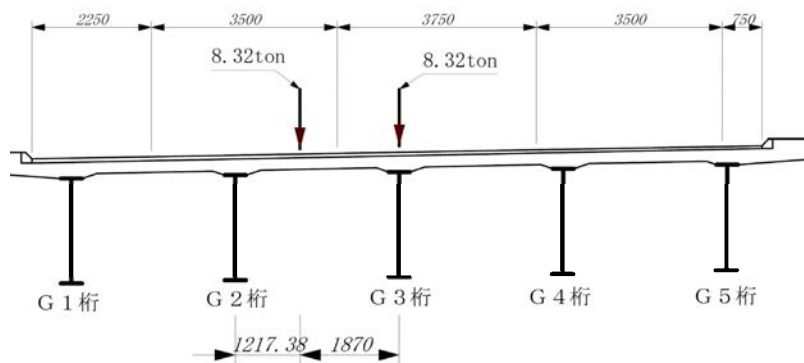
測 点		CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6	
実測値	変-1	-2.68	-2.65	-2.23	-	-	-	
	変-2	-1.70	-1.95	-2.33	-	-	-	
	変-3	-	-	-	-2.13	-2.13	-1.80	
	変-4	-	-	-	-1.30	-1.58	-1.88	
非合成構造	解析値	変-1	-8.30	-7.63	-6.12	-	-	-
		変-2	-5.09	-5.35	-5.72	-	-	-
		変-3	-	-	-	-7.72	-7.04	-5.53
		変-4	-	-	-	-4.50	-4.77	-5.15
	理論値/計測値	変-1	310%	288%	275%	-	-	-
		変-2	299%	274%	246%	-	-	-
		変-3	-	-	-	363%	331%	307%
		変-4	-	-	-	346%	303%	275%

表-付 6.2.10 実測値と合成構造解析値の比較表

測 点		CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6	
実測値	変-1	同左						
	変-2							
	変-3							
	変-4							
合成構造	解析値	変-1	-2.65	-2.50	-2.04	-	-	-
		変-2	-1.58	-1.77	-2.04	-	-	-
		変-3	-	-	-	-2.33	-2.18	-1.75
		変-4	-	-	-	-1.28	-1.51	-1.85
	理論値/計測値	変-1	99%	94%	91%	-	-	-
		変-2	93%	91%	88%	-	-	-
		変-3	-	-	-	110%	103%	97%
		変-4	-	-	-	99%	96%	99%

d) 床版のたわみ，鉄筋応力

荷重 16.64tf での，実測値と面外 FREMA 解析値（一体化，重ね梁）の比較が行なわれている。



荷重16.64tの場合の床版変位			荷重16.64tの場合の鉄筋応力		
計 算 値	一体化の 場合	Y=	0.19 mm (P1-P2)	σ_s =	47.15 kgf/cm ² (P1-P2)
			0.19 mm (P2-P3)		42.03 kgf/cm ² (P2-P3)
	重ねばり の場合	Y=	0.40 mm (P1-P2)	σ_s =	100.87 kgf/cm ² (P1-P2)
			0.40 mm (P2-P3)		89.92 kgf/cm ² (P2-P3)
実測たわみ量	Y=		0.24 mm (P1-P2)	σ_s =	170 kgf/cm ² (P1-P2)
			0.31 mm (P2-P3)		126 kgf/cm ² (P2-P3)

図-付 6.2.6 計算値と実測値

計算値と実測値を図-付 6.2.6 に示す。実測値は P1~P2 間の床版変位が 0.24mm，P2~P3 間が 0.31mm，鉄筋応力は P1~P2 間が 170kgf/cm²，P2~P3 間が 126kgf/cm²であった。

床版変位は，P1~P2 間と P2~P3 間で値に若干の違いがあるものの，両者ともに計算値での一体化と重ねばりの中間的な値となっている。鉄筋応力については，P1~P2 間，P2~P3 間共に計算値の重ねばりの値よりもさらに大きな値となっており，コンクリートの付着切れが懸念される。

また、一体化していると仮定すれば、床版変位の実測値から逆算して床版の有効厚さを求めると 23cm となり (P1~P2, P2~P3 間平均値)、床版は一体化していても 3cm の断面欠損状態にあるといえる。これは、引張側のコンクリートを無視した場合の中立軸の位置と一致する。

2.2.6 たわみによる劣化度評価例

(1) たわみによる劣化度を用いた評価

床版たわみは、床版厚、コンクリートの弾性係数、鉄筋量や、支持間隔、橋梁形式等の違いにより差が生じるため、たわみの絶対値で評価することはできない。このため、床版の変形量を定量的に評価する際には、個々の床版に関する指標として実測たわみを計算たわみに対する割合で表すたわみによる劣化度を用いることができる。たわみによる劣化度は、供用されている床版の劣化状況を表す指標として松井らにより提案された指標であり、式 (付 6.2.1) により算出される。たわみによる劣化度は、健全である場合は 0 に近く、劣化が進み使用限界状態に近づくと 1 に近い値となる。仮に活荷重たわみの実測値(W)が全断面有効(W₀)と引張無視(W_c)の間にある場合は、たわみによる劣化度は 0.5 となる。一般的に、活荷重たわみが引張側コンクリート無視の理論値に達した状態を使用限界状態と定義している。

$$D_{\delta} = \frac{W - W_0}{W_c - W_0} \dots \dots \dots (付 6.2.1) \text{ 調-53}$$

ここに、 D_{δ} : 劣化度 ($0 \leq D_{\delta} \leq 1$)

W : 測定時の実測活荷重たわみ

W_0 : コンクリートの全断面を有効と仮定した等方性板の理論たわみ

W_c : 引張側コンクリート無視の状態で直交異方性を考慮した理論たわみ

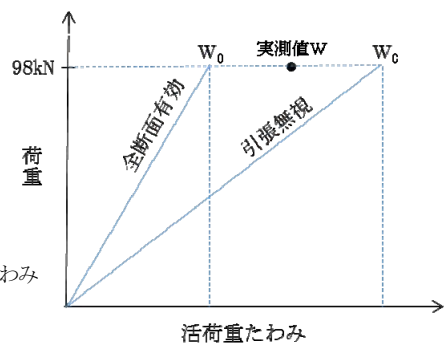


図-付 6.2.7 たわみによる劣化度の概念^{調-53)}

また、図-付 6.2.8 に示すように松井らは RC 床版の活荷重たわみ、ひび割れ密度の増加傾向が荷重の走行回数に対して指数関数的に増加することを考慮して RC 床版の損傷ランクを 5 段階にランク付けするとともに、時間 (竣工後の経年) を考慮に入れた対策区分判定の試案を提案している。この図は、既往の文献調査において、たわみによる劣化度と損傷度の関係が示されている唯一の試案であった。

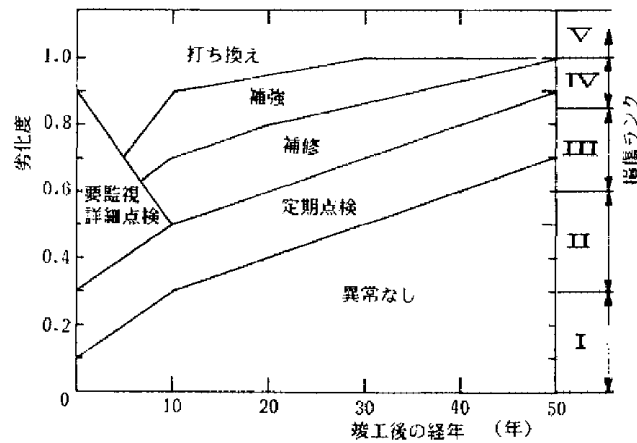


図-付 6.2.8 ひびわれ床版の損傷ランクと対策の区分^{調-53)}

(2) 実橋での RC 床版調査事例

松井らは表-付 6.2.11 に示すたわみによる劣化度の検証を 13 橋で行い、図-付 6.2.9 に示す結果を報告している。縦軸のたわみによる劣化度は、現場での载荷試験で測定した実測たわみを基にしている。横軸のひび割れ密度の測定は、裸眼で確認できるすべてのひび割れを対象にして格子密度法で求めている。たわみによる劣化度とひび割れ密度には、良い相関関係が認められ、たわみによる劣化度 1.0 までは線形関係を有しており、そのときのひび割れ密度は約 10m/m² である。それ以降、ひび割れ密度は停留するが、たわみによる劣化度は急激に増大する。この段階になると、ひび割れの発生・進展が停留し、ひび割れの貫通、ひび割れ面のスリット化や角落ちが顕著となり、版としての連続性が失われるためにたわみが増大する。この両者の関係には、それぞれ使用限界が設定されているので、有効な評価方法となる。たわみによる劣化度の実橋への適用では、载荷試験によるたわみの測定が必要である。

表-付 6.2.11 実橋床版の劣化度による判定結果^{調-53)}

橋 名 - パネル	載荷 ケース	たわみによる判定			D δ	ひびわれ密度 Cd (#/m ²)
		W(mm)	Wc(mm)	Wo(mm)		
Sho-橋		242	237	50	1.03	9.9
Kam-橋	No.1	89	135	43	0.50	4.5
	No.2	80	113	36	0.57	5.4
	No.3	76	135	43	0.36	4.0
Ni-A-橋		77			0.30	3.7
	B-橋	90	110	63	0.57	6.4
	C-橋	108			0.96	9.8
Han-橋	No.1	42	80	22	0.34	2.2*
	No.2	61			0.67	3.6*
Han-橋	No.1	234	287	99	0.72	7.4
	No.2	195	285	98	0.52	5.1
Yam-A-橋	1	51	77	29	0.46	
	2	52	76	28	0.50	5.3
	3	51	78	28	0.46	
Yam-B-橋	1	35	57	28	0.24	2.7
	2	38	65	31	0.21	
Yam-C-橋 (トラス)	1	66	77	34	0.74	6.2
	3	69	80	34	0.76	
Tam-橋	No.1	175	169	71	1.06	10.5
	No.2	115	104	48	1.20	9.0
Tej-橋	No.1	82	177	40	0.31	3.6
	No.2	60	170	39	0.16	1.6
Mae-橋 (旧)	No.1	190	151	62	1.44	10.4
	No.2	102	121	48	0.74	7.6
	No.3	235	147	60	2.01	10.4
	No.4	99**	149	61	0.43	7.1
Mae-橋 (新)	No.1	9	26	10	0	0.5
	No.2	7	21	8	0	0.6
	No.3	8	17	7	0	0.4
	No.4	10	23	9	0	0.2
Shi-橋***	No.1	64	76	23	0.77	9.3
	*** No.2	52	77	23	0.54	5.8
	*** No.3	58	71	17	0.76	5.1
	*** No.4	34	73	17	0.30	4.9
Tak-橋	No.1	58	121	26	0.34	3.6
	No.2	93	140	26	0.59	5.2
	No.3	100	160	30	0.54	6.2
	No.4	39	89	27	0.19	3.0
	No.5	37	92	26	0.16	1.4
	No.6	28	62	17	0.24	1.5
	No.7	89	119	41	0.62	5.9

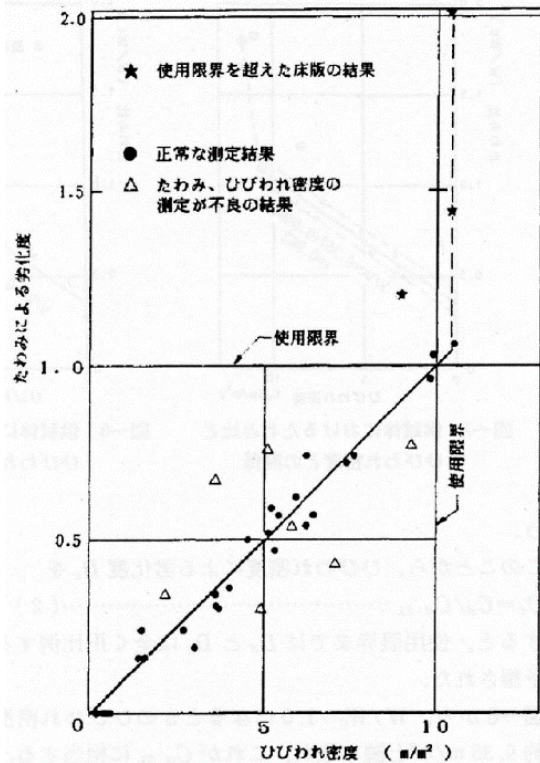


図-付 6.2.9 実橋床版における判定結果^{調-53)}

(3) FWD によるたわみの測定事例

塩害と凍害の複合劣化の影響により、RC 床版上面の劣化が顕在化している橋梁について、舗装損傷の判定に用いる FWD によるたわみ測定により、図-付 6.2.10 の概念図に示すように RC 床版の健全性を評価する手法が試みられている。この手法では、床版下面からの目視点検による劣化度判定結果とポットホールの発生状況等からは判定が困難な床版上面の損傷を FWD による健全度評価手法により、ある程度推定することが可能であることが示されている。

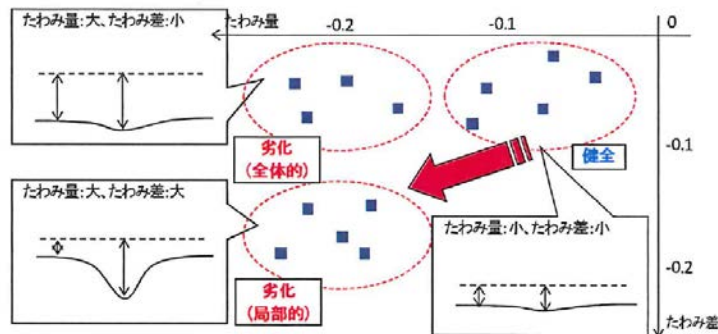


図-付 6.2.10 たわみによる健全度評価の概念^{調-196)}

2.2.7 複合劣化の事例

付録-1 の道路橋床版の劣化損傷事例の 12 事例について、劣化要因と対策等に目して再整理したものを表-付 6.2.12 に示す。12 事例中の 8 事例が床版の打ち替えもしくは取り替えが実施されており、比較的劣化が進展した事例であると考えられる。圧縮強度試験や中性化深さ試験などの詳細調査が行なわれているが、水平ひび割れや床版の抜け落ちが生じた床版は、取り替えが実施される傾向にある。なお、この中には、床版のたわみを劣化判定の指標に用いた事例は見られない。

表-付 6.2.12 事例調査表の事例

	地域	劣化要因	床版下面のひび割れ状況	劣化の判定に用いた調査方法	対策が必要となった理由	対策
1	北海道	主に凍害	ひび割れ有り	橋梁点検	床版の抜け落ち	床版部分打ち替え
2	北海道	主に凍害	ひび割れ有り	橋梁点検	白色析出物、かぶり厚の著しい不足	床版全面打ち替え
3	北海道	凍害	ひび割れ有り	橋梁点検、コンクリートコア採取	—	不明
4	兵庫県	主に塩害	ひび割れ、白色析出物有り	赤外線法、衝撃弾性波法	海砂の使用による塩害	床版架け替え
5	長野県	塩害と凍害	ひび割れ、白色析出物有り	不明	不明	架け替え
6	岐阜県	ASR と塩害	格子状のひび割れと白色析出物	塩分量、ASR	多数の水平ひび割れ	架け替え
7, 8	富山県	塩害	白色析出物を伴う二方向ひび割れ	塩分量、中性化、ASR、圧縮強度	路面の変状が頻発し、床版の剛性低下（水平）が見られた	プレキャスト床版への取り替え
9	福岡県	主に塩害	ひび割れ有り	舗装の開削調査	床版上面の浮きはく離、凍結防止剤の侵入	応急復旧として部分補修
10	石川県	主に ASR と塩害	ひび割れ、白色析出物有り	鉄筋腐食度、中性化、塩分量、圧縮強度、ASR	床版のひび割れと砂利化、舗装の変状	上面のかぶりコンクリートを撤去し断面修復
11	長野県	主に凍害と ASR	不明（下面鋼板接着）	中性化、塩分量、圧縮強度、ASR	鋼板接着の抜け落ち	橋の架け替え
12	不明	主に凍害と ASR	漏水箇所へ亀甲状のひび割れ、白色析出物	コア採取、骨材品質調査、塩分量、圧縮強度、ASR	床版の抜け落ち	床版の取り替え

2.3 定量化にむけた課題

第2章では、健全性定量化の指標としてたわみを選出し、既往の調査研究結果でのたわみの位置づけについて検討を行った。たわみについては、直接計測の実績のほか近年の非接触センサの技術の発展も期待されること、また間接的ではあるが振動計測等からも求められることから、床版の健全性を限界状態に基づき定量的に、評価する指標になり得るものと判断したためである。

その結果、実橋梁床版での目視によるグレーディングとたわみの計測について検討を行った事例は少なく、たわみが定量化指標として適切かどうかについて検証は十分にはできず、材料劣化をたわみという構造性能の指標に結び付けることが、課題として残った。また、断面耐荷力（あるいは疲労耐力）とたわみ（剛性）の関係は不明な点も多いことが、課題として再認識された。

以上より、第3章にて、床版に複合劣化が生じた状態を構造解析のパラメータとして設定し、実験式、理論、FEMにより構造解析を行ってそれぞれのたわみ、耐荷力、疲労寿命を算出し、相互の関係を検討することとした。

【調査文献】 調査の対象とした文献を以下に示す。

- 調-1) 石井孝男, 谷倉泉, 庄中憲, 國原博司, 松井繁之: 23年供用したRC床版の損傷実態・残存疲労寿命と維持管理との関係に関する基礎的研究, 土木学会論文集 I 巻 537/I-35, pp.155-166, 1996.4
- 調-2) 関口幹夫, 橋吉宏: 24年供用した鋼コンクリート合成床版の重錘落下たわみ法による評価, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.1123-1133, 2012.
- 調-3) 石崎茂, 松井繁之: 2方向支持されたRC床版の劣化機構と耐久性評価法に関する研究, 土木学会論文集 No.738/1-64, pp. 257-270, 2003.7
- 調-4) 増田圭佑, 河内令子, 出雲淳一: 30年以上供用したRC中空床版の損傷度評価について, 土木学会第59回年次学術講演会(平成16年9月)
- 調-5) 高野真希子, 阿部忠, 木田哲量, 小森篤也, 児玉孝喜, 小川洋二: 47年供用したRC床版のCFSS下面補強およびSFRC上面増厚補強による耐疲労性, 構造工学論文集, Vol. 57A, 2011.3
- 調-6) 樋口匡, 大島俊之, 三上修一, 山崎智之, 佐藤誠, 竹田俊明: BMSに用いるRC床版の疲労劣化予測手法について, 土木学会北海道支部論文報告集第60号, 1-3
- 調-7) 澤野利章, 阿部忠, 徐銘謙, 木田哲量, 西林聖武: CFS補強RC床版の補強効果および押抜きせん断耐荷力評価式, 日本材料学会, 材料 Vol. 56 No.10, pp.977-984, 2007
- 調-8) 阿部忠, 木田哲量, 元燦豪, 小森篤也: CFS補強RC床版の輪荷重走行疲労実験における耐疲労性の評価および維持管理, セメント・コンクリート論文集, Vol. 65 No. 1, pp. 493-500, 2011
- 調-9) 小森篤也, 小林朗, 阿部忠, 元燦豪: FRPを用いた道路橋RC床版補強の現状と長寿命化対策, 第7回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.19-24, 2012
- 調-10) 早坂洋平, 山口恭平, 曾田信雄, 大西弘志: FWDによる既設RC床版のたわみ量と床版の性状, 土木学会第69回年次学術講演会(平成26年9月) I-022
- 調-11) 山口恭平, 早坂洋平, 曾田信雄, 大西弘志: FWDによる既設RC床版の健全度評価手法の一提案, 土木学会第69回年次学術講演会(平成26年9月) I-023
- 調-12) 関口幹夫: FWDによる床版たわみ測定手法の検討, 土木学会第58回年次学術講演会(平成15年9月) CS6-051
- 調-13) 関口幹夫, 國府勝郎: FWDによる床版の健全度評価手法の検討, 構造工学論文集 Vol.50A, 2004年3月, 697-706
- 調-14) 富田義紀, 原田隆郎, 横山功一: GAの階層化による橋梁の維持管理計画最適化モデルの提案, 土木学会第56回年次学術講演会(平成13年10月)
- 調-15) 関口幹夫, 佐々木俊平: IISによる各種床版の健全度の評価, 平19. 都土木技術センター年報
- 調-16) 前田研一, 作田孝行, 町田文孝, 橋吉宏, 富澤光一郎: RC床版の劣化部調査における非破壊検査法における適用, 川田技報 Vol.8, pp.26-35, 1989
- 調-17) 小田憲司, 山根富徳, 大田司郎, 竹村一郎: RC構造物における変状発生の頻度を考慮した点検方法の提案, 土木学会第63回年次学術講演会(平成20年9月) 6-060
- 調-18) 松井繁之, Ahmed EL-HAKIM: RC床版のひびわれの開閉量による輪荷重の測定に関する研究, 構造工学論文集 Vol35A, pp.407-418, 1989
- 調-19) 武田昭彦, 遠藤武平: RC床版の繰り返し劣化と水の影響, セメント・コンクリート No.433, pp24-29, 1983.3

- 調-20) 白石成人, 古田均, 馬野元秀, 川上宏一郎: RC 床版の耐用性評価システムに関する基礎的研究, 土木学会論文集 I 巻 386/I-8, pp.285 - 291, 1987.10
- 調-21) 福田泰樹, 貝戸清之, 橋爪謙治, 横山和昭: RC 床版の劣化速度に関する統計的分析に基づく補修優先順位の決定, 土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年 9 月)VI-215
- 調-22) 内山典之, 西山真, 平野廣和, 佐藤尚次: RC 床版の劣化予測を考慮した橋梁維持管理システムの構築, 土木学会応用力学論文集 Vol.7, pp.1141-1148, 2004.8
- 調-23) 樋口匡, 大島俊之, 三上修一, 山崎智之, 佐藤誠, 竹田俊明: RC 床版ひび割れの劣化因子の分析と劣化予測の検討, 土木学会北海道支部論文報告集 Vol.61, pp88-91, 2005
- 調-24) 樺山好幸, 稲垣太浩, 江口洋一, 鏡原宏志, 小柳治: RC 床版補強工法におけるセメント系床版下面充填材の研究, 土木学会論文集 No.567/ VI-35, pp.103-115, 1997.6
- 調-25) 幸左賢二, 北原秀樹, 小郷政弘, 荒木茂: RC 中空床版橋の損傷要因分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2003
- 調-26) 宮川英明, 佐々木武美: SFRC を用いた RC 床版の補修事例: 国道 16 号天台大橋(下り) (特集 道路床版の維持・強化: 長期耐久性の確保へ)--(施工事例), 土木施工 55(6), PP.106-109, 2014.6
- 調-27) 阿部忠, 高野真希子, 木田哲量, 児玉孝喜: SFRC 上面増厚補強 RC 床版の耐疲労性の評価および維持管理, セメントコンクリート論文集 Vol. 65 No. 1, pp.485-492, 2011
- 調-28) 井之上賢一, 三上浩, 今田文男, 廣瀬清泰, 河野一資, 堀川都志雄: アラミド繊維シートによる補強および再補強時での余寿命推定, 土木学会第 69 回年次学術講演会(平成 26 年 9 月) I -015
- 調-29) 伊戸康清, 島田守, 大田孝二, 五島孝行, 柴田辰正: アルカリシリカ反応で損傷した鋼道路橋 RC 床版の調査, 第 1 回北陸道路保全会議, pp.63-66, 2013.
- 調-30) 児島孝之, 杉江功, 丸山悟, 村山康雄: アルカリ骨材反応による RC 床版の損傷と補修, コンクリート工学 Vol.32 No.2, pp.24-36, 1994.
- 調-31) 岸紗百合, 森川英典: アンケート調査に基づく塩害劣化 RC 橋の健全性評価, 土木学会第 60 回年次学術講演会 (平成 17 年 9 月) 5-028
- 調-32) 松井繁之: 移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文報告集 9-2, pp.627-632, 1987
- 調-33) 丸屋, 堀口ほか: ウェーブレット変換を用いた床版コンクリートのひび割れ調査の実用化, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, 2007
- 調-34) 子田, 古山ほか: 塩害を受けた RC 床版の劣化性状と耐荷性状に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2008
- 調-35) 親泊ほか: 沖縄県における RC 床版の耐久性調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp583-588, 2000
- 調-36) 森寛晃, 久我龍一郎, 小川彰一, 久保善司: 寒冷地で供用された RC 床版の劣化要因推定, コンクリート工学論文集 第 24 巻第 1 号 2013 年 1 月
- 調-37) 出戸秀明, 岩崎正二, 春山俊仁, 白川克幸: 既設鋼桁橋の桁理論に基づく簡易劣化診断について, 土木学会東北支部技術研究発表会 (平成 20 年度) I -26
- 調-38) 既設道路橋コンクリート床版の耐久性評価に関する実証的研究, 寒地土木研究所
- 調-39) 大島俊之, 三上修一, 山崎智之, 丹波郁恵: 橋梁健全度評価に用いる評価方法の検討と影響要因の解析, 土木学会論文集 No.675/ I -55, 201-217, 2001.4
- 調-40) 室井智文, 窪田憲司, 紫桃孝一郎, 稲葉尚文, 横山和昭, 山根立行: 橋梁マネジメントシステムにおける劣化度評価手法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.51A, 2005 年 3 月
- 調-41) 川村: 現場技術者のための ASR 対策ノート, 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋編, pp.44-47, 星雲社, 2010.
- 調-42) 吉沢, 西村ほか: コンクリート構造物への非破壊検査の適用に関する基礎研究(1)-RC 床版を用いた静的荷重損傷検出の比較-, 生産研究 49 巻 4 号 (1997.4)
- 調-43) 山田岳史, 沼田克, 岡本安弘, 松井繁之: コンクリート厚が合成床版の疲労耐久性に及ぼす影響, 土木学会第 59 回年次学術講演会 (平成 16 年 9 月) CS8-005
- 調-44) 伊藤, 松井ほか: 下面増厚工法によって補強された RC 床版の経年劣化調査, 第 2 回床版シンポジウム, pp75-82, 2000
- 調-45) 後藤, 長谷ほか: 樹脂注入補修を行った上面増厚床版の追跡調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp1471-1476, 2011
- 調-46) 国土交通省: 床版の損傷事例,
- 調-47) 森田英明, 大野敦弘: スケルカ技術を活用した橋梁床版劣化診断システムの開発と適用, 土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年度)V-156
- 調-48) 加藤静雄, 熊谷清貴, 中馬勝己, 小出博, 齊藤雅信: 赤外線サーモグラフィ法による床版上面の調査手法について, 土木学会第 65 回年次学術講演会 (平成 22 年 9 月) VI-165
- 調-49) 小野, 三田村ほか: 積雪寒冷地における RC 床版の疲労耐久性向上について, 構造工学論文集 Vol55A
- 調-50) 積雪寒冷地における土木施設のマネジメント手法に関する研究, 寒地土木研究所

- 調-51) 橋：鉄筋コンクリート床版の損傷事例と調査，橋梁と基礎，2014，Vol.48，pp53-59
- 調-52) 前田，松井ほか：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式，土木学会論文集 348 号 1984.8
- 調-53) 松井・前田：道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案，土木学会論文集 No374 1986 年 10 月
- 調-54) 市川，後藤ほか：内部に水平ひび割れを有する道路橋床版の補修・補強とその効果，第 7 回床版シンポジウム，pp111-117，2012
- 調-55) 志水ほか：名古屋高速大規模舗装修繕工事における床版内部事前調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp1447-1452，2013
- 調-56) 三上市蔵，田中成典，小森宏昭，安藤黄太：日本道路公団の損傷度判定法に基づく道路橋 RC 床版の補修工法選定のためのエキスパート・システム，土木学会第 42 回年次学術講演会(昭和 62 年) I 482-483
- 調-57) 林田宏，田口史雄，嶋田久俊，蓮井昭則：非破壊試験によるコンクリート及び構造物の健全度評価手法について，北海道開発土木研究所月報 No633 2006 年 2 月
- 調-58) 阿部忠，木田哲量，勝呂翔平，伊藤清志：ひび割れ損傷を受けた RC 床版の一次・二次補強法における破壊状況および耐疲労性の評価，セメント・コンクリート論文集 Vol. 66 (2012) No. 1 p. 560-567
- 調-59) 阿部忠，水口和彦，元燦豪，川井豊：疲労損傷を受けた RC 床版の一次・二次補強法における耐疲労性の評価，構造工学論文集 v o 1.59A (2013 年 3 月)
- 調-60) 石川裕一，村上裕貴，青山實伸，畔柳昌己：疲労と塩害劣化した鋼橋床版の鉄筋腐食の実態と自然電位による評価，土木学会第 65 回年次学術講演会 (平成 22 年 9 月) I -310
- 調-61) 森山，橋：北陸自動車道における床版の損傷事例と対策，土木施工 2014，No.6，pp82-85
- 調-62) 有馬，石川ほか：北陸地域における道路鋼橋 RC 床版の健全度評価法に関する提案，第 7 回床版シンポジウム，pp131-136，2012
- 調-63) 稲葉，横山ほか：増厚された RC 床版の損傷状態の調査および評価について，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp487-492，2006
- 調-64) 古田均：ライフサイクルコストを考慮した橋梁群の RC 床版の最適維持管理計画支援システムに関する研究 (特集 信頼性工学)，材料 47 巻 12 号
- 調-65) 貝戸清之，阿部雅人，藤野陽三，本村均，金子謙一郎：レーザー常時微動計測に基づく RC 床版の振動モード形の同定，土木学会第 55 回年次学術講演会 (平成 12 年 9 月) CS-75
- 調-66) 毛，江上ほか：圧縮側補強による RC 床版のせん断強度への影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，2007
- 調-67) 反田，木田ほか：移動荷重が作用する CFS 補強 RC 床版の補強効果と力学特性に関する研究，
- 調-68) 藤山ほか：移動荷重と水分の影響を同時に受ける RC 部材の疲労破壊特性(疲労・衝撃)，コンクリート工学年次論文集 30(3)，883-888，2008-07-30
- 調-69) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について(スラブ・疲労)，コンクリート工学年次論文報告集 9(2)，627-632，1987-06-12
- 調-70) 古田均，渡邊英一，賀建紅：遺伝的アルゴリズムとニューラルネットワークを用いた RC 床版の耐用性評価における知識獲得支援手法，土木学会論文集 I 巻 537/I-35 号 145-153 頁 1996 年 4 月
- 調-71) 浜田純夫，毛明傑，田中宏明，楊秋寧：引張側かぶり厚さの大きい RC 床版の押抜きせん断強度に関する研究，土木学会論文集 802 巻 -号 255-260 頁 2005 年
- 調-72) 出水享，松田浩，藤岡靖，大石義成，高橋洋一：遠隔非接触振動計測装置を用いた RC 床版の劣化検知に関する研究，土木学会第 69 回年次学術講演会(平成 26 年 9 月) I -026
- 調-73) 子田，古山ほか：塩害を受けた RC 床版の劣化性状と耐荷性状に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.813-818，2008.
- 調-74) 関口，笹井ほか：塩害を受けた RC 床版の劣化度調査と保全工事，
- 調-75) 岡，花井，木村：塩害を受けた RC 床版橋の載荷試験 (特集 道路橋保全の新たな取組み--臨床研究を中心として)，土木技術資料 53(2)，10-13，2011-02
- 調-76) 市川，長井ほか：塩害劣化した RC 床版の耐力に関する実験的研究，
- 調-77) 石澤，西川ほか：横桁のたわみを考慮した縦置き床版の断面力と設計例，土木学会第 63 回年次学術講演会(平成 20 年 9 月)
- 調-78) 横山和昭，佐藤貢一，日野伸一：下面増厚した RC 床版のせん断補強効果と疲労耐久性の評価に関する実験的研究，土木学会論文集A Vol. 63 (2007) No. 4
- 調-79) 今西直人，木虎久人，山田泰行，國川正勝：加振機を用いた床版剛性の同定方法についての実験的検討，土木学会第 58 回年次学術講演会 (平成 15 年 9 月) CS1-019
- 調-80) 西村，木田ほか：荷重変動を想定した走行振動荷重が及ぼす RC 床版の動的影響，土木学会第 59 回年次学術講演会 (平成 16 年 9 月)
- 調-81) 伊藤清志：乾燥・湿潤状態で接着剤を塗布した SFRC 上面増厚補強法の耐疲労性の評価，構造工学論文集 Vol. 58A(2012 年 3 月)
- 調-82) 森，久我，小川，久保：寒冷地で供用された RC 床版の劣化要因推定 24_1，コンクリート工学論文集 第 24 巻 第 1 号 2013 年 1 月

- 調-83) 赤代恵司, 三田村浩, 坂口淳一, 岸徳光: 丸鋼を用いた RC 床版の疲労耐久性 (その 1. 輪荷重走行試験による疲労耐久性の検討), 土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年度) I -011
- 調-84) 内田ほか: 既設 RC 床版の健全度評価手法に関する実験的検討, 土木学会第 55 回年次学術講演会 (平成 12 年 9 月)
- 調-85) 福永, 松井: 既設 RC 床版の劣化度評価について, 土木学会第 6 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 2008.
- 調-86) 横山和昭, 上東泰, 野島昭二, 土井達朗: 既設橋梁の健全度評価に関する基礎的研究, 土木学会第 57 回年次学術講演会 (平成 14 年 9 月) V-264
- 調-87) 前川, 藤山ほか: 擬似クラック法に基づく疲労応答解析と既設 RC 床版の余寿命推定,
- 調-88) 橋吉宏, 関口幹夫, 林暢彦, 野呂直以: 供用後 24 年を経過した鋼・コンクリート合成床版の衝撃加振によるたわみ計測, 土木学会第 65 回年次学術講演会(平成 22 年度) I -291
- 調-89) 齋木佑介, 内藤英樹, 平岡拓朗, 鈴木基行: 共鳴振動試験によるコンクリート内部の空隙の検出, 土木学会第 65 回年次学術講演会(平成 22 年度)V-236
- 調-90) 田中, 村越: 橋面アスファルト舗装の変状と RC 床版の疲労, 土木技術資料-53-2 (2011)
- 調-91) 武田三弘, 加藤潔, 光岡達之, 早坂洋平: 橋梁コンクリート床版の新たな損傷評価方法に関する検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会(平成 22 年度)V-359
- 調-92) 藤島政記, 笠井利貴, 副島良憲: 橋梁の健全性評価に関する一考察, 土木学会第 63 回年次学術講演会 (平成 20 年 9 月) 6-066
- 調-93) 後藤昭彦, 大澤誠司: 橋梁マネジメントシステム (NEXCO-BMS) を活用した維持管理計画検討, 土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年度)VI-209
- 調-94) 福田慎治, 神谷誠, 堀口賢一, 小山哲: 橋梁床版ひび割れ調査へのウェーブレット変換画像解析技術の適用, 土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年度)VI-241
- 調-95) 中津功一郎, 野村泰稔, 古田均, 足立渉, 服部洋: 橋梁損傷度判定における複合特徴選択のためのアンサンブルシステムの構築, 応用力学論文集 Vol.13, pp.957-964, 2010 年 8 月, 957-964
- 調-96) 菅田良和, 桂謙吾, 藤本圭太郎, 桜井宏司: 橋梁定期点検における進行性評価に関する一提案, 土木学会第 65 回年次学術講演会(平成 22 年度)VI-179
- 調-97) 樋口匡, 大島俊之, 佐藤誠, 三上修一, 工藤英雄, 山崎智之: 橋梁点検データによる RC 床版の劣化予測手法の検討, 土木学会第 59 回年次学術講演会 (平成 16 年 9 月) I -138
- 調-98) 田中, 村越: 繰返し移動荷重を受ける鋼板接着補強された鉄筋コンクリート床版の挙動 16-07, 構造工学論文集 Vol.59A (2013 年 3 月)
- 調-99) 長屋, 村越, 田中: 繰返し移動荷重を受ける鉄筋コンクリート床版のひび割れ挙動に関する検討(疲労・衝撃), コンクリート工学年次論文集 30(3), 907-912, 2008-07-30
- 調-100) 沼田学, 藤井堅, 中村秀治: 個々の橋梁の強度劣化曲線に基づく橋梁アセットマネジメントの試み, 土木学会第 63 回年次学術講演会(平成 20 年 9 月) I -059
- 調-101) 島崎潤, 重石光弘, 伊藤博章, 伊藤剛: 鋼・コンクリート合成床版の繰返し載荷試験における AE 発生挙動, 土木学会第 59 回年次学術講演会 (平成 16 年 9 月) 5-089
- 調-102) 籠池利弘, 貴志友基, 山根彰, 明石良男: 鋼 3 径間連続トラス橋コンクリート床版下面の剥落調査, 土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年度)
- 調-103) 山野達也, 鷹羽新二, 鎌田敏郎, 内田慎哉: 鋼コンクリート合成床版モデルを用いた各種非破壊試験法の欠陥検出性能の評価, 土木学会第 65 回年次学術講演会(平成 22 年度)V-235
- 調-104) 松田哲夫, 西山晶造, 松井繁之, 元井邦彦, 村山康雄, 薄井王尚: 鋼橋 RC 床版のモニタリングによる安全管理と健全度評価, 土木学会第 64 回年次学術講演会(平成 21 年 9 月) I -623
- 調-105) 堀川都志雄, 加藤暢彦, 吉川紀, 山口良弘, 園田恵一郎: 鋼板接着工法で補強されたひび割れ損傷 RC 床版の耐久性について, 構造工学論文集, Vol.44A, 1998 年 3 月, 1083-1094
- 調-106) 松井繁之, 栗田章光, 中井博, 黒山泰弘: 鋼板接着工法により補強した RC 床版の疲労性状, 合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 1986 年 9 月, 247-254
- 調-107) 前川, 久利, 佐々木, 飛ヶ谷, 青木: 鋼板接着補強 RC 床版の維持管理に関する検討, 第 7 回道路橋床版シンポジウム論文報告集
- 調-108) 玉越, 石尾, 強瀬: 鋼板接着補強した道路橋コンクリート床版の劣化診断手法, 土木技術資料 56-7 (2014)
- 調-109) 平塚慶達, 前川宏一: 鋼板接着補強工法における鋼板の浮き位置が床版の疲労寿命に与える影響, 土木学会第 69 回年次学術講演会(平成 26 年 9 月) I -014
- 調-110) 堀川都志雄: 合成桁橋 RC 床版のひび割れ損傷過程-24 年間供用された実橋床版の輪荷重装置による走行実験, 土木学会論文集 620 巻
- 調-111) 小林, 鹿野ほか: 山間寒冷地における RC 床版の ASR と凍害による複合劣化の事例とその検証実験, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造) 70(3), 320-335, 2014
- 調-112) 浜田純夫, 松尾栄治, 藤岡靖: 実験結果に基づく RC 床版の押抜きせん断強度算定式の安全係数, 土木学会論文集 V 676 巻 51 号 51-63 頁 2001 年 5 月
- 調-113) 貝戸清行, 青木一也, 小林潔司: 実践的アセットマネジメントと第 2 世代研究への展望, 土木技術者実践論文集,

Vol.1, 67-82, 2010.3

- 調-114) 前田幸雄, 松井繁之: 実物大鋼格子床版の RC 床版との比較における板特性と耐荷力に関する実験的研究, 土木学会論文集 -巻 181 号 1-14 頁 1970 年 9 月
- 調-115) 阿部長門, 関口幹夫: 小型 FWD による道路橋鉄筋コンクリート床版健全度評価への適用性の検討, 土木学会第 59 回年次学術講演会(平成 16 年 9 月) 5-620
- 調-116) 柏宏樹, 大竹雄介, 内藤英樹, 中野聡, 木皿尚宏, 鈴木基行: 小型起振機による実道路橋の起振実験, 土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年度) I -315
- 調-117) 大田孝二: 床版最前線(第 1 回)道路橋 RC 床版の設計と損傷, 橋梁と基礎 47 (11)
- 調-118) 青木孝憲, 國府勝郎, 関口幹夫: 衝撃荷重によるたわみを用いた道路橋 RC 床版の健全度評価方法, 土木学会第 60 回年次学術講演会(平成 17 年 9 月) CS10-004
- 調-119) 亀田浩昭, 横山広, 関口幹夫, 堀川都志雄: 衝撃荷重載荷試験による床版剛性の評価, 土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年度) I -016
- 調-120) 長谷, 和田, 後藤: 上面増厚床版における劣化要因の検証と耐久性向上対策の検討, コンクリート工学 Vol.50, No.3, 2012.3
- 調-121) 並河伸宜, 田原和久, 横山正樹, 鈴木啓司: 診断結果(病気の特定結果)を用いた橋りょうの健全度評価に関する検討, 土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年度)VI-206
- 調-122) 中村, 清水ほか: 積雪寒冷地における RC 床版の損傷事例, 第 7 回床版シンポジウム, pp137-142, 2012
- 調-123) 安達, 三田村ほか: 積雪寒冷地における RC 床版の耐久性向上に関する研究, 平成 17 年度 土木学会北海道支部論文報告集 第 62 号
- 調-124) 小野, 三田村, 林川, 松井: 積雪寒冷地における RC 床版の疲労耐久性向上について, 構造工学論文集 Vol.55A, 2009.3
- 調-125) 三田村浩, 佐藤京, 西弘明: 積雪寒冷地における既設 RC 床版の延命手法について, 寒地土木研究所月報 寒地土木研究所月報 (676), 10-18, 2009-09
- 調-126) 三田村, 佐藤, 西, 渡辺: 積雪寒冷地における既設 RC 床版の延命手法について 56A_1239, 構造工学論文集 Vol.56A (2010 年 3 月)
- 調-127) 西, 今野ほか: 積雪寒冷地における既設 RC 床版の損傷対策技術に関する研究,
- 調-128) 須志田, 林川, 森田: 積雪寒冷地における床版調査方法の高度化に関する一考察, 鋼構造年次論文報告集 第 21 巻 (2013 年 11 月)
- 調-129) 角間, 表, 澤松: 積雪寒冷地における道路橋 RC 床版の上面補修方法の検討, 寒地土木研究所月報 (714), 2-11, 2012-11
- 調-130) 出戸, 新銀, 鈴木ほか: 積雪寒冷地の塩化物供給を考慮した RC 床版の寿命診断, 東北地域災害科学研究 43, 7-12, 2007-03
- 調-131) 新根武, 鈴木大輔, 出戸秀明, 岩崎正二: 積雪寒冷地の橋梁コンクリート床版の余寿命診断について, 土木学会東北支部技術研究発表会(平成 18 年度) I -23
- 調-132) 阿部忠: 走行荷重が作用する UFC 埋設型枠 RC 床版の最大耐荷力および耐久性に関する研究, 材料 Vol. 58 (2009) No. 7
- 調-133) 水口和彦: 走行振動荷重による応力履歴と塩害・凍害作用を受けた RC 床版の劣化状態および耐荷力の低下に関する研究, セメント・コンクリート論文集 Vol. 63 (2009) No. 1
- 調-134) 阿部, 木田, 徐, 澤野: 走行振動疲労荷重を受けた CFS 補強 RC 床版の補強効果および残存耐力(連続繊維補強コンクリート(構造)), コンクリート工学年次論文集 28(2), 1471-1476, 2006-07-30
- 調-135) 西村, 阿部ほか: 走行振動疲労荷重を受ける RC 床版の破壊メカニズムおよびひび割れ密度に関する研究,
- 調-136) 松井繁之, 木村元哉, 蓑毛勉: 増厚工法による RC 床版補強の耐久性評価, 構造工学論文集 Vol.38A, 1992 年 3 月, 1085-1096
- 調-137) 倉橋正: 打音法を用いた橋梁鉄筋コンクリート床版の欠陥検知に関する検討, 土木学会中部支部研究発表会
- 調-138) 前川, 藤山: 大規模疲労解析研究,
- 調-139) 香川紳一郎, 山下善弘, 村上弘行, 中野将: 地中レーダー (GPR) を用いた橋梁床版コンクリートの健全度探査技術について, 土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年度) I -515
- 調-140) 青山, 石川ほか: 中性化の進行した実道路構造物の塩化物イオン浸透特性, コンクリート年次論文集, Vol.33, pp.809-814, 2011
- 調-141) 青山, 有馬ほか: 中性化領域における塩分移動メカニズムに関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No.1, pp.817-822, 2013.
- 調-142) 干場, 小林, 早川: 長岡大橋における電磁波レーダ調査に基づく床版補修工事の施工報告, 第 1 回北陸道路保全会議, 2013
- 調-143) 島田隆史, 鎌田敏郎, 竹村泰弘, 井上正光, 島田隆史: 低周波弾性波非破壊検査装置による RC 床版の内部欠陥に対する検出性能の評価, 土木学会第 57 回年次学術講演会(平成 14 年 9 月)
- 調-144) 田中, 村越, 吉田: 撤去床版を用いた調査事例-コンクリート床版の水張り試験一, 土木技術資料 54-7 (2012)
- 調-145) 金田尚志, 魚本健人: 鉄筋コンクリート構造物のライフサイクルコストと維持管理計画, 土木学会第 57 回年次学術講演会(平成 14 年 9 月)

- 調-146) 橋：鉄筋コンクリート床版の設計・施工と性能の評価，橋梁と基礎 Vol.47 No.12, pp.41-46, 2013.
- 調-147) 橋：鉄筋コンクリート床版の損傷事例と調査，橋梁と基礎 Vol.48 No.5, pp.53-59, 2014.
- 調-148) 石橋忠良：鉄筋コンクリート床版下面に施工した各種補修工法の効果，コンクリート工学年次論文報告集 9(1), 429-434, 1987
- 調-149) 橋吉宏，梶川康男，川村満紀：鉄筋腐食により損傷を受けた RC 床版の押抜きせん断耐力に関する一考察，土木学会論文集 V-巻 426/V-14 号 65 - 74 頁 1991 年 2 月
- 調-150) 佐藤誠，大島俊之，三上修一，樋口匡：点検データに基づく床版劣化の推定と BMS への応用，構造工学論文集 Vol.51A, 2005 年 3 月, 1147-1145
- 調-151) 表，三田村，赤代，松井：凍害劣化した床版補修工法の耐疲労特性に関する実験的研究，第 7 回道路橋床版シンポジウム論文報告集
- 調-152) 赤代恵司，渡邊忠朋，三田村浩，岸徳光：凍害劣化を受ける RC 床版に関する実験的研究，平成 21 年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第 66 号 A-49
- 調-153) 佐藤久，長井正嗣，宮下剛，西尾守広，石川裕一：凍結防止剤で塩害した RC 床版の曲げ・押抜きせん断破壊機構に関する基礎研究，土木学会第 64 回年次学術講演会(平成 21 年 9 月)I-353
- 調-154) 本荘，藤原，葛目，牧：凍結防止剤による塩害で劣化した鋼橋 RC 床版の詳細調査，第 11 回コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム (2011)
- 調-155) 石川，村上ほか：凍結防止剤による塩害を受けた道路鋼橋 RC 床版の鉄筋腐食の実態と自然電位測定の実用に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.2, pp.1453-1458, 2011
- 調-156) 早坂洋平，羽原俊祐，加藤哲，光岡達之：凍結防止剤散布環境下における実橋 RC 床版のコンクリート性状の変化，土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年度)V-258
- 調-157) 近藤航，佐藤尚次：道路橋 LCC マネジメントの中での疲労劣化と大型車交通便益の関係の評価，第 35 回土木学会関東支部技術研究発表会 I-026
- 調-158) 阿部，木田，高野，川井：道路橋 RC 床版におけるコンクリートの圧縮強度が耐疲労性に及ぼす影響評価，セメント・コンクリート論文集 64(1), 552-559, 2010
- 調-159) 園田恵一郎，沖野真，林秀侃，喜田浩：道路橋 RC 床版に対する鋼板接着補強工法の信頼性に関する研究，土木学会論文集 I-巻 398/I-10 号 245 - 254 頁 1988 年 10 月
- 調-160) 欠番
- 調-161) 阿部忠，木田哲量，高野真希子，川井豊：道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力および耐疲労性の評価，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) 67 巻 -号 39-54 頁 2011 年
- 調-162) 前田幸雄，松井繁之：道路橋 RC 床版の設計曲げモーメント式に関する一考察，土木学会論文集 -巻 252 号 11 頁 1976 年 8 月
- 調-163) 阿部忠：道路橋 RC 床版の長寿命化修繕計画における補強対策および維持管理，セメントコンクリート (781), 50-60, 2012-03-10
- 調-164) 横山，本荘ほか：道路橋 RC 床版の鉄筋腐食を伴う劣化機構の解明に関する研究(既存構造物の調査)，コンクリート工学年次論文集 30(3), 1687-1692, 2008-07-30
- 調-165) 田中，村越，長屋：道路橋 RC 床版の疲労損傷過程における上面かぶりのはく離の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.3, 2008
- 調-166) 庄中，関口ほか：道路橋 RC 床版の疲労耐久性に関する共通試験，土木学会第 60 回年次学術講演会 (平成 17 年 9 月)
- 調-167) 村越潤，田中良樹：道路橋 RC 床版の劣化形態の多様化と防水対策 (特集 道路床版の維持・強化：長期耐久性の確保へ)，土木施工 55(6), 68-71, 2014-06
- 調-168) 松井繁之，前田幸雄：道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案，土木学会論文集第 374 号/ I -6, 1986 年 10 月, 416-429
- 調-169) 三田村，佐藤ほか：道路橋 RC 床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響，構造工学論文集，Vol.55A, pp.1420-1431, 2009.
- 調-170) 藤井久矢，中藪勲，古田均，堂垣正博：道路橋維持管理計画のアセットマネジメント，第 9 回設計工学に関するシンポジウム (平成 17 年 12 月)
- 調-171) 中谷，内田ほか：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国土技術政策総合研究所資料，No.28, 2002.
- 調-172) : 道路橋床版の疲労劣化メカニズム，RC 床版の損傷メカニズム P93~99
- 調-173) 岡田清，岡村宏一，園田恵一郎，島田功：道路橋鉄筋コンクリート床版のひびわれ損傷と疲労性状，土木学会論文報告集第 321 号，1982 年 5 月, 49-61
- 調-174) 斎藤優貴，阪田和哉：栃木県内の橋梁における床版補修の LCC 分析に関する研究，第 37 回土木学会関東支部技術研究発表会 VI-1
- 調-175) 石川，足立ほか：疲労と凍結防止剤による塩害を受けた鋼橋 RC 床版の特徴と健全度評価に関する研究，構造工学論文集，Vol.57A, pp.1263-1272, 2011
- 調-176) 古市亨・松井繁之・佐光浩継・小寺徹：疲労寿命推定理論を用いた床版の対策優先順位決定に関する一手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.3, 2008
- 調-177) 阿部忠，水口和彦：疲労損傷を受けた RC 床版の一次・二次補強法における耐疲労性の評価，構造工学論文集，

Vol. 59A (2013)

- 調-178) 小林珠祐, 内藤英樹, 岩城一郎, 子田康弘, 鈴木基行: 疲労損傷を受けた道路橋 RC 床版の非破壊検査, 土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年度) I-015
- 調-179) 西川和廣, 神田昌幸, 杉山純, 内田賢一: 非破壊検査機器を用いた RC 床版の診断技術に関する検討, 土木学会第 49 回年次学術講演会(平成 6 年 9 月) V-91
- 調-180) 戸田勝哉, 中村善彦, 倉田孝男: 分光分析法による実橋梁の診断システムの開発, 土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年度) V-059
- 調-181) 宮村正樹, 春山俊仁, 岩崎正二, 大西弘志, 出戸秀明: 舗装の影響を考慮した道路橋 RC 床版の健全度評価に関する一考察, 土木学会第 69 回年次学術講演会(平成 26 年 9 月) I-008
- 調-182) 金光寿一: 舗装熱を利用したサーモグラフィ法による RC 床版内部の欠陥検出に関する研究, 土木学会論文集 732 巻
- 調-183) 青山, 石川ほか: 北陸地方での道路構造物の中性化深さの進行特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.635-640, 2010.
- 調-184) 志水, 森, 瀬良: 名古屋高速大規模舗装修繕工事における床版内部事前調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, 2013
- 調-185) 上山暁一, 森川英典, 内海卓也, 狩野裕之: 目視調査に基づく塩害劣化 RC 橋の簡易健全性評価法の比較検証, 土木学会第 64 回年次学術講演会(平成 21 年 9 月) V-168
- 調-186) 前島拓, 子田康弘, 岩城一郎: 融雪剤による塩害を受けた道路橋 RC 床版の疲労耐久性評価, 土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年度) V-259
- 調-187) 岩城, 子田ほか: 融雪剤の影響を受けて劣化した道路橋 RC 床版の疲労耐久性評価に関する研究, 高速道路関連社会貢献協議会 平成 21 年度研究助成
- 調-188) 岩城一郎: 融雪剤の影響を受けて劣化した道路橋 RC 床版の疲労耐久性評価に関する研究 (平成 21 年度高速道路関連社会貢献協議会研究助成の概要(その 1)), 高速道路と自動車 53(8), 49-51, 2010-08
- 調-189) 園田恵一郎, 堀川都志雄: 輪荷重の反復作用下での道路橋 RC 床版の低サイクル疲労特性, 土木学会論文集 V-巻 390/V-8, pp.97-106, 1988.2
- 調-190) 斎藤卓也, 子田康弘, 岩城一郎: 輪荷重走行試験による塩害を受けた RC 床版の疲労耐久性に関する実験的検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会(平成 20 年 9 月) 5-206
- 調-191) 城戸靖彦, 尾堂良一, 森本昌直, 岸上弘宣: 劣化が進行した RC 床版の耐荷力評価と上面増厚補強の補強効果について, 土木学会第 65 回年次学術講演会(平成 22 年度) I -292
- 調-192) 中村修, 久野公德, 松下博通: 劣化した RC 床版のせん断耐力低下について(腐食・防食), コンクリート工学年次論文報告集 17(1), 931-936, 1995-06-01
- 調-193) 石川, 青山ほか: 劣化した道路鋼橋 RC 床版の凍結防止剤による塩分浸透特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp1393-1398, 2010
- 調-194) 松田浩, 倉方慶夫, プーンタナボン・ソムボジ, 中村太一: 連続合成桁 RC 床版のクリープ・乾燥収縮解析, コンクリート工学年次論文集, Vol 22, No.3, 2000
- 調-195) 鍋島益弘, 堀川都志雄: 連続繊維シートを用いた床版下面補強工法における補強効果の比較
- 調-196) 山口恭平, 早坂洋平, 曾田信雄, 大西弘志: FWD を用いた既設 RC 床版の健全度評価手法に関する一提案, 構造工学論文集 Vol. 61A (2015)

3. 複合劣化による構造性能の低下の把握

3.1 材料劣化における現象の整理

3.1.1 はじめに

塩害、ASR、凍害などによる劣化を受け鉄筋腐食の進行、コンクリートの力学性能の低下、かぶりのはく落などが生じたコンクリート構造物に対して、どの程度の構造安全性が保たれているかを把握するために、本章では解析により検討する。そこで、まず材料劣化を解析上どのように表現すべきかについて検討した。

例えば塩害による被害を推定する場合、環境条件である建設地点での塩分供給状況を調査し、RC 部材のかぶりの塩化物に対する抵抗性から、時系列を追って鉄筋位置での塩化物量の推定を行い、腐食の有無や程度を推定するような詳細アプローチがある。しかしここでは、既に被害が生じた場合を想定し、その劣化程度を文献調査により推定することとした。そのため、実験供試体ではなく、実環境に置かれた構造物の劣化の程度について記述されている文献を収集することを試みた。

塩害に対しては、実構造物でどの程度の劣化が生じたのかについて調査された文献は非常に多数に上ると推察され、網羅的に収集することは困難と考えられた。よって、ここではコンクリート分野での当該テーマを扱った委員会報告書¹⁾を中心に参照することとした。その他、近年発表された床版の劣化²⁾や実構造物の調査事例³⁾についての研究も参考とした。

床版に限らず、塩害を受ける RC 部材の劣化の程度を確定的に示すことはできない。1つの実構造物を仮定したとしても、時間によってその劣化の進行は異なるし、1つの環境を仮定しても塩害抵抗性の異なる RC 構造物は劣化の程度も異なるためである。ここでは、生じた劣化のみを取り上げ、劣化の程度が「軽微」、「中程度」、「激しい」などの簡易なグレーディングとそのときの劣化程度の定量値との関係を求めることとした。

ASR や凍害に対しても同様に、コンクリート分野での委員会報告書を中心としつつ、実構造物の劣化の調査を取り扱ったいくつかの研究論文を収集した。

文献調査の結果、実験供試体を用いた研究事例は数多いが、それらの研究事例においては実験で設定した実験供試体の劣化度が実構造物のどの程度の劣化度に対応しているのかが明確でない場合が多かった。実構造物の撤去や補修の際に調査した研究では、劣化のグレーディングが明示的にはなされていない例も多かった。そのため、例えば撤去を伴う場合には劣化度が「激しい」と読み替えるなど、工学的な解釈も必要となった。

3.1.2 塩害による劣化パラメータ

(1) 既往の検討

文献2)に収録されているケーススタディにおいては、有限要素解析等で塩害劣化を再現する際のモデル化の検討が行われ、その結果を表-付6.3.1に示す。モデル化で検討されている項目は、鉄筋の断面積減少、鉄筋の力学特性、鉄筋とコンクリートとの付着特性、コンクリート断面積、コンクリートの力学特性等に分類できる。

解析における鉄筋の表現の仕方は分散鉄筋モデルと離散鉄筋モデルにおいて異なる。離散鉄筋モデルにおいては鉄筋断面をトラスの断面減少として直接設定でき、付着応力-すべり関係も直接考慮できる。しかし広く用いられている分散鉄筋モデルでは付着の影響を間接的に評価するが、鉄筋が腐食した場合の定量的な研究が不足していると指摘されている²⁾。鉄筋腐食の断面減少が生じた場合の離散鉄筋モデルにおいては、耐荷性能を評価することはできるが、変形性能については評価できるとはいえないとしている。

表-付 6.3.1 モデル化に対応した調査結果の整理²⁾

モデル化	モデル化の項目	必要な情報	
形状	解析範囲	劣化状況、構造物の周辺状況	
	解析次元	劣化の空間分布	
	要素分割	コンクリート	はく離・はく落の状況
		鉄筋	配筋状況、かぶり厚さ
	境界条件	支承、接合部の状況、たわみ	
材料	コンクリート	強度、弾性係数	
		ひび割れ	
	鉄筋	強度、弾性係数	
		腐食状況、断面欠損	
付着・定着	付着強度、定着の状況		

(2) 実測に基づく鉄筋の腐食減量

塩害による劣化指標のひとつとして、鉄筋の腐食に伴う鉄筋の断面積の減少がある。鉄筋の断面積は、曲げ、せん断、等の構造挙動に直接的に関わる。

鉄筋の腐食減量は、その定義上、採取した鉄筋の重さの変化から求めるが、文献によっては直径や3次元形状を計測して幾何学的に求める方法もある。また、採取した鉄筋の重さや直径を計測する場合に、計測対象とする軸方向の長さによって、局所的な腐食を考慮するか、平均的な腐食程度を把握するかなどの考え方の違いがある。両者の平均値はほぼ同じでも、データのばらつきが異なる。局所的な腐食も考慮して測定する場合には、腐食減量の最大値は大きくなる傾向がある。収集した文献には数多く種類の計測データがあり、全て同じ条件に揃えて評価することはできないため、それらの測定方法の違いも含めた結果の整理となる。腐食減量は質量の減少率であるが、断面積減少率と同じ割合となるため、両者は概念的には同じものを表す。

まず、塩害で劣化した実構造物の各種測定結果から、腐食減量が最大でどの程度生じているのか把握することとした。解析においては危険側の値を設定することで安全側の判断をすることや、劣化程度のオーダーを把握する必要があることから、各条件において劣化度の最大値を把握することとした。

実験供試体の場合には、塩水散布や電食により容易に数十%の腐食減量を作りだすことができるが、その設定値の根拠は乏しいため、以下のとりまとめにおいては、断りのない限り実験供試体は除外し、実構造物を測定した事例のみとした。その結果を図-付 6.3.1～図-付 6.3.3 に示す。

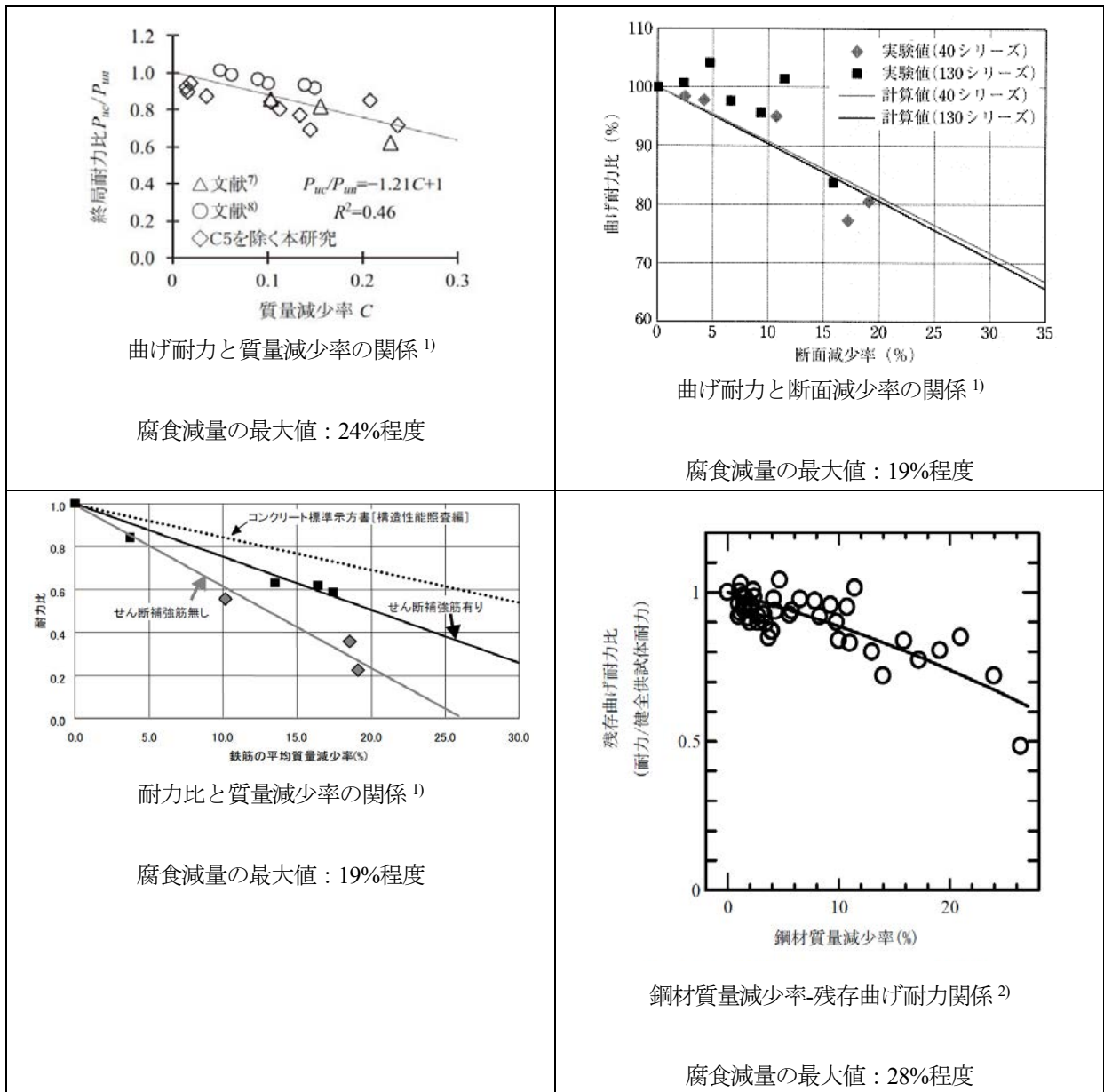
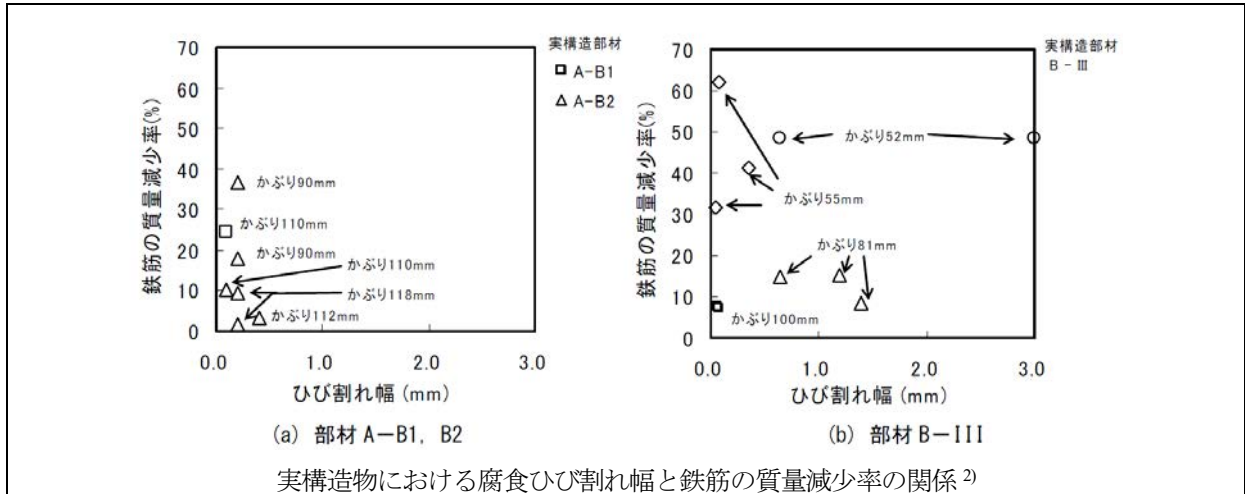
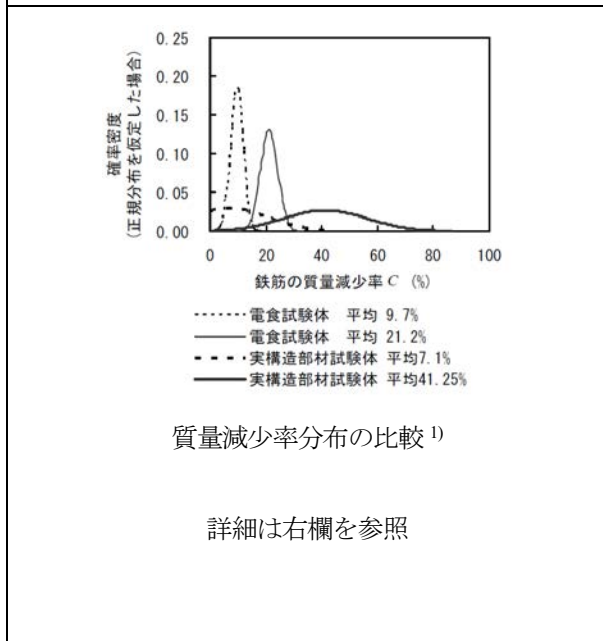
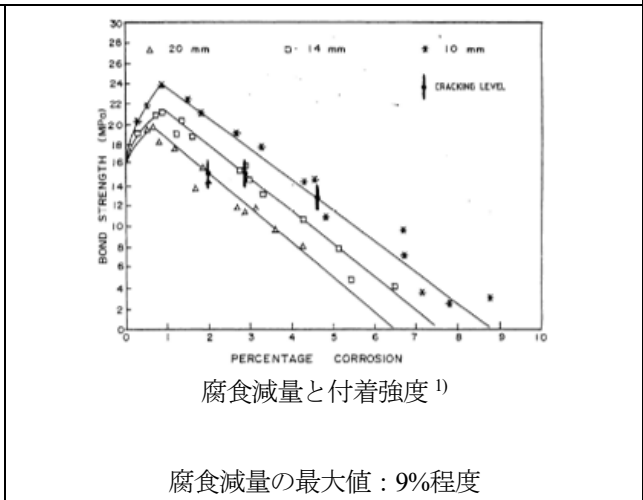
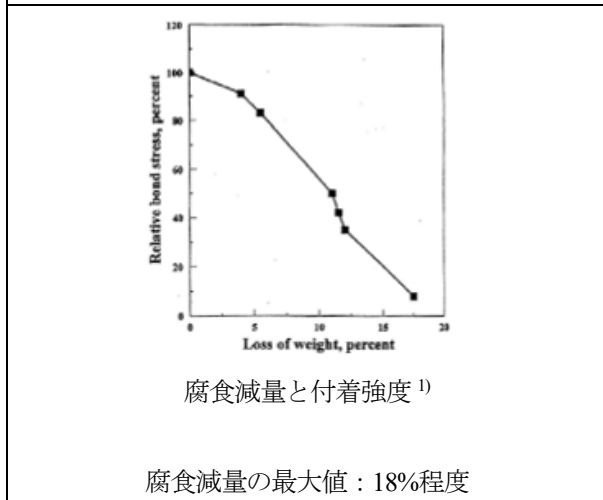


図-付 6.3.1 実測に基づく鉄筋の腐食減量 (1)



腐食減量の最大値 : 37%, 62%程度
 栈橋であり非常に過酷な環境であることに留意する.



鉄筋の質量減少率⁵⁾

主筋番号	位置番号	下筋筋			上筋筋	
		No.1	No.2	No.3	No.3	
2AA	4	(1)	0.0	39.2	24.5	11.4
		(2)	0.0	21.9	26.7	—
2EB	4	(1)	0.0	31.9	70.2	—
		(2)	0.0	28.3	47.7	—
20C	4	(1)	0.0	0.0	55.0	0.0
		(2)	0.0	0.0	31.2	0.0
		(3)	0.0	—	31.7	—
20D	4	(1)	0.0	0.0	56.8	—
		(2)	0.0	0.0	51.7	—
2EE	4	(1)	0.0	0.0	44.3	0.0
		(2)	0.0	0.0	53.5	0.0
2FF	4	(1)	0.0	0.0	61.8	—
		(2)	0.0	0.0	64.9	—
		(3)	—	—	—	—
20G	4	(1)	0.0	0.0	22.0	0.0
		(2)	0.0	0.0	43.0	0.0
2H	4	(1)	0.0	0.0	37.9	—
		(2)	0.0	0.0	36.4	—
平均質量減少率(%)			0.0	7.1	44.8	2.8

※0.0%は目視により判定

左の実構造物試験体の元文献である。

腐食減量の最大値 : 実構造物供試体 No.2 は平均 7.1%, 最大 39.2%, No.3 は平均 44.8%, 最大 70.2%

図-付 6.3.2 実測に基づく鉄筋の腐食減量 (2)

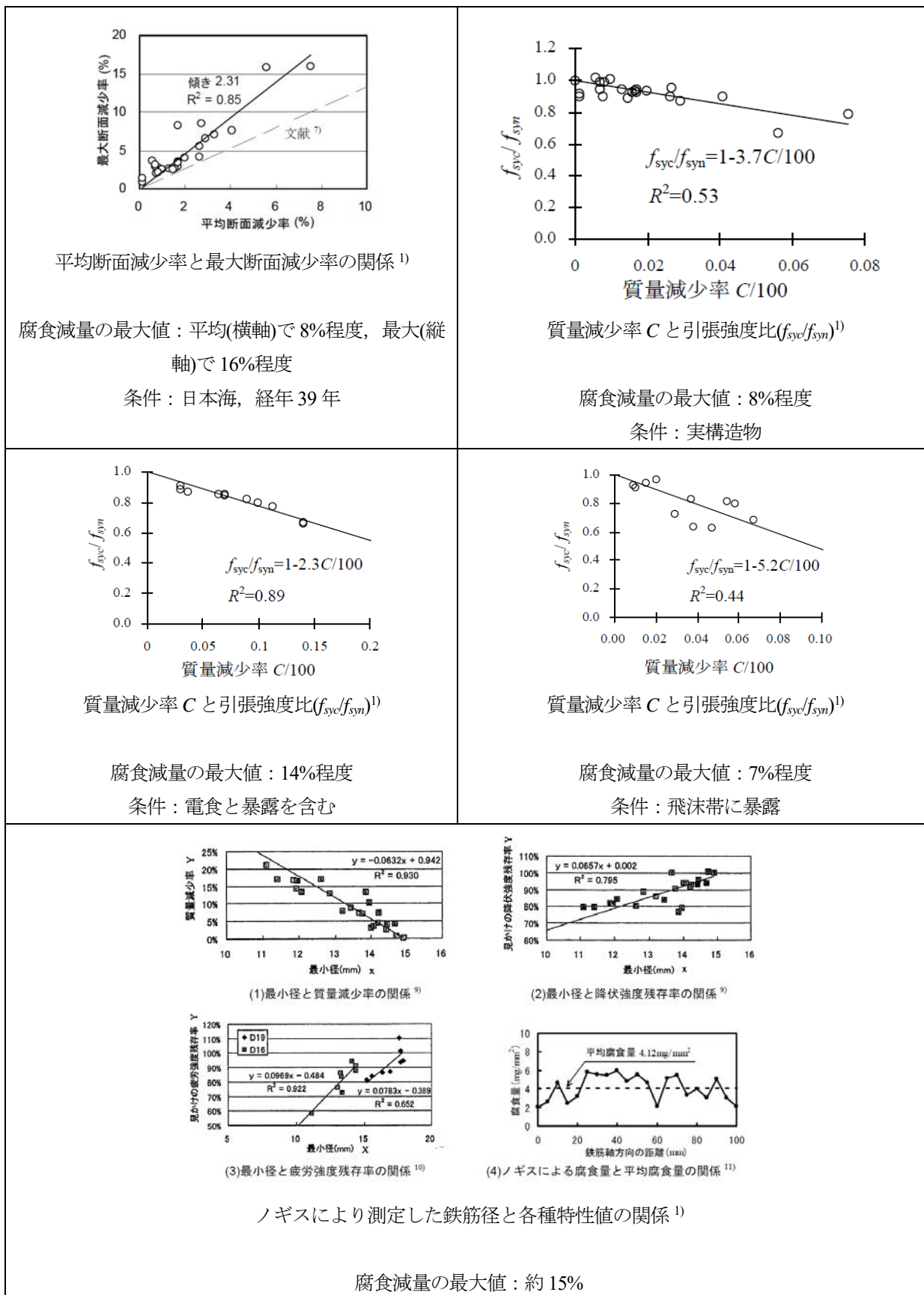


図-付 6.3.3 実測に基づく鉄筋の腐食減量 (3)

以上の13例を概観すると、腐食減量の最大値は10～20%程度のケースと、40～70%程度のケースに分けることができる。後者は概ね栈橋の事例であった。一般に、栈橋は界面からの距離も近く過酷な塩害環境下にある。一般に栈橋の劣化事例では、建設後ほとんど目視調査がなされずに、路面陥没などの不具合がでて初めて船上調査等で劣化が把握されるものが多いようである。したがって、ここに示した栈橋の事例は劣化のグレーディングとしては、非常に厳しいものであるとの位置づけになるであろう。

鉄筋の腐食量については、実構造物では測定できない場合がある。特に、ひび割れや浮きの発生などの場合には鉄筋は露出していないため、直接的に調査を行うことはできない。図-付6.3.4に表面ひび割れ幅と鉄筋腐食量との関係を示す。これにより表面からの目視観察から腐食量を推定することも可能である。

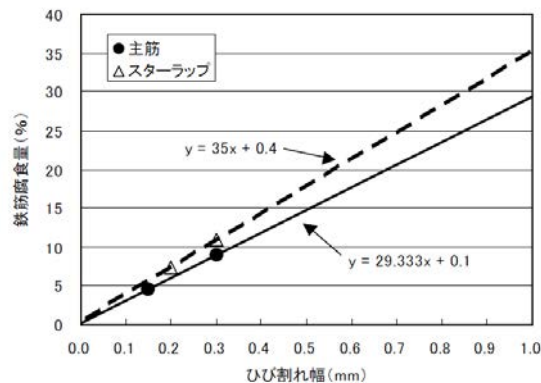


図-付6.3.4 ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係²⁾

以上を踏まえ、表-付6.3.2に腐食減量と劣化の状況の関係を示す。ほとんどのケースにおいて、外観のグレーディング結果が提示されていないため、表-付6.3.2に示す提案は主観も混じっていることに留意された。

表-付6.3.2 鉄筋の腐食減量と劣化の状況の関係

鉄筋の腐食減量	劣化の状況
10～20%	塩害が発生している状態
40～70%	全くメンテナンスされず塩害が大きく進行している状況

続いて、文献1)、2)の両方にケーススタディとして取り上げられている塩害により被害を受けた橋梁の調査結果について紹介する。対象構造物は日本海沿岸部に建設された橋長43.840m、全幅員12.3m、桁長14.5mの3連RC単純T桁の鉄筋コンクリート道路橋である。竣工後35年に、塩害で撤去される際に調査された橋梁の事例である。この事例では、劣化の度合いとして、外観調査およびはつり調査などが行われている。

桁の直下に海面を有するS1スパンの5主桁のうち、著しい劣化を生じている「劣化レベル大」および中程度の劣化が生じている「劣化レベル中」の桁が選定された。2007年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]に従い目視観察による劣化の半定量的評価(グレーディング)を行ったところ、「劣化レベル中」の橋桁は加速期後期、「劣化レベル大」は劣化期と判定された。

図-付6.3.5および図-付6.3.6のとおり桁の展開図には浮き、はく落、浮き・はく離、錆汁の区分でその領域が示されている。「劣化レベル大」はかぶりコンクリートのはく落が生じているため鉄筋の腐食状況を比較的容易に観察することができ、「劣化レベル中」はほとんどの鉄筋がコンクリートに隠れているため内部鉄

筋の腐食量を把握しにくい。主鉄筋のはつり調査により、鉄筋毎の腐食率が測定され、各位置における腐食率の最大値を採用し、表-付6.3.3のような劣化の程度と鉄筋の質量減少率の関係が得られた。はく落部47%、浮き・はく離部15%というのは、表-付6.3.2に示した数値の範囲に収まる。よって、両者を鑑み、劣化の程度と鉄筋の質量減少率の関係を表-付6.3.4のように定める。図-付6.3.5に示すように劣化レベル大において全ての箇所にはく落が生じているわけではないが、ここでは簡単のため全断面一律の損傷を受けていると仮定した上で、推定精度を考慮して表-付6.3.4に仮定した劣化の程度と鉄筋の質量減少率の関係を有効数字1桁で表した。

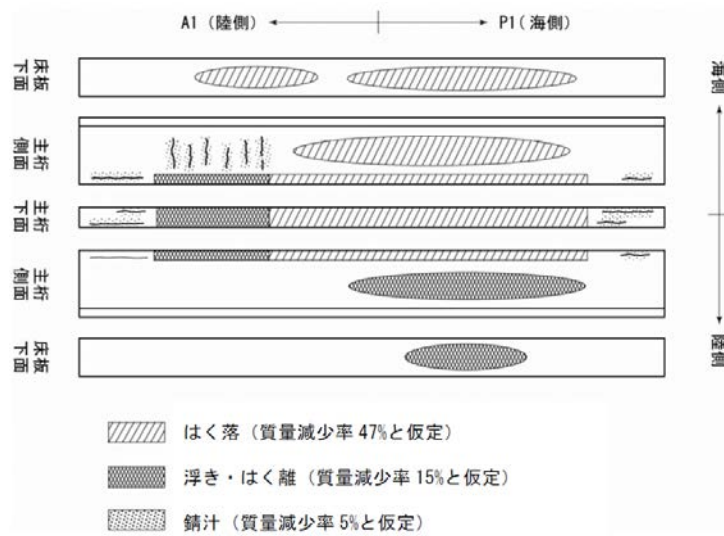


図-付6.3.5 劣化レベル大における損傷状況²⁾

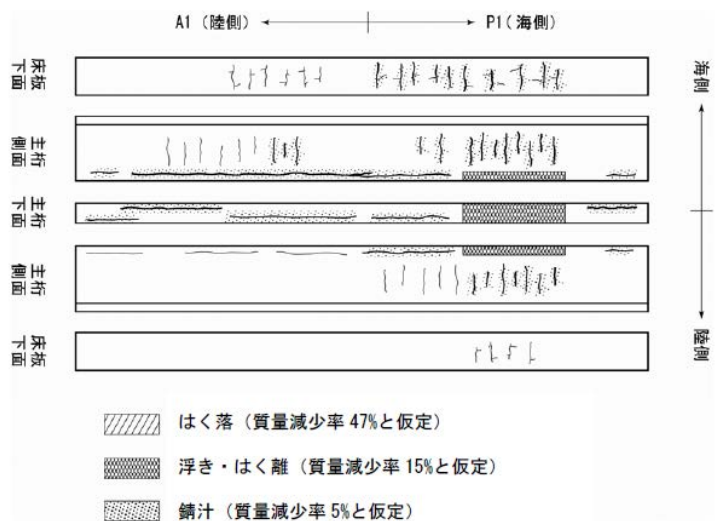


図-付6.3.6 劣化レベル中における損傷状況²⁾

表-付 6.3.3 劣化の程度と鉄筋の質量減少率の関係

劣化の程度	主鉄筋の質量減少率(%)
はく落部	47
浮き・はく離部	15
錆び汁部	5

表-付 6.3.4 仮定した劣化の程度と鉄筋の質量減少率の関係

劣化過程	主鉄筋の質量減少率(%)
加速期（前期）	5
加速期（後期）	20
劣化期	50

(3) 道路橋床版への塩化物イオンの浸透

文献6)では、撤去された実構造物の道路橋床版のうち、海水または凍結防止剤による塩分浸透が予想される5橋について、コンクリート床版中への塩分浸透について調査された結果が報告されている。5橋の結果を概観すると、アスファルト舗装が機能している場合には上面からの塩分浸透は少ないが、アスファルト舗装の打継ぎ目からは塩分が浸入し、コンクリート床版中へ浸透することが認められた。

(4) 鉄筋の降伏点

文献1)において、腐食減量の増加により、見かけの降伏点が減少することが示されている。これは、腐食減量はある有限長さの平均的な質量変化で表される平均的な腐食量であるのに対し、降伏点は最小断面積により左右されるため、見かけの数値が低下すると説明されている。実環境での腐食に対しては、それぞれ、図-付 6.3.7のように表現されている。図-付 6.3.7より、 C の係数の平均をとり、有効数字1桁で表すと係数は4となり、式(付 6.3.1)に示す。

$$\frac{f_{syc}}{f_{syn}} = 1 - \frac{4C}{100} \dots \dots \dots \quad (\text{付 6.3.1})$$

ここに、 f_{syc} は腐食した鉄筋の降伏点、 f_{syn} は健全な鉄筋の降伏点、 C は腐食減量(%)であり健全な鉄筋断面積に換算したときの割合である。

腐食後の降伏点比を断面積を考慮して計算すると、前述の鉄筋腐食減量5%に対して降伏点比は $0.8/0.95=0.84$ 、20%に対して $0.2/0.8=0.25$ 、50%に対してはマイナスの値となる。提案式は腐食減量10%程度までしか示されておらず、外挿となってしまうため、今回は考慮しないこととする。

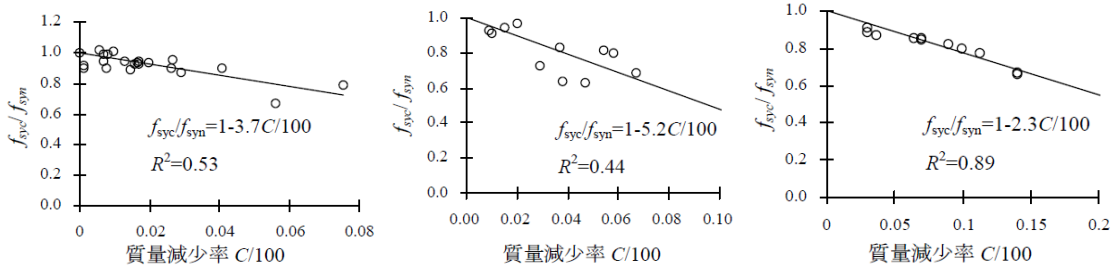


図-付 6.3.7 降伏点と質量減少率の関係¹⁾

(5) 鉄筋の静弾性係数

文献 1)では鉄筋の見かけの静弾性係数も減少することが報告されているが、降伏点の低下率よりも小さいため、ここでは考慮しないこととする。

(6) 鉄筋とコンクリートとの付着特性

文献 1)では質量減少率を用いて、解析においては鉄筋断面積の減少および付着強度の減少について式 (付 6.3.2) により考慮している。

$$\frac{\tau_b}{\tau_{b0}} = \exp(-0.0607C) \dots \dots \dots \quad (\text{付 6.3.2})$$

ここに、 τ_b/τ_{b0} は付着強度比、 C は鉄筋の質量減少率(%)である。

付着の劣化に伴うテンションスティフニングに関しては、図-付 6.3.8 に示すように付着特性が鉄筋断面積減少率の関数になっている。

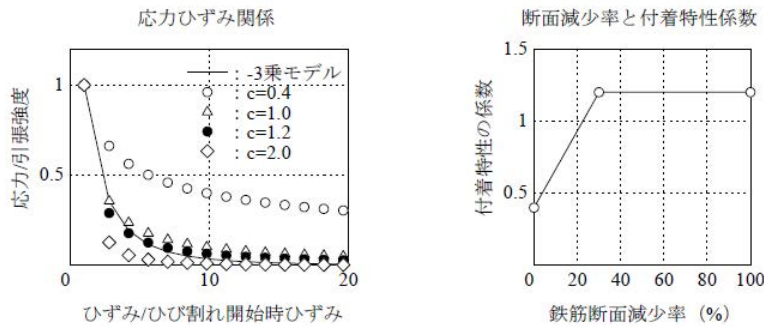


図-付 6.3.8 テンションスティフニングモデルにおける付着特性係数の決定²⁾

(7) コンクリートの断面積

鉄筋が露出している場合にはかぶりのコンクリートを無視して考えるのが妥当である。はく離が生じた場合にも鉄筋内部のコアコンクリートとかぶりコンクリートの一体性は担保できないため無視して考えるのが妥当である。

ただし、検討例においては、離散ひび割れを考慮するためにはコンクリートを除外することができないため、コンクリートの面積を考慮することとしている。

(8) コンクリートの力学特性

コンクリート自体の圧縮強度や弾性係数は塩分浸透によって変化はしないものの、前項においてひび割れが発生した場合に見かけの圧縮強度は減少すると考えることもできる。

(9) 塩害のまとめ

以上を考慮して、塩害劣化に対して解析上考慮する仮定した劣化の程度と損傷度の関係について、コンクリートのかぶりの有無、鉄筋断面積、鉄筋の付着特性のみ考慮することとし、その内容を表-付 6.3.5 に示す。

表-付 6.3.5 仮定した塩害の劣化の程度と損傷度の関係

劣化過程	コンクリート				上面（圧縮）鉄筋				下面（引張）鉄筋			
	圧縮強度	弾性係数	上面かぶり	下面かぶり	弾性係数	降伏点	断面積	付着・定着※1	弾性係数	降伏点	断面積	付着・定着
加速期（前期）	—	—	—	—	—	—	● 5%減	● 0.74	—	—	—	—
加速期（後期）	—	—	● 完全になし	—	—	—	● 20%減	● 0.30	—	—	—	—
劣化期	—	—	● 完全になし	—	—	—	● 50%減	● 0.05	—	—	—	—

※ 一印は変更しないことを表す

※1 式 (付 6.3.2) による

文献 2)における解析による試算結果を図-付 6.3.9 に示す。図は単純 T 桁の解析結果である。試算においては、劣化レベル中においては健全と比較して降伏荷重が若干小さくなっているがその差はほとんどない。文献 2)で実施されている電食を用いた共通試験においても、腐食率 5~10%程度では付着劣化や降伏荷重の低下は顕在化しない場合が多いと報告されている。

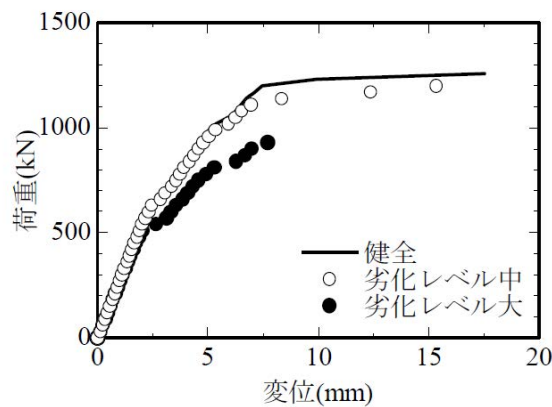


図-付 6.3.9 単純 T 桁の荷重-載荷点変位曲線²⁾

3.1.3 ASRによる劣化パラメータ

(1) ASRによる被害の概要

ASRによる劣化指標には、コンクリートに関しては圧縮強度、割裂強度、静弾性係数、動弾性係数の変化が報告されている⁷⁾。鉄筋に関しては、コンクリートのひび割れに伴う鉄筋付着の低下、鉄筋折曲げ部で破断する事例、などが報告されている。概観すると、圧縮強度と割裂強度の低下が主要な変化であった。鉄筋については、隅角部の折曲げ部での破断が多く、本文で対象とする床版では見られないため考慮しないこととした。

(2) ASRによる圧縮強度および静弾性係数の低下

文献8)について示す。図-付6.3.10に示す経年24年程度の鉄道ラーメン高架橋から切り出した床版を3方向にコア採取して測定した結果、材齢28日の圧縮強度 35N/mm^2 と比較してA方向で49%、B方向で73%、C方向で64%であった。静弾性係数はA方向で6%、B方向で53%、C方向で60%であった。A方向が極端に小さいのは水平方向のひび割れが卓越しているためと考えられる。A方向の弾性係数の低下6%については、この方向の载荷には床版の载荷は関係しないので、以後除外することとする。

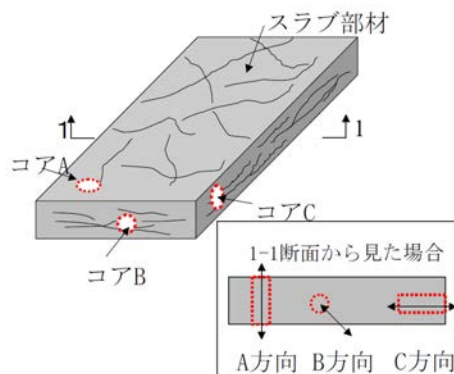


図-付6.3.10 供試体の概要⁸⁾

文献9)について示す。図-付6.3.11に示すT形RC橋脚の張出し部から採取したコアによる結果、設計規準強度の標準値 24N/mm^2 を基準として8つのコアの結果は平均値で 22.4N/mm^2 、比率は93%、最低値は 18.5N/mm^2 で比率は77%であった。ただ、この文献では比較するものが設計規準強度であるが実際には損傷前の圧縮強度はもっと大きく、低下割合も大きかったと考えられる。

静弾性係数についてその平均値は 13.5kN/mm^2 であり、圧縮強度を基にしたコンクリート標準示方書での推定値の54%に相当する。静弾性係数の最低値は 7.2kN/mm^2 であり圧縮強度から推定した値の21%であった。



図-付6.3.11 供試体の概要⁹⁾

文献 10)について示す。実構造物で ASR と判定された橋脚 21 基を対象に検討している。そのうち経時変化を取得した構造物 5 種類の経時変化を図-付 6.3.12 に示す。竣工後 10 年程度で一定値となり、竣工時の圧縮強度の 70%程度に低下している。

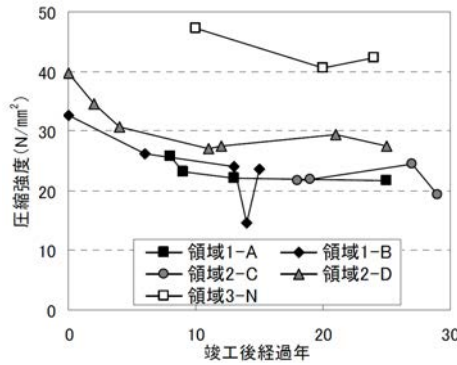


図-付 6.3.12 圧縮強度の経時変化¹⁰⁾

文献 11)では高速道路で発見された RC 道路橋床版の経時変化をモニタリングした結果を公表している。図-付 6.3.13 のように材齢が経過するとともにひび割れ密度が単調に増加している。また、ひび割れの深さについては、コア採取を行い、実際に測定している。対象構造物の床版厚さは 190mm, 220mm であり、図-付 6.3.14 に示すとおり測定されたひび割れ深さは 50~90mm 程度であった。仮に上下面とも均等にひび割れが入っているとすれば、安全側に判断するとほぼ床版の全厚にわたりひび割れが発生していると考えられる。

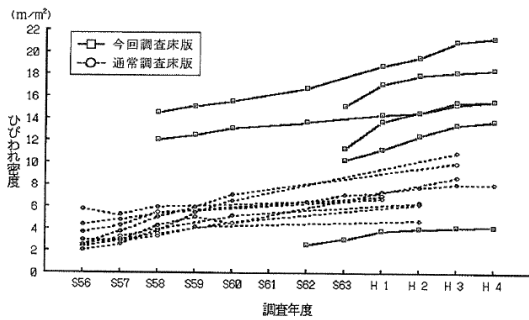


図-付 6.3.13 ひび割れ密度の経年変化¹¹⁾

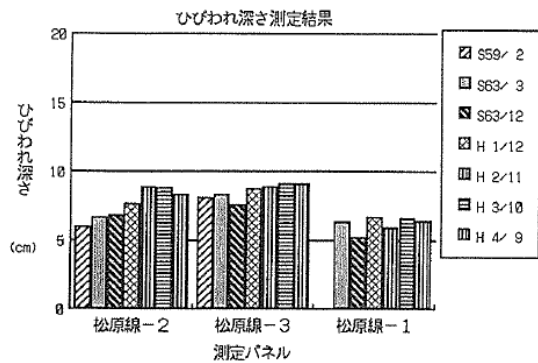


図-付 6.3.14 ひび割れ深さ測定結果¹¹⁾

文献 7)では、表-付 6.3.6 のように損傷の進行を定量的に示している。進展期、加速期、劣化期に進むにつれて圧縮強度、弾性係数が低下している。

表-付 6.3.6 鉄道構造物における ASR の劣化過程と外観等の特徴の例⁷⁾

劣化過程	外観等の特徴	備 考
潜伏期	ASR は発生しているが、外観上の変状が見られない。	—
進展期	ASR による膨張によってひび割れが発生し、変色、ゲルの滲出が見られる。	(この段階で劣化が停止することもある) ・ほとんどが幅 0.2mm 以下のひび割れ ・ひび割れ密度：2 個/m 程度 ・ひび割れが密な領域：部材総面積の 30% 以下 ・採取コアの圧縮強度に低下は見られないがヤング係数は低下している：低下率 50% 以下。
加速期	ASR によるひび割れが進展し、ひび割れ本数、幅、密度および密な領域が増大する。	(この段階で劣化が停止することもある) ・ほとんどが幅 0.2~0.5mm のひび割れ ・最大ひび割れ幅 1mm 以上 ・ひび割れ密度：5 個/m 程度 ・ひび割れが密な領域：部材総面積の 50% 程度 ・採取コアの圧縮強度に僅かな低下は見られ、かつヤング係数は 50% 以上低下している。
劣化期	ASR によるひび割れが多数発生し、構造物に段差、ずれなどが見られる。かぶりの部分的な浮きやはく離・はく落が発生する。鋼材の腐食が進行し、錆汁が見られる。変位・変形が大きくなる。状況によっては、鉄筋の降伏および破断が発生する。	・最大ひび割れ幅：2mm 以上 ・コンクリートの圧縮強度が 50% 程度以上低下する場合がある。

※ひび割れ密度：ここでは、単位長さの測線を横切るひび割れの本数。例えば、1m×1m の正方形区画で幅 0.1mm 以上のひび割れをスケッチするとともに、0.1m ピッチのメッシュ（測線）を描く。測線を横切るひび割れの本数を測線の総延長で除してひび割れ密度とする。

文献 12)では、北陸地方の既設コンクリート構造物から採取したコンクリートコア 298 試料の強度性状についてとりまとめられている。図-付 6.3.15 より最悪のケースを想定すると、静弾性係数は概ね 10%程度に低下している例が認められる。

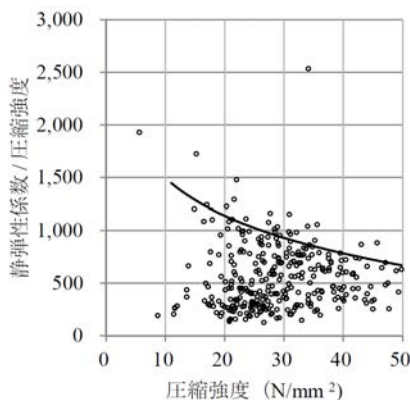


図-付 6.3.15 コアの圧縮強度と静弾性係数の関係¹²⁾

(3) ASR のまとめ

ASR による損傷に関して、以上を加味し、概ね最悪のケースを想定すると、有効数字 1 桁で表記すると表-付 6.3.7 のとおりに設定できる。圧縮強度や静弾性係数の低下領域については、前述のとおりひび割れ深さは床版のほぼ全領域に達しているとみなせるため全域とする。

表-付 6.3.7 仮定した ASR の劣化の程度と損傷度の関係

劣化過程	外観	圧縮強度(%)	静弾性係数(%)
進展期	ひび割れ幅 0.2mm 以下	100	50
加速期	ひび割れ幅 0.2~0.5mm 程度	70	50
劣化期	ひび割れ幅 2mm 以上	50	10

3.1.4 凍害による劣化パラメータ

(1) 凍害による被害の概要

凍害の劣化には、スケーリング、ひび割れ、ポップアウトが代表的であり、それらの進行によってはく離、断面欠損、鉄筋露出などが生じる。凍害による劣化の概念図として、**図-付 6.3.16** ように表面からのスケーリングによる欠損、ひび割れが進展している部分が存在する¹³⁾。ひび割れ領域がコンクリートの内部に広がり、弾性係数が大きく低下する。

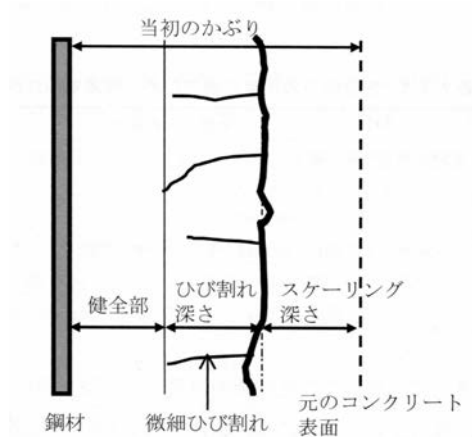


図-付 6.3.16 凍害による劣化の概念図¹³⁾

(2) 凍害による劣化深さ

劣化深さについての研究を概観する。

文献14)において実験供試体について打込み面に対して深さ方向に超音波伝搬速度を測定した結果を**図-付 6.3.17**に示す。深さが100mm程度は超音波伝搬速度が低下しており、ひび割れ等が発生していることを間接的に示している。

文献15)では実構造物のコアを用いて、同様に深さ方向の超音波伝搬速度を調べており、その結果を**図-付 6.3.18**に示す。測定範囲が100mmまでであり100mmの時点では伝搬速度は収束していないためそれ以上の可能性も否定はできないが、影響範囲は80mmである記されている。

超音波伝搬速度から動弾性係数への換算については式(付6.3.3)が提案されており¹⁶⁾、その関係を用いると**図-付 6.3.19**のようになる。

$$E_d = 4.0387V^2 - 14.438V + 20.708 \dots \dots \dots \text{(付 6.3.3)}$$

ここに、 E_d は動弾性係数(GPa)、 V は超音波伝播速度(km/s)である。

文献14)と文献15)では、コンクリート内部の超音波伝播速度とコンクリート表面の超音波伝播速度を測定しているため、上式の超音波伝播速度と動弾性係数の換算式を用いて計算した動弾性係数のコンクリート表面における残存率を**表-付 6.3.8**に示す。

なお、静弾性係数と動弾性係数の関係に関しては、概ね動弾性係数と静弾性係数が比例しているという記述¹⁷⁾があるため、ここではその比率を考えると、動弾性係数の低下率と静弾性係数の低下率は同じであると考える。

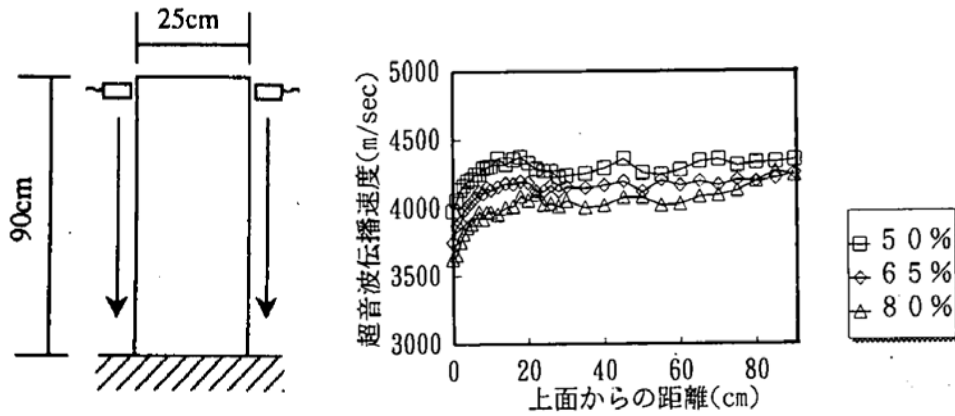


図-付 6.3.17 上面からの深さ毎の超音波伝搬速度¹⁴⁾

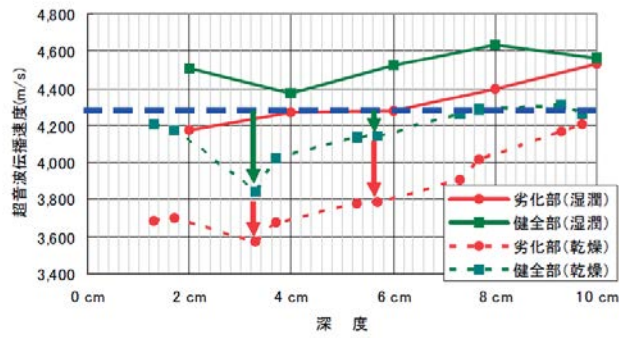


図-付 6.3.18 超音波伝搬速度¹⁵⁾

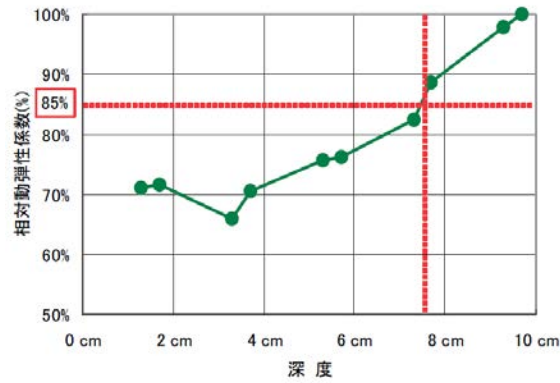


図-付 6.3.19 超音波伝搬速度より求めた相対動弾性係数¹⁵⁾

表-付 6.3.8 動弾性係数のコンクリート表面における残存率

文献 番号	状態	深さ	内部速度	換算 動弾性係数	表面劣化部 の伝搬速度	換算 動弾性係数	動弾性係数 の残存率
		mm	km/s	GPa	km/s	GPa	%
15	劣化部乾燥	80	4.30	33.30	3.60	21.1	63
15	劣化部湿潤	80	4.30	33.30	3.80	24.2	73
14	W/C=50	100	4.30	33.30	4.00	27.6	83
14	W/C=65	100	4.15	30.35	3.75	23.4	77
14	W/C=80	100	4.00	27.58	3.60	21.1	76

文献 18)では、凍害を対象として、有限要素法により解析した事例が報告されている。その中において、圧縮強度を 2/3, 1/3 に低下させている事例、劣化の範囲を 4/H (H は断面高さ)、2/H, 100mm としている事例がある。パラメトリックスタディの一環であり、それらの材料劣化が報告されているわけではないが、参考となる。

(3) 凍害のまとめ

以上を概観した結果に加え、ヒアリング結果等も考慮して、凍害劣化による損傷度について表-付 6.3.9 のとおり定めた。

表-付 6.3.9 仮定した凍害の劣化の程度と損傷度の関係

劣化過程	コンクリート			
	圧縮 強度	弾性 係数	上面 かぶり	下面 かぶり
軽度	—	● 上から30mm70% ※1	—	—
加速期 (前期) ～ 加速期 (後期)	● 上から80mm70% ※1	● 上から80mm70%	● 上から10mm損失 ※1	—
劣化期	● 上から80mm70% ※1	● 上から80mm40% ※1	● 完全に(30mm)なし ※2	—

※ —印は変更しないことを表す

※1 他のレベルの数値と比較しながら補間的に決定したもの

※2 現場で見られる最悪の条件を想定

3.1.5 劣化パラメータのまとめ

ここでは、主として実構造物の調査結果に基づいて、塩害、凍害、ASR に関する劣化パラメータをグレード毎に設定した。しかしながら、文献は全てのケースを網羅できておらず、多くは工学的判断も併せて値を提案した。今回は、解析において検討するための設定値を定めることが目的であったため、必ずこれらの値の劣化が生じるわけではないことを付記する。

3.2 検討手法

解析の利点のひとつは、劣化要因をパラメータとして、床版剛性や床版耐力に与える影響を調べることができることにある。ここでは、以降の解析を進めるにあたり、対象とした床版の概要と解析ケース、床版の検討法についての説明を行う。

3.2.1 示方書の変遷と対象とした床版の概要

RC床版は適用された設計基準により耐久性は異なり、図-付6.3.20に示す輪荷重走行試験の研究成果¹⁹⁾から、昭和39年道示（以前含む）で設計されたRC床版は相対的に耐久性が低く、平成8年道示以降は耐久性が高いと位置づけられる。示方書の変遷からは、昭和39年道示以前と昭和55年道示以降では疲労に対する耐久性が大きく異なり、昭和47年道示はその遷移期とみなすことができる。一方、ASRや塩害に対しては、旧建設省から「コンクリート中の塩化物総量規制について（大臣官房技術審議官通達 昭和61年6月）」、「アルカリ骨材反応抑制対策について（建設省技調発第370号 平成元年7月）」の通達、また、塩害が想定される地域を対象とした「塩害対策指針（案）・同解説」（日本道路協会 昭和59年2月）により、対策がなされた。これらの対策がなされる前に建設された、北陸自動車道、東北自動車道、中央自動車道、中国自動車道などでは、塩害およびASRにより損傷が報告されており、昭和47年道示によって設計された床版が多く含まれている。

そこで、複合劣化を仮定したFEMによる解析では、昭和39年と昭和47年道示による床版を対象として検討を進めることとした。ここで、図-付6.3.20に示した輪荷重走行試験の報告は文献20)で報告されており、その試験体概要を図-付6.3.21～図-付6.3.22に示す。後述の3.3.2、3.4.3、3.5.2の検討では、この供試体を対象にパラメータを変化させて検討を行うこととした。また、3.4.1、3.5.1に示す耐荷力の検討では、適用された規定に対する復元設計を行い耐荷力の比較を行った。ここで、参考としてわが国における床版規定として、「大正15年道路構造細則」から「平成24年道路橋示方書」までの示方書の変遷を示す。

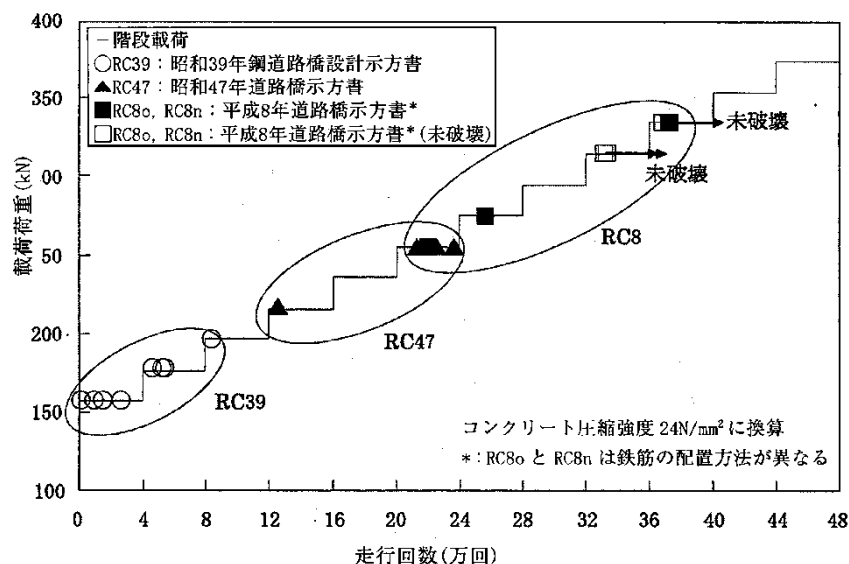


図-付6.3.20 RC床版の輪荷重走行試験結果の例¹⁹⁾

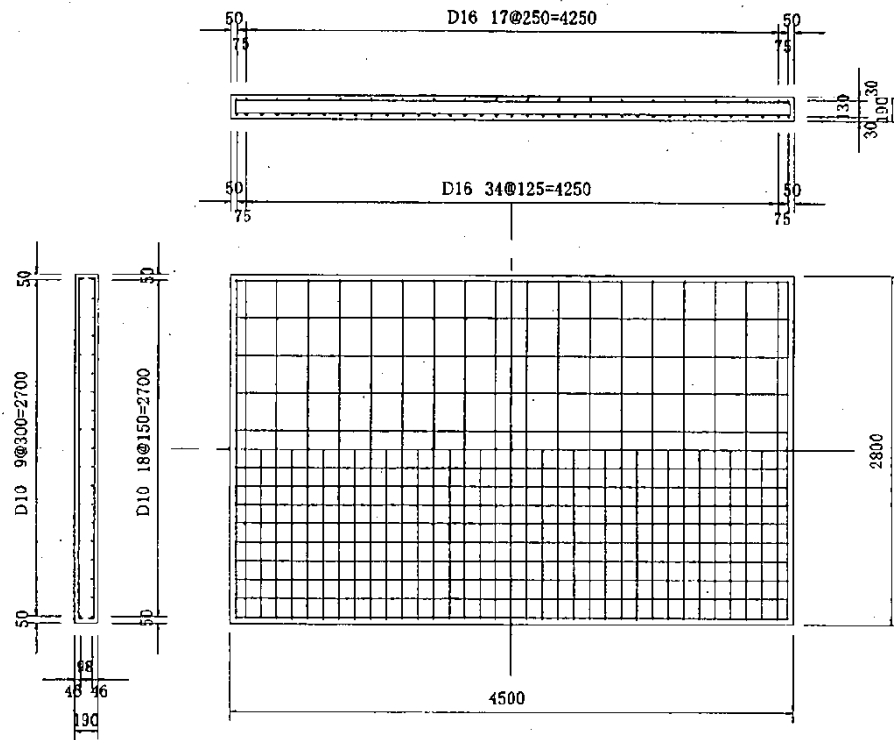


図-付 6.3.21 土木研究所による輪荷重走行試験供試体の形状・寸法 (昭和 39 年道示)²⁰⁾

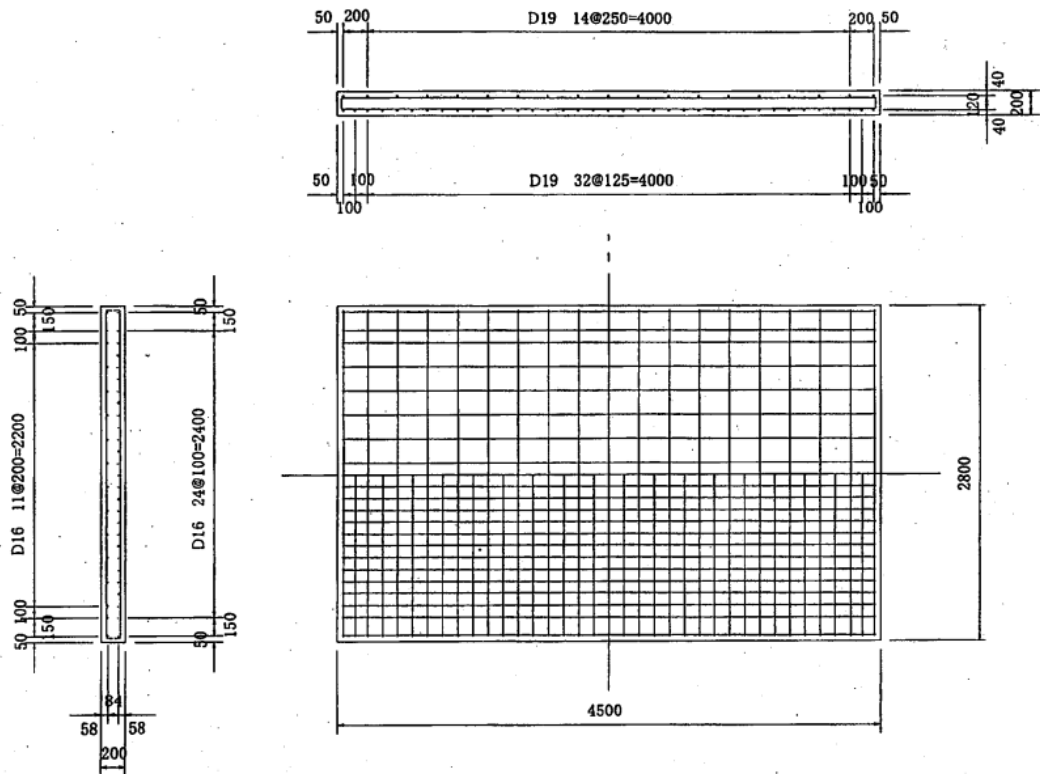


図-付 6.3.22 土木研究所による輪荷重走行試験供試体の形状・寸法 (昭和 47 年道示)²⁰⁾

表-付 6.3.10 道路橋の鉄筋コンクリート床版に関する設計規定の変遷

規定等の名称	制定年月	最小厚(cm)	許容応力度(kgf/cm ²)		連続版の設計曲げモーメント(M)の算定式 (P:輪荷重,L:床版支間,i:衝撃係数)	
			鉄筋	コンクリート		
道路構造に関する細則案	1926年 大正15年6月	規定なし	1200	45	$M = \frac{P(L-b/2)}{4}(1+i), i = \frac{20}{60+L} \leq 0.3$	1等橋 P=4.5t
鋼道路橋設計示方書(案)	1939年 昭和14年2月	全厚:14 有効:11	1200	45 $\sigma_{28}/3 \leq 65$	$M = \frac{P(L-b/2)}{4}(1+i), i = \frac{20}{50+L}$	1等橋 P=5.2t
鋼道路橋設計示方書	1956年 昭和31年5月		1300	$\sigma_{28}/3 \leq 70$ $\sigma_{28} \geq 160$	$M = \frac{0.4P(L-1)}{L+0.4}(1+i), i = \frac{20}{50+L}$ 配力鉄筋:主鉄筋の25%以上	1等橋 P=8.0t 2 ≤ L ≤ 4m
鋼道路橋設計示方書	1959年 昭和39年6月		1400 (SS41) 1600 (SS50) 1800 (SSD49)	$\sigma_{28}/3 \leq 80$ $\sigma_{28} \geq 180$	$M = \frac{0.4P(L-1)}{L+0.4}(1+i), i = \frac{20}{50+L}$ 配力鉄筋:主鉄筋の70%以上	
鋼道路橋一方鉄筋コンクリート床版の配力鉄筋設計要領	1967年 昭和42年9月					
鋼道路橋の床版設計に関する暫定基準(案)	1968年 昭和43年5月	3L+11 ≥16	1400 (SD24,S D30)	$\sigma_{28}/3 \leq 100$ $\sigma_{28} \geq 210$	$M = 0.8 \cdot (0.12L + 0.07)P$:主鉄筋 $M = 0.8 \cdot (0.10L + 0.04)P$:配力鉄筋 (衝撃を含む算定式)	1等橋 P=8.0t L ≤ 4m 大型車計画 交通量1000 台超の時 P=9.6tに割増
鉄筋コンクリート床版の設計について	1971年 昭和46年3月					
道路橋示方書	1973年 昭和48年2月					
道路橋鉄筋コンクリート床版の設計,施工について	1978年 昭和53年4月	$d_0 = 3L + 11 \geq 16$ $d = k_1 k_2 d_0$ k ₁ :交通量係数 k ₂ :付加 モーメント係数	1400 -200	$\sigma_{28}/3 \leq 100$ $\sigma_{28} \geq 240$	$M = 0.8\alpha \cdot (0.12L + 0.07)P$:主鉄筋 $M = 0.8\alpha \cdot (0.10L + 0.04)P$:配力鉄筋 $\alpha = 1 + (L - 2.5)/12$: L ≥ 2.5に対する割増し係数(衝撃を含む算定式)	B活荷重 P=10.0t L ≤ 4m
道路橋示方書	1980年 昭和55年2月					
道路橋示方書	1990年 平成2年2月					
建設省都市局・道路局通達	1993年 平成5年2月					
道路橋示方書	1994年 平成6年2月					
道路橋示方書	1996年 平成8年2月					
道路橋示方書	2002年 平成14年3月					

主な改定項目は、設計輪荷重(P)、設計活荷重曲げモーメント計算式、最小床版厚(t)などの項目に対して改訂が加えられている。設計輪荷重は年代が新しくなるに従い大きくなり、主筋の活荷重曲げモーメント算出法は昭和31年と昭和46年に算出式が改訂されている。また、配力筋量に関しては、昭和42年(昭和31年以前は明確な規定なし)までは主筋の25%と規定されていたが、以降は主筋の70%以上と増加している。さ

らに、床版の損傷が顕在化してきた昭和 53 年以降は鉄筋の許容応力度に対して 200kgf/cm²程度余裕を持たせるよう規定されている。

3.2.2 板理論に基づくたわみの計算

本報告では、複合劣化を生じた RC 床版の評価指標として、たわみに着目している。床版たわみの算出方として、板理論に基づく解析手法を用いる方法がある。

この解析方法は薄板理論による理論解析手法であり、道路橋示方書の設計曲げモーメントはこの方法により算定されている。図-付 6.3.23 に示す力のつり合いと断面力と曲率の関係式で与えられる板の基本式を、境界条件と荷重条件のもとで理論的に解く方法である²¹⁾。繰り返し計算により解を収束させる計算手法であり、道路橋示方書では、2 辺単純支持の等方性の無限板としてこの解析手法により設計モーメントが算出される。最近ではエクセルによるプログラムを組めば計算ができるため、この解析法を適用することは容易である。

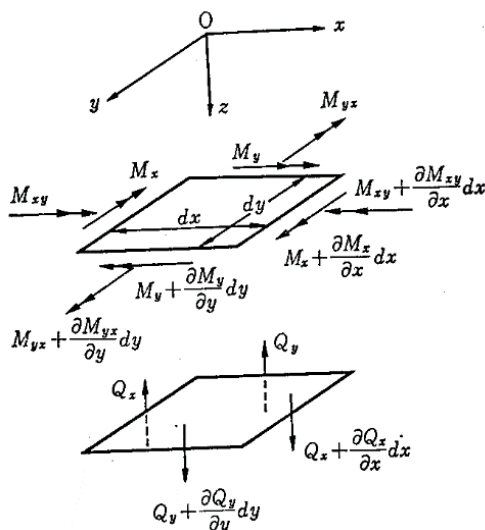


図-付 6.3.23 板における曲げおよびせん断の力のつり合い²¹⁾

複合劣化による損傷は版剛性の評価で表現され、版剛性は、弾性係数、せん断弾性係数、ポアソン比、板厚がパラメータになる。コンクリートを全断面有効とした等方性板の版剛性、あるいは、引張コンクリート無視の状態と等価な版剛性を設定することが可能であるが、厚さ方向には一様な剛性評価となる。この解析方法による複合劣化を仮定したたわみの計算は、3.3.1 で示される。この薄板理論の応用として、厚さ方向にも異なる剛性評価が可能な多層版理論²²⁾、あるいは、板厚方向のせん断変形を考慮した厚板理論も床版の解析に用いられる例もある。

3.2.3 コンクリート標準示方書による耐荷力の計算

コンクリート標準示方書による床版の耐荷力式²³⁾は、押抜きせん断耐力が梁のせん断耐荷力式と同形式で表されると仮定して、下記の式(付 6.3.4)で与えられる。この耐荷力式は、種々のパラメータを実験的な研究により検討した角田の式²⁴⁾を基にしている。

$$V_{us} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d \quad \dots \dots \dots \quad (\text{付 6.3.4})$$

ここに,

$$f_{pcd} = 0.20\sqrt{f'_{cd}} \quad \text{ただし, } f_{pcd} \leq 1.2N/mm^2$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1000/d} \quad \text{ただし } \beta_d > 1.5 \text{ となる場合は } 1.5 \text{ とする.}$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p_r} \quad \text{ただし } \beta_p > 1.5 \text{ となる場合は } 1.5 \text{ とする.}$$

$$\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$$

u : 載荷面の周長(mm)

u_p : 設計断面の周長(mm)で, 載荷面から $d/2$ だけ離れた位置の周長とする.

d : 有効高さ(mm)

p_c : せん断引張鋼材比で, 2 方向に配置された鉄骨・鉄筋に対する平均値とする.

f_{cd} : コンクリートの設計圧縮応力度(N/mm²)

コンクリート標準示方書式は, 圧縮せん断抵抗が耐力に寄与すると仮定しており, 寸法効果が考慮されている. このコンクリート標準示方書式に対して, 後述する松井の式では, これにダウエル作用による床版下面のはく離も耐力に寄与すると仮定している.

3.2.4 松井式による耐荷力の算定と疲労寿命の計算

道路橋 RC 床版の疲労強度式として松井によって提案された以下の式 (付 6.3.5)²⁵⁾ が用いられる場合が多い²⁾.

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.520 \quad \dots \dots \dots \quad (\text{付 6.3.5})$$

ここに,

N : 繰り返し回数

P : 作用荷重

P_{sx} : はり状化を考慮した床版耐荷力

ここで, 床版耐荷力 P_{sx} は, 図-付 6.3.24 の抵抗メカニズムに基づく, はり状化を考慮した耐荷力式であり, 以下の式 (付 6.3.6) で表わされる.

$$P_{sx} = 2B(\tau_{max} \cdot X_m + \sigma_{max} \cdot C_m) \quad \dots \dots \dots \quad (\text{付 6.3.6})$$

ここに,

B : 疲労に対する有効幅 $B = b + 2d_d$

b : 輪荷重の軸方向の辺長

d_d : 配力筋の有効高さ

τ_{max} : コンクリートの最大せん断応力度

X_m : 主鉄筋断面で引張側コンクリートを無視した場合の圧縮縁からの中立軸距離

σ_{max} : コンクリートの最大引張応力度

C_m : 引張り主鉄筋のかぶり

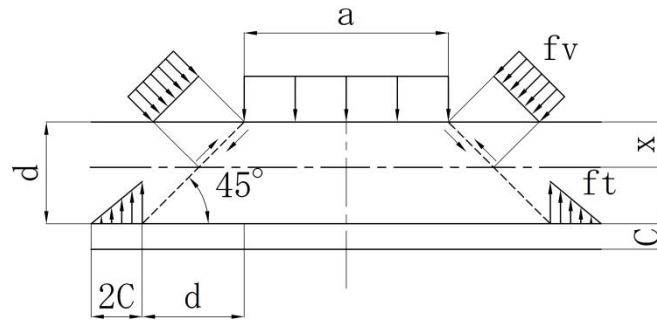


図-付 6.3.24 松井式における床版耐力 P_{sx} の抵抗メカニズム⁷⁾

式(付 6.3.6)の疲労強度に対して、作用荷重 P が既知であれば疲労寿命は予測できる。なお、床版に水が浸入すれば寿命は大きく低下する²⁶⁾。

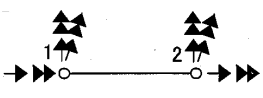
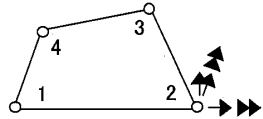
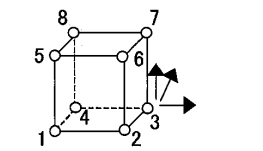
式(付 6.3.6)から、 P_{sx} により疲労強度は変動することがわかる。はり状化を考慮した床版耐荷力 P_{sx} は、図-付 6.3.24に示すように床版の中立軸より上の圧縮側の領域でのせん断抵抗と、引張鉄筋がダウエル作用により床版下面のかぶりを剥がす抵抗力の和として与えられる。この式によると、輪荷重の接地寸法、コンクリート引張強度(コンクリート圧縮強度の関数)、床版厚および中立軸の位置が耐荷力に大きく影響する。また、上下の鉄筋量やコンクリートのヤング係数比については、中立軸の位置に影響するので、これらのパラメータについても耐荷力に影響を及ぼす。ここで、コンクリート標準示方書で考慮されている寸法効果については、床版厚の範囲が限定されていることからパラメータとしては考慮されていない。

複合劣化を受ける床版では、弾性係数や圧縮強度の低下、鉄筋の断面欠損量が P_{sx} に及ぼす影響、また床版の凍害に対しては床版上面から損傷が進むので、見かけ上は損傷を受けた部分の床版厚を小さくすることで P_{sx} に及ぼす影響が検討でき、寿命低下の程度を予測することができる²⁷⁾。またさらに、塩害による損傷で下面の鉄筋位置で水平ひび割れが生じている床版では、ダウエル効果そのものが期待できないので、松井式を修正して耐荷力を予測する方法も試みられている²⁸⁾。

松井式による P_{sx} と床版寿命に対する検討は、3.4.2, 3.5.1で示される。

3.2.5 FEM

FEMは板の基本式を近似的に解くための数値解析方法であり、形状関数で定義される要素の選定と、材料としての構成則の選定により、パラメータ解析の自由度が大きいのが特徴である。要素の選定として、床版に適用できる代表的な要素を図-付6.3.25に示す。

要素	名称	節点数	自由度	適用構造	入力条件・備考
	はり要素 (棒要素)	2	6 (2)	鉄筋	棒構造 断面積
	シェル要素	4	5	板構造	板構造 板厚
	ソリッド要素	8	3	コンクリート 鉄筋コンクリート	立体構造 鉄筋組込みも可能

共通入力条件：弾性係数，せん断弾性係数，ポアソン比，材料構成則

記号 \rightarrow : 変位, 力 $\rightarrow\rightarrow$: 回転, モーメント

図-付6.3.25 代表的要素

材料非線形を考慮して解析を行う場合は、材料構成則と破壊規準の選定が重要になる。材料構成則については汎用ソフトに依るところが大きく、直交異方性の方向に非線形を定義する方法や、降伏関数を定義して流れ則を適用する方法が代表的である。降伏関数としては、鋼材ではフォン・ミゼスの降伏規準、コンクリートではドラッカー・プラガーの降伏規準が適用される場合がある。鉄筋コンクリート要素の構成則としては、引張軟化の影響とひび割れ後の挙動も表現できる前川・岡村モデル²⁹⁾が最近の解析例で用いられるようになっており、床版の輪荷重走行試験の解析にも適用されるようになってきている³⁰⁾。この前川・岡村モデルの汎用ソフトとして、高サイクル疲労損傷を再現する履歴経路積分型の疲労非線形有限要素解析 (COM3D・東京大学開発) があり、以下に概要を説明する。

コンクリートおよび鉄筋コンクリート要素の構成則は、ひび割れを内在する有限体積に適用される構成則を使用している³¹⁾。本構成則は、複数の微細なひび割れの挙動を有限体積上で平均化することにより、有限要素の平均ひずみ-平均応力関係が規定される (分散ひび割れモデル)。ひび割れ以後の、ひび割れ開口方向の直応力及びひび割れ面に沿ったせん断応力伝達機構、さらに鉄筋とコンクリート間の付着とひび割れ位置での鉄筋の塑性局所化は、すべて有限要素の平均ひずみ-平均応力関係の中で再現される。これをひずみ経路に沿って経路積分することにより、応力とあわせて塑性・損傷状態を直接算出することが可能である。床版のように、構造内に分散して配置された鉄筋により、多数のひび割れが分散する場合には、全体挙動を再現するのに合理的な手法である。

平均ひずみ-平均応力関係は、図-付6.3.26に示す1次元の圧縮、引張、ひび割れ面せん断伝達のモデルから構成される。3次元の非線形構造解析における多方向複数のひび割れは、多方向非直交固定ひび割れモデルを組み込むことで再現した。これにより、荷重の履歴に応じたひび割れの発生と発生後の挙動とを、3次元で再現することができる。

	Compression model	Tension model	Crack shear model
Core Constitutive low	<p>Stress-strain</p> $\sigma = E_0 K_C \epsilon_e$ $\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p$	<p>Stress-strain</p> $\sigma = E_0 K_T \epsilon_e$ $\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p$	<p>Shear stress-shear strain</p> $\tau = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} R_c'(\omega, \delta, \theta) \sin \theta d\theta$
Enhanced model for High cycle fatigue	<p>Fracture parameter K_C considers time dependent plasticity & fracturing and cyclic fatigue damage</p> $dK_C = \left(\frac{\partial K_C}{\partial t} \right) dt + \left(\frac{\partial K_C}{\partial \epsilon_e} \right) d\epsilon_e$ <p>time dependent cyclic fatigue</p> $\left(\frac{\partial K_C}{\partial \epsilon_e} \right) = \lambda \sim \text{when } F_k = 0$ $\left(\frac{\partial K_C}{\partial \epsilon_e} \right) = - \left(\frac{\partial F_k}{\partial \epsilon_e} \right) \left(\frac{\partial F_k}{\partial K} \right) + \lambda \sim \text{when } F_k \neq 0$ $\lambda = K^3 \cdot (1 - K^4) \cdot g \cdot R$ <p>EI-Kachif and Maekawa 2004</p>	<p>Fracture parameter K_T considers time dependent fracturing and cyclic fatigue damage</p> $dK_T = F dt + G d\epsilon_e + H d\epsilon_e$ <p>Time dependent fracturing Cyclic fatigue damage</p> <p>Maekawa et al. 2003, Hisasue 2005</p>	<p>Accumulated path function X reduce shear associated with cyclic fatigue damage</p> $\tau = X \cdot \tau_0(\delta, \omega)$ <p>function original model</p> $X = 1 - \frac{1}{10} \log_{10} \left(1 + \int d(\delta/\omega) \right) \geq 0.1$ <p>Contact density model by Li & Maekawa 1989 Modification of accumulated path function by Gebreyouhannes 2006</p>
Physical meaning	Decrease of stiffness and plasticity accumulation by continuous fracturing of concrete	Decrease of tension stiffness by bond fatigue	Decrease of shear transfer normal to crack by continuous deterioration of rough crack surface

図-付 6. 3. 26 COM3D におけるコンクリート要素の基本構成則 (1 次元)

コンクリートの高サイクル疲労損傷も、図-付 6. 3. 26 の 1 次元の基本構成則のレベルで考慮されている³⁾。繰り返し荷重を受けるコンクリートでは、塑性変形が進行するだけでなく、コンクリート内部に発生する微細なひび割れの進展により、除荷および再載荷時の弾性剛性の低下 (損傷) が徐々に進行する。この挙動は、圧縮と引張の基本構成則において、破壊パラメータとして組み込まれている。鉄筋とコンクリートの付着疲労に起因する剛性低下は、引張側の損傷として解析に反映される。一方、コンクリートひび割れ面に沿った方向のせん断応力伝達モデルでは、繰り返し回数に応じてせん断力伝達機能を低下させる微小損傷項が導入されている。通常、骨材を含む普通強度のコンクリートでは、ひび割れ面には凹凸が生じる。この凹凸が、繰り返し荷重による擦り磨き効果で平滑化し、かみ合わせ作用が低下する現象をモデル化したものである。以上の構成則の詳細については、参考文献を参照されたい。

このモデルによる解析検討は、3. 3. 2, 3. 4. 3, 3. 5. 2 で示される。

3.2.6 解析におけるパラメータ

以上に示した解析検討手法に対して、前述の3.1に示したように複合劣化を表すパラメータを表-付6.3.11～表-付6.3.13のように変化させて検討を行う。

表-付6.3.11 仮定した塩害の劣化の程度と損傷度の関係

劣化過程	コンクリート				上面（圧縮）鉄筋				下面（引張）鉄筋			
	圧縮強度	弾性係数	上面かぶり	下面かぶり	弾性係数	降伏点	断面積	付着・定着※1	弾性係数	降伏点	断面積	付着・定着
加速期（前期）	—	—	—	—	—	—	● 5%減	● 0.74	—	—	—	—
加速期（後期）	—	—	● 完全になし	—	—	—	● 20%減	● 0.30	—	—	—	—
劣化期	—	—	● 完全になし	—	—	—	● 50%減	● 0.05	—	—	—	—

※ —印は変更しないことを表す

※1 式（付6.3.2）による

表-付6.3.12 仮定したASRの劣化の程度と損傷度の関係

劣化過程	外観	圧縮強度(%)	静弾性係数(%)
進展期	ひび割れ幅 0.2mm 以下	100	50
加速期	ひび割れ幅 0.2～0.5mm 程度	70	50
劣化期	ひび割れ幅 2mm 以上	50	10

表-付6.3.13 仮定した凍害の劣化の程度と損傷度の関係

劣化過程	コンクリート			
	圧縮強度	弾性係数	上面かぶり	下面かぶり
進展期	—	● 上から30mm70% ※1	—	—
加速期（前期） ～ 加速期（後期）	● 上から80mm70% ※1	● 上から80mm70%	● 上から10mm損失 ※1	—
劣化期	● 上から80mm70% ※1	● 上から80mm40% ※1	● 完全に(30mm)なし ※2	—

※ —印は変更しないことを表す

※1 他のレベルの数値と比較しながら補間的に決定したもの

※2 現場で見られる最悪の条件を想定

3.3 使用状態に関する検討

3.3.1 複合劣化を仮定したたわみの計算

橋梁の定期点検要領では、ひび割れ等の外観上の損傷度ランクによる判定により床版の健全性について評価を行っているが、定性的な判定のため、点検者の判断により差が生じやすい。一方、床版たわみは、材料劣化に伴うコンクリートの弾性係数の低下や、上面劣化に伴うかぶり厚の減少等による断面剛性の変化が表れやすく、床版たわみを使用状態の劣化指標として評価する手法が提案されている。そのため、定性的な外観目視による損傷度と床版たわみとの関係について、既往の文献調査を行い、床版の健全性を定量的に評価することを試みた。しかし、既往の文献調査により、外観目視による損傷度と床版たわみとの関係を検討している文献は数少ないことから、以下に示すように、複合劣化による各種パラメータの減少割合が床版たわみに及ぼす影響について試算を行うこととした。ここでは、前述 3.2.2 に示した板理論に基づいて床版たわみを求めている。

【板理論による床版たわみの計算】

既往の国総研資料 28²⁰⁾に準拠して、S39 道示床版および S47 道示床版について、各劣化要因により上面かぶり厚、鉄筋量、弾性係数が減少した場合のたわみ量を求め、各種パラメータの減少割合が床版たわみにどの程度影響するか確認を行った。板理論による計算および後述 3.3.2 に示す FEM 解析に用いた基準床版は次のとおりである。

- i) 国総研資料 28 に示す昭和 39 年示方書準拠床版および昭和 47 年示方書準拠床版とした。
- ii) 橋軸方向 4500mm、橋軸直角方向 2800mm（支間長 2500mm）、版厚 190mm および 200mm とした。
- iii) 配筋は、昭和 39 年および昭和 47 年示方書について、表-付 6.3.14 のとおりとした。
- iv) コンクリートに関する物性値は、国総研資料 28 より以下の実験値を使用した。コンクリートの材料試験結果を表-付 6.3.15 に示す。
- v) 鉄筋に関する諸数値は、国総研資料 28 より以下の実験値を使用した。鋼材の材料試験結果を表-付 6.3.16 に示す。

表-付 6.3.14 昭和 39 年および昭和 47 年示方書準拠床版の配筋

適用示方書	S39		S47	
	橋軸方向（配力筋）	直角方向（主筋）	橋軸方向（配力筋）	直角方向（主筋）
上面	D16 ctc 200	D19 ctc 250	D16 ctc 200	D19 ctc 250
下面	D16 ctc 100	D19 ctc 125	D16 ctc 100	D19 ctc 125

表-付 6.3.15 コンクリートの材料試験結果 (床版)

供試体名	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	ポアソン比	引張強度 (N/mm ²)
RC39-1	26.9	2.05	0.178	1.94
RC39-2	28.6	2.19	0.147	2.63
RC39-3	13.6	1.62	0.191	1.44
RC39-4	29.7	2.39	0.172	2.69
RC39-5	31.1	2.34	0.170	2.49
RC39-6	28.4	2.18	0.161	2.21
RC39-7	25.4	2.39	0.123	2.15
RC39-8	27.1	2.32	0.173	2.42
RC39-9	26.6	2.68	0.168	2.34
RC39+鋼板-1	25.9	2.07	0.159	2.5
RC39+鋼板-2	29.2	2.22	0.172	2.02
RC39+上面-1	27.1	2.16	0.131	2.57
RC39+上面-2	25.6	2.18	0.135	2.15
RC47-1	29.9	2.31	0.184	2.92
RC47-2	35.6	2.61	0.169	2.69
RC47-3	36.3	2.65	0.165	2.94
RC47-4	32.9	2.47	0.182	2.52
RC8o-1	27.1	2.42	0.168	2.34
RC8o-2	46.5	2.88	0.152	4.04
RC8o-3	45.4	2.63	0.144	3.91
RC8n-1	33.1	2.79	0.15	2.64
RC8n-2	38.4	2.57	0.130	2.84
RC8n-3	37.4	2.65	0.167	3.14
PC8-1	42.9	2.67	0.166	3.66
PC8-2	50.0	3.31	0.193	3.77

表-付 6.3.16 鋼材の材料試験結果

供試体名	鉄筋径	降伏点 (N/mm ²)	弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	伸び (%)
RC39-1	D10	343	489	21.9
	D13	360	531	22.9
	D16	340	507	25.1
RC39-2	D10	358	493	20.9
	D16	353	502	18.8
RC39-3~6	D10	362	505	16.3
	D13	339	478	19.9
	D16	380	553	17.9
RC39-7,8	D10	368	514	20.0
	D13	326	477	22.2
	D16	345	509	20.3
RC39-9	D10	387	582	18.5
	D13	347	494	22.9
	D16	358	523	19.6
RC39+鋼板-1	D10	332	480	23.9
RC39+上面-1	D13	331	461	25.1
	D16	343	519	19.3
RC39+鋼板-2	D10	368	514	20.0
RC39+上面-2	D13	326	477	22.2
	D16	345	509	20.3
RC47-1	D16	353	502	18.8
	D19	344	502	18.2
RC47-2	D16	358	520	27.2
	D19	361	529	25.2
RC47-3	D16	358	520	27.2
	D19	361	529	25.2
RC47-4	D16	358	520	27.2
	D19	361	529	25.2
RC8o-1	D13	331	474	23.2
	D16	347	508	20.7
	D19	353	533	20.0
RC8o-2	D13	338	484	28.5
	D16	358	520	27.2
	D19	361	529	25.2
RC8o-3	D13	338	484	28.5
	D16	358	520	27.2
	D19	361	529	25.2
RC8n-1	D16	358	518	26.1
	D19	334	495	27.3
RC8n-2	D16	358	518	26.1
	D19	334	495	27.3
RC8n-3	D16	358	520	27.2
	D19	361	529	25.2
PC8-1	D13	360	515	25.4
PC8-2	D19	354	513	25.3
	19.3	-	1974	-

床版たわみの計算は板理論に基づき、過去に土木学会床版委員会で作成したプログラム（エクセル計算）を用いて、全断面有効および引張側コンクリート無視時のたわみを算出した。材料劣化の影響については、前述 3.1 に示す文献調査結果に基づいて、計算に用いる数値を設定した。ここでは表-付 6.3.17 に示す各種パラメータの減少割合を設定し、たわみを試算した。なお、劣化によるコンクリートの弾性係数の低下は、厚さ方向に一樣に生じた状態としている。たわみの計算値は、各種パラメータの割合が減少した場合の剛性低下の影響のみ考慮している。たわみの計算結果を表-付 6.3.18～表-付 6.3.19, 図-付 6.3.27～図-付 6.3.28 に示す。

表-付 6.3.17 計算ケース

横軸(パラメータ)		塩害	ASR	凍害
かぶり厚 (上面)	10mm減			○
	30mm減	○		○
鉄筋量 (圧縮側)	5%減	○		
	20%減	○		
	50%減	○		
弾性係数 (全厚)	70%			○
	50%		○	
	40%			○
	10%		○	

床版たわみを求める際の条件

床版サイズ：4,500mm×2,800mm×190mm (S39 道示床版)，4,500mm×2,800mm×200mm (S47 道示床版)

支持間隔：2,500mm

$E_c=23.4\text{kN/mm}^2$ (S39 道示床版)， $E_c=24.7\text{kN/mm}^2$ (S47 道示床版)， $E_s=200\text{kN/mm}^2$ ，ポアソン比=0.167

載荷荷重 100kN，載荷板面積 200×500mm，2 辺単純支持，2 辺弾性支持（両端部）とする。

弾性支持梁：既往の研究と同様の H 形鋼（H300×300）

図-付 6.3.27～図-付 6.3.28 より、各種パラメータの減少による床版たわみへの影響は以下のとおりである。

- i) 上面かぶり厚が 10mm 減少するとたわみが約 1.15 倍に増加し、30mm 減少すると約 1.5～1.6 倍に増加する。
- ii) 全断面有効および引張無視時ともに、圧縮側の鉄筋量減少によるたわみ量への影響は小さい。
- iii) 全断面有効の場合、コンクリートの弾性係数が 70%に低下するとたわみは約 1.4 倍に増加し、40%に低下すると約 2.2～2.3 倍に増加する。引張無視の場合は、弾性係数が 70%に低下するとたわみは約 1.1 倍に増加し、40%に低下すると約 1.2～1.3 倍に増加する。

参考までに後述 3.3.2 の FEM 解析によるたわみの計算値について、同様に整理したものを表-付 6.3.20 および図-付 6.3.29 に示す。

表-付 6.3.18 床版たわみの計算値と比率

(S39道示床版)

横軸 (パラメータ)			全断面有効		引張無視	
			たわみ(mm)	比率	たわみ(mm)	比率
かぶり厚 (上面)	健全	0	0.64	1.00	3.07	1.00
	10mm減	10	0.75	1.16	3.51	1.14
	30mm減	30	1.02	1.59	4.66	1.52
鉄筋量 (圧縮側)	健全	0	0.64	1.00	3.07	1.00
	5%減	5	0.64	1.00	3.07	1.00
	20%減	20	0.65	1.01	3.07	1.00
	50%減	50	0.65	1.02	3.08	1.00
弾性係数 (全厚)	健全	100	0.64	1.00	3.07	1.00
	70%	70	0.93	1.45	3.34	1.09
	50%	50	1.24	1.93	3.61	1.18
	40%	40	1.49	2.32	3.81	1.24
	10%	10	3.85	6.00	5.54	1.80

【 全断面有効の場合 】

【 引張無視の場合 】

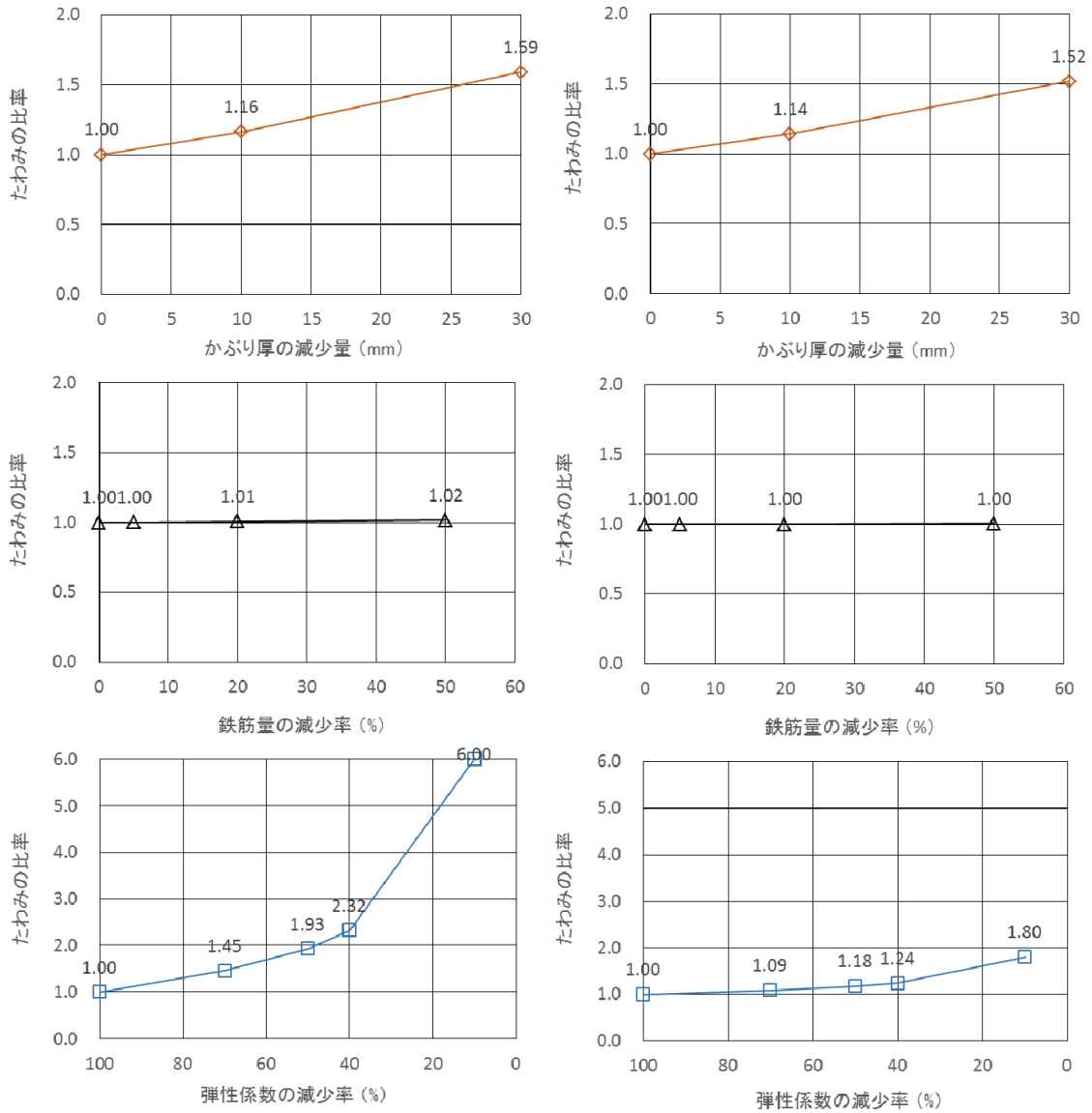


図-付 6.3.27 健全時とのたわみ比率 (S39 道示床版) : 板理論

表-付 6.3.19 床版たわみの計算値と比率

(S47道示床版)

横軸 (パラメータ)			全断面有効		引張無視	
			たわみ(mm)	比率	たわみ(mm)	比率
かぶり厚 (上面)	健全	0	0.54	1.00	1.69	1.00
	10mm減	10	0.62	1.15	1.95	1.15
	30mm減	30	0.82	1.53	2.60	1.54
鉄筋量 (圧縮側)	健全	0	0.54	1.00	1.69	1.00
	5%減	5	0.54	1.00	1.69	1.00
	20%減	20	0.54	1.01	1.69	1.00
弾性係数 (全厚)	50%減	50	0.55	1.02	1.70	1.01
	健全	100	0.54	1.00	1.69	1.00
	70%	70	0.73	1.37	1.87	1.11
	50%	50	0.96	1.80	2.07	1.22
	40%	40	1.15	2.15	2.22	1.31
	10%	10	2.71	5.07	3.46	2.05

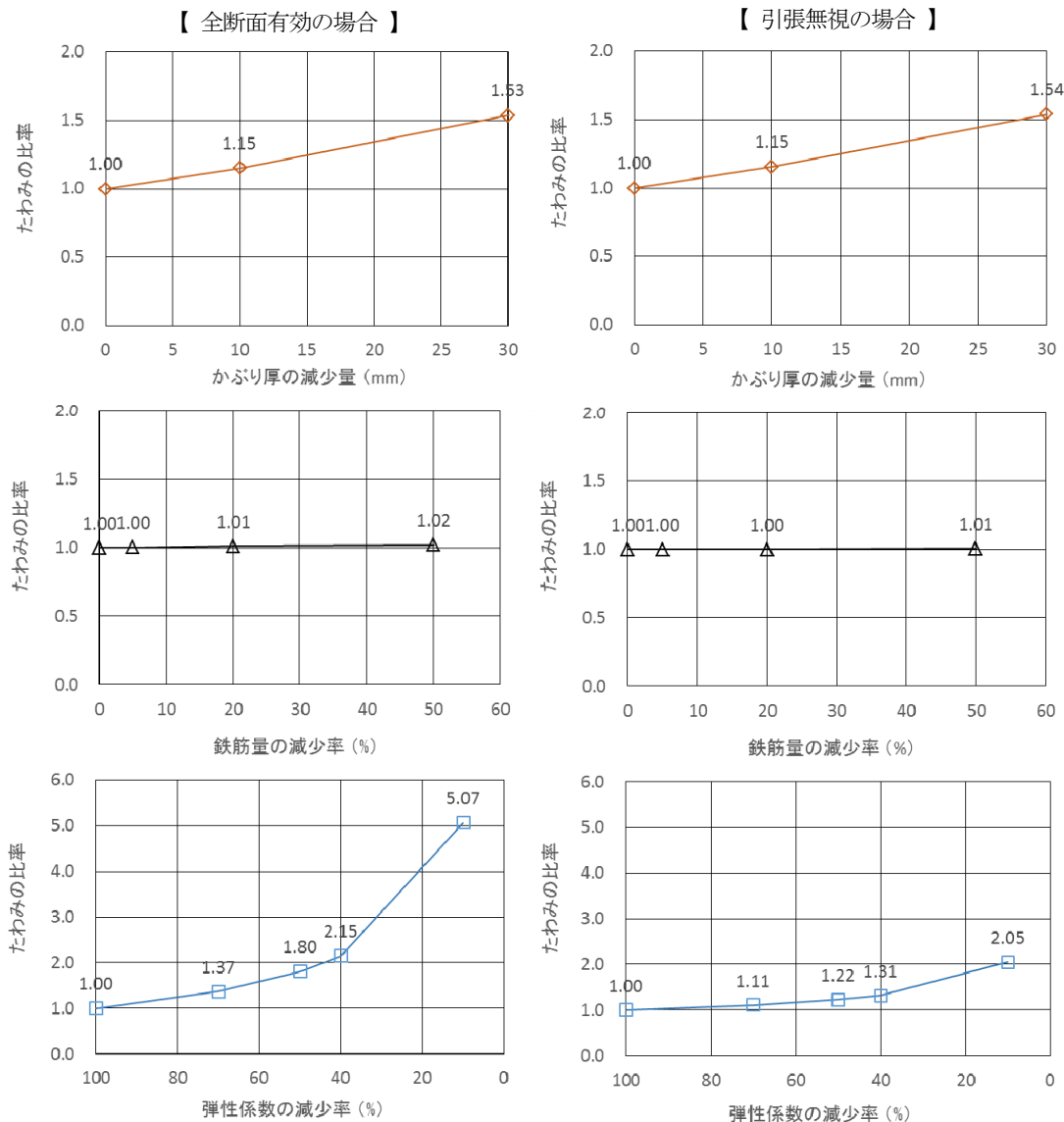


図-付 6.3.28 健全時とのたわみ比率 (S47 道示床版) : 板理論

表-付 6.3.20 床版たわみの計算値と比率

(S47道示床版:FEM解析)

横軸 (パラメータ)		たわみの 比率	
かぶり厚 (上面)	健全	0	1.00
	10mm減	10	1.14
	29mm減	29	1.49
鉄筋量 (圧縮側)	健全	0	1.00
	10%減	10	1.01
	50%減	50	1.03
圧縮強度	健全	100	1.00
	50%減	50	1.07
	75%減	25	1.21
弾性係数	健全	100	1.00
	40%減	60	1.60
	80%減	20	4.07

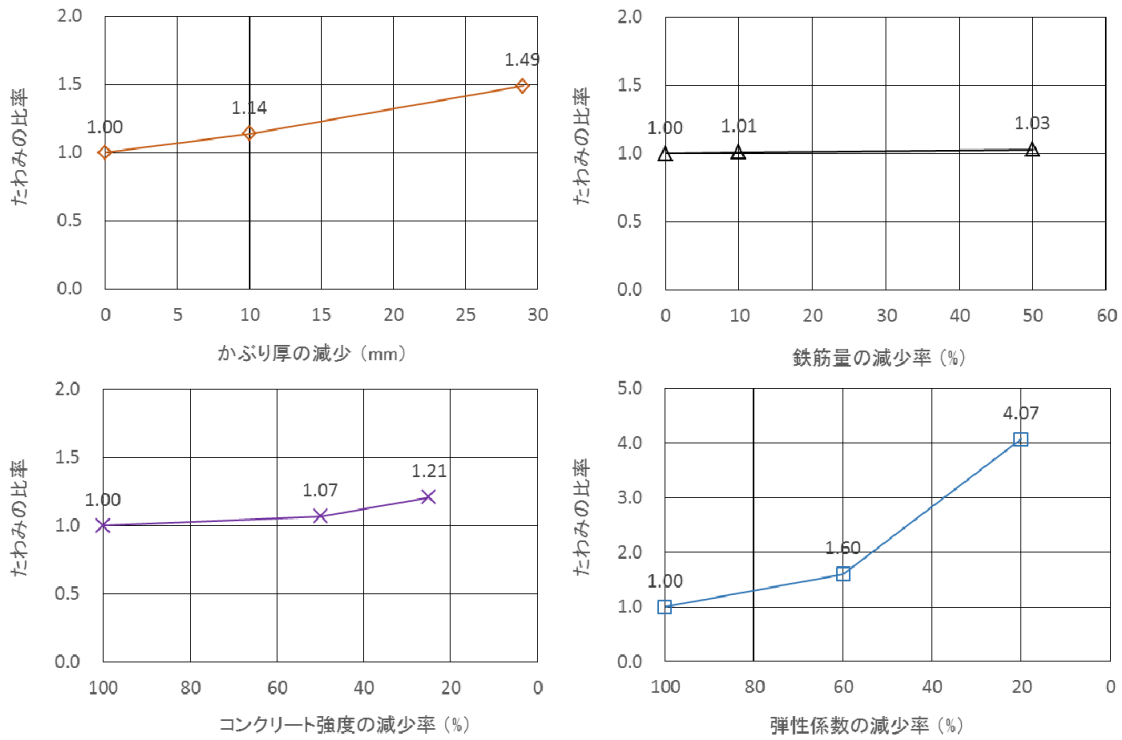


図-付 6.3.29 健全時とのたわみ比率 (S47 道示床版) : FEM 解析

次に塩害および凍害劣化について、前述の表-付 6.3.17 に示す各種パラメータが同時に低下した際の床版たわみへの影響を図-付 6.3.30～図-付 6.3.31 に示す。図中、黒塗りの棒グラフが各種パラメータの低下が同時に生じた場合を示している。これらの図より、塩害、凍害劣化とともに、各種パラメータの低下が同時に生じた際は、床板たわみへの影響が大きくなり、特に全断面有効でかぶり厚の減少と弾性係数の低下が同時に生じた場合はその影響が大きいことがわかる。

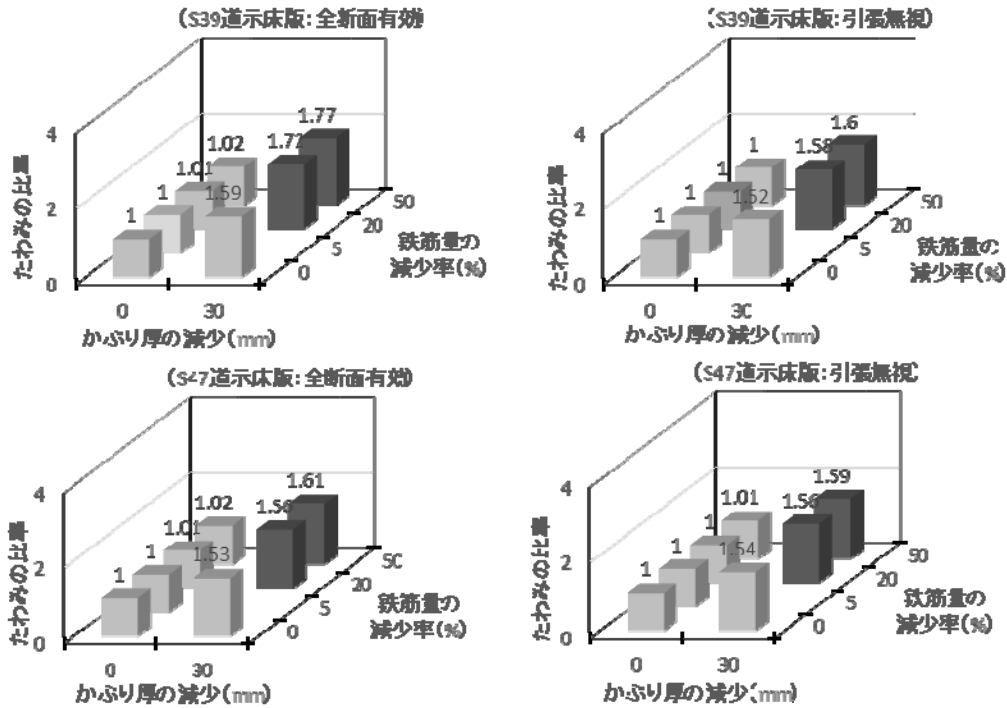


図-付 6.3.30 各種パラメータの低下が同時に生じた場合（塩害劣化）

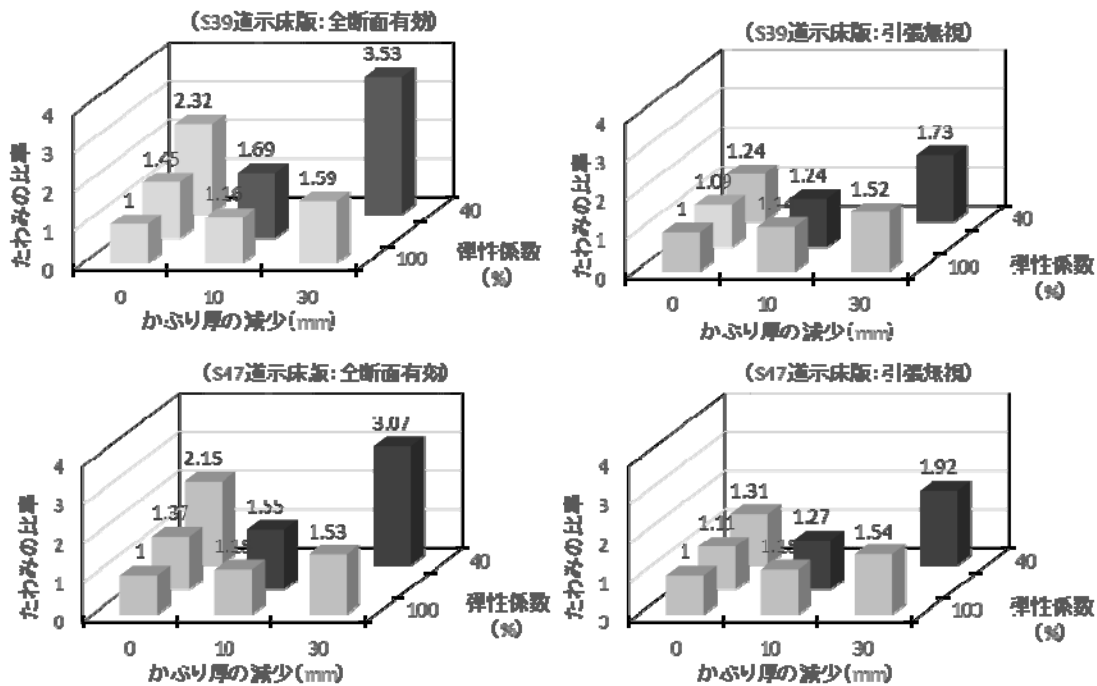


図-付 6.3.31 各種パラメータの低下が同時に生じた場合（凍害劣化）

ASRが生じた場合の板理論による床版たわみは、仮に弾性係数が全厚で低下した状態について求めている。たわみの計算値を図-付 6. 3. 32 に示す。ASRにより弾性係数が低下した場合、全断面有効の方が床版たわみへの影響が大きいことがわかる。

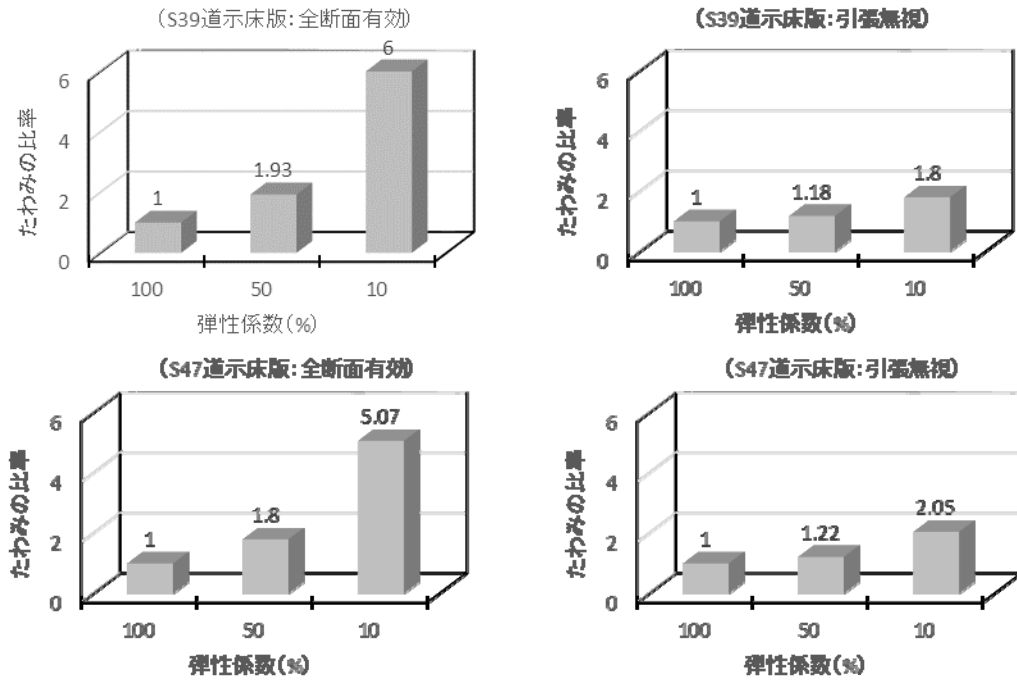


図-付 6. 3. 32 弾性係数が低下した場合 (ASR)

また、塩害、凍害、ASR の各劣化要因について、劣化過程ごとに床版たわみへの影響を表したものを図-付 6. 3. 33 に示す。

S39 道示床版、S47 道示床版ともに、引張無視時は各劣化要因による違いはあまり見られないが、全断面有効時の凍害劣化期および ASR 重度の場合にたわみへの影響が大きいことがわかる。

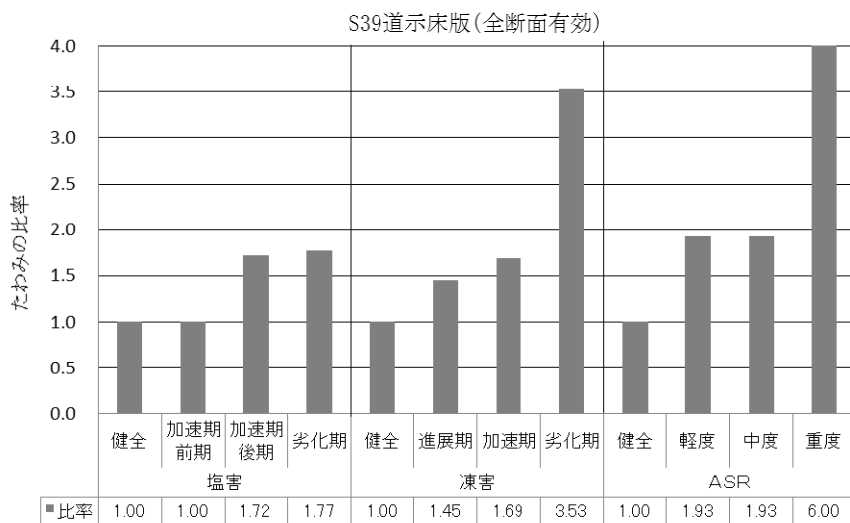


図-付 6. 3. 33 各劣化要因の床版たわみへの影響

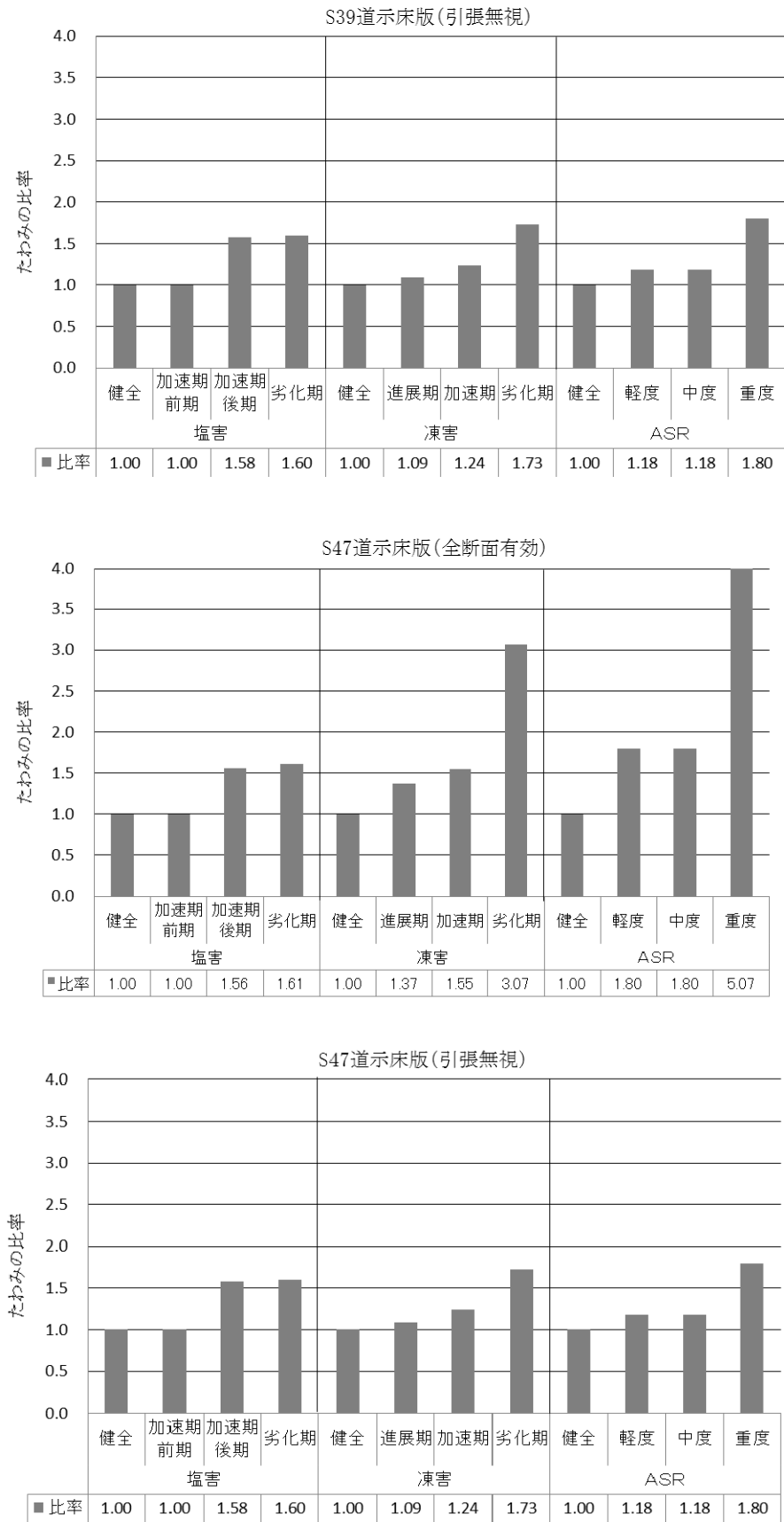


図-付 6. 3. 33 各劣化要因の床版たわみへの影響

3.3.2 FEMによるたわみの計算

(1) 基準床版の設定

本節では、既往の輪荷重試験による研究²⁰⁾に基づき、表-付 6.3.21 に示す昭和 39 年示方書準抛床版および昭和 47 年示方書準抛床版を対象として、パラメトリックスタディを実施した。基本となる健全床版の材料特性値は表-付 6.3.22～表-付 6.3.23²⁰⁾のとおり設定した。

損傷を表すパラメータの設定は、表-付 6.3.11～表-付 6.3.13 のとおり、基本の物性値を低減した。

表-付 6.3.21 昭和 39 年および昭和 47 年示方書準抛床版の配筋

適用示方書	S39		S47	
	橋軸方向 (配力筋)	直角方向 (主筋)	橋軸方向 (配力筋)	直角方向 (主筋)
上面	D16 ctc 200	D19 ctc 250	D16 ctc 200	D19 ctc 250
下面	D16 ctc 100	D19 ctc 125	D16 ctc 100	D19 ctc 125

表-付 6.3.22 採用したコンクリートの特性値²⁰⁾

供試体名	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	ポアソン比	引張強度 (N/mm ²)
RC39-1	26.9	2.05	0.178	1.94
RC39-2	28.6	2.19	0.147	2.63
RC39-3	13.6	1.62	0.191	1.44
RC39-4	29.7	2.39	0.172	2.69
RC39-5	31.1	2.34	0.170	2.49
RC39-6	28.4	2.18	0.161	2.21
RC39-7	25.4	2.39	0.123	2.15
RC39-8	27.1	2.32	0.173	2.42
RC39-9	26.6	2.68	0.168	2.34
RC39+鋼板-1	25.9	2.07	0.159	2.5
RC39+鋼板-2	29.2	2.22	0.172	2.02
RC39+上面-1	27.1	2.16	0.131	2.57
RC39+上面-2	25.6	2.18	0.135	2.15
RC47-1	29.9	2.31	0.184	2.92
RC47-2	35.6	2.61	0.169	2.69
RC47-3	36.3	2.65	0.165	2.94
RC47-4	32.9	2.47	0.182	2.52
RC8o-1	27.1	2.42	0.168	2.34
RC8o-2	46.5	2.88	0.152	4.04
RC8o-3	45.4	2.63	0.144	3.91
RC8n-1	33.1	2.79	0.15	2.64
RC8n-2	38.4	2.57	0.130	2.84
RC8n-3	37.4	2.65	0.167	3.14
PC8-1	42.9	2.67	0.166	3.66
PC8-2	50.0	3.31	0.193	3.77

表-付 6.3.23 採用した鉄筋の特性値²⁰⁾

供試体名	鉄筋径	降伏点 (N/mm ²)	弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	伸び (%)
RC39-1	D10	343	489	21.9
	D13	360	531	22.9
	D16	340	507	25.1
RC39-2	D10	358	493	20.9
	D16	353	502	18.8
RC39-3~6	D10	362	505	16.3
	D13	339	478	19.9
	D16	380	553	17.9
RC39-7,8	D10	368	514	20.0
	D13	326	477	22.2
	D16	345	509	20.3
RC39-9	D10	387	582	18.5
	D13	347	494	22.9
	D16	358	523	19.6
RC39+鋼板-1 RC39+上面-1	D10	332	480	23.9
	D13	331	461	25.1
	D16	343	519	19.3
RC39+鋼板-2 RC39+上面-2	D10	368	514	20.0
	D13	326	477	22.2
	D16	345	509	20.3
RC47-1	D16	353	502	18.8
	D19	344	502	18.2
RC47-2	D16	358	520	27.2
	D19	361	529	25.2
RC47-3	D16	358	520	27.2
	D19	361	529	25.2
RC47-4	D16	358	520	27.2
	D19	361	529	25.2
RC8o-1	D13	331	474	23.2
	D16	347	508	20.7
	D19	353	533	20.0
RC8o-2	D13	338	484	28.5
	D16	358	520	27.2
	D19	361	529	25.2
RC8o-3	D13	338	484	28.5
	D16	358	520	27.2
	D19	361	529	25.2
RC8n-1	D16	358	518	26.1
	D19	334	495	27.3
RC8n-2	D16	358	518	26.1
	D19	334	495	27.3
RC8n-3	D16	358	520	27.2
	D19	361	529	25.2
PC8-1	D13	360	515	25.4
PC8-2	D19	354	513	25.3
	19.3	-	1974	-

境界条件は、2辺支持および2辺弾性支持とした。弾性支持は、実験で用いられている H-300 鋼材をソリッドで作成して再現した。また、浮き上がり防止として実験図面を参考にして床版上面節点 8 か所鉛直方向変位を拘束した。解析モデルの概要を図-付 6.3.34 に示す。

荷重は静的荷重とし、変位制御で版中央 $200 \times 500\text{mm}$ の範囲にある節点に一様に鉛直下向きに強制変位を与えた (図-付 6.3.35)。以降に、荷重時のこれらの節点反力の合計を「耐荷力」、荷重範囲直下の版下面の鉛直変位 (たわみ) を「鉛直方向たわみ」、耐荷力が 100kN の時のたわみを「使用したわみ」と定義し、結果を示す。

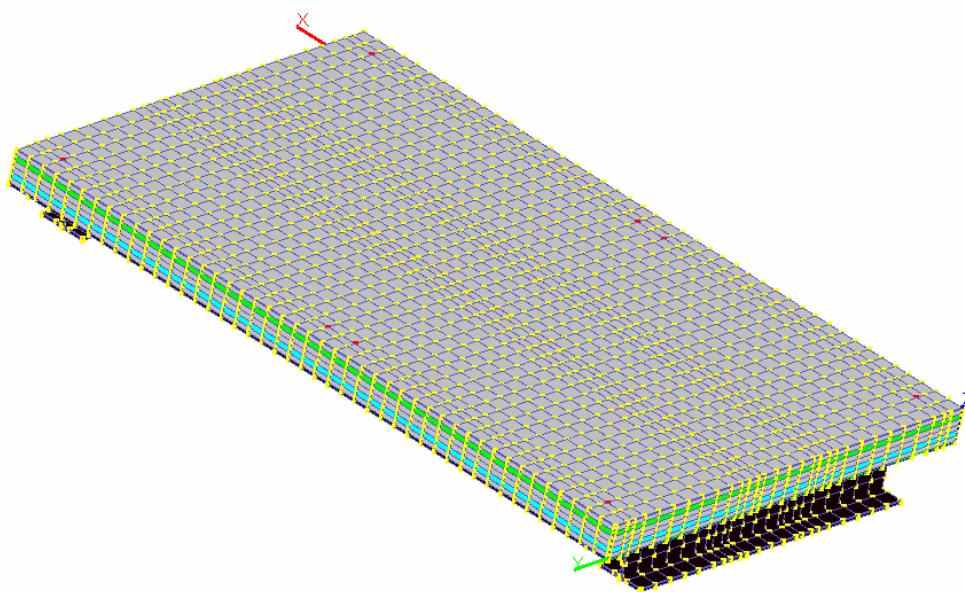


図-付 6.3.34 解析モデル全体概要図

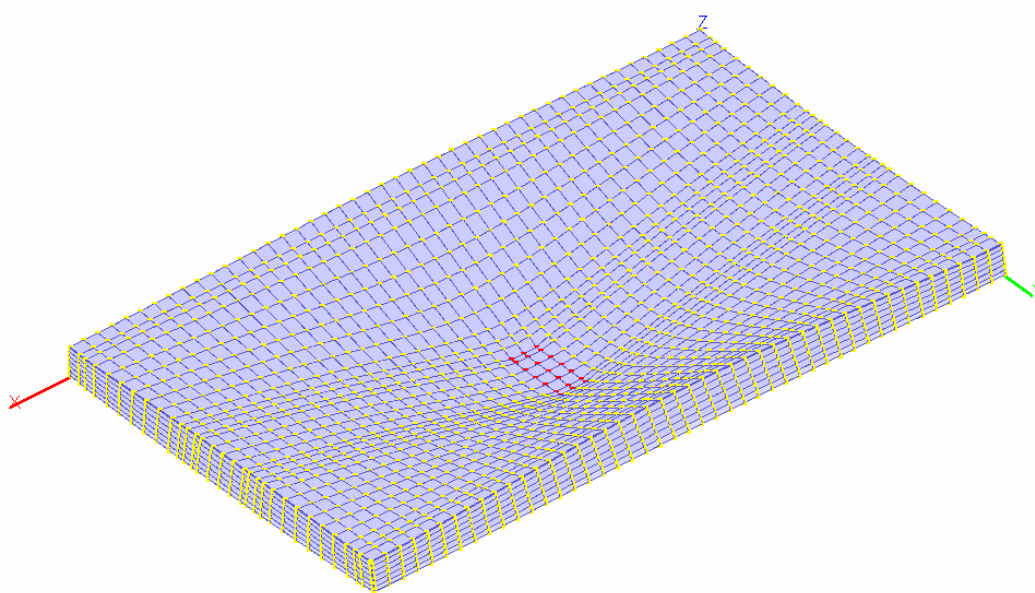
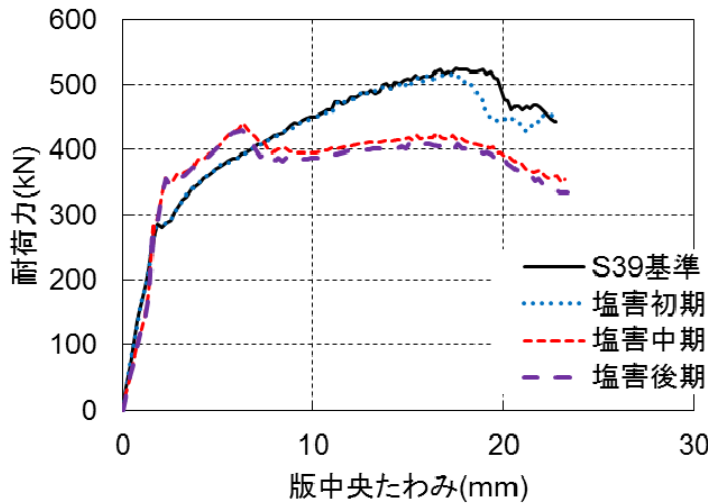


図-付 6.3.35 静的荷重時変形図の例

(2) S39 床版の静的解析結果

1) 塩害劣化

耐力力と版中央たわみの推移を図-付 6.3.36 に示す。使用時のたわみの増加は鉄筋断面積の減少のみの塩害初期ではほぼ見られないが、水平ひび割れによる不連続で上面かぶりが失われたと想定した中期、後期では、1.36 倍と明確にたわみが増加した。中期と後期を比較すれば、鉄筋有効断面積の減少と鉄筋付着減少よりも、上面かぶりの喪失のほうがたわみに対する影響が大きいことが確認された。

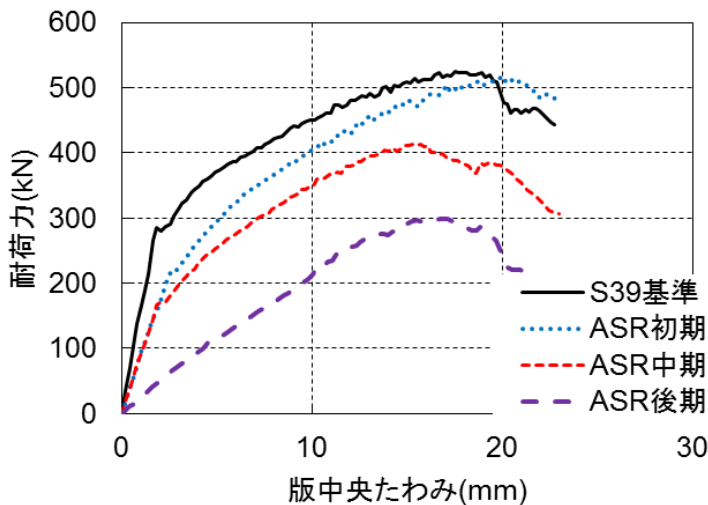


塩害	使用時	終局時
	100kN時 たわみ	耐力力
初期	1.00	0.98
中期	1.36	0.67
後期	1.37	0.66

図-付 6.3.36 耐力力—たわみ関係とたわみ増加率

2) ASR 劣化

耐力力と版中央たわみの推移を図-付 6.3.37 に示す。ひび割れ幅 0.2mm 以下を想定した ASR 初期（進展期）であっても、使用時のたわみはヤング係数低下の影響が大きく、1.87 倍と大幅に増加する。最大耐力力は圧縮強度低下の影響が大きく、中期（加速期）、後期（劣化期）での低下が著しい。ASR 損傷はたわみによる検出が比較的容易と考えられる。



ASR	使用時	終局時
	100kN時 たわみ	耐力力
初期	1.87	0.99
中期	1.91	0.79
後期	7.38	0.57

図-付 6.3.37 耐力力—たわみ関係とたわみ増加率

3) 凍害劣化

耐力と版中央たわみの推移を図-付 6.3.38 に示す。凍害の進行によって、使用時のたわみも着実に増加することが確認された。

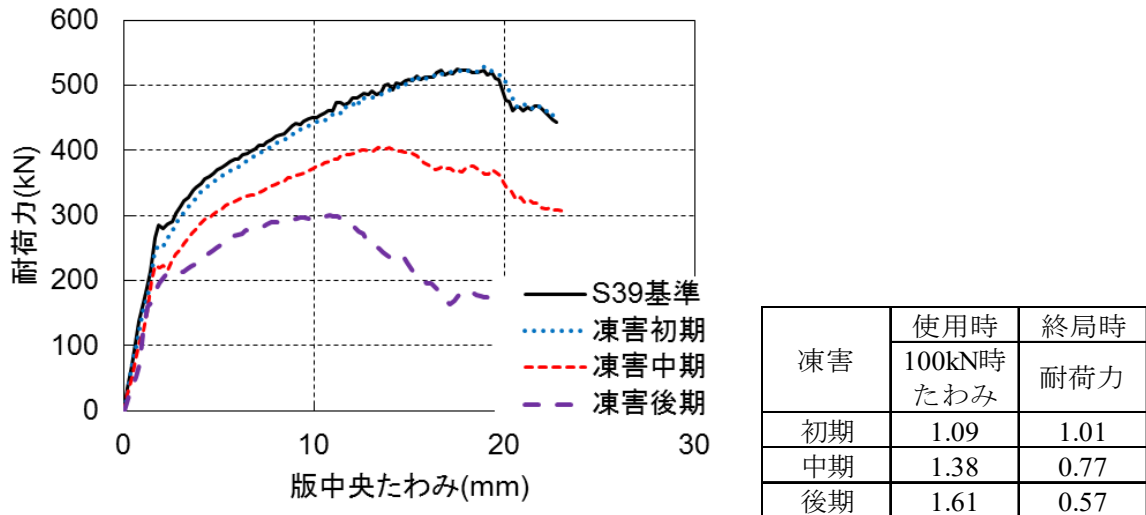


図-付 6.3.38 耐力—たわみ関係とたわみ増加率

4) まとめ

以上の結果を、使用時たわみのみを取り出し、損傷程度ごとに整理したのが図-付 6.3.39 である。各種劣化の進行によって、中期までの間にたわみが健全時の1~2倍程度となった。想定した損傷状態においては、ASR劣化後期に著しくたわみが増大する結果となった。実橋の計測において測定可能な使用時たわみの変化と耐力や疲労寿命と関連付け、健全性定量化をできる可能性がある。

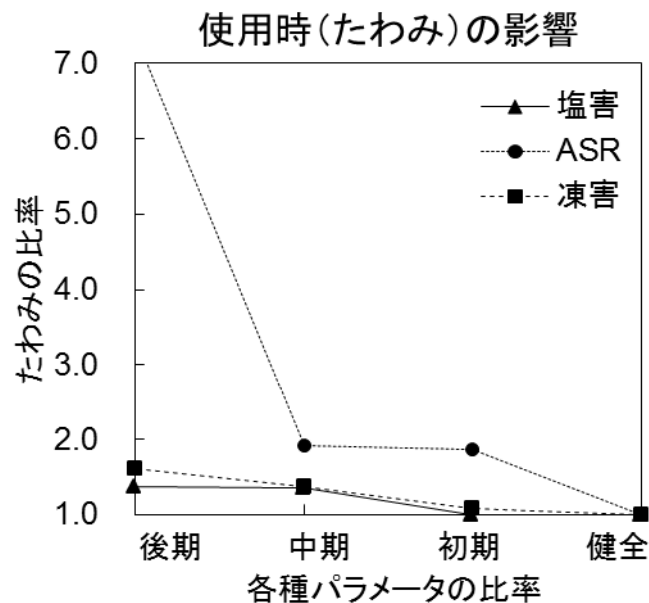


図-付 6.3.39 使用時たわみの劣化による倍率

(3) S47 床版結果の整理

1) 塩害劣化

耐力力と版中央たわみの推移を図-付 6.3.40 に示す。使用時のたわみの増加は鉄筋断面積の減少のみの塩害初期ではほぼ見られないが、水平ひび割れによる不連続で上面かぶりが失われたと想定した中期、後期では、ほぼ 1.5 倍と顕著にたわみが増加した。中期と後期を比較すれば、鉄筋有効断面積の減少と鉄筋付着減少よりも、上面かぶりの喪失のほうがたわみに対する影響が大きいことが確認された。

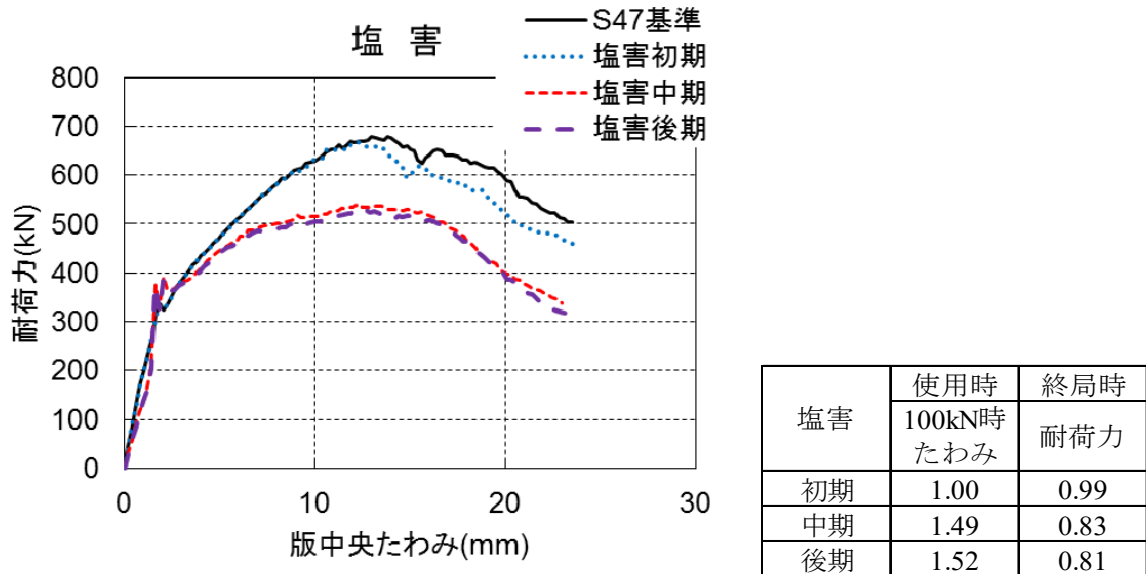


図-付 6.3.40 耐力力—たわみ関係とたわみ増加率

2) ASR 劣化

耐力力と版中央たわみの推移を図-付 6.3.41 に示す。ひび割れ幅 0.2mm 以下を想定した ASR 初期（進展期）であっても、使用時のたわみはヤング係数低下の影響が大きく、1.85 倍と大幅に増加する。最大耐力力は圧縮強度低下の影響が大きく、中期（加速期）、後期（劣化期）での低下が著しい。ASR 損傷はたわみによる検出が比較的容易と考えられる。

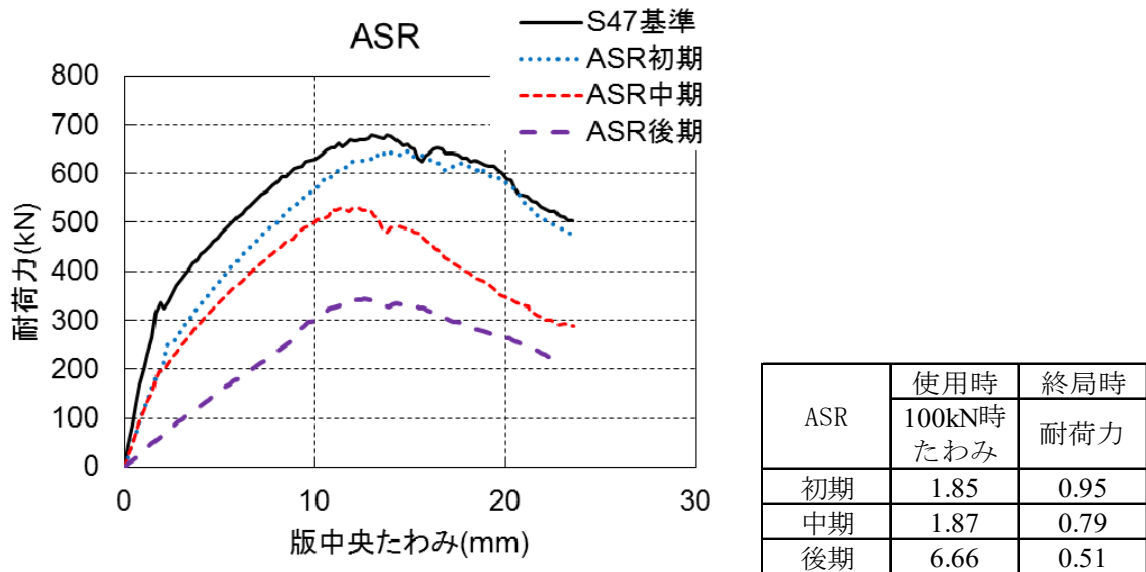


図-付 6.3.41 耐力力—たわみ関係とたわみ増加率

3) 凍害劣化

耐荷力と版中央たわみの推移を図-付 6.3.42 に示す。凍害の進行によって、使用時のたわみも着実に増加することが確認された。

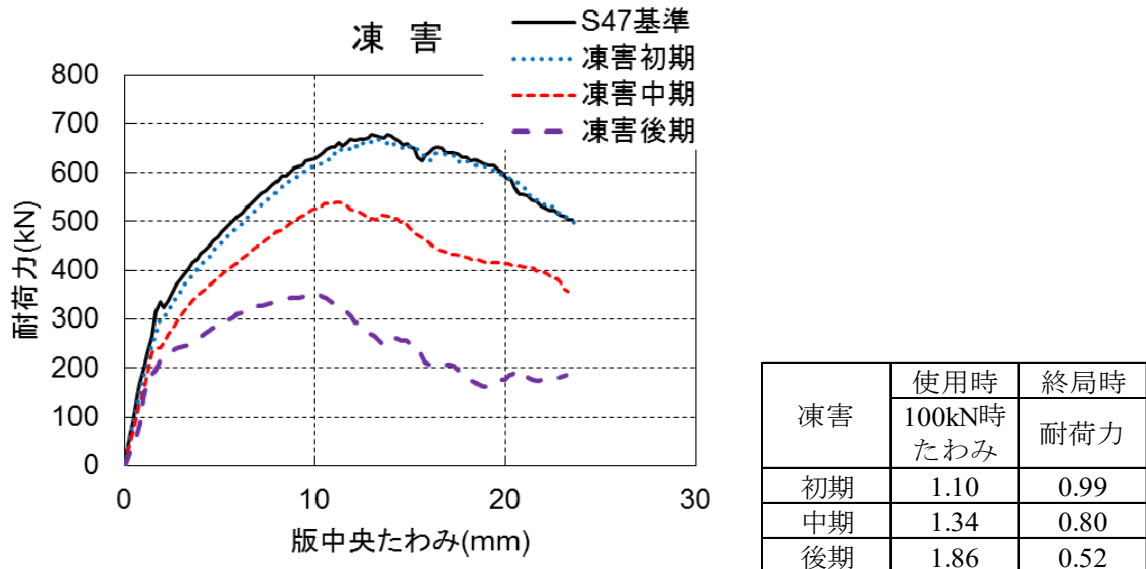


図-付 6.3.42 耐荷力—たわみ関係とたわみ増加率

4) まとめ

以上の結果を、使用したわみのみを取り出し、損傷程度ごとに整理したのが図-付 6.3.43 である。各種劣化の進行によって、中期までの間にたわみが健全時の1~2倍程度となった。想定した損傷状態においては、ASR劣化後期に著しくたわみが増大する結果となった。S39床版と全体の傾向は同じと言える。

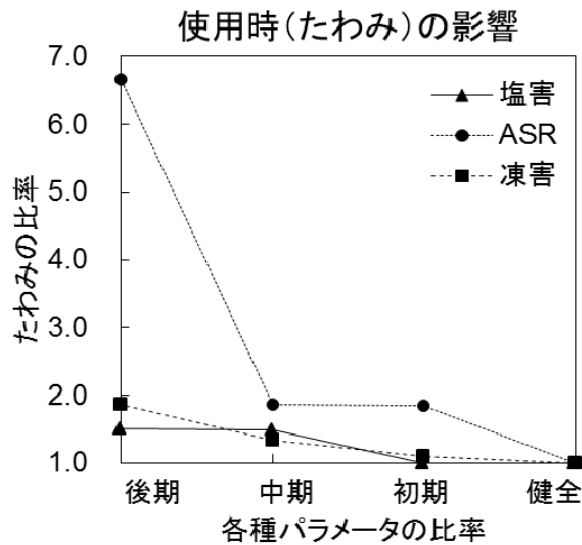


図-付 6.3.43 使用したわみの劣化による倍率

(4) 劣化要因毎の整理

次に、塩害、ASR、凍害といった実現象から、さらに具体的に各パラメータの影響度を調べるため、かぶり厚の減少、鉄筋断面積減少、コンクリート強度低下、コンクリートヤング係数低下といった要因ごとにパラメトリックスタディを行い、その結果を分析することとした。対象床版は、(3)の検討で用いた S47 床版とした。以下に、パラメータと検討ケースを示す。

i) かぶり厚減少

なんらかの理由で上面鉄筋より上のかぶりコンクリートが無効になった状態

10mm 減少 (もとの 67%), 29mm 減少 (もとの 0.03%)

ii) 鉄筋断面積減少

塩害による鉄筋腐食を想定。ただし付着の喪失は無視。上下面同程度に進行。

10%減少 (もとの 90%), 50%減少 (もとの 50%)

iii) コンクリート強度低下

凍害や ASR によってマイクロクラックが進行し、圧縮強度・引張強度ともに低下した状態、ただしヤング率はそのまま。

16kN/mm² 低下 (もとの 50%), 24kN/mm² 低下 (もとの 25%)

iv) ヤング係数低下

凍害や ASR によってマイクロクラックが進行した状態、ただし強度はそのまま。

10kN/mm² 低下 (もとの 60%), 20kN/mm² 低下 (もとの 20%)

検討ケースごとに、耐荷力とたわみの関係をまとめる。また、基準床版を 1.00 としたときの、変化の割合を表に示す。

i) かぶり厚減少

耐荷力-たわみ関係を図-付 6.3.44 に示す。最大耐荷力には影響が見られるが、使用したわみでも、かぶり厚がほぼなくなると、たわみは健全時の約 1.5 倍となった..

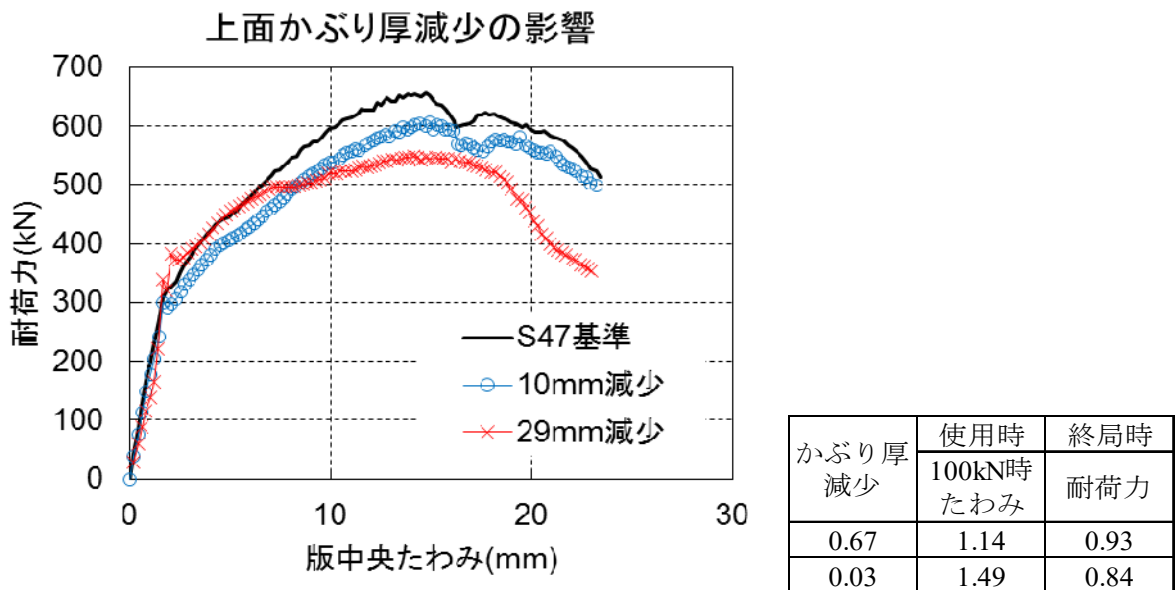


図-付 6.3.44 使用したわみの劣化による倍率

ii) 鉄筋断面積減少

耐力—たわみ関係を図-付 6. 3. 45 に示す。鉄筋断面積 10%程度の減少では耐力への影響は小さい。断面積 50%の場合は、単に耐力が低下するだけでなくせん断破壊から曲げ破壊へと破壊モードが移行したと考えられる。なお、設計荷重程度では、鉄筋断面積が半分になってもたわみの差はほぼみられなかった。

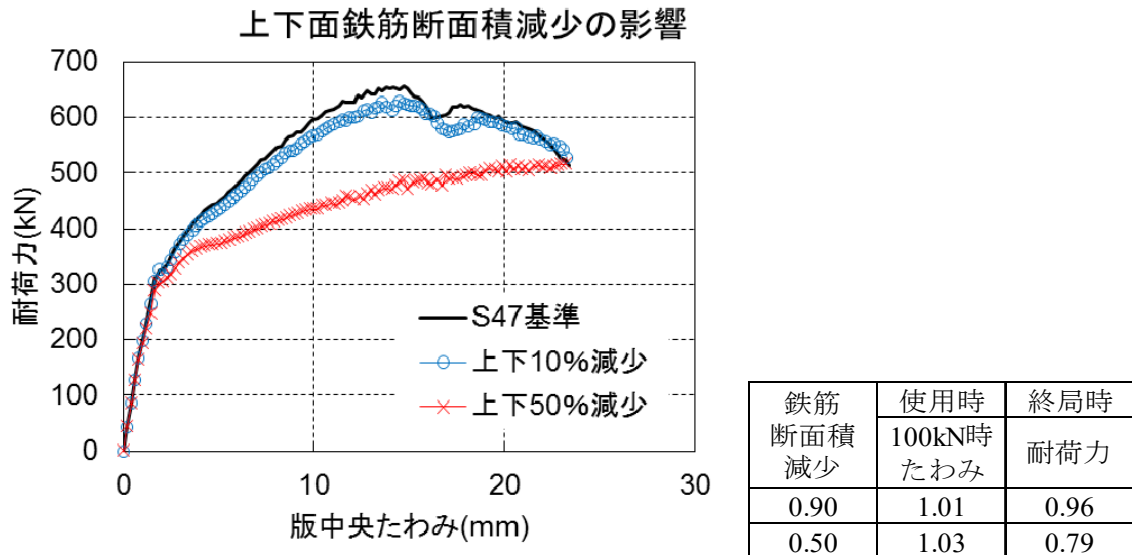


図-付 6. 3. 45 耐力—たわみ関係

iii) コンクリート強度低下

耐力—たわみ関係を図-付 6. 3. 46 に示す。強度低下割合に比例するように耐力が減少した。押抜きせん断が破壊モードであるため、鉄筋よりもコンクリート自体の性能が直接的に影響を及ぼすことが確認された。なお、圧縮強度だけでなく、引張強度も低下させていることから、設計荷重程度でも、たわみの差は見られるものの、その差は大きくはなかった。

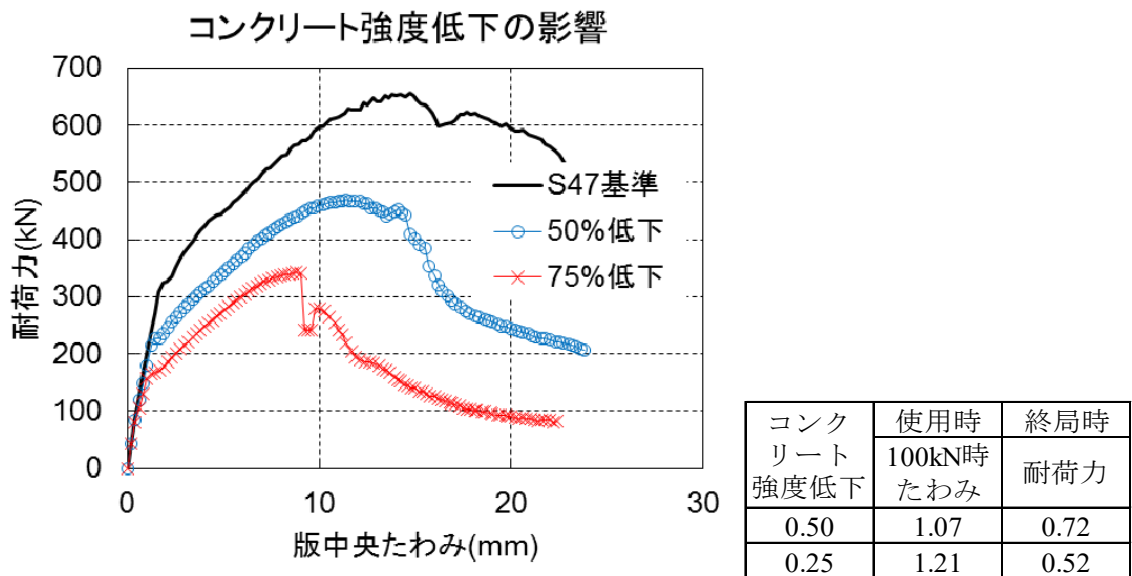


図-付 6. 3. 46 耐力—たわみ関係

iv) ヤング係数低下

耐力-たわみ関係を図-付 6.3.47 に示す。ヤング係数が低下しても強度が高ければ、最終的な耐力への影響は小さいと言える。ただし、設計荷重に対するたわみの差は非常に大きいものとなった。

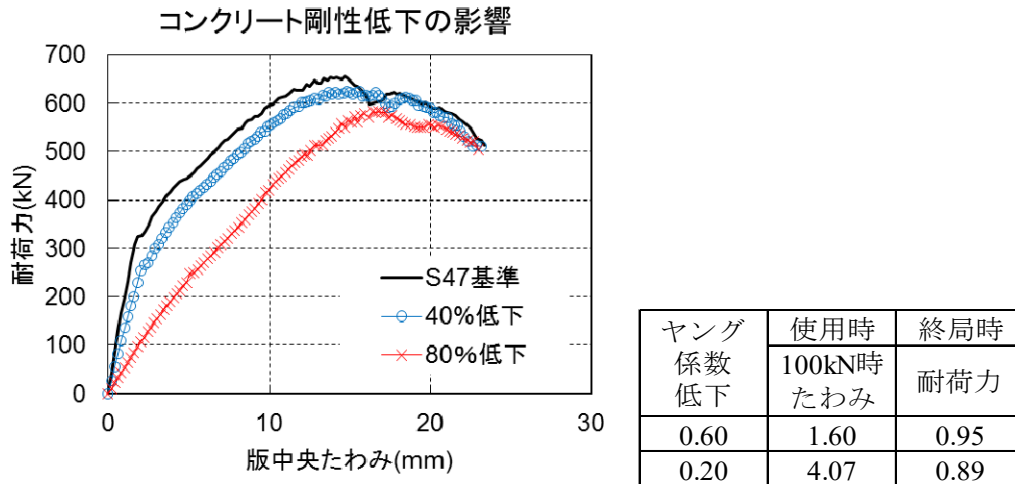


図-付 6.3.47 耐力-たわみ関係

v) まとめ

縦軸を基準床版のたわみに対するパラメータごとに検討したたわみ比率、横軸を各パラメータでの数値比率として無次元化し、すべての低下割合を図-付 6.3.48 に示す。使用時（たわみ）への影響という観点であらためて分析すると、ヤング係数の低下は、設計荷重程度に対するたわみに大きな影響を及ぼすことがわかる。これより、凍害やASRを含む疲労複合劣化においては、たわみを健全度評価指標の一つとできる可能性が示された。また、ヤング係数に次いで、上面かぶりの喪失の影響も大きいことが確認された。

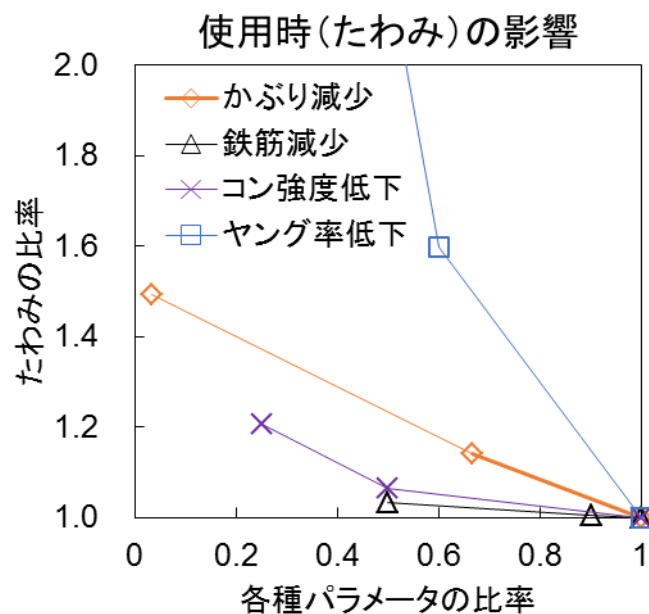


図-付 6.3.48 劣化パラメータが使用時たわみの及ぼす影響

3.3.3 使用状態と劣化パラメータの関係まとめ

(1) 板理論に基づく床版たわみ

床版たわみは、疲労劣化とともに、塩害、ASR、凍害等による材料劣化の進行に伴う断面剛性の低下の影響を受ける。ここでは、前述 3.3.1 で示した板理論による床版たわみについて、材料劣化のどのパラメータが使用性（たわみ）に影響するのか整理した。各種パラメータとたわみの比率の関係を図-付 6.3.49～図-付 6.3.50 に示す。

健全な状態である全断面有効の場合、計算を行った各種パラメータのうち、弾性係数の低下の影響が最も大きく、次にかぶり厚の影響が大きいことがわかる。一方、一般的に使用限界状態と言われる引張無視の場合、コンクリートの有効断面が小さくなるため、弾性係数の低下によるたわみへの影響が小さくなっているものの、かぶり厚の減少と同様に床版たわみへの影響が比較的大きいことがわかる。

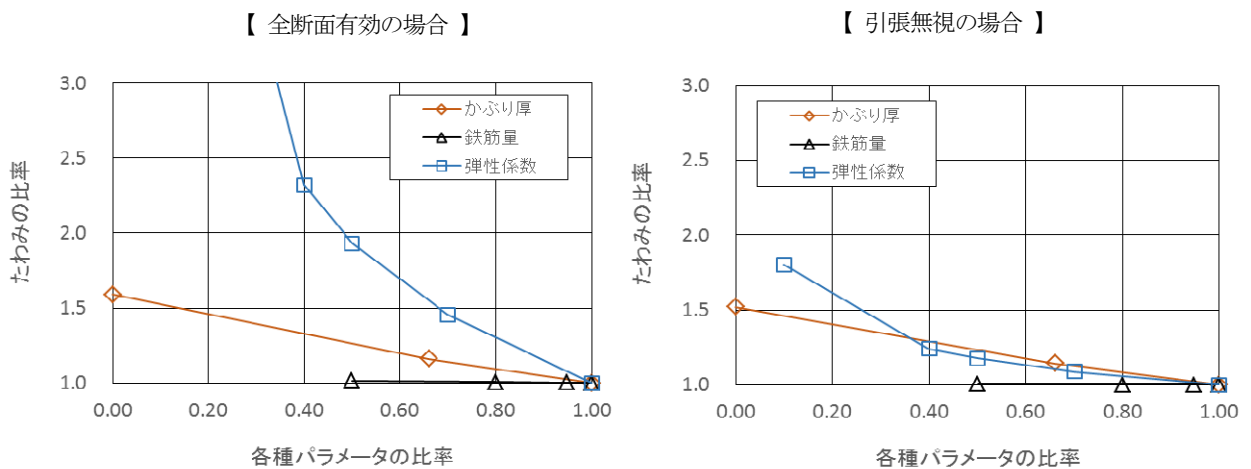


図-付 6.3.49 各種パラメータとたわみの比率 (S39 道示床版)

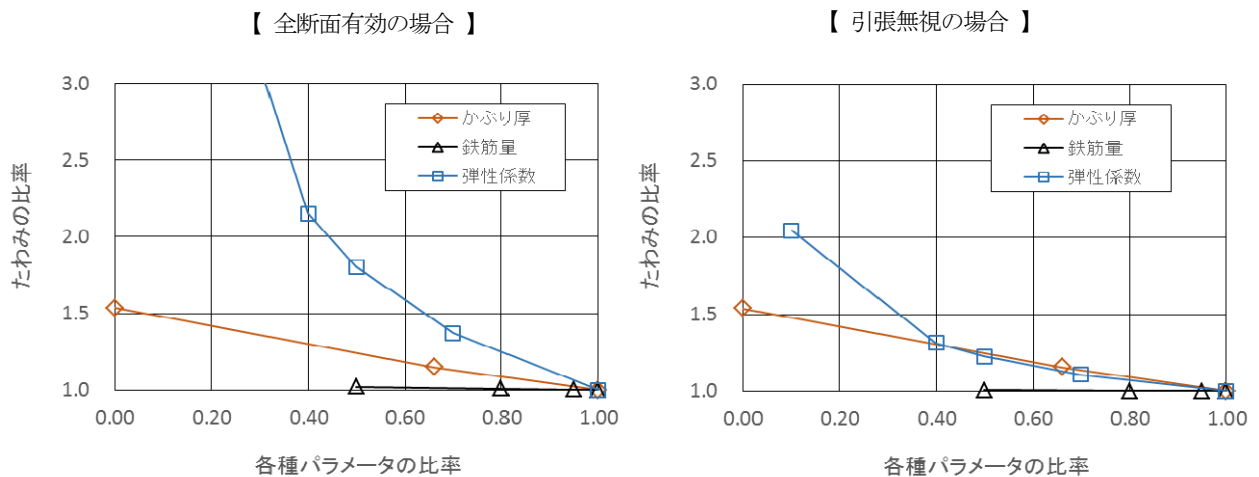


図-付 6.3.50 各種パラメータとたわみの比率 (S47 道示床版)

(2) FEM 解析による床版たわみ

FEM 解析について、各種パラメータとたわみの比率との関係 (S47 道示床版) を図-付 6.3.51 に示す。これより、弾性係数の低下が生じると、設計荷重相当 (100kN) の床版たわみに明らかな変化がみられる。上面かぶりの減少の影響も比較的大きいことがわかる。このため、凍害や ASR を含む複合劣化において、床版たわみを健全度評価指標のひとつとできる可能性がある。

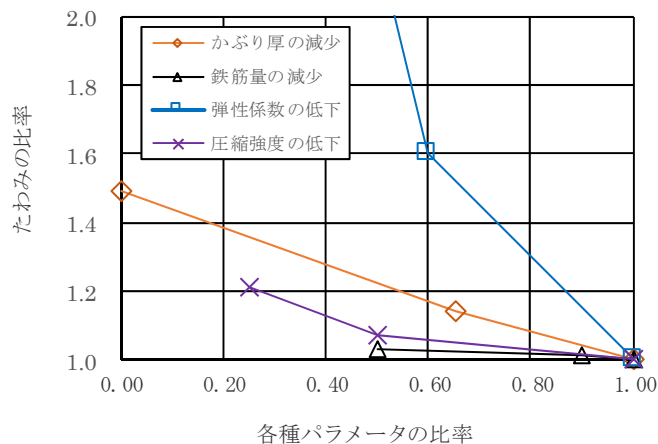


図-付 6.3.51 各種パラメータとたわみの比率 (S47 道示床版)

(3) たわみ計算値の妥当性について

板理論および FEM 解析によるたわみ計算値の妥当性を確認するため、国総研資料 28 に示されている S39 道示床版、S47 道示床版の輪荷重走行試験の結果と比較した。床版たわみの比較を表-付 6.3.24 に示す。

国総研資料の床版たわみの経時変化図より 100kN 時の床版たわみを推測すると、S39 道示床版、S47 道示床版ともに床版たわみは約 0.6mm であり、板理論の全断面有効時および非線形 FEM 解析による計算値と概ね一致していることから、たわみ計算値の妥当性が確認できる。

表-付 6.3.24 床版たわみの比較

(単位 : mm)

	国総研資料 28	板理論		非線形 FEM
	100kN 時 床版たわみ	全断面有効	引張無視	
S39 道示床版 (S39RC-5)	約 0.6	0.64	3.07	0.58
S47 道示床版 (S47RC-4)	約 0.6	0.54	1.69	0.47

3.4 終局状態（耐力力、疲労寿命）に関する検討

3.4.1 コンクリート標準示方書に基づく耐力力の計算

(1) コンクリート標準示方書による押し抜きせん断耐力

コンクリート標準示方書²³⁾における押し抜きせん断耐力 V_{pcd} は、式（付 6.3.7）で与えられる。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d / \gamma_b \quad \dots \dots \dots \quad (\text{付 6.3.7})$$

ここで、 $f_{pcd} = 0.20\sqrt{f'_{cd}}$ ただし、 $f_{pcd} \leq 1.2N/mm^2$
 $\beta_d = \sqrt[4]{1000/d}$ ただし $\beta_d > 1.5$ となる場合は 1.5 とする。
 $\beta_p = \sqrt[3]{100p_r}$ ただし $\beta_p > 1.5$ となる場合は 1.5 とする。
 $\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$

u : 載荷面の周長(mm)

u_p : 照査断面の周長(mm)で、載荷面から $d/2$ だけ離れた位置で算定するものとする。

d および p : 有効高さ(mm)および鉄筋比で、二方向の鉄筋に対する平均値とする。

γ_b : 一般に 1.3 としてよい。

(2) 複合劣化による押し抜きせん断耐力の変化

ここでは、表-付 6.3.10 に示す各適用示方書によって復元設計された断面に対して、上記の押し抜きせん断耐力を算出し比較するものである。押し抜きせん断耐力式に対して 3.1 においてまとめた塩害、ASR、凍害による劣化を複数パラメータ同時低下で考慮する。

塩害、ASR、凍害の各劣化現象に対して実現象の状態での床版支間と押し抜きせん断耐力の相関を図-付 6.3.52~図-付 6.3.60 に示す。

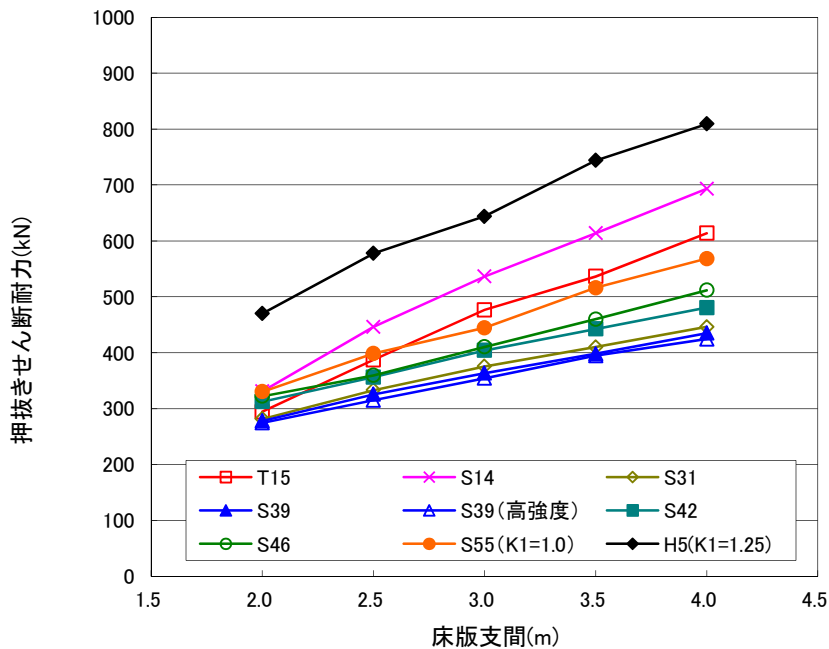


図-付 6.3.52 床版支間と押し抜きせん断耐力の相関（塩害加速期前期）

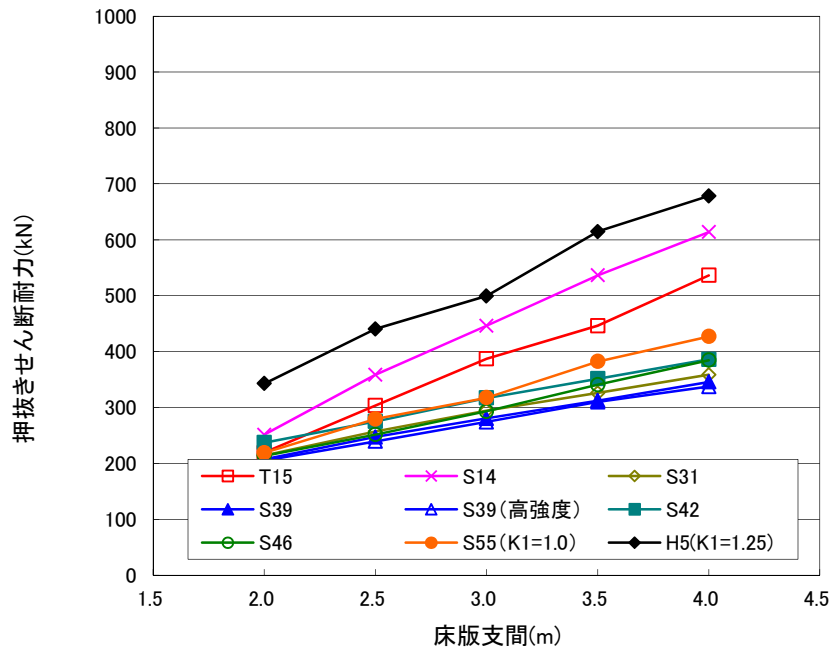


図-付 6. 3. 53 床版支間と押し抜きせん断耐力の相関 (塩害加速期後期)

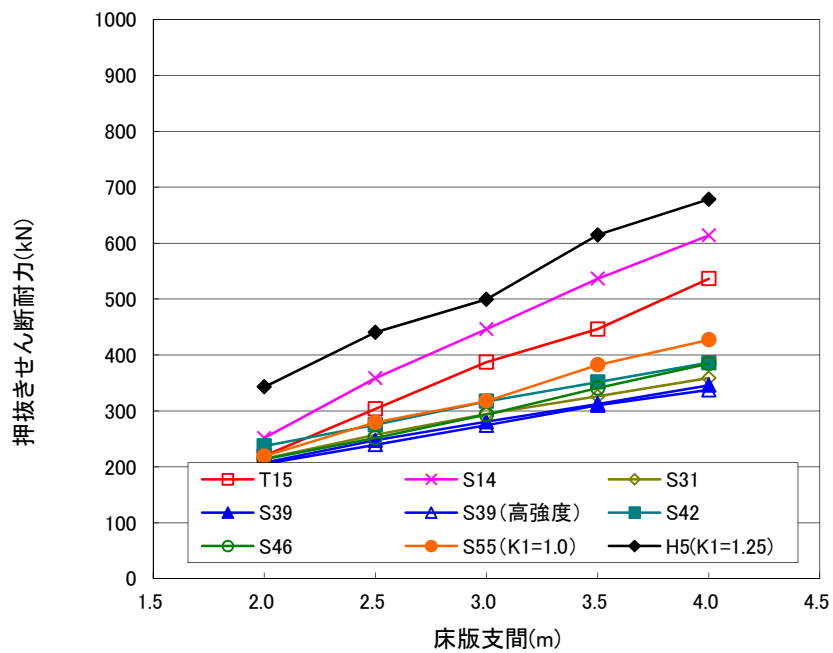


図-付 6. 3. 54 床版支間と押し抜きせん断耐力の相関 (塩害劣化期)

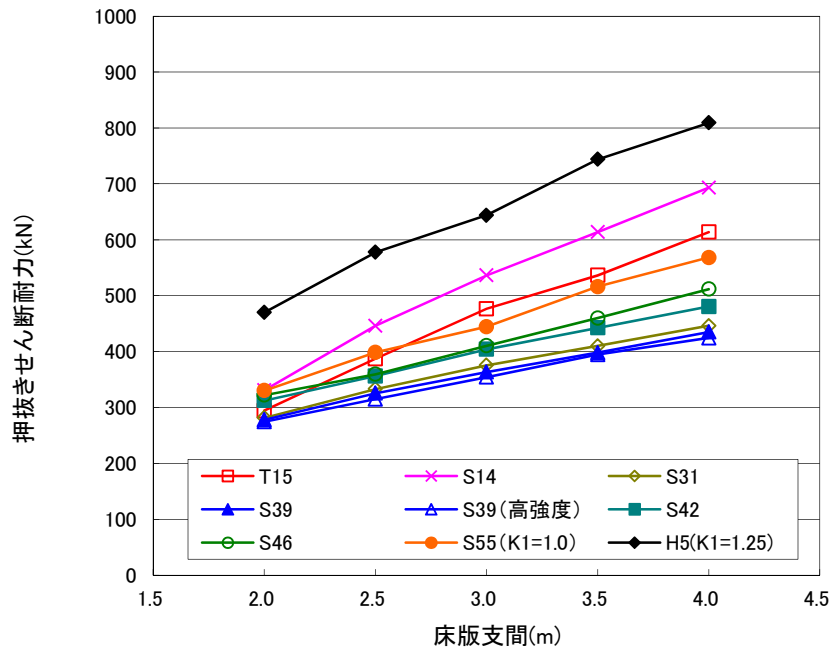


図-付 6. 3. 55 床版支間と押し抜きせん断耐力の相関 (ASR 進展期)

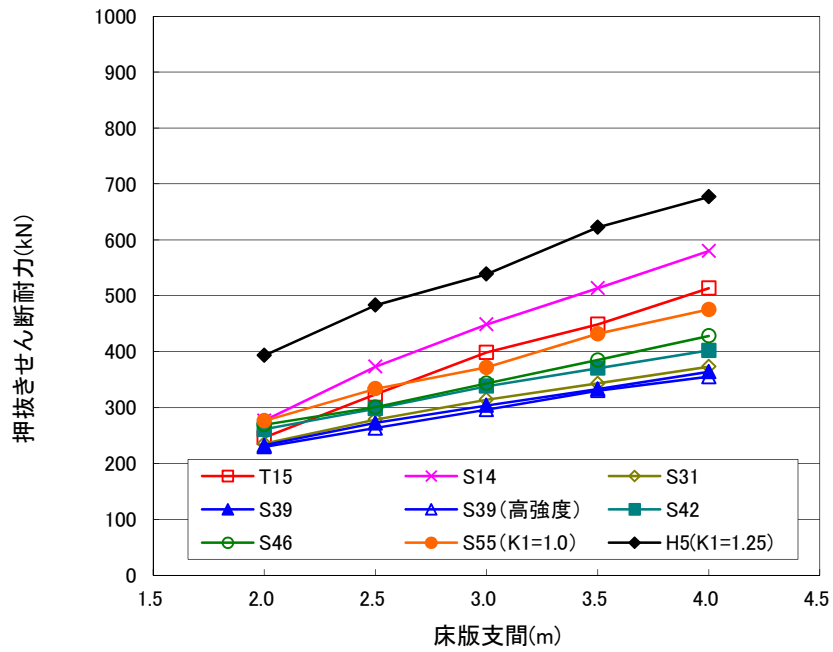


図-付 6. 3. 56 床版支間と押し抜きせん断耐力の相関 (ASR 加速期)

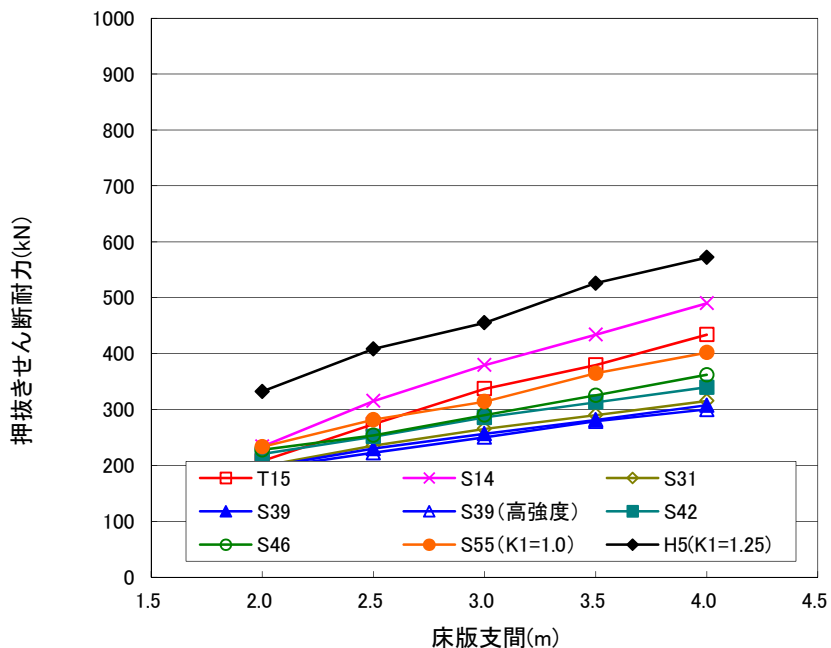


図-付 6.3.57 床版支間と押し抜きせん断耐力の相関 (ASR 劣化期)

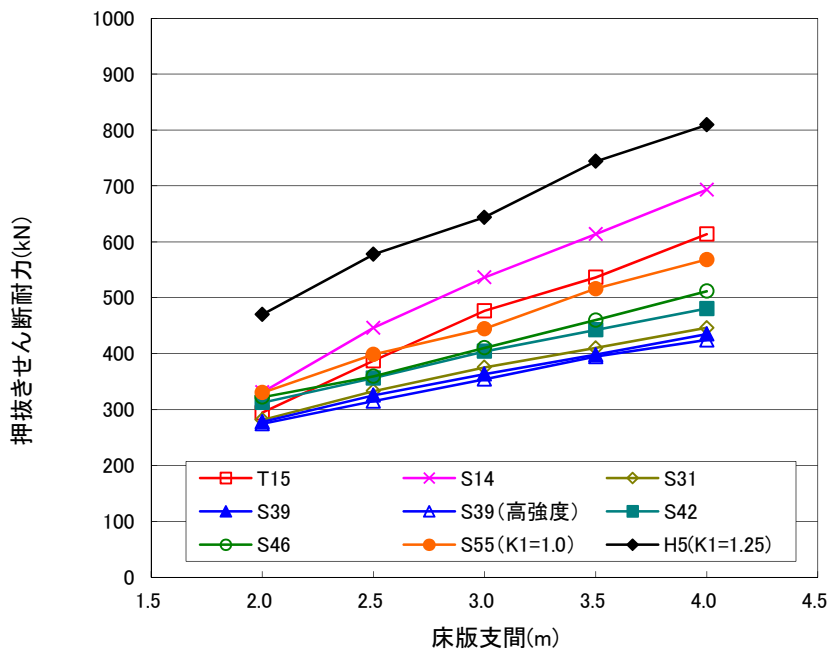


図-付 6.3.58 床版支間と押し抜きせん断耐力の相関 (凍害軽度)

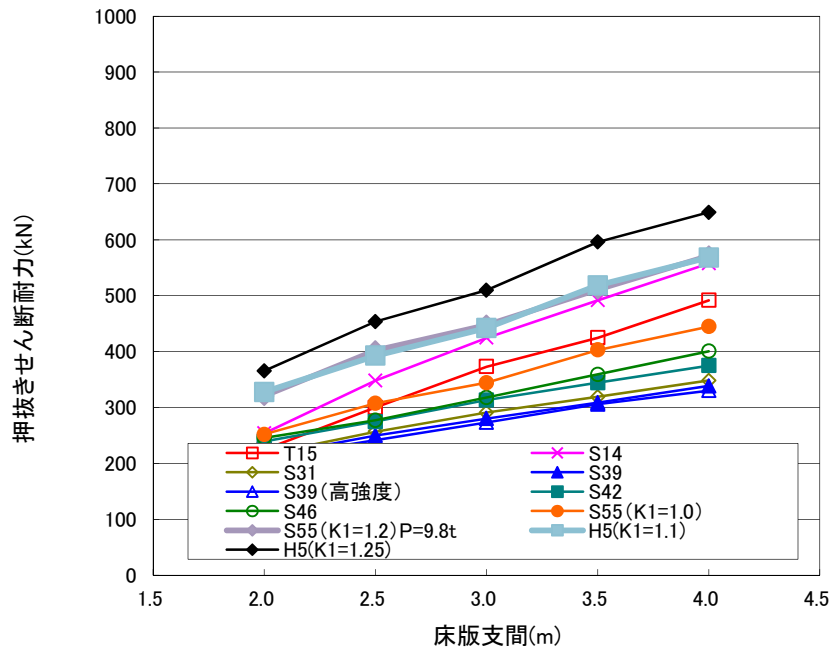


図-付 6.3.59 床版支間と押し抜きせん断耐力の相関（凍害中度）

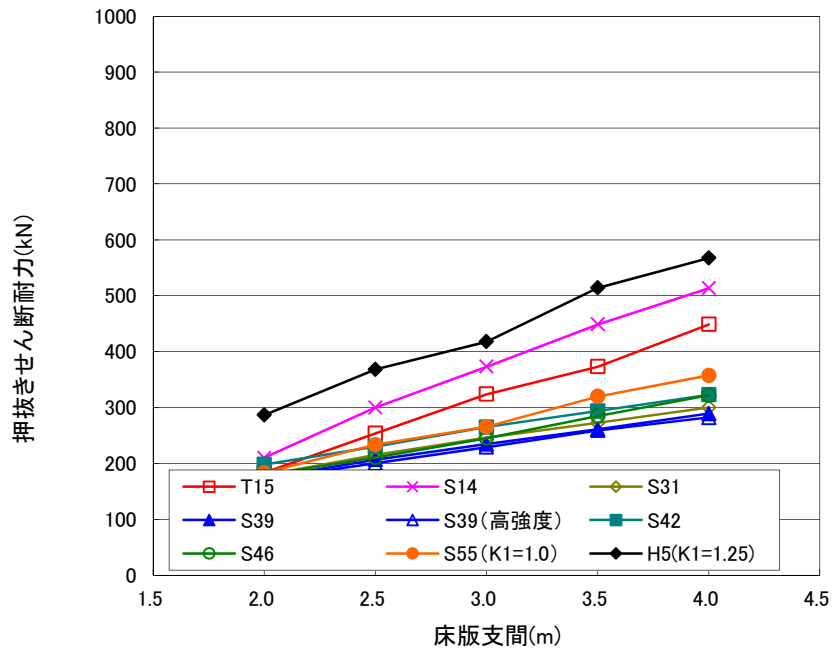


図-付 6.3.60 床版支間と押し抜きせん断耐力の相関（凍害重度）

(3) 各パラメータが押抜きせん断耐力に及ぼす影響

ここでは S39 示方書と S47 示方書床版における表-付 6.3.11～表-付 6.3.13 に示す各パラメータが押抜きせん断耐力に及ぼす影響を比較する。

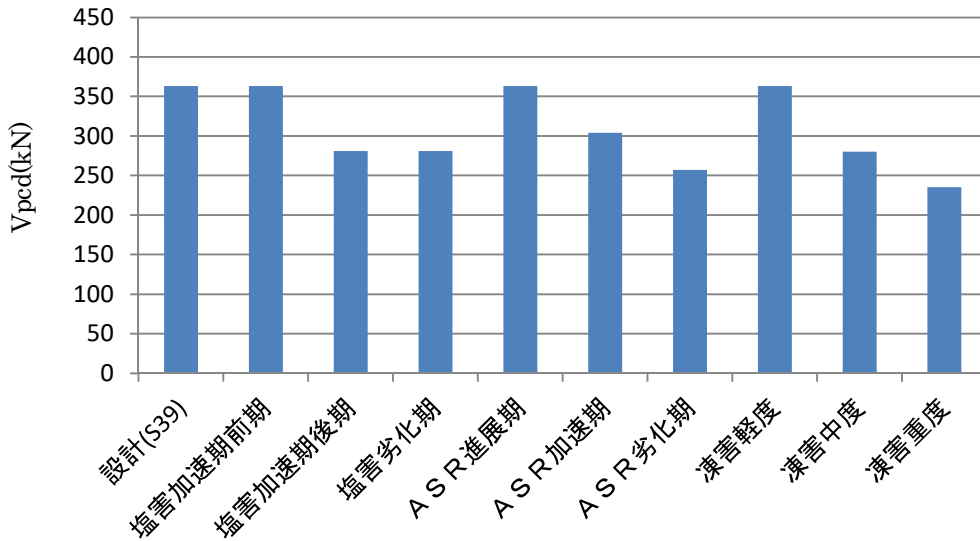


図-付 6.3.61 S39 道示における損傷毎の押抜きせん断耐力

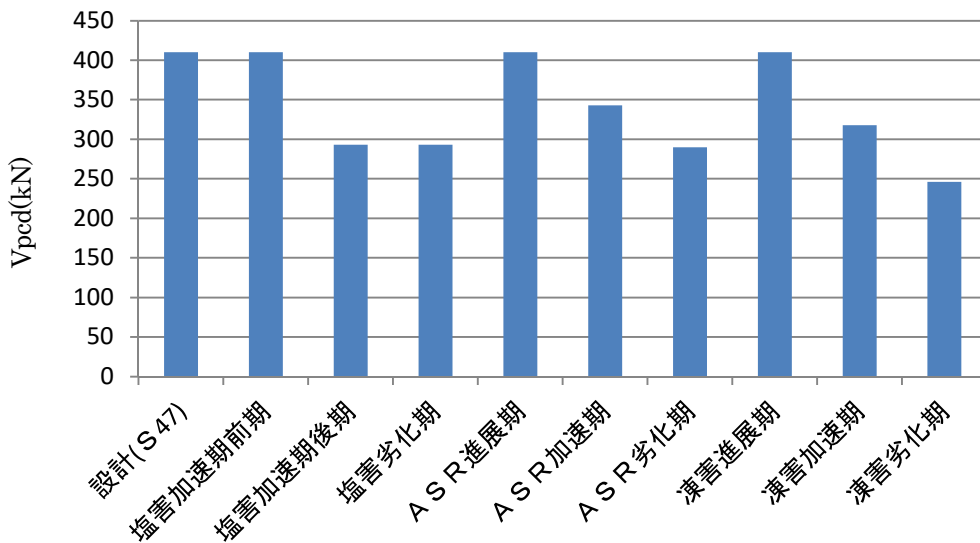


図-付 6.3.62 S47 道示による損傷毎の押抜きせん断耐力

上記グラフより、かぶり厚が減少する塩害及び凍害において、減少の割合に応じて押し抜きせん断耐力が低減していることがわかる。ASR においては圧縮強度の低減に従い押し抜きせん断耐力が低減している。

本検討においては、コンクリート標準示方書の押し抜きせん断耐力式に影響を及ぼすパラメータはかぶり厚と圧縮強度のみであり、その他のパラメータでは押し抜きせん断耐力に影響はない。ただし、ここでは塩害劣化による鉄筋の断面減少を床版上面の圧縮側としたが、海岸沿いの高架橋や栈橋など下面から塩害を受ける場合は、下鉄筋の断面減少は押し抜きせん断耐力に影響を及ぼすので注意が必要である。

3.4.2 松井式による耐荷力の計算

(1) 輪荷重供試体での耐荷力

S39 道示における、損傷要因毎のはり状化を考慮した押し抜きせん断耐荷力 P_{sx} を、**図-付 6.3.63** に示す。これより、耐荷力の低下は、ASR、凍害が大きく、塩害の影響は小さいことが確認できる。これは、ASR、凍害では、上側のかぶり厚の減少と圧縮強度の低下が同時に生じるためであり、圧縮強度が低下しない塩害では耐荷力の低下が小さいことから、 P_{sx} はコンクリートの圧縮強度の影響を大きく受けることがわかる。なお、塩害の加速度後期より劣化期の耐荷力が大きくなっているのは、上側鉄筋の断面減少により中立軸が下がり、計算上のコンクリートの断面積が増加するためである。

S47 道示における、損傷要因毎のはり状化を考慮した押し抜きせん断耐荷力 P_{sx} を、**図-付 6.3.64** に示す。これより、損傷要因毎の耐荷力の低下の割合は、S39 道示の結果とほぼ同様であり、適用基準による差異はほとんどないことがわかる。

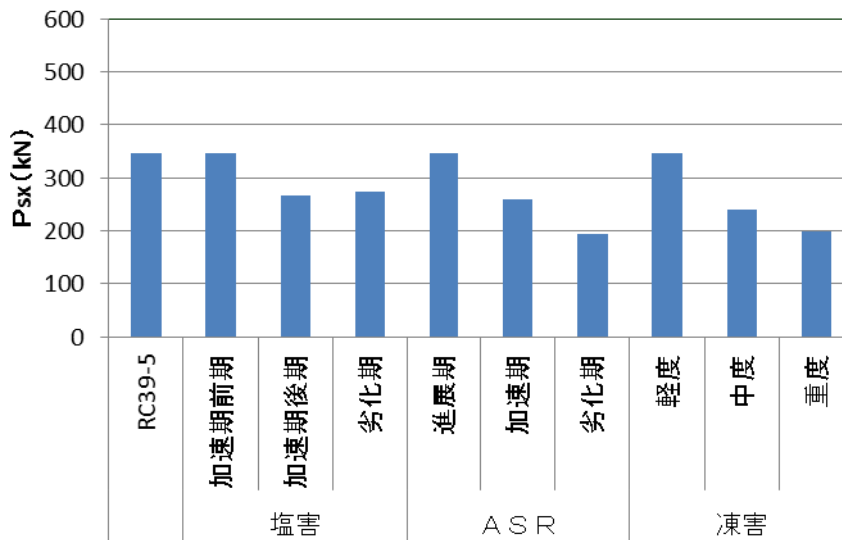


図-付 6.3.63 S39 道示における損傷要因毎の P_{sx}

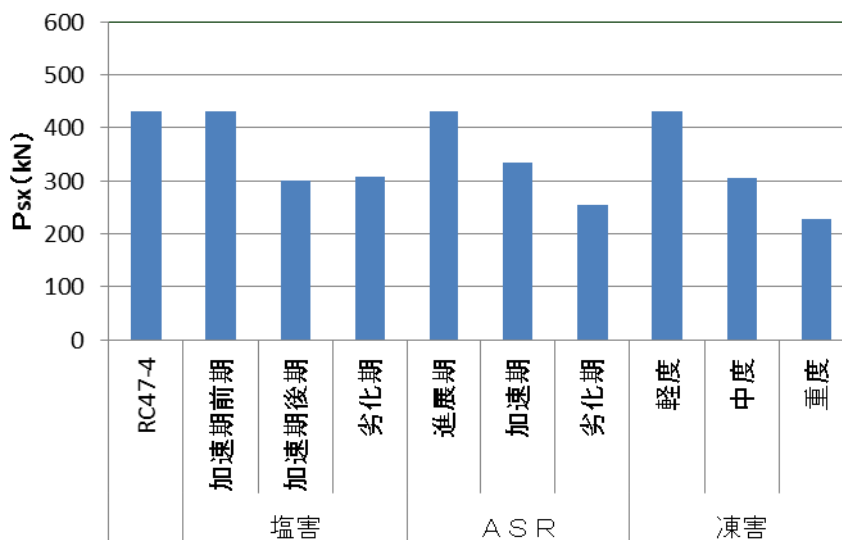


図-付 6.3.64 S47 道示における損傷要因毎の P_{sx}

(2) 適用基準による耐荷力の差異

図-付 6. 3. 65 に適用基準毎の P_{sx} の計算値を示す。これより、 P_{sx} は、S39（高強度）が最も小さく適用道示が新しくなるにしたがって大きくなる。また、S31 以前では、 P_{sx} が大きくなる傾向があるが、これは、曲げモーメント式の違いによるものと考えられる。

図-付 6. 3. 66 に適用基準毎の床版支間と P_{sx} の計算値との関係を示す。これより、いずれの適用基準においても床版支間が大きくなるにしたがって P_{sx} が大きくなることが確認できる。これは、床版支間の増加と共に床版厚が増加するためと考えられ、床版厚を決定する際の割増係数が設定された S55 以降では、 P_{sx} の増加量が大きい傾向にある。

図-付 6. 3. 67 に損傷要因毎の適用基準と P_{sx} の相関を、図-付 6. 3. 68 に損傷要因毎の P_{sx} を示す。これより、耐荷力の低下は、輪荷重供試体と同様に ASR、凍害が大きく、塩害が小さい傾向になることが確認できる。

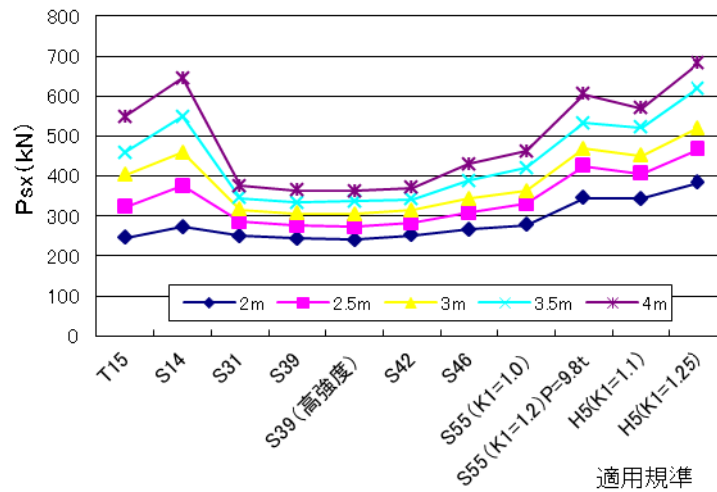


図-付 6. 3. 65 適用道示と P_{sx} の相関

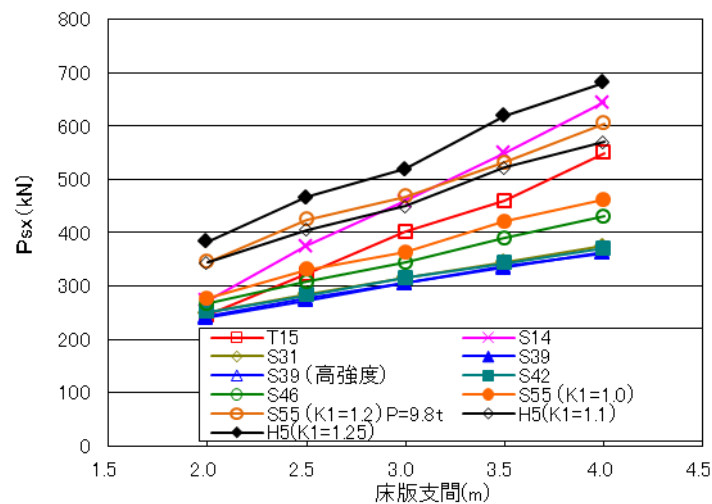


図-付 6. 3. 66 床版支間と P_{sx} の相関

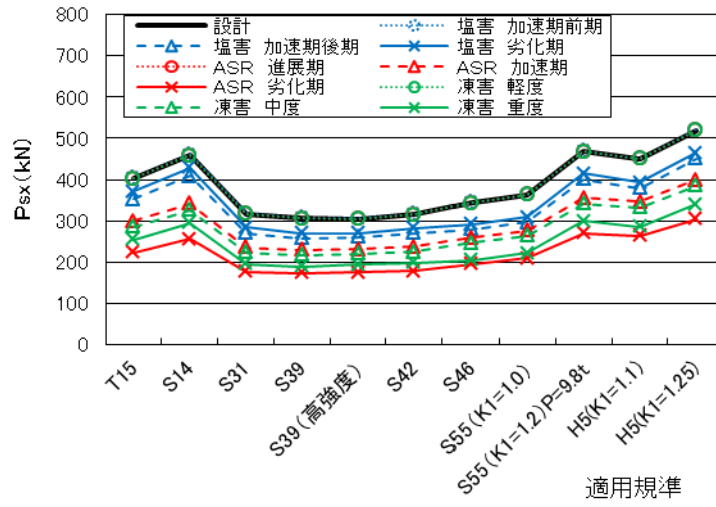


図-付 6. 3. 67 損傷要因毎の適用基準と P_{sx} の相関

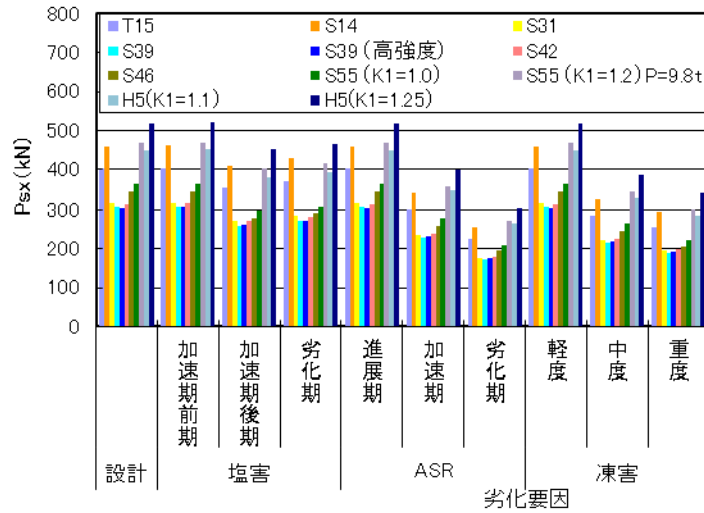


図-付 6. 3. 68 損傷要因毎の P_{sx}

3.4.3 FEMによる耐荷力の計算

(1) 耐荷力の算出

3.3.2に示すとおり，たわみの算出と同時に耐荷力の算出を行った。

劣化進行度ごとに最大耐荷力に及ぼす影響を，健全床版に対する比率としてまとめたものを図-付 6.3.69に示す。終局耐力への影響は，いずれも中期以降に顕著にみられることがわかった。また，S39床版とS47床版との傾向の違いは，塩害劣化の影響度である。もとの鉄筋量が少ないS39床版では，塩害による耐荷力の低下は比較的大きいと言える。

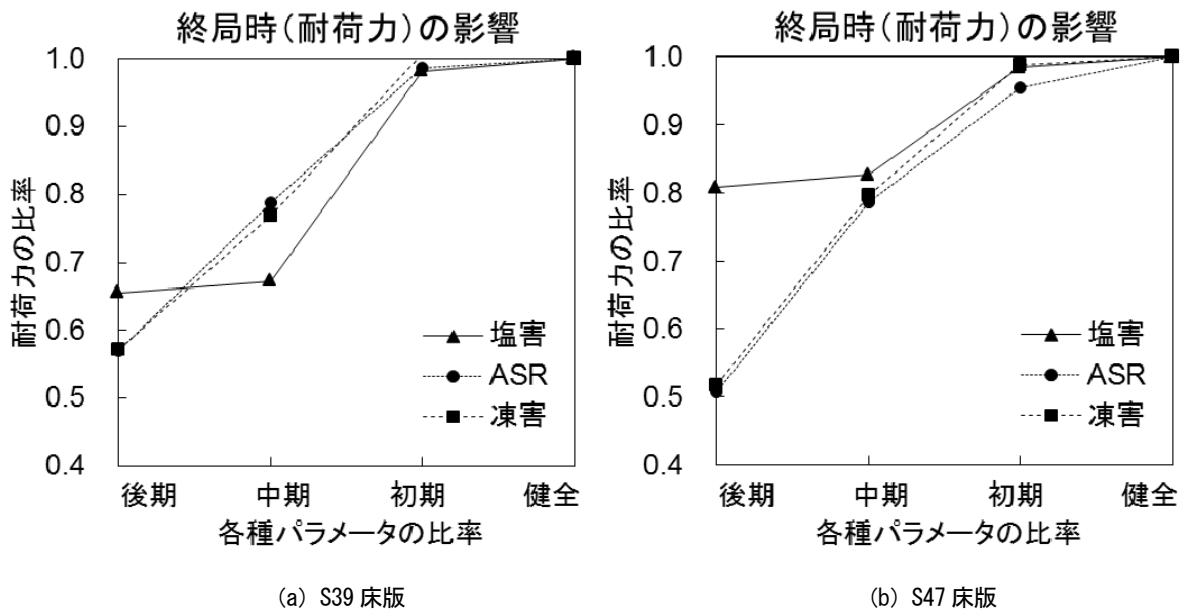


図-付 6.3.69 耐荷力への影響度まとめ

3.4.4 終局耐力と劣化パラメータの関係まとめ

コンクリート標準示方書に基づく押し抜きせん断耐力式では，かぶり厚と圧縮強度のみであり，その他のパラメータでは押し抜きせん断耐力に影響はないことから凍害の影響度が大きく見積もられ，はり状化を考慮した押し抜きせん断耐力 P_{sc} での耐荷力の低下は，凍害が最も大きく，次いで，ASR，塩害の順になることが確認できた。一方，塩害による鉄筋付着低下の影響も見込んだFEMにおいて，損傷中期までは凍害とASRと比較して塩害の影響も同等以上であったが，後期（重度）の状態では，凍害やASRのほうが耐荷力低下は著しいという結果となった。

3.5 終局状態（疲労寿命）に関する検討

3.5.1 松井式による疲労寿命の計算

(1) 輪荷重供試体での疲労寿命

図-付 6.3.70 に、土木研究所における輪荷重走行試験結果による S-N 関係を示す。これより、試験結果は土木研究所の S-N 曲線と概ね一致しており、この S-N 関係を適用できることが確認できる。

図-付 6.3.71 に、S39 道示、S47 道示における損傷要因毎の疲労寿命を示す。これより、いずれの基準においても、疲労寿命の低下は ASR、凍害が大きく、塩害が小さい傾向が確認できる。これは、耐荷力と同様に、ASR、凍害では上側のかぶり厚の減少と圧縮強度の低下が同時に生じるためであり、疲労寿命もコンクリート強度の影響を大きく受けることがわかる。

図-付 6.3.72 に、損傷要因毎の S-N 関係を示す。これより、損傷要因によらず、いずれも S-N 線の傾きは概ね等しいことがわかる。このときの劣化期の疲労寿命は、設計時と比べ ASR、凍害で約 1/10000 に、塩害で約 1/100 に低下することが確認できる。

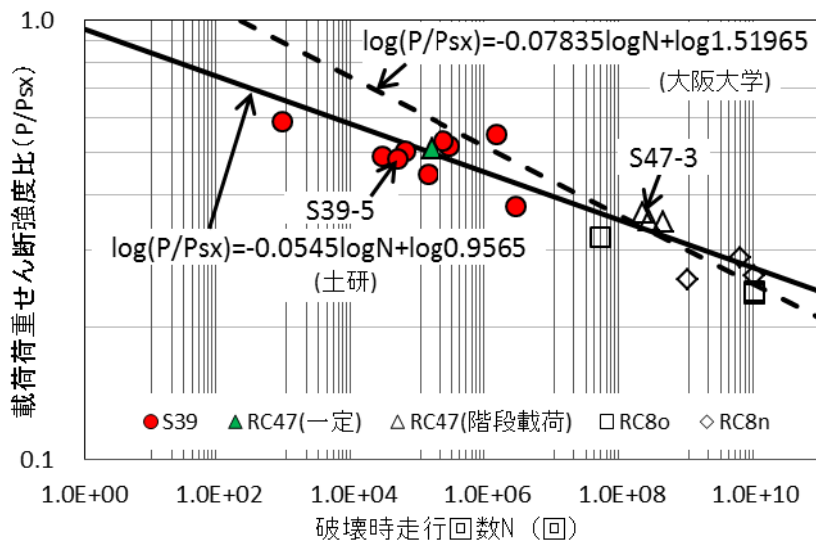
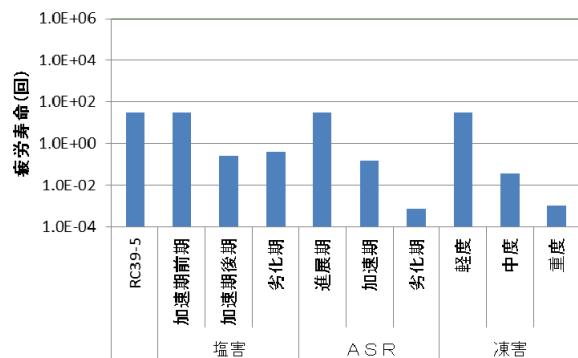
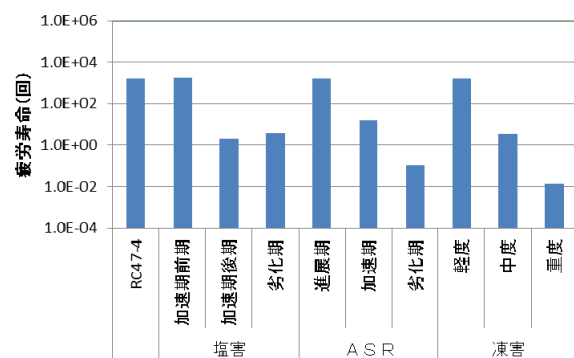


図-付 6.3.70 輪荷重走行試験結果（土木研究所）による S-N 関係



(a) S39 道示



(b) S47 道示

図-付 6.3.71 損傷要因毎の疲労寿命

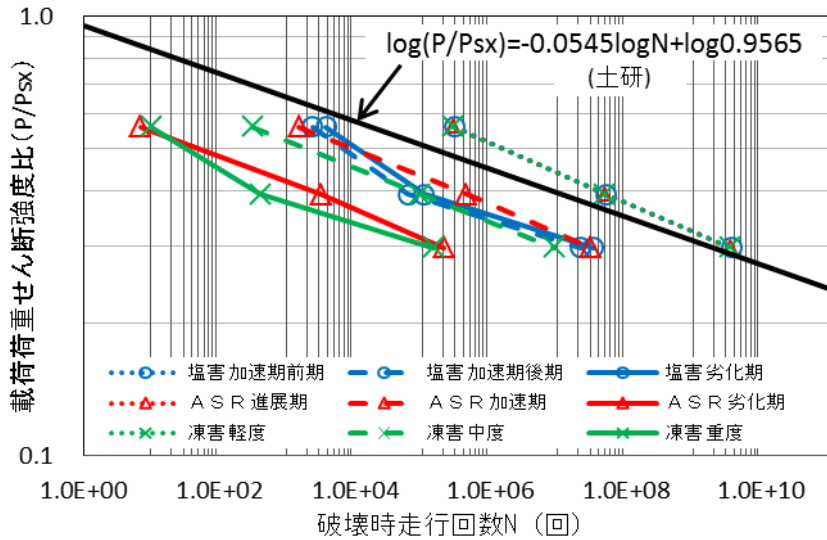


図-付 6.3.72 損傷要因毎の S-N 関係

(2) 適用基準による耐荷力の差異

図-付 6.3.73 に適用基準毎の疲労寿命の相関を示す。これより、疲労寿命は、S39（高強度）が最も小さく適用道示が新しくなるにしたがって大きくなる。また、S31 以前では、疲労寿命が大きくなる傾向があるが、これは、曲げモーメント式の違いによるものと考えられる。

図-付 6.3.74 に適用基準毎の床版支間と疲労寿命との関係を示す。いずれの適用基準においても床版支間が大きくなるにしたがって、疲労寿命が大きくなることが確認できる。これは、耐荷力と同様、床版支間の増加と共に床版厚が増加するためである。

図-付 6.3.75 に損傷要因毎の適用基準と疲労寿命の相関を、図-付 6.3.76、図-付 6.3.77 に、それぞれ、損傷要因毎の疲労寿命および疲労寿命比を示す。これより、疲労寿命の低下は、輪荷重供試体と同様に ASR、凍害も大きく、塩害の影響は小さいことがわかる。また、疲労寿命比を道示年代ごとに比較すると、ほとんど差がないことから、道示の年代による疲労寿命の低下割合はほとんど同じとなることがわかる。

図-付 6.3.78 に、損傷要因毎の S-N 関係を示す。これより、輪荷重供試体と同様に、損傷要因によらず S-N 線の傾きは概ね等しく、疲労寿命は、ASR、凍害で約 1/10000 に、塩害で約 1/100 に低下する。

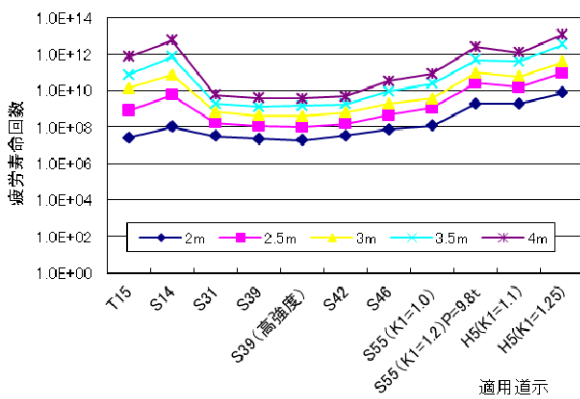


図-付 6.3.73 適用基準と疲労寿命の相関

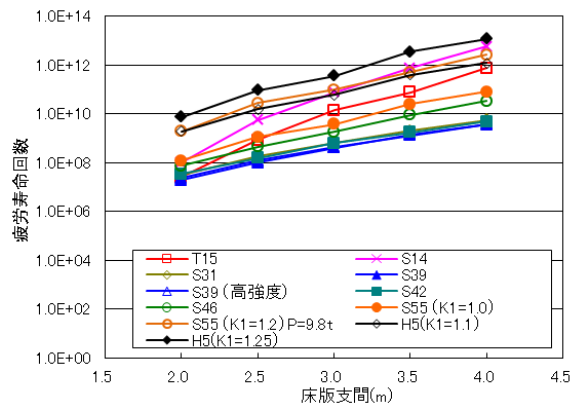


図-付 6.3.74 床版支間と疲労寿命の相関

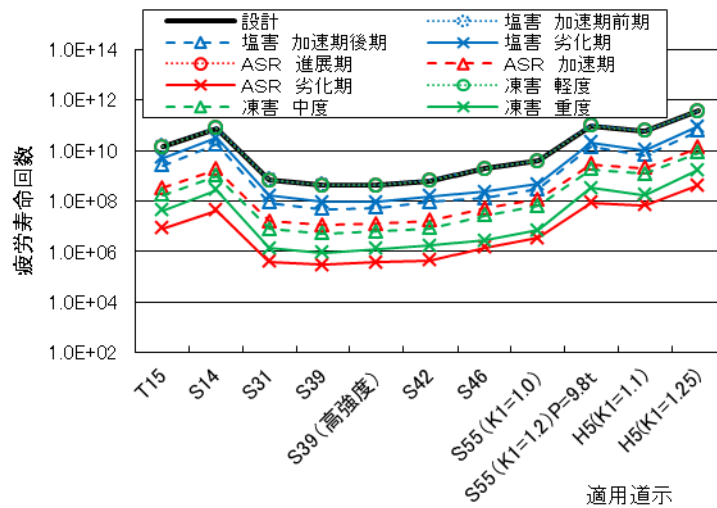


図-付 6.3.75 損傷要因毎の適用基準と疲労寿命の相関

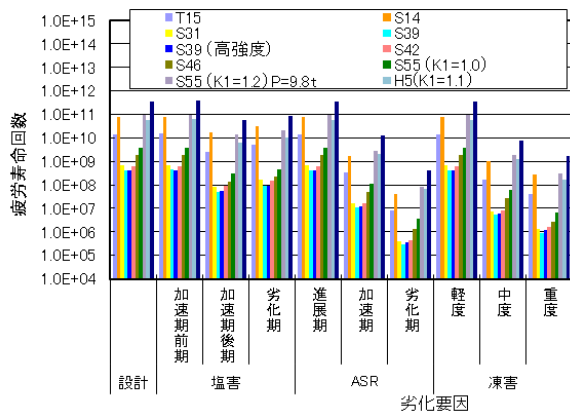


図-付 6.3.76 損傷要因毎の疲労寿命

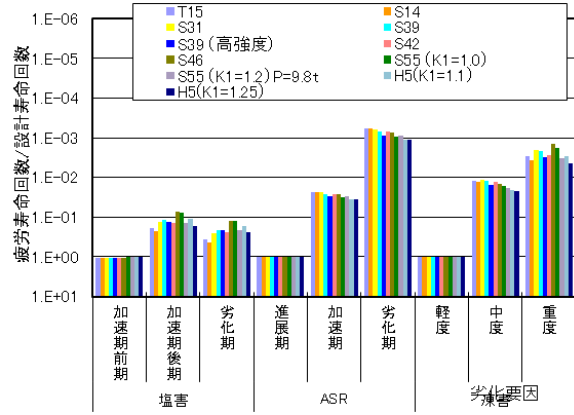


図-付 6.3.77 損傷要因毎の疲労寿命比

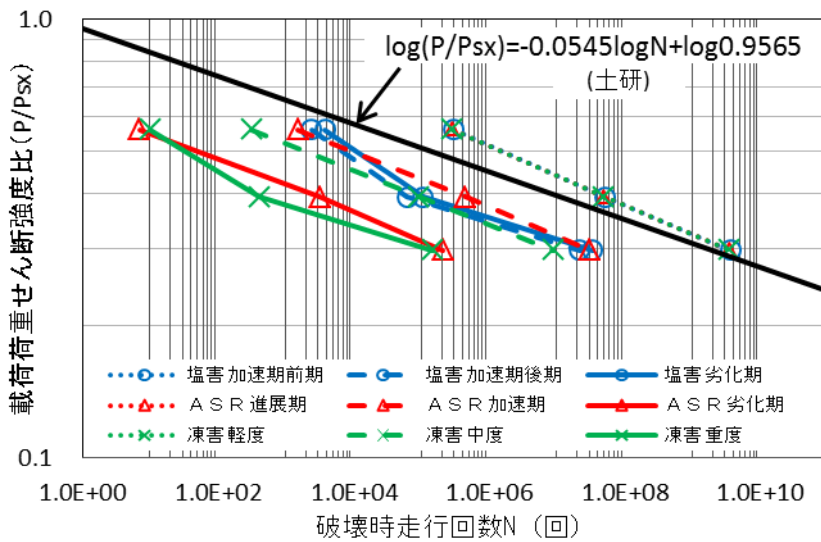


図-付 6.3.78 損傷要因毎のS-N関係

3.5.2 FEMによる疲労寿命の計算

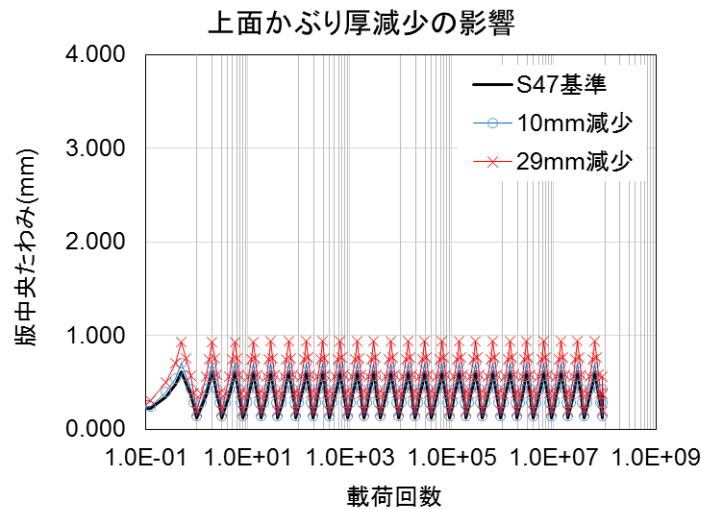
(1) 定点一定振幅繰返し荷重に対する疲労寿命

3.3.2 のモデルを対象として、3.3.2 (4) の条件をパラメータとして与え、定点一定振幅繰返し荷重に対する疲労寿命の算出を行った。荷重は静的耐荷力を算出した際と同じ版中央 $200 \times 500\text{mm}$ の範囲に、節点荷重として与えた。荷重の振幅は版中央 $200 \times 500\text{mm}$ の範囲の合計で $1\text{kN} \sim 100\text{kN}$ の一定で、载荷周波数は 2.5Hz (周期は 0.4s) とした。また、繰返し回数は 1000 万回までとした。

以下、図-付 6.3.79～図-付 6.3.83 に結果を示す。いずれも定点荷重の繰返しによるたわみの増加はわずかであり、疲労破壊を生じたと判定されるようなたわみの急増はみられなかった。このため、疲労寿命を算出することができないため、载荷初回の最大たわみと载荷終了時の最大たわみを比較し、その増分により、各パラメータの影響度を整理するものとした。

i) かぶり厚減少

たわみと载荷回数の関係を図-付 6.3.79 に示す。初期たわみの差が最後まで継続し、定点荷重の繰返しによるたわみの増加はわずかである。

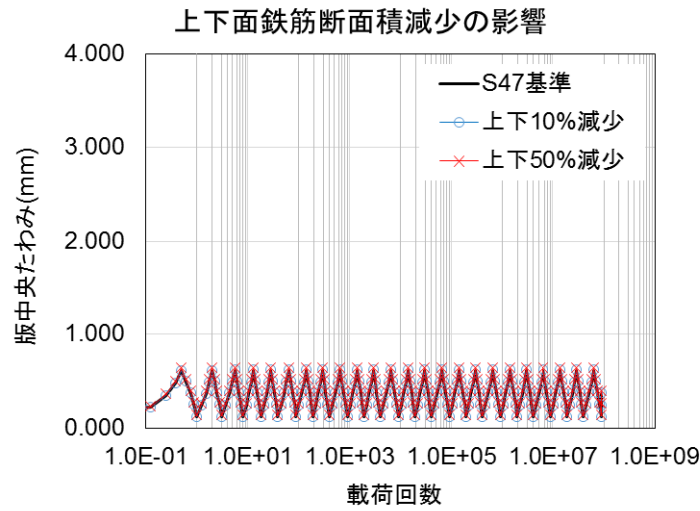


かぶり厚 減少	初回	最終载荷	比率 初回比
	活荷重 たわみ	活荷重 たわみ	
0.67	0.564	0.564	1.001
0.03	0.746	0.747	1.001

図-付 6.3.79 たわみ-载荷回数関係

ii) 鉄筋断面積減少

たわみと载荷回数の関係を図-付 6.3.80 に示す。初期たわみの差が最後まで継続し、定点荷重の繰返しによるたわみの増加はわずかである。

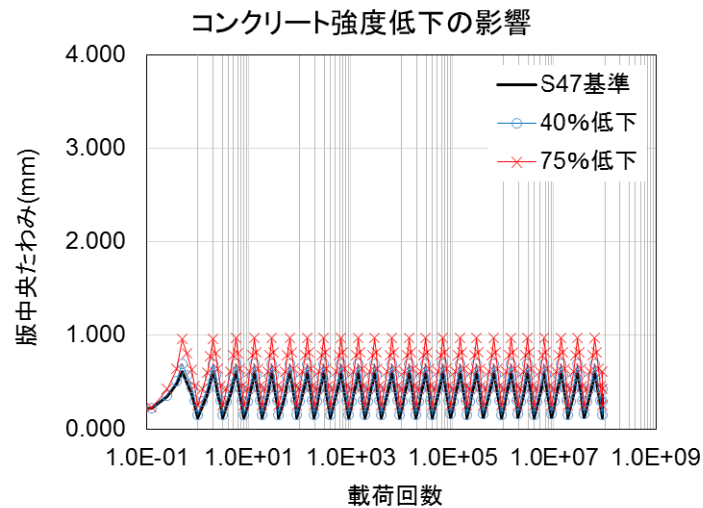


鉄筋 断面積 減少	初回	最終載荷	比率
	活荷重 たわみ	活荷重 たわみ	初回比
0.90	0.493	0.494	1.001
0.50	0.507	0.507	1.001

図-付 6.3.80 たわみ-載荷回数関係

iii) コンクリート強度低下

たわみと載荷回数との関係を図-付 6.3.81 に示す。初期たわみの差が最後まで継続し、定点荷重の繰返しによるたわみの増加はわずかである。

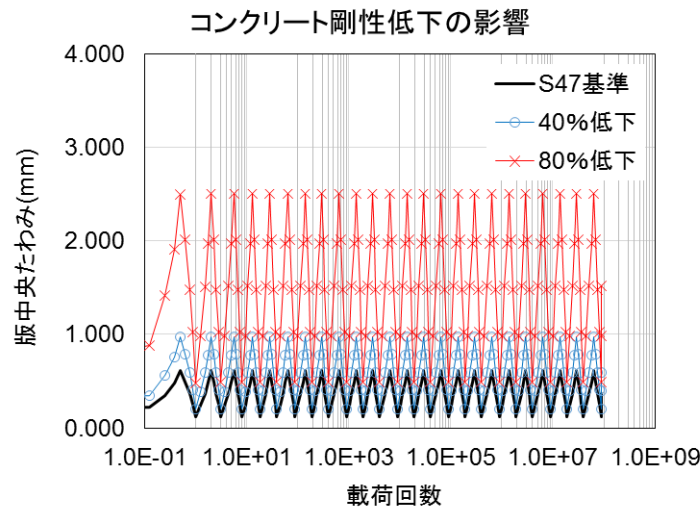


コンク リート 強度低下	初回	最終載荷	比率
	活荷重 たわみ	活荷重 たわみ	初回比
0.50	0.543	0.544	1.001
0.25	0.712	0.716	1.006

図-付 6.3.81 たわみ-載荷回数関係

iv) ヤング係数低下

たわみと載荷回数との関係を図-付 6.3.82 に示す。初期たわみの差が最後まで継続し、定点荷重の繰返しによるたわみの増加はわずかである。



ヤング 係数 低下	初回	最終載荷	比率
	活荷重 たわみ	活荷重 たわみ	初回比
0.60	0.772	0.774	1.003
0.20	2.005	2.015	1.005

図-付 6.3.82 たわみ-載荷回数関係

v) まとめ

たわみ増加割合をまとめたものを図-付 6.3.83 に示す。いずれも定点荷重の繰返しによるたわみの増加はわずかであり、各種パラメータの影響度を評価するのは難しいが、相対的には、コンクリート強度やコンクリートヤング率の低下は、定点繰返し荷重に対するたわみ増加に与える影響が幾分大きいと言える。

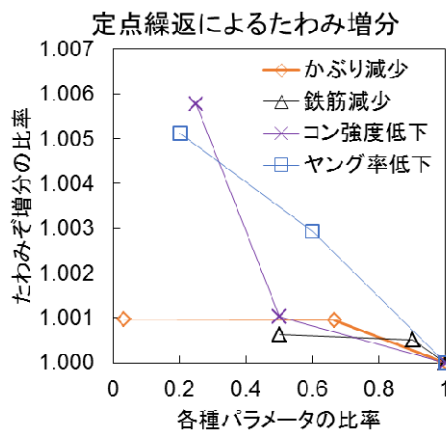


図-付 6.3.83 定点繰返しによりたわみ増分のまとめ

(2) 移動荷重繰返しに対する疲労寿命

3.3.2 のモデルを対象として、移動荷重繰返しに対する疲労寿命の算出を行った。荷重は静的耐荷力を算出した際と同じ版中央 200×500mm の範囲を、3000mm の範囲で移動することで、移動荷重を再現した。節点荷重の合計は 100kN の一定で、繰返し回数は 10^{18} 回までとした。しかし、いずれも移動荷重の繰返しによるたわみの増加はわずかであり、疲労破壊を生じたと判定されるようなたわみの急増はみられなかった。実床版で破壊が報告されるのは、過積載車の走行可能性とともに、実橋では衝撃の影響があること、また材料劣化の影響があるものと考えられる。

以上より、100kN の移動荷重では疲労寿命を算出して各影響度を検討することができないため、過大荷重を想定し、280kN での移動荷重繰返しを実施するものとした。破壊基準は、それぞれ静的解析で最大耐荷力を記録したときのたわみ (3.3.2) とした。

1) S39 床版

a) 塩害劣化

たわみと載荷回数関係を図-付 6.3.84 に示す。塩害初期で鉄筋断面積が 5%程度減少した場合でも、たわみの推移は健全時とほぼ同様であった。たわみが急激に増加するのは 10^{18} 回程度以降であり、実供用下で破壊する可能性は高くないと言える。一方、塩害が進行し鉄筋の膨張によるひび割れによって上面のかぶりコンクリートがはく離したことを想定した 2 ケースでは、初期たわみがほぼ倍程度となり、その後のたわみの増加も著しかった。

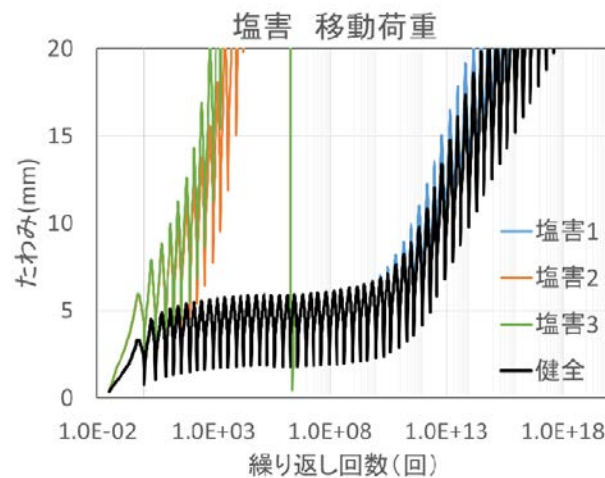


図-付 6.3.84 たわみ—載荷回数関係

b) ASR 劣化

たわみと載荷回数関係を図-付 6.3.85 に示す。塩害の場合とは異なり、ASR 劣化の進行度合いに応じて、たわみが増加する回数が小さくなった。ASR の進行度合いを主としてヤング係数の低下で表現しているため、使用時たわみの増加と同様、疲労寿命にも大きな影響を与える結果となった。なお、使用時たわみが健全時の 2 倍程度となる ASR 初期でも、疲労寿命の減少割合は 1/1000 にもなっている。

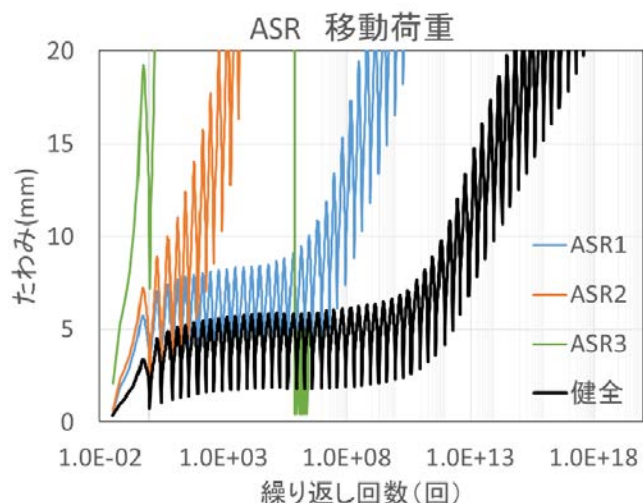


図-付 6. 3. 85 たわみ-載荷回数関係

c) 凍害劣化

たわみと載荷回数(回)の関係を図-付 6. 3. 86 に示す。塩害の場合と同様，凍害初期は健全時とのたわみの推移の差は大きくはないが，中期，後期では大幅に異なる結果となった。また，使用時たわみは凍害後期でも高々健全時の2倍程度であったが，疲労寿命の減少は最大で1/10⁹にもなっており，移動荷重下での疲労寿命に与える影響の大きさが確認された。

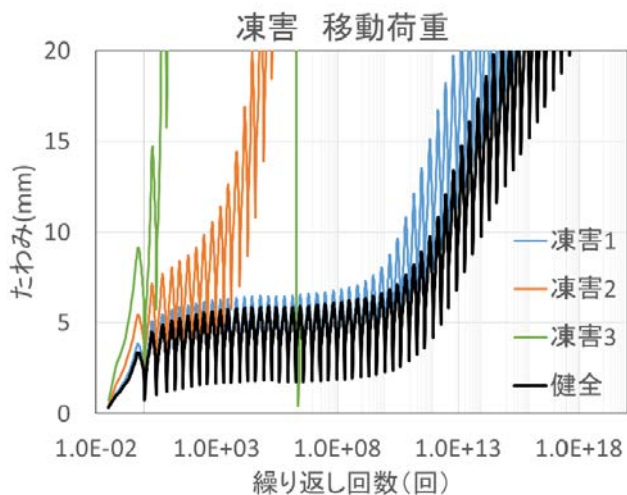


図-付 6. 3. 86 たわみ-載荷回数関係

2) S47 床版

a) 塩害劣化

たわみと荷重回数の関係を図-付 6.3.87 に示す。S39 床版と同様、塩害初期で鉄筋断面積が 5%程度減少した場合でも、たわみの推移は健全時とほぼ同様であった。実供用下で破壊する可能性は低いと言える。一方、塩害が進行し鉄筋の膨張によるひび割れによって上面のかぶりコンクリートがはく離したことを想定した 2 ケースでは、初期たわみがほぼ倍程度となり、その後のたわみの増加も著しかった。

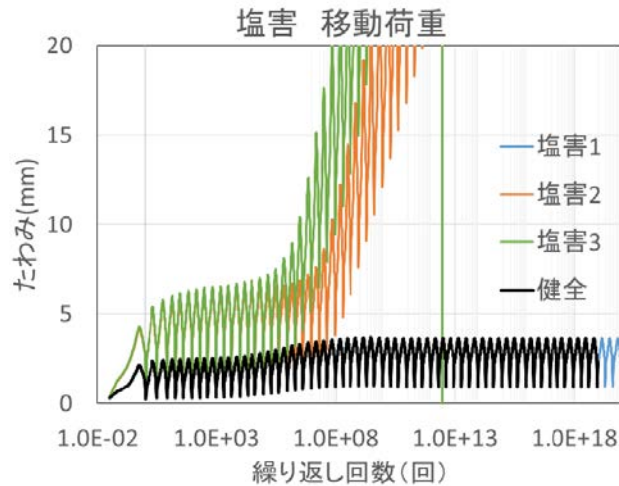


図-付 6.3.87 たわみ-荷重回数関係

b) ASR 劣化

たわみと荷重回数の関係を図-付 6.3.88 に示す。S39 床版と同様、ASR 劣化の進行度合いに応じて、たわみが増加する回数が小さくなった。ASR の進行度合いを主としてヤング係数の低下で表現しているため、使用時たわみの増加と同様、疲労寿命にも大きな影響を与える結果となった。なお、ASR 初期と中期はそれぞれ使用時たわみが健全時の 2 倍程度にとどまっていたが、両者の疲労寿命差は 1/10000 にもなっていた。

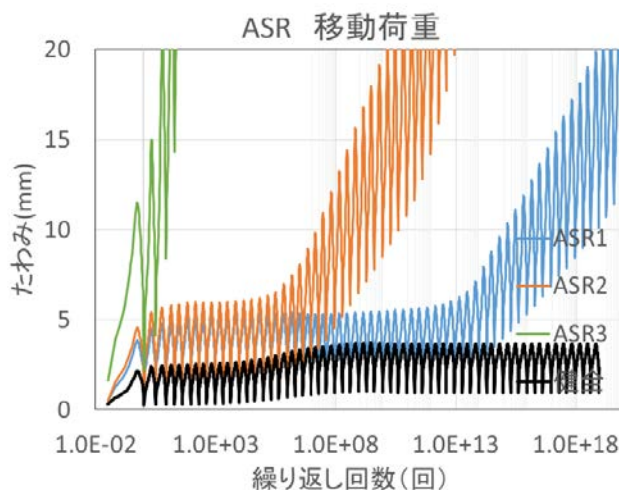


図-付 6.3.88 たわみ-荷重回数関係

c) 凍害劣化

たわみと載荷回数(移動荷重)の関係を図-付 6.3.89 に示す。塩害の場合と同様、凍害初期は健全時とのたわみの推移の差は大きくはないが、中期、後期では大幅に異なる結果となった。また、凍害中期の使用時たわみは凍害中健全時の 1.5 倍程度、凍害後期では 2 倍程度であったが、両者の疲労寿命の差はで $1/10^{10}$ にもなっており、移動荷重下での疲労寿命に与える影響の大きさが確認された。

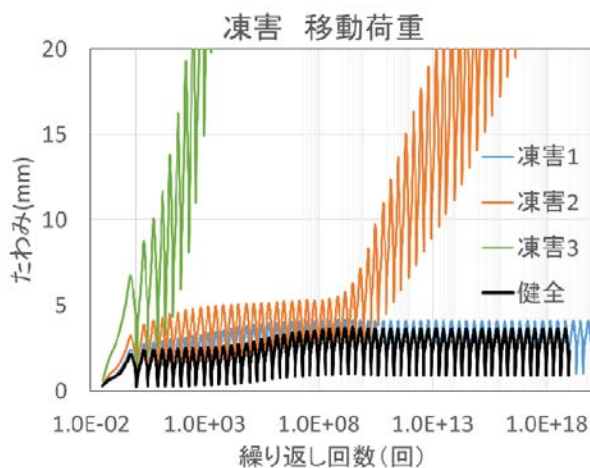


図-付 6.3.89 たわみ-載荷回数関係

3) まとめ

本節では各劣化パラメータが、移動荷重の繰返しによる破壊までの回数(疲労寿命)に与える影響を調べた。その結果、使用時たわみの差から感覚的にイメージされるよりも、移動荷重による疲労寿命への影響は著しく大きいことが示された。本シミュレーションでは荷重を過大に設定しているため、ここで得られた知見を実床版に適用するには十分な注意が必要であるが、材料劣化が RC 床版の疲労寿命にいかにか大きな影響を与えるかを考えるにあたり、ひとつの参考材料とはなり得る。

参考文献

- 1) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズNo.71，2006.9
- 2) 土木学会：続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズNo.85，2009.5
- 3) 前島拓，子田康弘，土屋智史，岩城一郎：塩害による鉄筋腐食が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.70，No.2，pp.208-225，2014
- 4) 上田洋，飯土井剛，子田康弘，佐伯竜彦，岩城一郎，鈴木基行：厳しい塩害環境において架替え後 15 年が経過した PC 橋の詳細調査および今後の維持管理に関する提案，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.71，No.2，pp.161-180，2015
- 5) 横沢篤，加藤絵万，横田弘，下村匠：供用 40 年が経過した RC 栈橋上部工の劣化と構造性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.1591-1596，2005
- 6) 土木研究所構造物メンテナンス研究センター：既設道路橋コンクリート床版の耐久性向上に関する研究，土木研究所資料，第 4160 号，2010.1
- 7) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書—鉄筋破断と新たな対応—，コンクリートライブラリー，No.124，2005
- 8) 田附伸一，津吉毅，石橋忠良，松田芳範，今井勉：ASR により損傷した RC 部材の耐荷力に関する実験的研究，土木学会論文集 E，Vol.63，No.1，pp.166-177，2007
- 9) 野村倫一，松田好史，葛目和宏：ASR の影響を受けた構造物におけるコンクリートの力学的特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1273-1278，2009
- 10) 川島恭志，幸左賢二，佐々木一則，真野祐子：実構造物における ASR 損傷度の定量的評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.737-742，2006
- 11) 児島孝之，杉江功，丸山悟，村山康雄：アルカリ骨材反応による RC 床版の損傷と補修，コンクリート工学，Vol.32，No.2，pp.23-36，1994.2
- 12) 加賀谷悦子，青山實伸：北陸地方の既設コンクリート構造物から採取したコアの強度・変位性状，土木学会年 70 回年次学術講演会講演概要集，V-541，pp.1081-1082，2015.9
- 13) 2013 年制定 コンクリート標準示方書 維持管理編，土木学会，p.191，2013
- 14) 山下英俊，堺孝司，佐伯昇：コンクリート構造物の凍害発生要因に関する研究，土木学会論文集，No.602/VI-40，pp.93-105，1998
- 15) 林田宏，田口史雄，遠藤裕丈，草間祥吾：超音波伝搬速度測定によるコンクリート構造物の凍害診断に関する基礎的研究，寒地土木研究所月報，No.656，pp.10-15，2008
- 16) 緒方英彦，服部九三雄，高田龍一，野中資博：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1563-1568，2002
- 17) A.M.Neville 著，三浦尚訳：ネビルのコンクリートバイブル，技報堂出版，p.519，2004
- 18) 北海道土木技術会コンクリート研究委員会：凍害により材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能評価に向けて ～劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会報告書～，2014.9
- 19) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，平成 24 年 3 月，2012
- 20) 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国総研資料第 28 号，2002.3
- 21) 土木学会：構造力学公式集，昭和 61 年 6 月，1986
- 22) 関口幹夫，横山広，堀川都志雄：リブ付き多層版解析による各種補強床版の実測たわみの評価，構造工学論文集，Vol.54A，pp.442-451，2008.
- 23) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，2012.

- 24) 角田与史雄, 伊藤昭夫, 藤田嘉夫: 鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 229 号, pp.105-115, 1974
- 25) 松井繁之; 道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究, 大阪大学学位論文, 1984
- 26) 松井繁之; 移動荷重を受ける道路橋の RC 床版と水の影響について, 日本コンクリート工学協会, 第 9 回コンクリート工学年次論文報告集, 1987
- 27) 三田村浩, 佐藤京, 本田幸一, 松井繁之: 道路橋 RC 床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響, 構造工学論文集, Vol.55A, 2009.3
- 28) 橘吉宏, 梶川康夫, 川村満紀: 鉄筋腐食により損傷を受けた RC 床版の押し抜きせん断耐力に関する一考察, 土木学会論文集, 第 426 号, pp.65-74, 1991.
- 29) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991
- 30) 藤山知加子, 商峰, 櫻井信影, 前川宏一: 直接経路積分法に基づく鋼コンクリート合成床版の疲労寿命推定と損傷モード, 土木学会論文集 A, Vol.66, No1, pp.193-206, 2010
- 31) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear mechanics of reinforced concrete, Spon press, London, 2003

4. 点検結果と定量化指標の関連付けの試み

4.1 点検結果を用いた RC 床版の残存耐荷力および残存寿命の評価

4.1.1 はじめに

道路橋 RC 床版の定期点検では、通常、下面側からの接近目視により点検を実施し、ひび割れ状況や白色析出物、漏水、はく離、鉄筋腐食等により損傷判定を実施し、その後、床版としての健全性の評価（診断）をしている。これまでの損傷評価は、床版としての耐荷力もしくは耐久性を直接的に評価する指標が少なく、各種の損傷の状況から劣化進行の状況等を複合的に評価し、健全性の診断評価の区分を I～IV で診断していた。床版の健全度評価において、床版の残存耐荷力および残存寿命を直接的に評価することができれば、継続使用上の危険度の判断や補修優先度の設定に際して有用な情報となる。

そこで、RC 床版の健全度評価方法として、定期点検で診断した床版の劣化現象（塩害、ASR、凍害）および損傷程度により劣化過程を推測した場合での、残存耐荷力と残存寿命の程度を評価する方法について検討する。また、たわみ計測結果や上面から詳細調査等により圧縮側の砂利化や鉄筋腐食等の状況が分かる場合、更に精度を向上する方法についても述べる。

これまで、既設床版に関する残存耐荷力および残存寿命の評価は、切り出した後に輪荷重走行試験により確認するといった実験的な検討や、設計図から断面を想定し、当該橋梁の交通実態を用いて床版の S-N 線等から推測する計算手法による検討が多くなされてきた。これらは、特定の床版に対し実施する点では有効であるが、点検対象となる膨大な資産に対して、床版が現場にあるままで損傷発見後すぐに継続使用上の危険度や補修優先度を判定する場合のようなマクロ的な評価には、時間とコストの関係で適用することが難しい。

これについて、3 章までに理論計算や耐荷力算定式、非線形 FEM 解析による検討で、劣化が生じた RC 床版の劣化課程ごとに損傷程度を仮定し、断面緒元に関してかぶり圧縮強度や鉄筋断面積等の各種パラメータを低減する方法により、その場合のたわみ・耐荷力・寿命に及ぼす影響を考察してきた。その結果を再掲するが、図-付 6.4.1～図-付 6.4.3 のように、健全状態に比較して各種の材料劣化が生じた場合に、どの程度耐荷力や寿命が低下しているのか評価が可能となる。本検討結果は、床版支間や断面緒元が限定的な条件の下での結果ではあるが、床版の劣化状況とそれによる輪荷重に対する安全性について定性的にもしくは感覚的に評価できる。

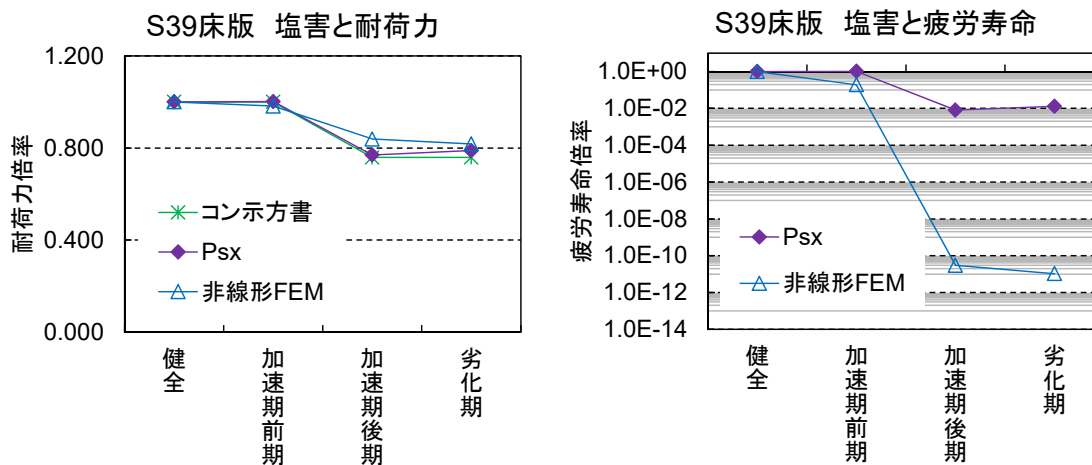


図-付 6.4.1 塩害の劣化過程での耐荷力・疲労寿命の変化 (S39 床版, 支間 2m 程度)

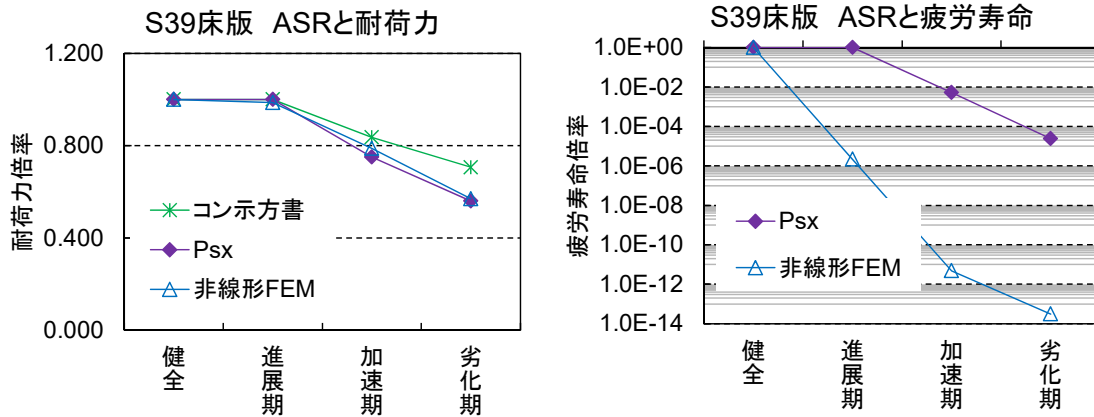


図-付 6.4.2 ASR の劣化過程での耐荷力・疲労寿命の変化 (S39 床版, 支間 2m 程度)

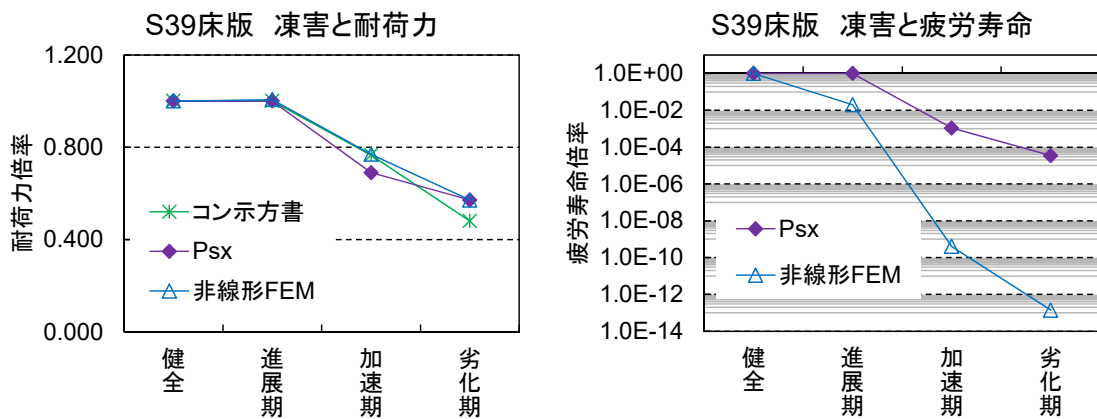


図-付 6.4.3 凍害の劣化過程での耐荷力・疲労寿命の変化 (S39 床版, 支間 2m 程度)

4.1.2 点検での診断区分と劣化過程の関係

定期点検での健全性診断の評価区分について、材料劣化の状態（劣化過程）に応じて明確に当てはめることは難しいが、第3章で断面緒元を低減したことを参考に、耐荷力上の安全性の観点から対応表を整理すると表-付 6.4.1 のとおりとなる。ここでは、径間単位での評価Ⅰ～Ⅳについて例示している。仮に、定期点検結果で評価ランクがつけられた場合には、この対応表を用いて、4.1.1 に示すような耐荷力や寿命の変化量から、安全性を評価することが考えられる。

4.1.3 たわみを用いた大まかな疲労寿命評価

床版下面側で変位計によりたわみ計測した場合や、上面側から FWD により床版たわみ推定をした場合には、その結果を用いて疲労寿命の推測が可能となる。第3章でのたわみ評価は健全部との比較でのたわみ倍率と疲労寿命倍率が検討されており、計測結果により劣化部のたわみと健全部のたわみが分かれば、その比率により、劣化部の寿命低下の状況が推測するものである。床版パネルについてその支間中央でのたわみとの関係を図-付 6.4.4～図-付 6.4.6 に示す。なお、健全部のたわみについては、断面緒元が図面等により分かる場合には、FEM 解析等の解析検討により推定した値を用いてもよい。ただし、これらの図は、限定的な計算条件であることから、厳密な評価ではないことに注意しておく必要がある。

表-付 6. 4. 1 健全性診断評価区分と劣化過程との関係

国交省の健全性診断評価区分	疲労 (繰返し作用による損傷)	塩害 (鉄筋腐食による耐荷性能低下)	凍害 (コンクリート凍害による耐荷性能低下)	ASR
劣化過程の参照先	床版維持管理マニュアル 4.1.3	床版維持管理マニュアル 4.1.4	床版維持管理マニュアル 4.1.5	床版維持管理マニュアル 4.1.7
I 健全	潜伏期 「主に乾燥収縮により、橋軸直角方向に一方向ひび割れが数本程度発生している段階」	潜伏期 「鋼材表面における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に達するまでの期間」 ～進展期 「鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間」	潜伏期 「床版コンクリートにポップアウトが発生した状態」	潜伏期 「濡れ色」
II 予防保全	進展期 「主桁作用により、橋軸直角方向に曲げひび割れが進展するとともに、橋軸方向に床版の曲げによるひび割れも進展し始め、格子状のひび割れ網が形成される段階」	加速期（前期） 「腐食ひび割れ発生により腐食速度が増大する期間」	進展期 「床版コンクリートがスケーリングし、骨材が露出している状態」	進展期 「コンクリートにひび割れ、ゲル状物質の滲出、濡れ色」
III 早期措置	加速期 「ひび割れの網細化が進み、ひび割れの開閉やひび割れのすり磨きが始まる段階」	加速期（後期） 「腐食ひび割れが多数発生し、部分的なはく離・はく落が認められる。」	加速期（前期） 「床版コンクリートのスケーリングが鉄筋付近まで達している状態」 ～加速期（後期） 「床版コンクリートのスケーリングにより、鉄筋が露出している状態」	加速期 「ひび割れの増加、床版内部に水平ひび割れの発生、腐食発生」
IV 緊急措置	加速期（後期） 「ひび割れのスリット化や角落ちが生じコンクリート断面の抵抗は期待できない段階」	劣化期 「腐食量の増大により耐荷力の低下が顕著な期間」	劣化期 「床版コンクリートがスケーリングし、鉄筋の露出とコンクリートの砂利化が見られる状態」	劣化期 「水平ひび割れの進展、腐食の進展、剥離・剥落、陥没、抜け落ち」

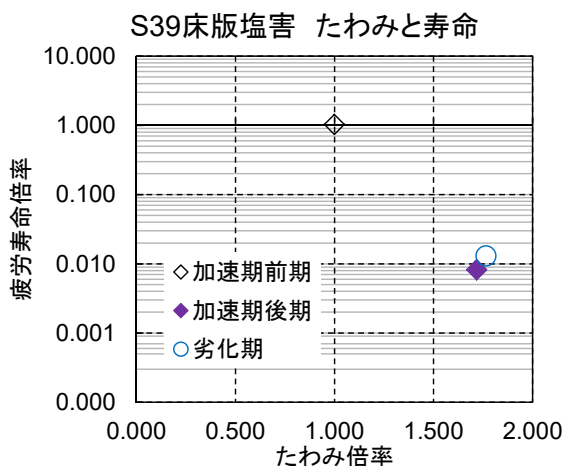


図-付 6. 4. 4 塩害のたわみと疲労寿命の関係

(S39 床版, 支間 2m 程度)

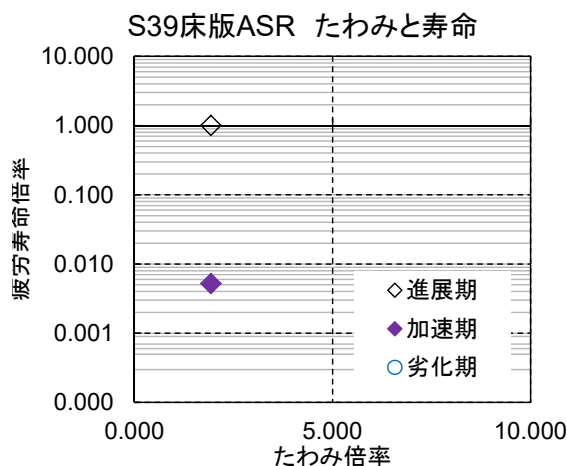


図-付 6. 4. 5 ASR のたわみと疲労寿命の関係

(S39 床版, 支間 2m 程度)

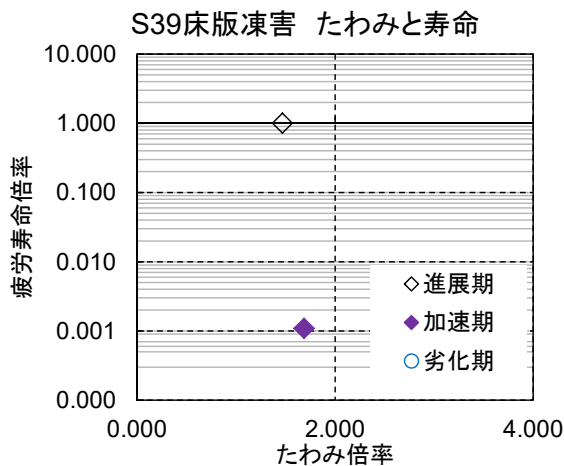


図-付 6.4.6 凍害のたわみと疲労寿命の関係
(S39 床版, 支間 2m 程度)

4.2 点検結果を用いた評価の手順

4.1 で述べた、耐荷力や疲労寿命の評価方法について、維持管理で用いる際の評価フローを図-付 6.4.7 に示す。手順について概説すると以下のとおりとなる。

【評価の手順】

①材料劣化に関する評価

定期点検結果（＋詳細調査）により、現状、材料劣化の種類（塩害、ASR、凍害）とその劣化過程がどの段階にあるか評価する。この際、床版上下面での点検に加えて、コア抜き等によりコンクリートの材料物性を調査することで精度を向上できる。

②たわみ計測の結果による精度向上

必要に応じてたわみ計測を実施し、劣化床版のたわみ値と健全部でのたわみ値を把握する。健全部のたわみ値に関しては、FEM 解析等の数値計算手法による推定値を用いてもよい。

③耐荷力低下度、疲労寿命低下度の評価

図-付 6.4.1～図-付 6.4.3 を用いて、材料劣化の種類とその劣化過程から、耐荷力低下と疲労寿命低下の状況を推測する。定期点検結果では損傷ランク（I～IV）で評価が与えられる場合もあるため、この際には、表-付 6.4.1 から、劣化の種類と劣化過程を推測することが有効である。また、手順②でたわみ計測結果がある場合には、図-付 6.4.4～図-付 6.4.6 を用いて、たわみ倍率（劣化床版でのたわみ値／健全部床版のたわみ値）により疲労寿命低下を推測し、評価の精度を向上する。

④現状の耐荷力低下もしくは疲労寿命低下の評価に加えて、漏水の状況やコンクリートの内在塩分、鉄筋の付着塩分、コンクリートの残存膨張量等の情報により、今後の劣化速度を考慮したうえで、最終的な床版の健全度を評価する。

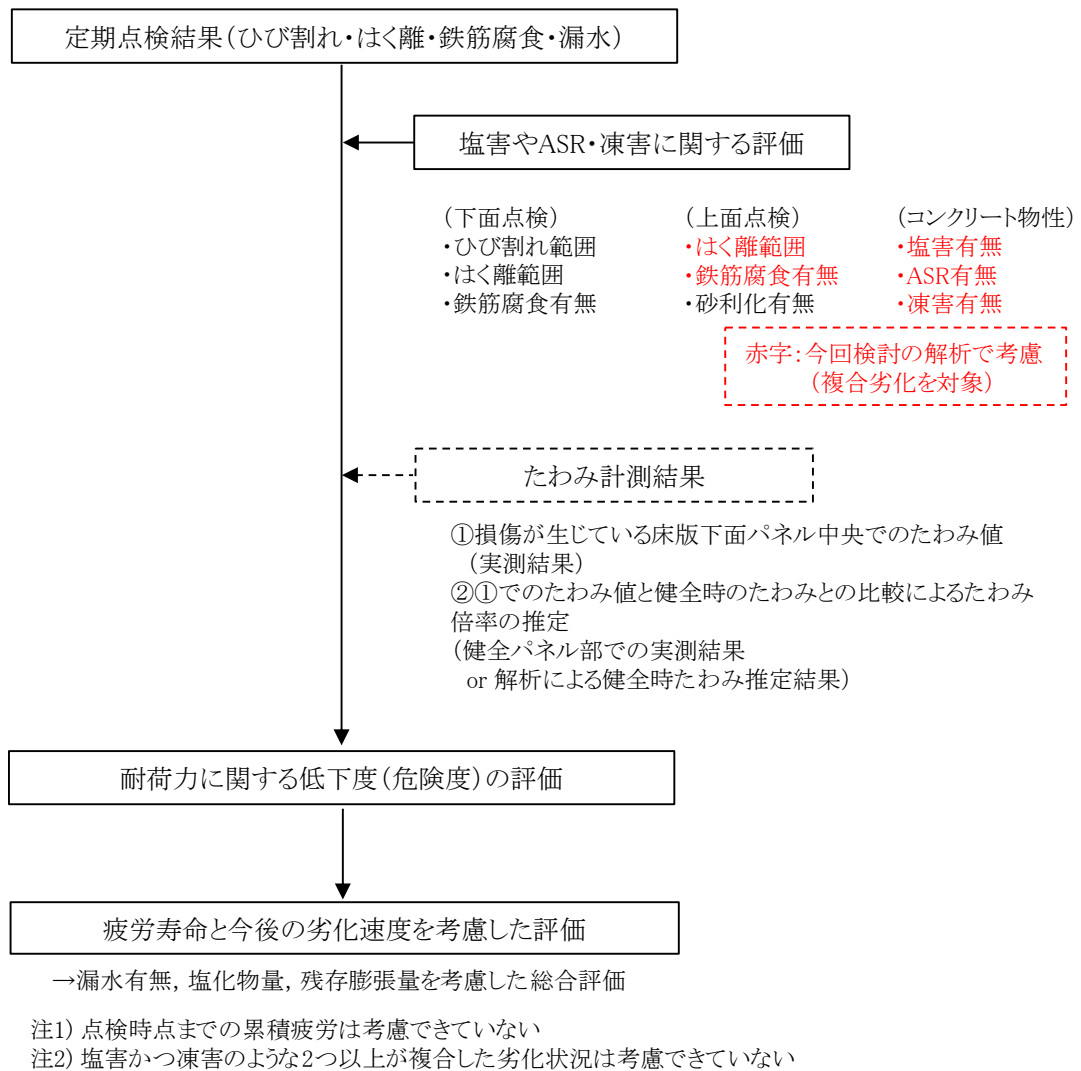


図-付 6.4.7 点検結果を用いた耐荷力・残存寿命の推測

これらをまとめると、定期点検で把握している下面からの情報に加えて、詳細調査等での上面からの各種の損傷情報やたわみ計測結果、材料物性の情報を考慮することで、評価対象床版の劣化過程の推定精度を向上することが可能である。これにより健全状態との推定精度を向上することにつながる。ただし、解析検討では、限られた床版寸法、支間、設計適用道示 (S39, S47) であること、ひび割れの状態はモデル化できていない (ただし、断面全体で弾性係数を低下させることで擬似的にモデル化している) こと、劣化状態の断面特性としてある程度の仮定に基づいている。このため、多種多様な既設床版の設計条件での評価にそのまま用いるのには、多少の無理がある点は考慮する必要があるが、継続使用上の危険度や補修優先度の判断について有用な情報となる。

総合的な評価では、耐荷力および寿命の健全状態からの低下度に併せて、現時点以降の劣化の進行速度を加味して評価することが望ましい。例えば、漏水がある場合や塩化物量や残存膨張量の程度に応じて、今後の劣化進行の速度を予測し評価を安全側にすることが考えられる。

5. おわりに

本報告は、「床版の健全性を限界状態に基づき定量的に定義し、評価・管理水準を定める」ことを目標として活動を行った成果をまとめたものである。

「健全性」を着目時点での残存耐荷力や残存疲労寿命と解釈し、材料劣化を伴うことを前提とした RC 床版のパラメトリックスタディを行い、それらを定量的に示すことはできた。また、パラメトリックスタディの数値のみで限界状態を確定し、評価、管理水準を定めるのは困難であったが、それに代替する成果として、従来の目視点検によって得られる定性的グレード判定と数値指標の関連づけを（大胆な仮定を伴うもの）行うことができた。本報告で検討した条件は実現象のごく一部であり、また数値の信頼性については今後の検証を経なければならぬものと認識しているが、少しでも実務に資する具体的、定量的な資料を提示するため、議論を尽くした結果である。

ただし、本検討では、時間に伴う劣化を評価する視点を取り込むことはできなかった。例えば、たわみなどのある数値指標が 30 年で初期値から 50%低下した場合と 5 年で 50%低下した場合とでは、構造物自体に対する評価が異なってしかるべきであるが、本検討ではある着目時点での数値にもとづく評価を行うため、同じ評価となってしまう。これについては、今後の研究課題としたい。