I－6 コンクリート橋梁の劣化リスクの評価について

Risk evaluation of concrete bridge deterioration

張青[1]・野崎真司[2]・広瀬道夫[3]・森本博昭[4]

Zhang Qing, Nozaki Shinji, Hirose Michio and Morimoto Hiroaki

抄録：本研究ではGISを導入した橋梁点検データベースと、これを活用した劣化リスクの評価、ならびに劣化機構の推定手法を提案する。コンクリートの劣化機構を推定する際，建設当初から橋梁に含まれる潜在的劣化リスクを考慮することが有効である。ある年代に施工された橋梁には，材料，施工法などに技術的な特徴がある。これらは，環境要因とともに潜在的劣化リスクとして持続的に橋梁の劣化に影響を及ぼす。本研究では、施工時期に関連する潜在的劣化リスクとして、高度成長期、現場練り時期、塩分量、アルカリ量規制の有無、RC床版の耐力設計などを考慮する。環境については，降水量、最低温度、日交通量、融雪剤の散布量などを考慮する。損傷橋梁について、劣化リスク評価と劣化機構の推定を行なうとともに，目視点検と詳細調査により劣化と潜在的劣化リスクとの関連についての検討を行なった。

Abstract: Practical inspection database of concrete bridge based on GIS has been developed. By using the database, presuming method for mechanisms of concrete bridge deterioration, and evaluating method for latent deterioration risks that is effective to improve the precision of presuming are proposed. The latent deterioration risk due to the construction time and environmental factors have had an influence on the bridge deterioration. In this study, as the latent deterioration risks of construction time the high economical growth period, the spot mix period, the period of the regulating for the salinity quantity and the alkaline quantity are considered. Depth of rainfall, the amount of snowfall, lowest temperature, day traffic density and the amount of sprinkling of snow melting are considered as the latent environment risk concerned with the deterioration. The correlations with the latent deterioration risks and the deterioration mechanisms of the deteriorated bridges were investigated by the visual inspection and the details investigations.

キーワード： 橋梁健全度，劣化機構，劣化リスク，リスク評価，GIS

Keywords : Bridge condition, Concrete deterioration mechanism , Deterioration risk, Risk evaluation、GIS

1．はじめに

橋梁劣化に影響する諸要因の多様性により，橋梁の劣化機構はいくつかの要因が複合している場合が少なくない。このような場合，橋梁点検結果に加えて，当該橋梁の劣化に対する潜在的劣化リスクを考慮して劣化機構の解析を行なうのが合理的である。また，劣化に対する潜在的リスクを把握することは，維持管理，補修，および補強計画を立てる上で有力な資料となる。現在まで，橋梁劣化機構と年代、使用環境など潜在的リスクとの関連について考察した研究報告は少ない。

本研究では，GIS を導入した独自の橋梁点検データベースを構築するとともに，これを活用した橋梁劣化に対する潜在的リスク要因，特に施工年代と環境因子による劣化リスクの評価法，ならびに劣化リスクを考慮した橋梁，特にコンクリート部材の劣化機構の推定手法を提案する。さらに，劣化橋梁の目視点検と詳細調査により，劣化機構と潜在的劣化リスクとの関連についての検討を行なった。

2．GISによる橋梁点検データベースと健全度調査

本研究では，岐阜県の 11 地区における昭和 10 年から昭和 60 年代までに建設された 725 橋に対して，岐阜県独自の橋梁点検マニュアルと点検シート[1)]を用いて健全度調査を実施した。得られた点検結果を維持管理に有効に活用できるように，GIS による橋梁点検データベースを構築した。

点検は，**図－1**と**表－1**に示すように，上部工上面，上部工下面，下部工の橋梁各部位ごとに点検項目（コンクリートのひび割れ，剥離，鉄筋の露出，錆，断面欠損など）について，損傷マップ作成，および劣化レベル a～e（a:健全，b:ほぼ健全，c:やや注意，d:注意，e:危険）の判定を行なう形式となっている。

そして，各劣化レベルに点数を与え，点数の合計と各部位の劣化レベルとの組合せなどから，橋梁各部位

1：正会員 工修 岐阜大学 学生 工学部社会基盤工学科
(〒502-0854 岐阜市鷺山向井町 2348-2 正和荘 17, Tel :080-3612-3296, E-mail : zq329@msn.com)
2：非会員 岐阜県基盤整備部道路維持課
3：正会員 岐阜県建設研究センター研究部
4：正会員 工博 岐阜大学 教授 工学部社会基盤工学科

および全体の健全度を評価している[1]。本研究の一環として開発したGIS橋梁点検データベースシステムは，市販のGISエンジンを採用しているが，将来的には岐阜県で構築を進めている岐阜県域統合型GISの導入を視野に入れている。**図－2**に，データベースシステムの実行画面の一例を示す。画面地図上から，各種検索条件に該当する橋梁について，点検シート，状況写真，緒元，補修・補強履歴などを効率よく参照することができる。岐阜県では，橋梁をはじめとした社会資本の維持管理面での効率向上を目指して本システムの整備を検討している。

3．橋梁劣化機構と劣化リスクの評価方法

橋梁点検データベースの活用法の一つとして，本研究では，橋梁コンクリート部材の劣化リスクの評価および劣化機構の推定を試みた。

本研究では，各点検項目と劣化機構との対応をあらかじめ定めておき，点検から得られる各点検項目（劣化レベルc以上のもの）との対応から劣化機構を推定した。さらに，施工年代と環境に起因する要因のもつ劣化リスクについても同様の方法で評価した。本章では，劣化リスクと劣化機構の関連について述べる。

（1）施工年代に起因する劣化リスク

ある年代に施工された橋梁には，材料，施工法などに技術的な特徴がある[2]。これらは，橋梁の完成と同時に，潜在的劣化リスクとして持続的に橋梁の劣化に影響を及ぼすと考えられる。施工時期に関連する潜在的劣化リスクには以下のようなものが考えられる。

リスク(1)高度成長期（1970-1980年）

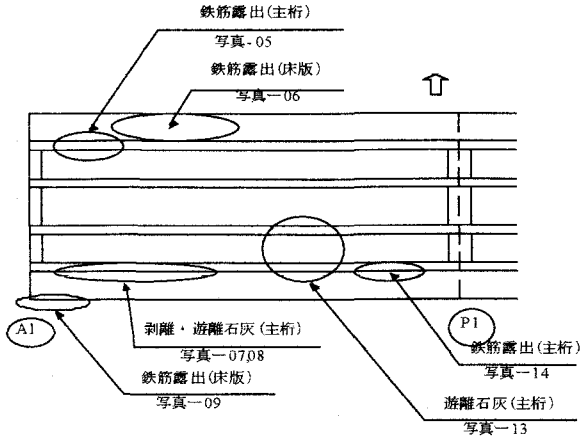
この時期は，工期が最優先され，生コン加水の問題もあった。コンクリートの打設，養生方法および混和水の管理は，コンクリートの品質を左右する。従って，この時期に施工されたコンクリートには強度，収縮，耐久性などに問題があるものも存在し，橋梁の完成後の中性化および床版の疲労に対する潜在リスクが高くなると考えられる。

また，寒冷地では，凍害が起き易くなる。さらに，この時期には，海砂と凍結防止剤の使用，および安山岩など火山岩系の砕岩を骨材にした事例もあったことが推測されるので，塩害およびアルカリ骨材反応（以下ASRと略す）とも関連があると考えられる。

リスク(2)現場練り時期（1960年以前）

1960年頃までは，まだ現場練りが多く行なわれていたと考えられる。現場練りのコンクリートはレデーミクストコンクリートにくらべて，材料および製造の管理が劣っていたことが考えられる。

また，冬季施工では初期凍害のリスクも高かったと考えられる。従って，この時期に施工された橋梁は，高度成長期と同様な潜在的劣化リスクを有すると考えられる。



図－1　上部工損傷マップの一例(一部)

表－1　橋梁点検項目例(上部工下面一部)

<RC床版>

1. 排水	A1~P1
周囲から漏水、遊離石灰の発生はあるか	c
2. 鉄筋	
鉄筋露出、錆汁があるか(張り出し部)	c
鉄筋露出、錆汁があるか(中間部)	a
鉄筋に断面欠損があるか、	a
鉄筋が破断しているか、	a
3. コンクリート	
コンクリートが剥離、脱落しているか	c
一方向のひびわれがあるか	b
二方向のひびわれがあるか	a
遊離石灰があるか	b
鉄筋の錆汁があるか	d
漏水はあるか	c
施工不良による豆板等はあるか	a

<RC桁>

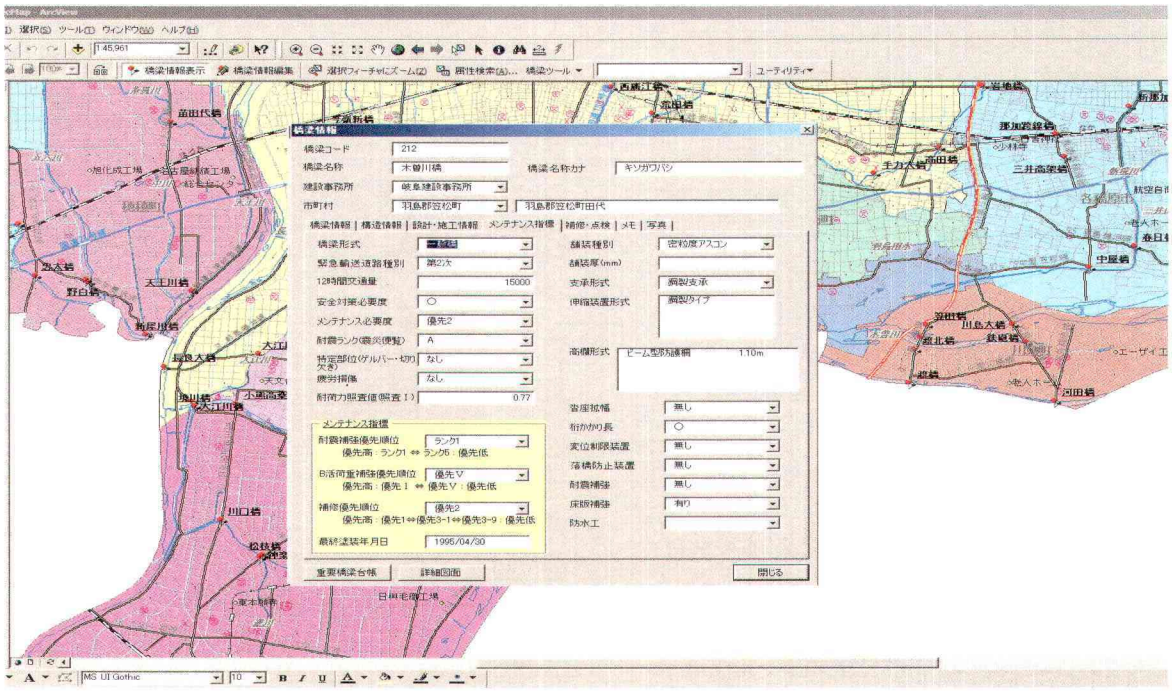
1. 鉄筋	A1~P1
鉄筋露出、錆汁があるか	c
鉄筋に断面欠損があるか	a
鉄筋が破断しているか	a
2. コンクリート	
コンクリートが剥離、脱落しているか	c
一方向のひびわれがあるか	e
二方向のひびわれがあるか	a
遊離石灰があるか	c
鉄筋の錆汁があるか	a
漏水はあるか	c
施工不良による豆板等はあるか	a

リスク(3)塩分量の規制前（1987年以前）

1987年から塩化物総量規制が開始された。この時期以前の橋梁には，海砂の使用などにより，鉄筋の腐食，およびコンクリートのひび割れ，剥離などの塩害発生の潜在的リスクが高いと考えられる。

リスク(4)アルカリ量の規制前（1989年以前）

1989年に建設省総プロでASR抑制対策が開始された。反応性骨材あるいは潜在的に有害である骨材の使用の他に，骨材以外からもアルカリは供給され，特に海砂はそれに含まれる塩分（NaCl）量に応じて相当量のアルカリ（Na_2O換算）がもたらされる。アルカリ量の規制前に完成された橋梁は，ASRに対する潜在的リスクが高いと考えられる。



図－2　GIS 橋梁点検データベースシステム

リスク(5)RC 床版の配力筋不足（1967 年以前）

1967 年から配力筋を主鉄筋の 70%とすることが規定された。これ以前の橋梁では，RC 床版の配力筋不足により，疲労に対する潜在的リスクが高いと考えられる。

リスク(6)RC 床版厚の不足（1968 年以前）

1968 年から床版厚が 3L+11≧16（L：スパン）に規定された。この時期以前の橋梁は，RC 床版厚の不足により，年々増加する交通量と車両の大型化によって疲労損傷のリスクが大きいと考えられる。

リスク(7)床版防水工未施工（1987 年以前）

1987 年に床版防水工指針が整備された。これ以前の橋梁では，床版に雨水等が供給され，コンクリートの疲労劣化は加速度的に進行すると考えられる。

上述のようなリスク(1)～(7)と劣化機構との関連性をまとめると，塩害に対してはリスク(1)，(2)，(3)，中性化にはリスク(1)，(2)，凍害にはリスク(1)，(2)，ASR にはリスク(1)，(2)，(4)，そして，疲労にはリスク(1)，(2)，(5)，(6)，(7)が関係することとなる。これらをまとめて**表－2**に示す。

（2）使用環境に起因する劣化リスク

使用環境も橋梁の劣化に重大な影響を及ぼす。本研究では，使用環境リスクについて，そのリスクの量，大きさに応じて厳，大，中，少 4 段階にランク分けを行った。

以下に劣化機構の発生に関わる潜在的な環境リスクについて述べる。

リスク(1)年間降水量(mm)

表－2　施工年代に起因するリスク

リ　ス　ク	施工時期	塩害	中性化	凍害	ASR	疲労
(1)高度成長期	1970-1980年	○	○	○	○	○
(2)現場練り時期	1960年以前	○	○	○	○	○
(3)塩分量の規制前	1987年以前	○				
(4)アルカリ量の規制前	1989年以前				○	
(5)RC床版の配力筋不足	1967年以前					○
(6)RC床版厚の不足	1968年以前					○
(7)床版防水工未施工	1987年以前					○

年間降水量は橋梁へ雨掛かりや地中からの水分の供給など，塩害，凍害，ASR，疲労のリスク要因になる。

本研究では，岐阜県各地の年間降水量を参考にして，厳は＞＝2450，大は 2150～2450，中は 1000～2150，そして，少は 0～1000 とした。

リスク(2)年間降雪量(mm)

年間降雪量は直接的に橋梁コンクリートの凍害に影響する。また，融雪水がコンクリートに浸透するより，塩害，ASR，疲労のリスクが大きくなる。本研究では，岐阜県の気象データを参考にして，厳は＞＝180，大は 140～180，中は 80～140，そして少は 0～80 とした。

リスク(3)最低気温(℃)

年間の気温の変化，特に，最低気温はコンクリートの凍害劣化のリスクを高める。本研究では，厳は＜＝－11.5，大は－9.2～－11.5，中は－5.9～－9.2，そして，少は 0.0～－5.9 とした。

リスク(4)日交通量(台/日)

日交通量は，排気ガスにより，中性化のリスクを高める。本研究では，岐阜県の交通量データを参考にして，厳は＞＝16500，大は 10300～16500，中は 2400～10300，

そして，少は0～2400とした。

リスク(5)日大型車交通量(台/日)

荷載条件，特に設計荷重を超える荷重は，床版疲労への影響が大きいと考えられる。本研究では，交通量調査データを参考にして，厳は＞＝1700，大は1200～1700，中は350～1200，そして，少は0～350とした。

リスク(6)融雪剤の散布量(t/km)

融雪剤の散布は，塩害劣化の大きなリスク要因となる。本研究では，岐阜県下路線の融雪剤年間使用量の統計データを参考にして，厳は＞＝4.0，大は2.8～4.0，中は1.0～2.8，そして少は0.0～1.0とした。

リスク(7)道路幅員構成

道路幅員は，床版疲労に大きな影響を及ぼすと考えられる。

上述のような使用環境に起因する潜在的リスク(1)～(7)と劣化機構との関連をまとめると，塩害にはリスク(1)，(2)，(6)，中性化にはリスク(4)，凍害にはリスク(1)，(2)，(3)，ASRにはリスク(1)，(2)，そして，疲労にはリスク(1)，(2)，(5)，(7)が対応する。これらをまとめて**表－3**に示す。

（3）点検データによる劣化機構の推定

橋梁点検により，劣化機構の推定の評価を行なうことが可能である。本研究では塩害，凍害，中性化，ASR，疲労の劣化機構に関連する点検項目（劣化現象）を選出した。選定にあたっては，土木学会コンクリート標準示方書「維持管理編」ならびに他の関連研究[3,4]を参考にした。以下に，各劣化機構に関連する点検項目について述べる。

a）塩害

塩害による劣化現象には，以下の外観特徴がある。すなわち，さび汁による汚れ(項目 7)，コンクリートうろこ状の剥離(項目 2)，鉄筋軸方向(一方向)のひび割れ(項目3)，および鉄筋が露出(項目1)などである。

b）凍害

凍害による劣化現象については，コンクリートの剥離，脱落(項目 2)，および表皮むけ（スケーリング），骨材露出(項目9)に着目した。

c）中性化

中性化については，コンクリート浮き，剥落(項目2)，鉄筋軸方向のひび割れ(項目3)，鉄筋露出，錆(項目1)に着目した。また，豆板(項目8)がある場合，コンクリートの密度が低いため中性化が発生しやすいと考えられる。

d）ASR（アルカリ骨材反応）

ASRについては，膨張ひび割れ（亀甲状が多い）(項目 5)，コンクリート剥離，ゲル，ポップアウト(項目2)，および変色，遊離石灰(項目6)を採りあげた。

e）疲労

道路橋の床版などにおいては，車両輪荷重の繰り返し作用による，二方向の格子状ひび割れ(項目 4)，およびひび割れからの遊離石灰(項目6)が析出する。

表－3 使用環境に起因するリスク

リスク	塩害	中性化	凍害	ASR	疲労
(1)年間降水量mm	○		○	○	○
(2)年間降雪量mm	○		○	○	○
(3)最低気温℃			○		
(4)日交通量 台/日		○			
(5)日大型車交通量 台/日					○
(6)融雪剤散布量t/km	○				
(7)道路幅員構成					○

表－4 点検項目と劣化機構との関連

項　目	塩害	中性化	凍害	ASR	疲労
(1)鉄筋露出,錆がある	○	○			
(2)コンクリートが剥離,脱落	○	○	○	○	
(3)一方向のひび割れ	○	○			
(4)二方向のひび割れ					○
(5)亀甲状のひび割れ				○	
(6)遊離石灰				○	○
(7)鉄筋の錆汁	○				
(8)豆板		○			
(9)スケーリング			○		

上述のような点検項目と劣化機構との関連をまとめると，塩害が点検項目(1)，(2)，(3)，(7)，凍害が点検項目(2)，(9)，中性化が点検項目(1)，(2)，(3)，(8)，ASRが点検項目(2)，(5)，(6)，そして疲労が点検項目(4)，(6)が対応することになる。これらを一括して**表－4**に示す。

（4）劣化リスクの評価と劣化機構の推定

劣化リスクの評価，ならびに劣化機構の推定は，ある劣化機構に対応する劣化リスク要因あるいは，点検項目の総合計（全てが対応した場合）で該当要因あるいは点検項目の合計点数を除すことにより算出した数値（本研究ではリスク係数と定義）により行なった。

各リスクおよび点検項目の点数は，施工年代については，対応する場合は1.0，無は0.0とした。使用環境については，厳が1.0，大が0.75～1.0，中が0.25～0.75，少が0～0.25とした。また，点検項目については，a，bが0.0，cが0.5，d以上は1.0とした。

そして，施工年代と使用環境のリスク係数の積を劣化に関する潜在的リスクとして定義した。

（5）推定・評価モジュールの開発

本研究では，マイクロソフト社のエクセル上で動作する劣化リスク評価，および劣化機構推定モジュールを開発した。本モジュールで用いる橋梁点検データは電子化されているので，効率よく解析を実施することができる。

4．実橋の劣化リスク評価

（1）評価対象

本研究では，岐阜県下の昭和53年9月に完成したH

橋の橋台の劣化機構の検討を行なった。H 橋は竣工して 26 年間を経ているが，損傷，劣化は部分的に比較的重篤な状態にある。本研究で提案した手法により，その劣化機構と施工年代，使用環境に関する要因のリスクの評価を行なった。

さらに，推定結果の適用性を検証するために，目視点検，鉄筋腐食，アルカリ量分析およびコンクリート塩分量などの調査を行った。

（2）劣化評価結果

図－3に H 橋の橋台の劣化機構と劣化リスクの評価結果を示す。施工年代から考えると 1978 年に完成した H 橋は防水，塩害，ASR に対して本格的な対策はとられていなかったと考えられる。使用環境から考えると，H 橋は岐阜北部の山間部にあるため，冬は最低気温－11.5℃となり，凍結融解作用が頻繁に繰り返されたと考えられる。これらのことより，ASR，塩害，凍害の順に施工年代と使用環境に起因する要因のリスクが大きくなっている。また，点検による推定結果においても ASR，塩害，凍害の順に可能性が高くなっている。

（3）検証調査

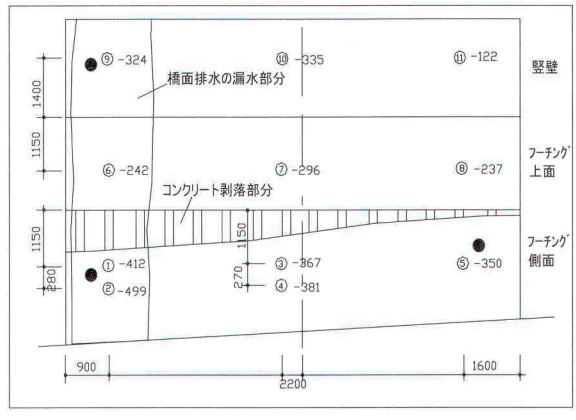
a）目視点検

写真－1と**図－4**に示すように，鉄筋露出，腐食，断面欠損が生じている。フーチング側面と竪壁の左側では橋面からの漏水痕跡が多く残っていた。コンクリートの変色，剥離，脱落，遊離石灰，亀甲状ひび割れなどが観察されたので，ASR が発生していると推定された。

また，コンクリートの剥離，脱落およびスケーリングなどの現象と現地の気象を考慮すると，H 橋の劣化機構には凍害も大きく関与していると判断された。

さらに，橋面排水工の不具合により，融雪剤による塩分を含んだ排水が竪壁及びフーチングの左側部に集中してこの部分の損傷が著しいことから，排水工の不具合が劣化の促進要因となっていることが考えられた。

写真－1　橋台の損傷状況

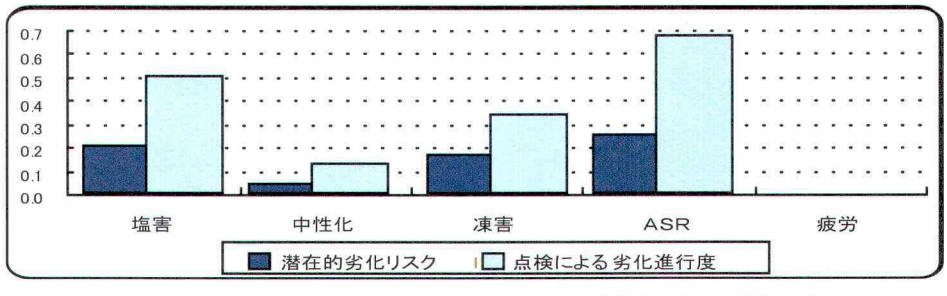


図－4　損傷状況及び実橋の詳細調査部位

b）詳細調査

H 橋の橋台から採取したコンクリートコア（全長 20cm）に対して構造物の劣化機構を確認するために，以下の調査を実施した。調査部位およびコア採取個所

↓リスク要因	塩害	中性化	凍害	ASR	疲労
施工年代に起因するリスク係数	0.5	0.3	0.3	0.5	0.0
使用環境に起因するリスク係数	0.4	0.1	0.5	0.5	0.0
劣化に関する潜在的なリスク	0.20	0.03	0.15	0.25	0.0
点検により確認された劣化進行状況	0.5	0.1	0.3	0.7	0.0



潜在的な劣化リスク：　ASR＞塩害＞凍害>中性化の順に問題が発生する可能性高い。
今後のメンテナンス：　ASRと塩害による劣化現象が顕著である。
凍害の劣化の進行についても注意が必要。

図－3　推定システムで橋梁劣化リスクの評価結果

(No. 1, 5, 9)を**図－4**に示す。

まず、水溶性アルカリ量について，本研究では，H橋の竪壁側面のコンクリート表面から80～100mmのところの水溶性アルカリ量を分析した。竪壁側面のコアを測定すると，水溶性等価アルカリ量 Na_2Oeq は3.7kg/m³であり，限界濃度参考値（3.0kg/m³以下）[2]を上回っているので，コンクリート中のアルカリ量はASRによる被害をもたらし得る量であったと推定される。

つぎに、コンクリート塩分量の測定では，**図－4**に示す調査部位No. 1, 5, 9において，表面より20mmピッチで試料5つを採取した。塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法によってコンクリート塩分量を測定した。

No. 5コアでは，コンクリート表面から深さ100mmまでの塩化物イオン濃度(以下,濃度と記す)は1.01kg/m³～0.32kg/m³であり，土木学会のコンクリート標準示方書[3]で提示されている鋼材腐食発生濃度1.2kg/m³には達していない。No. 1コア表面から，100mmまでの塩化物イオン濃度は**図－5**に示すように，コンクリート表層部の濃度が最も高く，内部に向かうに従って濃度は低下する傾向を示している。特に,深度80mmまでの領域の濃度は1.84kg/m³～1.29 kg/m³と高く，土木学会が提示した腐食発生限界濃度を上回った。このことから外部から塩分がコンクリート中へ侵入した可能性が高いと考えられる。

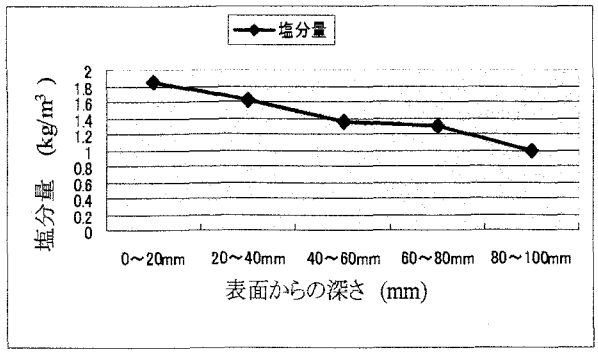
H橋は岐阜北部の山間部にあるため，冬は最低気温－11.5℃となり，橋面部の凍結を防ぐために散布された融雪剤が排水工不良により橋台に供給され，塩害を引き起したと考えられる。

また，**図－4**に示したNo. 1～11の11か所の自然電位を測定した。各測定箇所に併記された数値は自然電位測定結果である。これらの結果から，フーチング側面の左，中と右における鉄筋の腐食性が全て大，フーチング上面では腐食性がやや大あるいは軽微と判定された。そして，竪壁では左，中央の腐食性がやや大，右では腐食性がなしという結果となった。すなわち，腐食性大と判断された個所はいずれも露出部位近傍で，その他の内部鉄筋腐食は少ないと判断された。

最後に，ドリル法を用い，橋台にて11箇所の中性化調査を実施した。結果として，中性化深さは，平均値10.1mm，H橋の鉄筋のかぶりは100mmであることを考慮すると，中性化は問題とはならないと判断された。

c）実橋調査に基づく総合所見

上記の目視点検と詳細調査結果により判断すると,H橋の劣化機構はASR，塩害，凍害であり，橋面排水の不全がこれらの劣化機構を促進した複合劣化で，その結果，コンクリートの剥離，鉄筋の露出等が発生したと考えられる。



図－5 塩化物イオン濃度

これらの結果は，前述のH橋の劣化機構推定ならびに劣化リスクの評価結果とほぼ一致することが確認できた。

5．あとがき

本研究では，GISによる橋梁点検データベースシステムの構築，ならびに電子化された点検データを活用したコンクリート部材の劣化リスクの評価および劣化機構の推定を行った。その結果，社会基盤の維持管理に情報技術を導入することの有用性を確認することができた。

本研究では，施工時期および環境に関する要因の劣化リスクの評価方法を提案した。そして,点検から得られる損傷状況に，これらの劣化リスクを考慮する劣化機構の推定手法を検討した。実証調査により，本手法の有用性を確認することができた。今後は検証例を蓄積するとともに，劣化リスクの評価について，評価アルゴリズムの改善，および関連因子を取り込みなどにより，さらに合理的なリスク評価システムを完成させたい。

謝辞：本研究の実施には、岐阜県の主要コンクリート構造物健全度調査委員会（岐阜大学社会基盤工学科森本博昭、内田裕市、小澤満津雄、（財）岐阜県建設研究センター、岐阜県基盤整備部道路維持課、大日コンサルタント（株）の各位に多大の協力を頂いたことに謝意を表します。

参考文献

1) 岐阜県基盤整備部道路維持課:岐阜県橋梁点検マニュアル, 2003. 3.
2) コンクリート診断技術編集委員会，コンクリート診断技術’04[応用編]，日本コンクリート工学協会，pp. 124, pp. 141-142, 2004. 1.
3) 土木学会：2001年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編], 土木学会，2001.
4) 森本博昭：コンクリート構造物の健康診断, 設計資料土木編，建設工業調査会，No, 118, pp. 43-46, 2003. 9.

(2005.5.20受付)