

名阪国道鋼鈹桁橋における疲労損傷に対する維持管理

上窪 清治¹・向井 博也²

¹近畿地方整備局 奈良国道事務所 管理第二課 (〒630-8115 奈良市大宮町3丁目5番11号)

²東北地方整備局 三陸国道事務所 調査課 (〒027-0029 宮古市藤の川4番1号)

名阪国道には上下線合わせて鋼鈹桁橋が14橋あり、それらは竣工後36～42年が経過している。また、日交通量6万台、大型車混入率45%の重交通路線であるため、近年、疲労損傷が顕在化するようになってきている。2006年に鋼鈹桁橋の主桁ウェブ横桁貫通部に約1.0mの大きなき裂を発見し、そのき裂の発生進展要因の究明、横桁貫通部のき裂をはじめとした様々なき裂に対する補修補強対策の検討を行った。また、これらの検討結果に基づいた名阪国道の鋼鈹桁橋(14橋)の疲労損傷に対する今後の維持管理方針(案)の作成を行った。

キーワード 鋼橋, 疲労損傷, 補修補強, 維持管理

1. はじめに

名阪国道(三重県亀山市～奈良県天理市)には上下線合わせて鋼鈹桁橋が14橋あり、それらは竣工後36～42年が経過している。また、鋼鈹桁橋は疲労損傷に対する構造細部設計が実施されておらず¹⁾、さらには日交通量6万台、大型車混入率45%の重交通路線であるため、近年、

疲労損傷が顕在化するようになってきている。

2006年10月に名阪国道鋼鈹桁橋の主桁ウェブを横桁下フランジが貫通する構造部(以下、横桁貫通部とする。)に約1.0mの大きなき裂が発見されたのを機に、有識者をはじめとする「名阪国道の橋梁保全に関する検討委員会」を立ち上げた。本委員会では、横桁貫通部から発生した約1.0mの大きなき裂の発生進展要因の究明、横桁貫通部のき裂に対する補修補強対策の検討を行った。

表-1 名阪国道の橋梁保全に関する検討委員会の審議内容(主に横桁貫通部に対する事項)

委員会開催日	実施項目	内容	委員会開催日	実施項目	内容
第1回 2006.10.	大きなき裂に対する応急復旧対策	ストップホール, 当板補強, H形鋼補強	第6回 2008.01.	磁粉探傷試験 応力計測 FEM解析	大きなき裂が発生した橋梁のき裂調査(8924箇所) 横桁貫通部スカーラップ形状変更箇所の応力確認 横桁貫通部の当板補強対策検討
第2回 2007.01.	応力計測 FEM解析	応急復旧対策の監視, 応急対策の効果確認, 横桁貫通部の応力確認, 走行車両の荷重特性の把握 FEM解析により応急対策の補強効果検討	第7回 2008.03.	応力計測 FEM解析	応力頻度計測による疲労寿命推定 横桁貫通部およびその他の部位の補強対策検討, 大きなき裂が発生した橋梁の疲労耐久性照査
第3回 2007.03.	応力計測 FEM解析 横桁貫通部対策検討	応力頻度計測による疲労寿命推定, 動的波形計測により補強H形鋼切断前後の応力確認 補強H形鋼近傍解析 L型当板補強の提案	第8回 2010.11.	応力計測 材料試験	横桁貫通部の当板補強効果の確認 桁端部のウェブの材料試験(化学成分分析, サルファプリント試験, 引張試験, シャルビー衝撃試験)
第4回 2007.10.	磁粉探傷試験 材料試験 横桁貫通部対策検討	横桁貫通部およびその他の部位のき裂調査 き裂先端ストップホールコアの材料試験(化学成分分析, 破面観察, 金属組成・硬さ試験) 横桁貫通部補強構造の提案	第9回 2011.12.	材料試験 FEM解析 維持管理方針検討	き裂発生箇所における材料試験(シャルビー衝撃試験, 化学成分分析, 現地化学成分分析) 横桁貫通部の補強構造検討, 横桁貫通部を有する橋梁の疲労耐久性照査 補修事例集(案), 溶接箇所データベース(案), 維持管理方針(案)作成
第5回 2007.11.	磁粉探傷試験 応力計測 FEM解析	大きなき裂が発生した橋梁のき裂調査(3656箇所/8924箇所) 横桁貫通部スカーラップ形状変更箇所の応力確認 横桁貫通部の当板補強対策検討	-	-	-

また、定期点検などによるき裂調査の結果、横桁貫通部以外の部位にもき裂が見つかり、各種対策検討を行った。それらを受け、重要路線である名阪国道の全鋼桁橋の保全のため、名阪国道の鋼桁橋の疲労損傷に対する今後の維持管理方針（案）の作成も行った（表-1参照）。

本稿は、横桁貫通部の約1.0mのき裂の発生進展要因の究明、横桁貫通部の疲労き裂に対する補強対策や、名阪鋼橋の今後の維持管理のために作成した資料について報告するものである。

2. 横桁貫通部の約1.0mのき裂の発生進展要因の究明

(1) 約1.0mのき裂の発生状況

2006年10月に名阪国道の鋼桁橋の主桁ウェブ（G3）に約1.0mの大きなき裂を発見した。写真-1にき裂の発生状況を示す。き裂は主桁ウェブ横桁貫通部のスカーラップ部（図-1参照）の回し溶接部から発生しており、主桁ウェブを斜め上に進展していた。現在は、このき裂に対

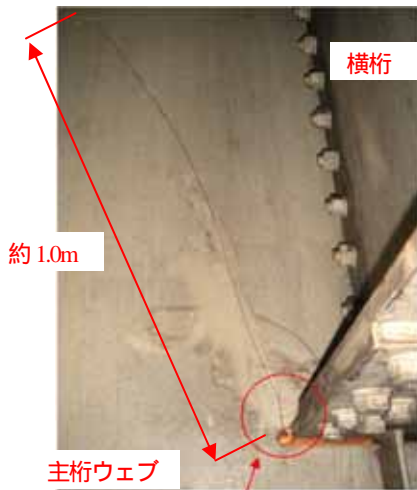


写真-1 約1.0mのき裂発生状況



写真-2 補強状況

して、写真-2に示すように大型当板補強を実施している。

(2) き裂発生進展要因の調査

a) 実働応力計測

損傷した主桁（G3）と同条件で、新たに損傷発生の可能性がある同主桁の橋軸方向対称位置における横桁貫通部（図-2参照）の応力発生状況を実働応力計測により確認した。

図-3に同主桁（G3）の橋軸方向対称位置における横桁貫通部の発生応力を示す。疲労強度等級が低く、用いにくいほうが良い溶接継手構造（H）¹⁾である横桁貫通部スカーラップ部の回し溶接部に高い応力（コバ面で124、143N/mm²）が発生していることが確認された。

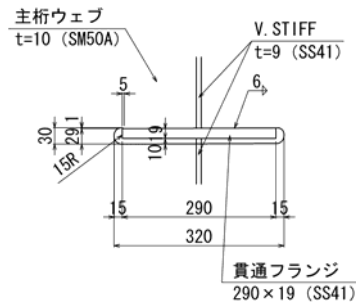


図-1 横桁貫通部詳細

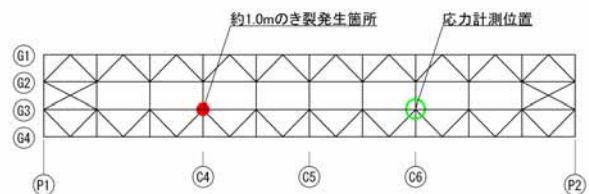


図-2 応力計測位置（平面図）

応力単位：N/mm²



図-3 横桁貫通部の発生応力
（G3，C6横桁貫通部（G2側））

b) 化学成分分析試験

約1.0mのき裂先端のストップホールコア、桁端部の主桁ウェブから採取した鋼材、および約1.0mのき裂に対する大型当板補強ボルト孔ピースを用いて、化学成分分析試験を実施した。なお、本主桁の鋼材は設計図書よりSM50A材（当時）となっている。

表-2に化学成分分析試験結果を示す。化学成分分析試験の結果、以下のことが明らかになった。

- ・ C含有量（0.28%）は、建設当時のJIS規格のSM50A、

表2 化学成分分析試験結果

分析試料	C4横桁部 (き裂発生主桁ウェブ)		A1支点部		JIS規格	
	ボルト孔 ピース	き裂先端 SHコア	G2 ウェブ	G3 ウェブ	SM50A (SM490A)	
化学成分 (wt%)	C	0.28	0.23	0.18	0.17	0.20
	Si	0.03	0.04	0.32	0.32	0.55
	Mn	1.05	1.15	1.25	1.26	1.60
	P	0.036	0.037	0.014	0.014	0.040 (0.035)
	S	0.027	0.021	0.017	0.017	0.040 (0.035)
	Cu	0.02	0.02	0.01	0.01	-
	Ni	0.03	0.03	0.02	0.02	-
	Cr	0.02	0.03	0.04	0.04	-
	Mo	0.02	0.02	0.02	0.02	-
	V	0.003	0.001	0.006	0.006	-

SM41Aの規定のC許含有量の上限値 (SM50A:0.24%, SM41A:0.27%) を超えており, C含有量が多く, 低温脆性が懸念される鋼材であった.

- 脱酸剤のSi含有量 (0.03%) は極めて少なく, SM50Aの規定値 (0.55%以下) と比べて, 脱酸不十分な鋼材に相当している. Si添加が極端に少ない, リムド鋼相当の鋼材であり, 溶接用鋼材としては適していない.
- 不純物のP, S含有量は, SM50Aの規定値 (P,S:0.040%以下) に近い値となっている.
- JIS規定以外の溶接硬化元素 (Cu, S, Ni, Cr, Mo, V) の含有量は少なく, 0.03%以下であった.

c) シャルピー衝撃試験

2.(2)b)の結果, C含有量が多いことが明らかとなり, き裂が発生した橋は冬季気温が0度以下となる地域にあるため, 低温で脆性破壊が生じる危険性を有している. そこで, 鋼材の低温脆性を確認することを目的としたシャルピー衝撃試験を実施した. 試験には桁端部の主桁ウェブから採取した鋼材, および約1.0mのき裂に対する大型当板補強ボルト孔ピースを用いた. なお, ボルト孔ピースは, 16mmと小さいため, E.B.W.溶接(電子ビーム溶接)によりサブサイズ試験片(7.5mm×10.0mm)を製作し, シャルピー試験を実施した(図4参照).

図5にシャルピー吸収エネルギーの遷移曲線を示す. 約1.0mのき裂発生箇所 で用いられていた鋼材はシャルピー吸収エネルギー値が極めて低い鋼材であった (SM490B材のシャルピー吸収エネルギー値の規定値 (0, 27J) を確保できる温度は40 以上). 併記した米国のLafayette Street橋 (本主桁と同様の大きなき裂が発生した橋) での試験結果の値²⁾と比較しても, 吸収エネルギー値がかなり低い結果となっている. したがって, 約1.0mのき裂箇所の鋼材は常温脆性を有する材料であったと考えられる.

d) 現地化学成分分析試験

2.(2)b) に記述したように, 疲労き裂発生箇所にお

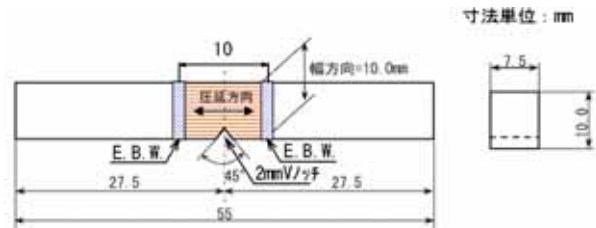


図4 シャルピー衝撃試験片 (サブサイズ) の形状と寸法

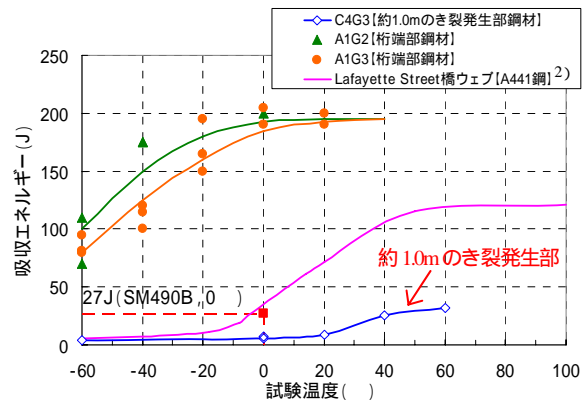


図5 シャルピー吸収エネルギーの遷移曲線

いては, 常温脆性を有するリムド鋼相当の鋼材が使用されていると考えられ, き裂発生箇所以外にそのような鋼材が用いられていないかを確認するために, 現地に非破壊で鋼材の化学成分分析を実施できる現地化学成分分析試験 (PMI (Positive Material Identification)) を本橋の全主桁ウェブ (全48箇所) にて実施した.

PMI試験の結果, 以下のことが明らかとなった.

- Cの含有量は, 48箇所中13箇所 でSM50Aの規定値である0.20%を超える箇所が存在する.
- 脱酸材であるSiの含有量は, 約1.0mのき裂が発生した箇所では, 0.015% ~ 0.044%であったが, それ以外の箇所においては, 0.23% ~ 0.35%であった.

(3) 約1.0mのき裂の発生進展要因

以上より, 約1.0mのき裂の発生進展要因を以下に示す.

a) 発生要因

- 疲労強度等級の低い溶接継手構造 (H) であった.
- 日交通量6万台, 大型車混入率45%と極めて重交通路線に位置する橋令34年の橋梁であった.
- 繰り返し荷重による疲労でき裂が発生したと考えられる.

b) 進展要因

- 設計図書に示されるSM50A材のJIS規格 (材料成分) を満足しない鋼材であった.
- シャルピー吸収エネルギー値が著しく低い, 常温脆性を示す鋼材であった.

3. 横桁貫通部の疲労き裂に対する補修補強対策

横桁貫通部スカーラップ部の回し溶接部（図-6参照）に対する補強対策は、表-1に示す様々な検討の結果、主桁のウェブおよび横桁の下フランジに、L型補強板を高力ボルトで取付ける構造を採用した。図-7に横桁貫通部の補強対策概要を示す。

図-8に補強前後の横桁貫通部の発生応力を示す。当板補強により、横桁貫通部スカーラップコバ面の応力は、27%～40%に低減した。また、コバ面から30mm離れた位置の応力は、52%～58%に低減した。したがって、十分な応力低減効果があることが確認された。

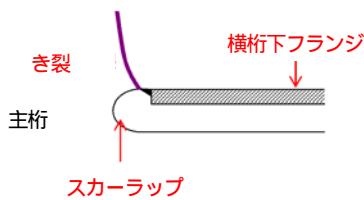


図-6 横桁貫通部のき裂

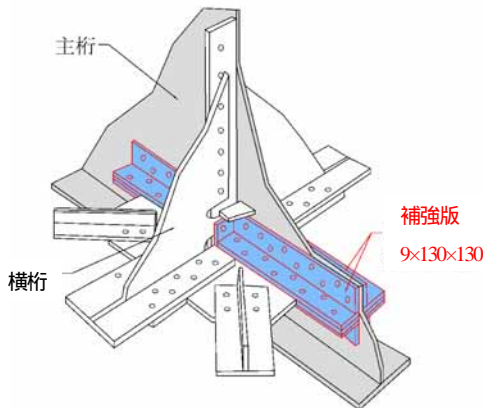


図-7 横桁貫通部の補強対策概要



図-8 補強前後の横桁貫通部の発生応力
(G3, C6横桁貫通部 (G2側))

4. 名阪鋼橋の補修事例集（案）の作成

(1) 目的

名阪国道の鋼鈹桁橋の疲労損傷に対して、これまで実施した点検結果、補修補強対策等を取り纏めた。今後、名阪鋼鈹桁橋の維持管理を行う上での参考となる資料作

成を目的とした。

(2) 概要

表-3に補修事例集（案）の内容、表-4に名阪国道の鋼鈹桁橋一覧を示す。本事例集（案）では、名阪国道における既設橋梁の内、鋼鈹桁橋14橋（上下線）を対象として、これまでの点検により発見された損傷や、補修補強対策済み箇所が把握できる図およびき裂損傷に対する補修・補強対策事例等を記載している。

表-3 補修事例集（案）の内容

記載内容	備考
構造諸元	各橋梁
溶接継手の種類と疲労強度等級	各橋梁
損傷および補修補強状況	各橋梁
重点点検箇所	各橋梁
鋼鈹桁に生じた疲労損傷事例	代表箇所
補修・補強対策事例	代表箇所

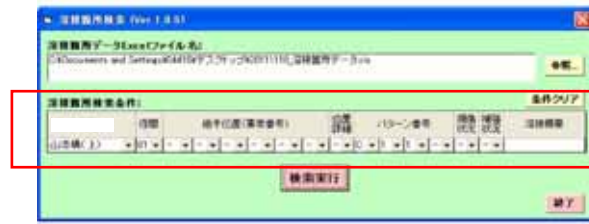
表-4 名阪国道の鋼鈹桁橋一覧

橋梁形式	橋長 (m) (支間割)	竣工年	主桁 本数
3径間連続 非合成鈹桁橋	110 (33.6+42.0+33.6)	1973	4
3径間連続 非合成鈹桁橋	110 (33.6+42.0+33.6)	1965	3
単純合成 鈹桁橋 (2連)	74 (41.0+33.0)	1973	3
単純合成 鈹桁橋 (2連)	74 (41.0+33.0)	1965	3
3径間連続 非合成鈹桁橋	128 (38.0+51.0+38.0)	1972	4
3径間連続 非合成鈹桁橋	128 (38.0+51.0+38.0)	1965	3
単純合成 鈹桁橋 (2連)	90 (45.0+45.0)	1972	4
単純合成 鈹桁橋 (2連)	90 (45.0+45.0)	1965	3
3径間連続 非合成鈹桁橋 単純合成鈹桁橋	159 ((32.1+56.0+32.0)+38.9)	1972	4
3径間連続 非合成鈹桁橋 単純合成鈹桁橋	159 ((32.1+56.0+32.0)+38.9)	1965	3
3径間連続 非合成鈹桁橋	134 (41.0+51.0+41.0)	1965	3
3径間連続 非合成鈹桁橋	134 (41.0+51.0+41.0)	1972	4
3径間連続 非合成鈹桁橋	172 (51.9+67.0+51.9)	1972	4
3径間連続 非合成鈹桁橋	172 (51.9+67.0+51.9)	1965	3

5. 名阪鋼橋の溶接箇所データベース（案）の作成

(1) 目的

名阪鋼橋の補修事例集（案）に記載されている名阪鋼橋（14橋）の溶接種類、箇所数を整理し、データベース化した。これは、今後、名阪鋼橋において、疲労損傷が生じた場合、損傷が生じた溶接箇所と同様の構造ディテールを有する箇所数を瞬時に把握することを目的として作成した。



検索条件入力
(橋名, 溶接継手種類, き裂発生有無, 補強の有無等を選択入力)

データベース検索 ↓



検索した溶接継手の概要図出力

No.	橋梁名	径間	継手位置 (要素番号)	位置 詳細	パターン 番号	損傷 状況	補強 状況	溶接概要	備考
05-1926		01	Mg 02 02	Cr 01 03	1C 1 1 3	0	1	主桁と横桁連結部	33
05-1930		01	Mg 02 02	Cr 02 03	2C 1 1 3	0	1	主桁と横桁連結部	37
05-1933		01	Mg 02 04	Cr 01 05	1C 1 1 3	0	1	主桁と横桁連結部	40
05-1937		01	Mg 02 04	Cr 02 05	2C 1 1 3	0	1	主桁と横桁連結部	44
05-1940		01	Mg 02 06	Cr 01 07	1C 1 1 3	0	1	主桁と横桁連結部	47
05-1944		01	Mg 02 06	Cr 02 07	2C 1 1 3	0	1	主桁と横桁連結部	51
05-2005		01	Mg 03 02	Cr 02 03	1C 1 1 3	2	1	主桁と横桁連結部	112
05-2008		01	Mg 03 02	Cr 03 03	2C 1 1 3	2	1	主桁と横桁連結部	115
05-2012		01	Mg 03 04	Cr 02 05	1C 1 1 3	2	1	主桁と横桁連結部	119
05-2015		01	Mg 03 04	Cr 03 05	2C 1 1 3	2	1	主桁と横桁連結部	122
05-2019		01	Mg 03 06	Cr 02 07	1C 1 1 3	0	1	主桁と横桁連結部	126
05-2022		01	Mg 03 06	Cr 03 07	2C 1 1 3	0	1	主桁と横桁連結部	129

検索結果一覧表出力

図-9 溶接箇所データベース検索ソフト概要(横桁貫通部の例)

(2) 概要

文献3)を参考に,溶接継手位置(要素番号)および溶接継手種類を番号や記号でパターン化し,点検結果や補修補強履歴を反映できるデータベースとした.溶接箇所のデータ数は多く,記録(登録)内容を確認することは容易でないため,データベースから検索条件に応じて,溶接箇所数,および溶接箇所概要図を出力できる検索ソフトを作成した.図-9に溶接箇所データベース検索ソフトの概要を示す.このソフトを用いることで,損傷箇所の同様の構造ディテールの箇所数や,補修補強対策実施の有無を瞬時に確認することが可能となる.

傷の発生が懸念される箇所がある.また,規格外の鋼材が確認されていることを踏まえた維持管理フローを作成した.

図-10に名阪国道の鋼鈹桁橋に対する維持管理フローを示す.以下に,その概要を示す.

- ・ 疲労強度等級がH 等級(横桁貫通部)に対しては,未補強箇所は当板補強を実施することにし,補強済み箇所は継続してき裂発生進展の有無を調査する.疲労強度等級がH等級以上の箇所に対しては,き裂が発生している場合は全て対策を実施する.なお,過去に事例が無いようなき裂の場合は,橋梁ドクター会議に諮る.
- ・ 約1.0mのき裂が発生した橋梁の一部に規格外の鋼材が確認されており,他の橋梁も同時期に建設されていることから,他の橋梁でも規格外の鋼材が含まれる可能性がある.したがって,疲労強度等級によらず,き裂発生箇所に対する補修補強対策により,ボルト孔ピース等が採取できる場合は,それを用いた材料試験を実施する.
- ・ 点検結果,調査結果,補修補強対策等の全ての情報は,補修事例集および溶接箇所データベースに記録(登録)する.記録(登録)内容を確認の上,次回点検調査等を実施する.
- ・ 点検調査および対策の実施結果を踏まえて,次回の定期点検時期を検討する.

6. 名阪国道の鋼鈹桁橋の疲労損傷に対する今後の維持管理方針(案)の作成

奈良国道事務所では,名阪国道の鋼鈹桁橋の疲労損傷に対する今後の維持管理方針を疲労強度等級により大きく2つに分け,原則として次のように考えている.

(1) 基本方針

a) 疲労強度等級H 級(横桁貫通部)

横桁貫通部は,疲労強度等級の低い溶接継手構造(H)であり,かつ,き裂が主部材に発生するため,スカーラップ形状の変更対策ではなく,全て当板補強による予防保全対策を実施する.

b) 疲労強度等級G等級(ガセットプレート,水平補剛材,ソールプレート,端部垂直補剛材)

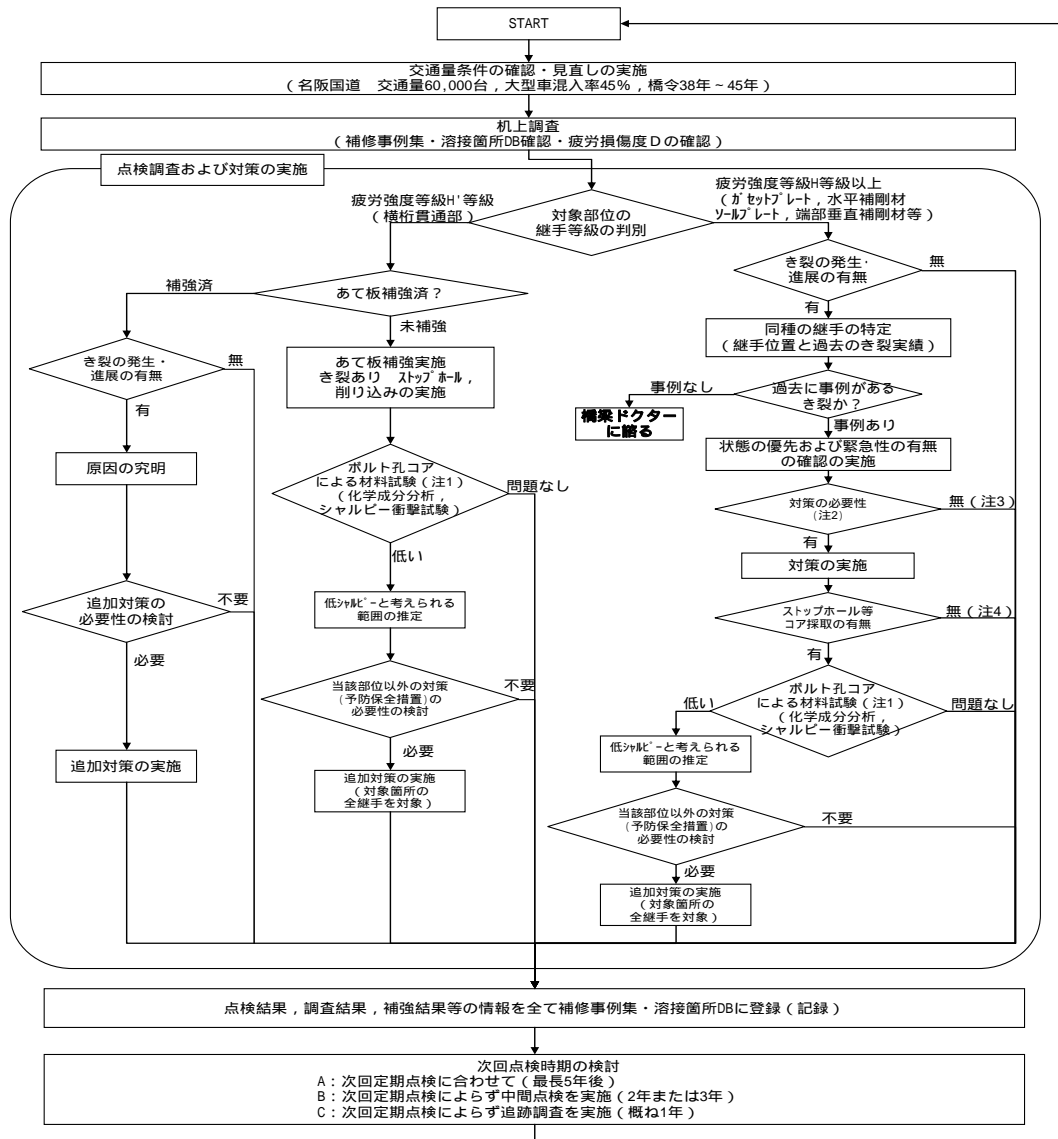
疲労強度等級G等級(ガセットプレート,水平補剛材,ソールプレート,端部垂直補剛材)の箇所は事後保全対策を基本とする.

(2) 名阪国道の鋼鈹桁橋に対する維持管理フロー

名阪国道の鋼鈹桁橋には横桁貫通部をはじめ,疲労損

7. おわりに

2006年10月に発見された主桁ウエブ横桁貫通部に生じた約1.0mのき裂に対し,「名阪国道の橋梁保全に関する検討委員会」を立ち上げ,2011年度の第9回委員会に至るまで各種試験・補強手法等の検討を実施し,約1.0m



注1) 材料試験の実施が可能な場合とする。また、同じ部材にて材料試験が既に実施されている場合はその結果から判断する。
 注2) わずかでも同種のき裂が進展する可能性がある場合は、対策措置を検討する。
 注3) き裂の特殊性や同種の継手の位置付け(場所や構造)により、継手として同じでも対策する必要がないと判断される場合などが該当する。
 注4) 削り込み等の対策で問題ない場合など、ピースが採取できない場合が該当する。

図-10 名阪国道の鋼桁橋に対する維持管理フロー

のき裂の発生進展要因は特定できたと考えている。また、本委員会でも得られた知見をもとにした、名阪国道の鋼桁橋の疲労損傷に対する今後の維持管理方針(案)を作成した。名阪国道は、西名阪・東名阪自動車道(高速道路)との組合せにより、名古屋と大阪を結ぶ一本の自動車専用道として日本の大動脈の一端を担う重要な役割を果たしており、今回作成した維持管理方針(案)により鋼橋を適切に維持管理していく必要がある。今後の維持管理手法の一つとして作成した溶接箇所データベースを点検結果や橋梁図面(橋梁構造マップ)とリンクできるようにバージョンアップさせるなど、橋梁点検結果等の管理をデジタル化していくことが今後必要な課題であると考えている。

謝辞: 本委員会にあたり、北田俊行委員長 大阪市立大

学名誉教授、坂野昌弘委員 関西大学教授、玉越隆史委員 国土技術政策総合研究所道路構造物管理研究室室長、ならびに村越潤委員 土木研究所橋梁構造研究グループ上席研究員にご指導を頂くとともに、貴重なご意見を頂きました。ここに記して感謝いたします。

向井 博也
前所属 近畿地方整備局 奈良国道事務所 管理第二課

参考文献

- 1) (社)日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 丸善, 2002.
- 2) John W. Fisher: 鋼橋の疲労と破壊 - ケーススタディー -, 建設図書, 1987.
- 3) 国土交通省国道・防災課: 橋梁定期点検要領(案), 2004.