

## 第3章 非破壊検査技術の基礎的調査（性能評価手法の予備検討）

### 3.1 実橋レベルでの基礎的調査

#### 3.1.1 概要

実橋における非破壊検査技術の検査性能を把握するために、国総研が準備した橋梁の架け替えによって撤去された撤去桁から作製した実損傷供試体に対して共同研究者が非破壊検査を実施する。国総研は共同研究者より提供を受けた検査結果を整理することで実橋を想定した検査における各検査技術の検査性能（検知可能な内部損傷の種類、検査精度、作業性能）について把握する。検査結果の整理では、非破壊検査後に共同研究者の内部損傷推定位置を解体調査することで実際の内部損傷位置を把握し、解体結果と検査結果を照合する。

#### 3.1.2 調査対象とした検査ケース

実橋レベルでの基礎的調査では9体の実損傷供試体に対して非破壊検査を実施した。各検査技術によって得られた検査結果は「検査ケース」と呼ぶこととし、①～②の番号を付して整理した。検査対象毎の検査ケース数を表-3.1.1に示す。各検査技術によって検知対象とする損傷の種類や適用範囲等（部材寸法や作業時間等）が異なるため、すべての供試体に対して検査することを求めておらず、検査ケース数が検査対象によって異なっている。22技術中、実橋レベルでの基礎的調査を実施した技術は20技術である。検査は共同研究者がそれぞれ単独で行った。

表-3.1.1 実橋レベルでの基礎的調査の検査ケース数

検査対象	C橋 (C-1)	C橋 (C-2)	C橋 (C-3)	C橋 (C-4)	C橋 (C-5)	C橋 (C-6)	A橋	B橋	D橋
検査ケース数	12	10	13	17	11	15	17	15	15

#### 3.1.3 検査に用いる供試体

##### (1) 実損傷供試体の作製

実橋レベルでの基礎的調査では、供試体の図面や内部損傷の種類等の予備情報を与えない状態で検査を実施する。検査には撤去桁から作製した実損傷供試体を使用した。撤去桁の諸元と作製した供試体数を表-3.1.2に示す。実損傷供試体はA～D橋の4橋から採取した撤去桁9部材（A橋：1部材、B橋：1部材、C橋：6部材、D橋：1部材）から作製した。撤去桁の形状を図-3.1.1～3.1.4、供試体設置状況を写真-3.1.1～3.1.4に示す。

表-3.1.2 実橋レベルでの基礎的調査試験に使用した撤去桁の諸元と供試体数

橋梁名称	橋梁形式	支間長	完成年度	撤去時期	供試体長さ	作製数
A橋	PC単純ポストテンションT桁橋	34.9m	1966年	2000年	約6m	1体
B橋	PC単純ポストテンションT桁橋	28.05m	1966年	2010年	約5m	1体
C橋	PC単純ポストテンションT桁橋	30.5m	1955年	2013年	約10m	6体
D橋	PC単純ポストテンションT桁橋	39.5m	1965年	2004年	約6m	1体

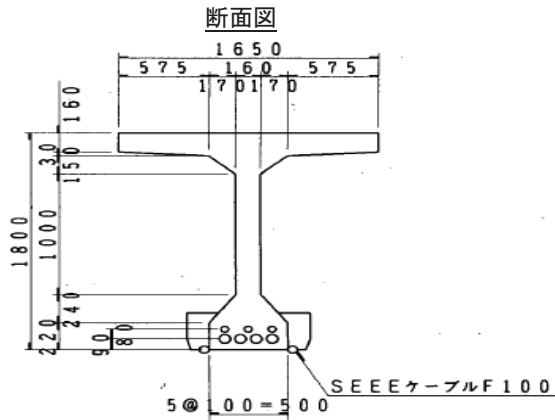
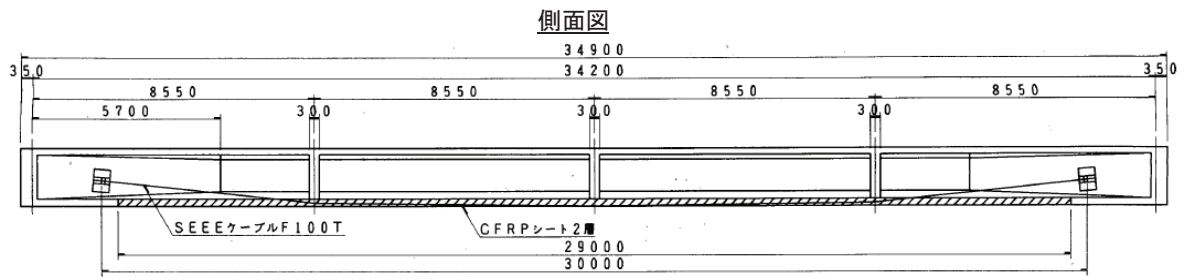


図-3.1.1 撤去桁の形状 (A橋)

写真-3.1.1 供試体設置状況 (A橋)

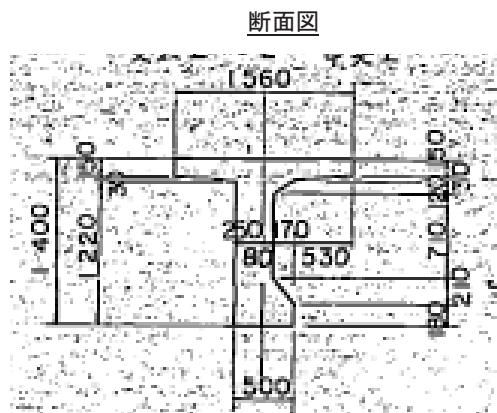
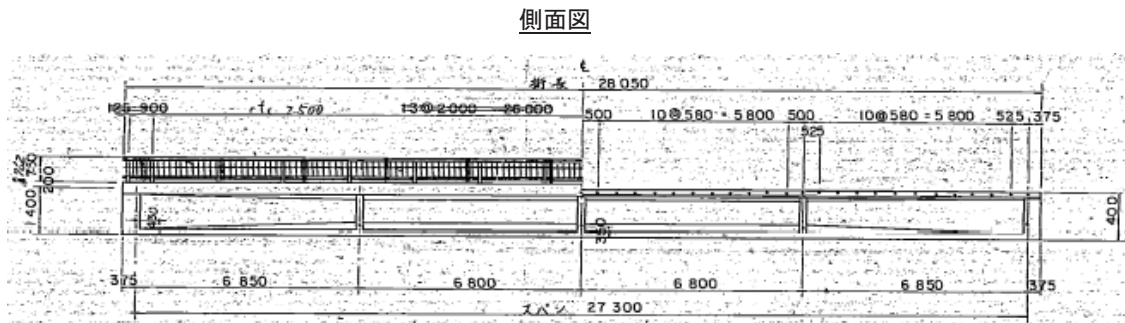
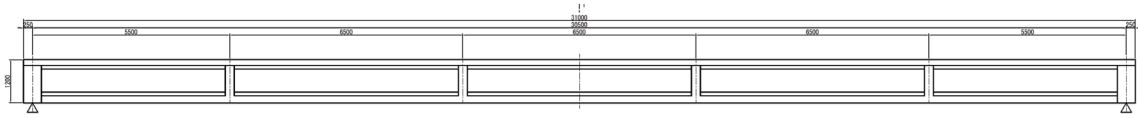


図-3.1.2 撤去桁の形状 (B橋)

写真-3.1.2 供試体設置状況 (B橋)

側面図



断面図

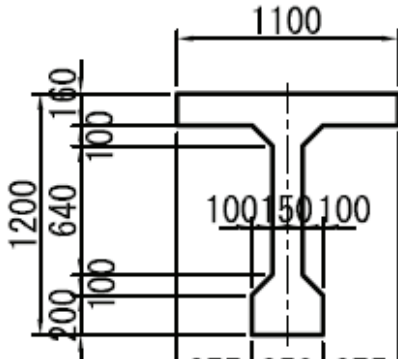
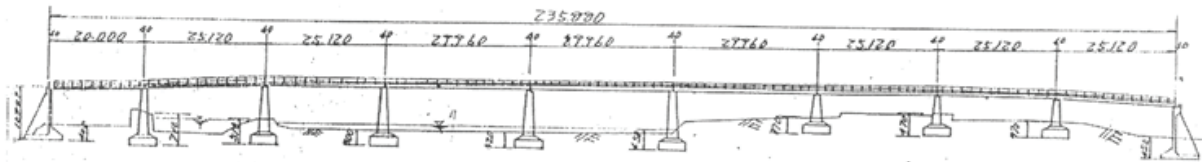


図-3.1.3 撤去桁の形状 (C橋)

写真-3.1.3 供試体設置状況 (C橋)

側面図



断面図

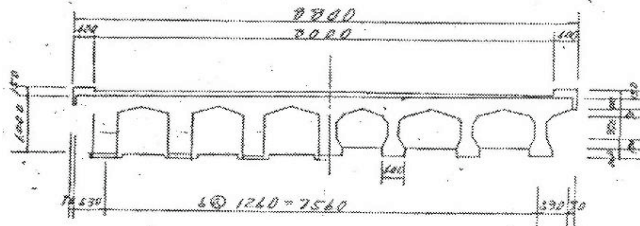


図-3.1.4 撤去桁の形状 (D橋)

写真-3.1.4 供試体設置状況 (D橋)

## (2) 実損傷供試体の外観調査結果

実橋レベルでの基礎的調査は、コンクリート部材の内部損傷に対する非破壊検査技術の性能を測るものであるため、供試体の外観から把握できる損傷は対象としない。そこで、調査に先立ち、実損傷供試体の外観調査を実施した。外観調査は「橋梁定期点検要領（案）（国土交通省道路局 国道・防災課 H16）」に基づき実施した。

外観調査結果の概要を表-3.1.3、損傷図を図-3.1.5～3.1.13に示す。すべての実損傷供試体において、主桁部にひび割れ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰が生じている。また、地覆部や横桁においても主桁と同様にひび割れや鉄筋露出等が生じている。

表-3.1.3 外観調査結果の概要

橋梁名称	外観調査結果
A 橋	・主桁部にひび割れ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、うきが見られる。 ・地覆部にひび割れ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰が見られる。
B 橋	・主桁部にひび割れ、破断、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、その他、変形・欠損が見られる。
C 橋	・主桁部にひび割れ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、うきが見られる。 ・横桁部に剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰が見られる。 ・地覆部に剥離・鉄筋露出が見られる。
D 橋	・主桁部にひび割れ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、うきが見られる。 ・横桁部に剥離・鉄筋露出、その他が見られる。 ・地覆部にひび割れ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰が見られる。

※調査結果の変状の記載は本研究に関連する桁本体に生じている変状について記載し、舗装や付属物に関するものは除く



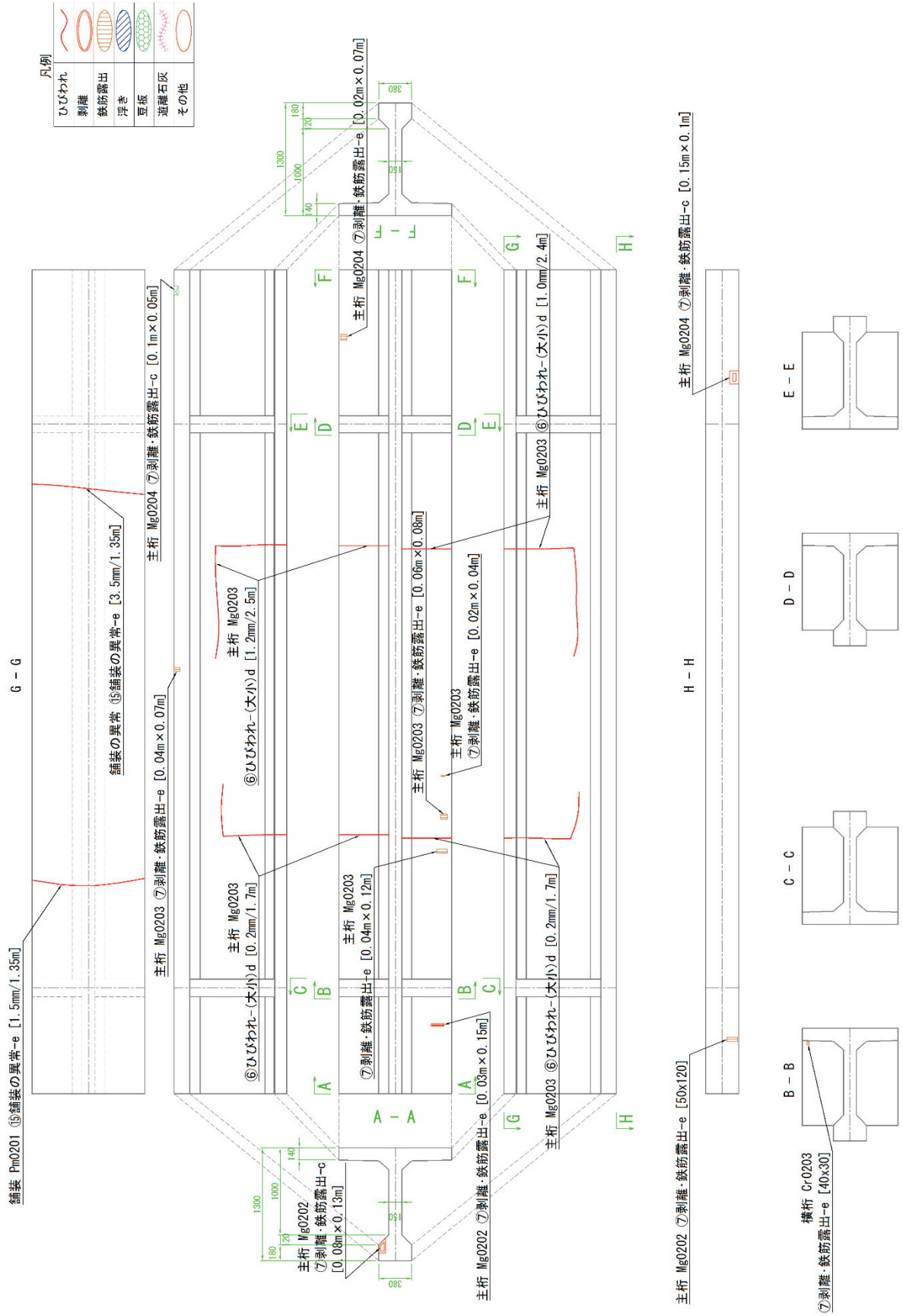


図-3.1.6 外観調査結果 (B橋)

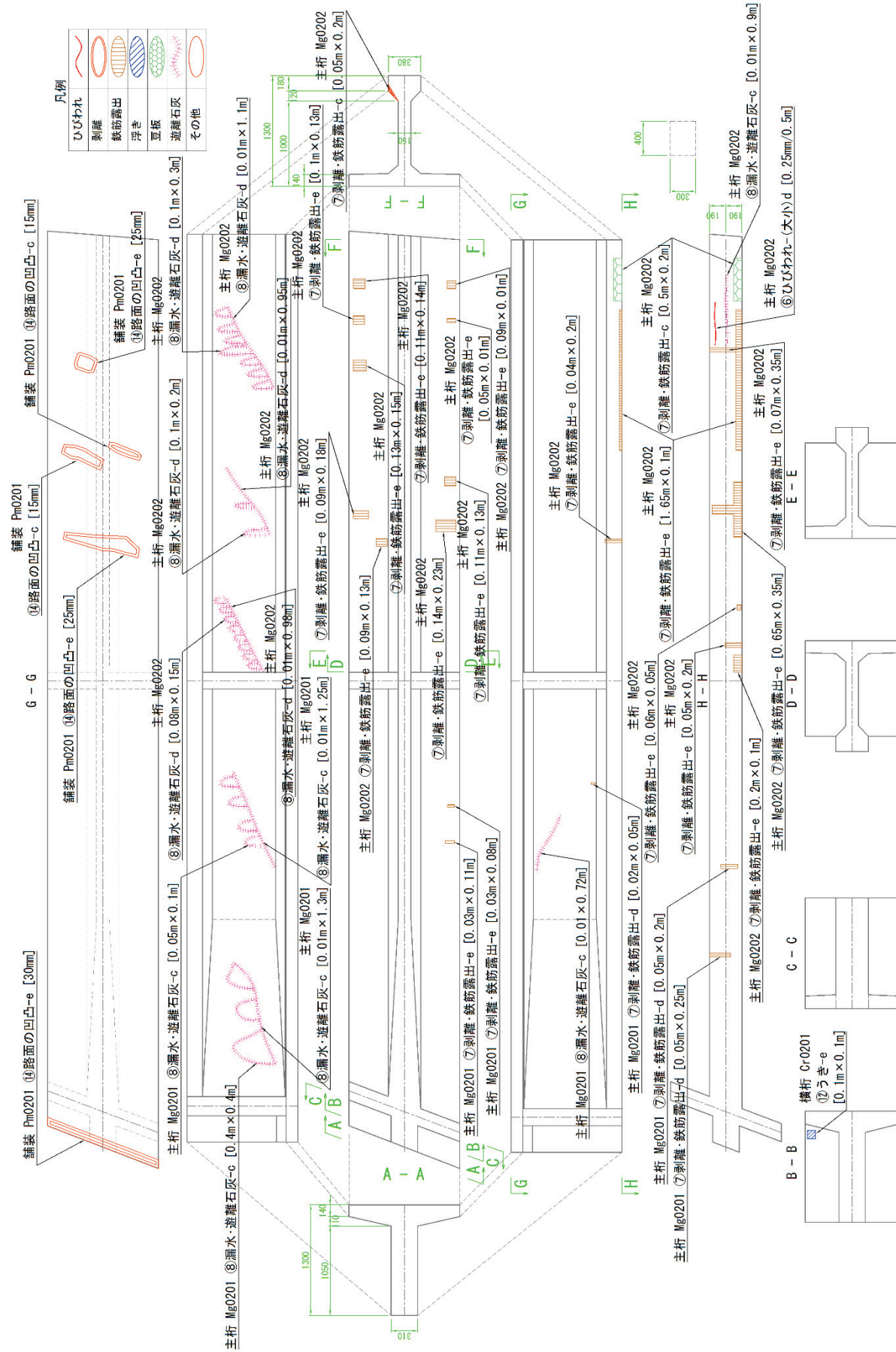


図-3.1.7 外観調査結果 (C橋: C-1)



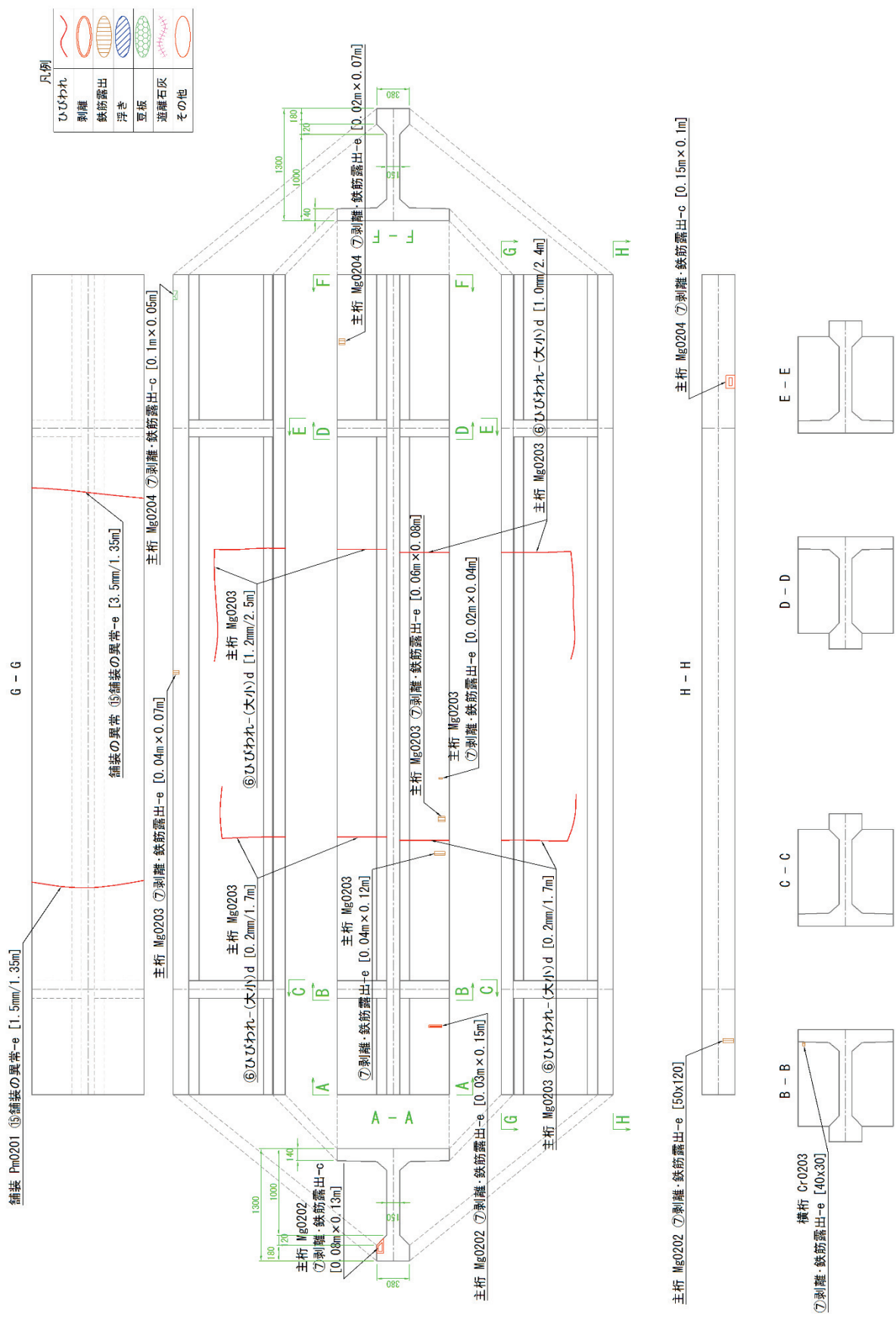


図-3.1.8 外観調査結果 (C橋 : C-2)

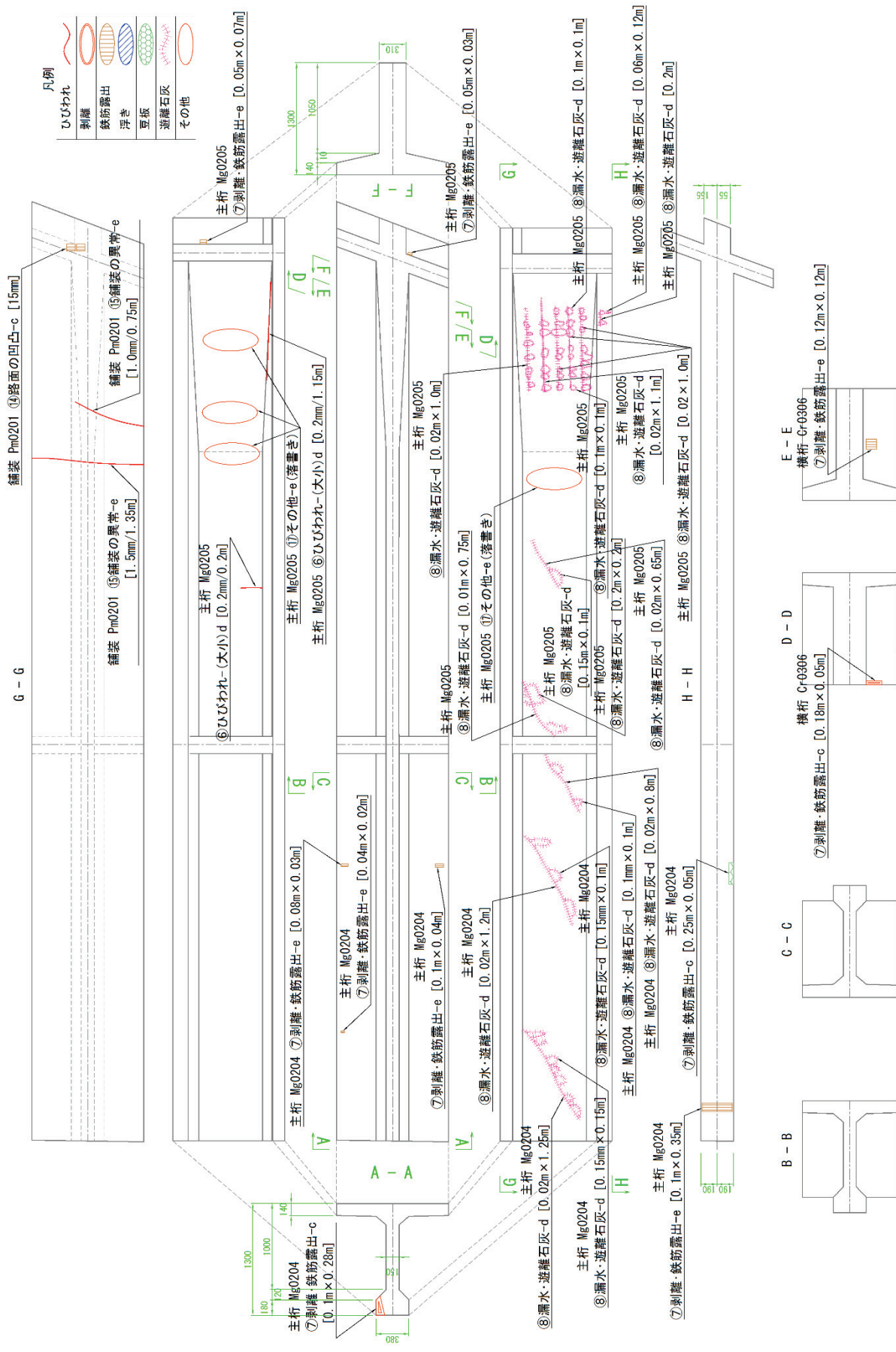
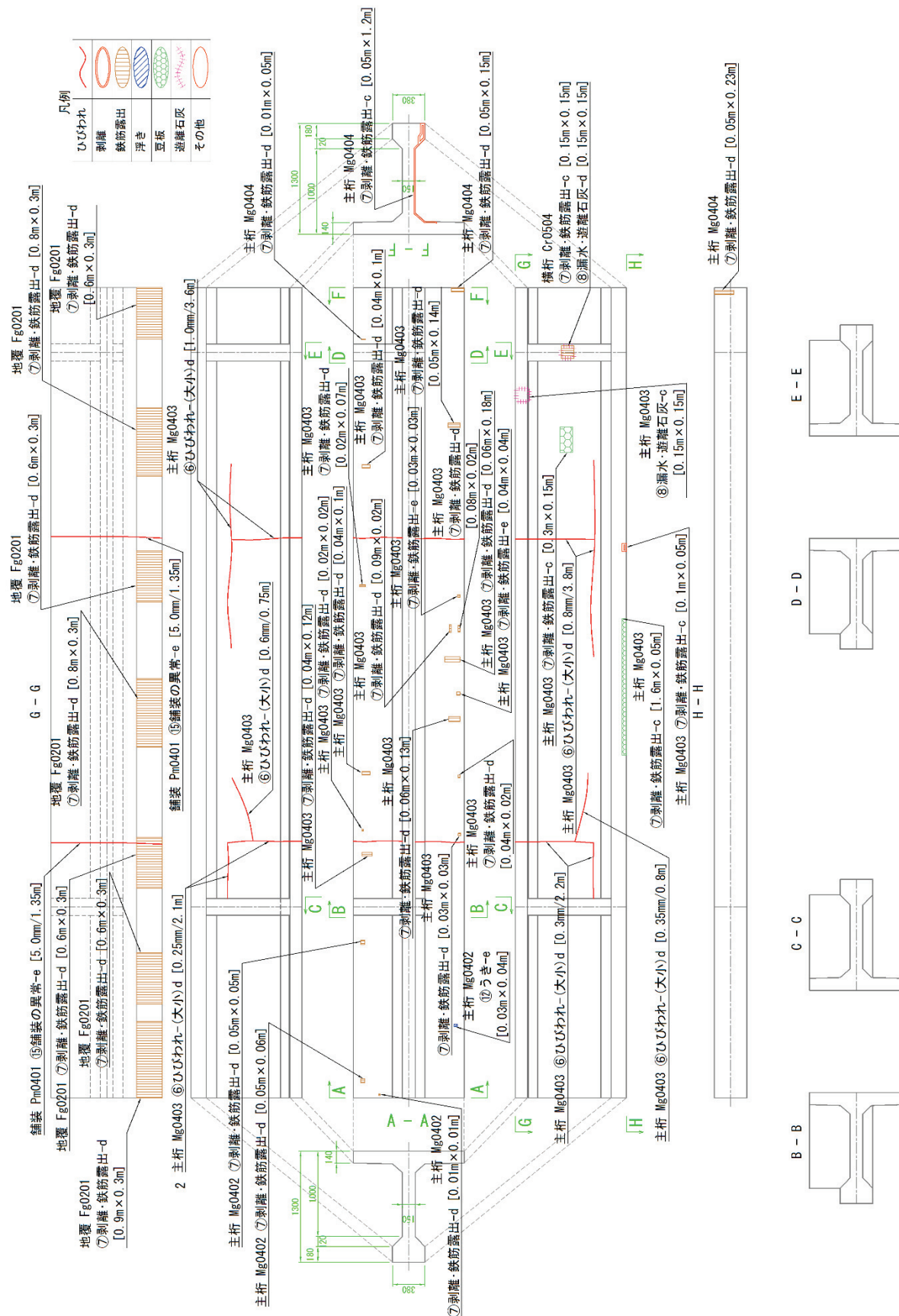


図-3.1.9 外観調査結果 (C橋：C-3)





凡例	
	ひびわれ
	剥離鉄筋露出
	浮き
	豆板遊離石灰
	その他

図-3.1.11 外觀調査結果 (C橋：C-5)

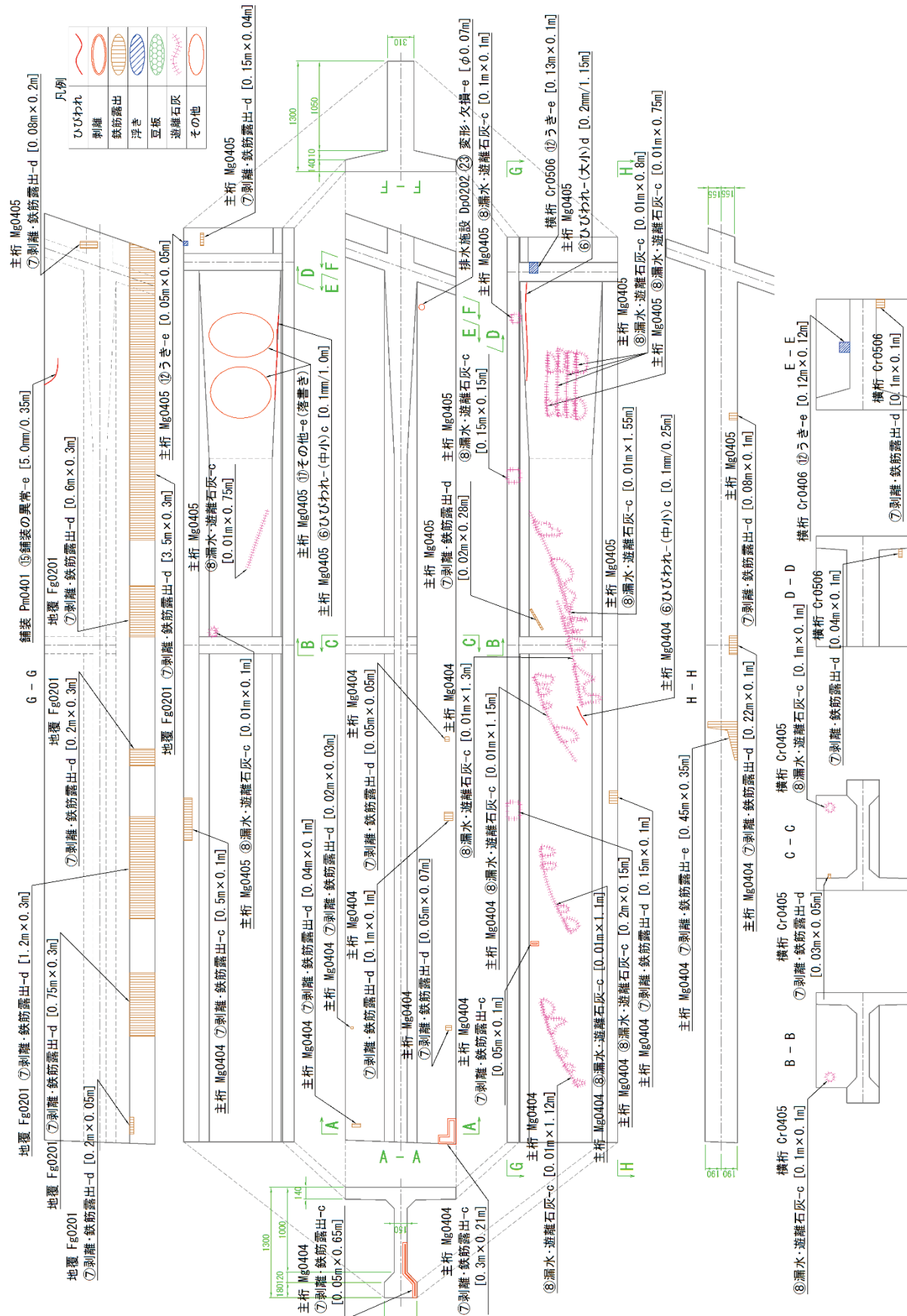
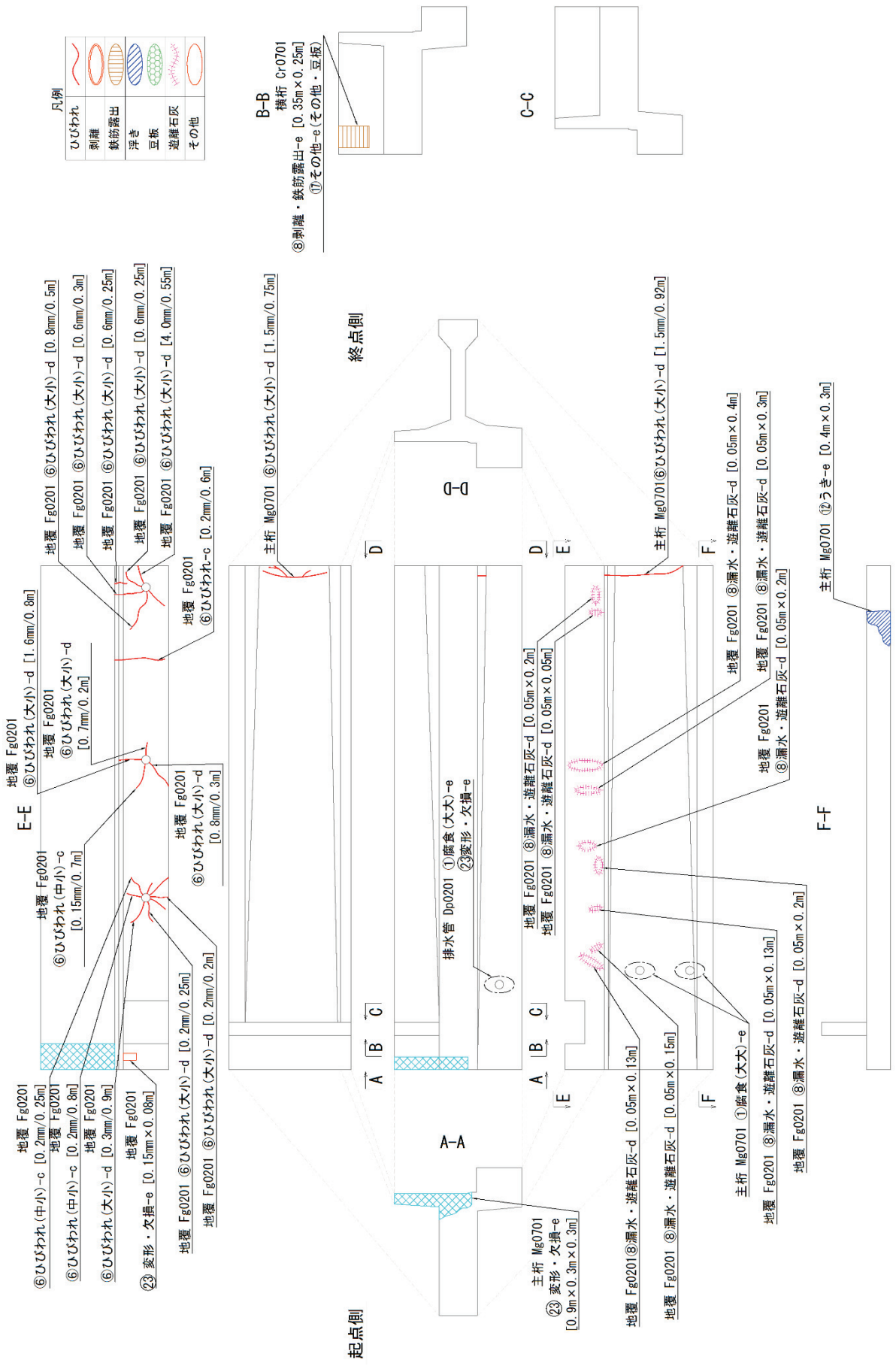


図-3.1.12 外観調査結果 (C橋 : C-6)



凡例	
	ひびわれ
	剥離
	鉄筋露出
	浮き
	豆板
	遊離石灰
	その他

**B-B**  
 横桁 Cr0701  
 ⑧剥離・鉄筋露出-e [0.35m×0.25m]  
 ⑦その他-e (その他・豆板)

図-3.1.13 外觀調査結果 (D橋)

### 3.1.4 調査項目と着目点

調査項目と着目点は表-3.1.4 のとおりである。各非破壊検査技術のコンクリート構造物の詳細調査への適用性を評価するためには、評価に必要なデータが得られ、検査精度や作業性等が把握できるように適切な検査要領が用意される必要がある。本研究では、検査要領の確立も本研究における着目点の一つとした。検査要領書を試行しながら改善点や問題点について把握するとともに各検査技術の結果の分析において要領の不適切や不十分な点（例えば各検査方法や仕様等によって不公平性や評価レベルに差を生じるなど）が検査結果に影響していないか検討を行った。

表-3.1.4 調査項目と着目点

調査項目	着目点
検知可能な内部損傷に関する種類の性能評価方法	解体調査により検査結果を照合し、検知可能な内部損傷の種類について把握する。
内部損傷の位置に関する検査精度の性能評価方法	内部損傷の推定位置 (X、Y、Z) を整理し、検知可能な方向や深さについての推定精度について把握する。
内部損傷の形状に関する検査精度の性能評価方法	内部損傷の推定形状 (x、y、z) を整理し、検知可能な形状（平面的 or 立体的）についての推定精度について把握する。
各検査技術の作業性能に関する性能評価方法	作業性（準備・撤去を含む検査時間、キャリブレーションの有無）について把握する。
検査要領書	確認項目や検査調書の様式等に不備がないか検査結果と併せて整理する。

### 3.1.5 試験実施条件

本調査では、完成図等により基本情報を得てから点検を実施する通常の橋の点検ではなく、建設年度が古く、完成図等がない場合の橋梁を想定して、予備情報（図面）のない条件で検査を実施した。供試体設置場所は屋外で、検査時間は A 橋、B 橋、D 橋の 3 体に対して 3.5 時間（0.5 日）、C 橋 6 体に対して 7 時間（1 日）を見込み、複数の共同研究者が同時に検査を行わないようにした。また、供試体に跡が残るようなマーキングは禁止とした。実損傷供試体は橋梁から切断した撤去桁から作製しているため、切断面の状態から内部損傷を推定できてしまう可能性がある。そこで、実損傷供試体の内部損傷を推定できる可能性のある切断面には木製のカバーを設置した上で、検査対象面はすべての面とした。また、試験の公平性及び客観性を確保するため、試験開始時から終了時まで立会者を配置した。

### 3.1.6 検査要領

検査に参加した共同研究者には、検査要領書を事前に配布し、検査手順や検査項目、結果の調書への記載内容について周知した。この検査要領に従って各共同研究者が非破

壊検査を実施し、調書を作成した。以下に検査要領書の内容を示す。

### (1) 検査手順

検査手順を図-3.1.14 に示す。検査は検査機器の準備から検査調書の提出までを一連の手順で行うこととした。

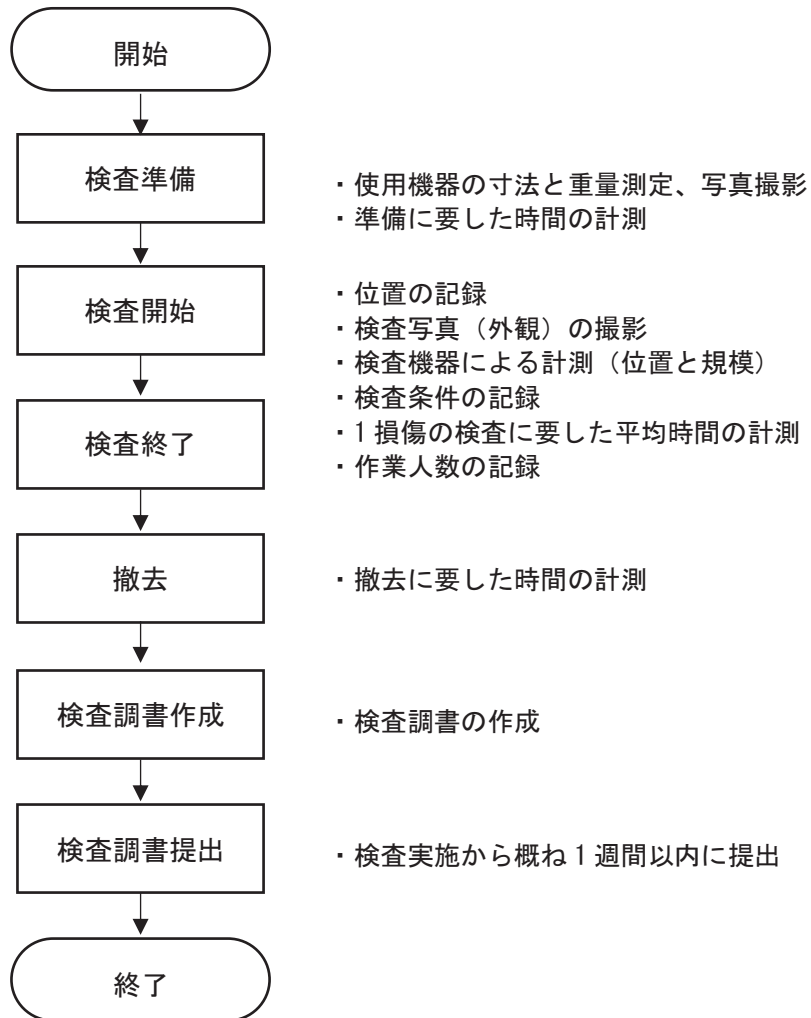


図-3.1.14 検査手順



## (2) 確認項目

表-3.1.4 で整理した調査項目について根拠となるデータが得られるように表-3.1.5 の通り確認項目を設定した。

非破壊検査技術のほとんどは、様々なセンサー等で取得した計測データを様々なアルゴリズムのプログラムソフトで処理して異常の有無や変状の内容などの評価結果を出力するものである。しかし、その処理過程が適正なものであるかどうかを検査時に確認することは極めて困難であり、ブラックボックスとなるデータ処理段階を経て実際と乖離した不適切な評価結果が誤って出力されても、それを認識できないままとなる危険性も危惧される。そこで調査では、検査結果に加えて、検査条件や検査結果の根拠等も併せて確認するものとした。

表-3.1.5 検査要領書の確認項目

確認項目	内容
1) 鋼材配置・寸法	①PC鋼線の位置 ②PC鋼線（より線）の径 ③PC鋼線（より線）の本数 ④PC鋼線（素線）の径 ⑤PC鋼線（素線）の本数 ⑥鉄筋の位置 ⑦鉄筋の径
2) 鋼材の健全性	①PC鋼線の位置 ②PC鋼線の腐食状況 ③PC鋼線の断面欠損率 ④鉄筋の位置 ⑤鉄筋の腐食状況 ⑥鉄筋の断面欠損率
3) グラウト充填状態	①グラウト未充填（空洞）の位置 ②グラウト未充填（空洞）の寸法（縦、横、奥行き）
4) プレストレス量	①プレストレス量の位置 ②プレストレス量
5) コンクリートの充填不良	①コンクリート充填不良（空洞）の検査位置 ②コンクリート充填不良（空洞）の寸法（縦、横、奥行き）
6) コンクリートのうき、剥離、ひび割れ分布と深さ	①うき・剥離の位置 ②うき・剥離の寸法（縦、横、奥行き） ③ひび割れの延長 ④ひび割れの最大幅の検査位置 ⑤ひび割れの最大幅 ⑥ひび割れの最大深さの検査位置 ⑦ひび割れの最大深さ
7) 検査条件	①検査の条件を詳細に記載（様式自由） ②測点ごとに検査条件が異なる場合は、測点ごとに条件を記載 ③機器性能等の性能により測定が不可能な場合、その理由 ④計測結果のとりまとめに要した時間
8) 検査精度の評価	①検査の推定精度（誤差）についての自社評価と根拠について記載
9) 使用機器及び作業性	①使用機器の諸元 ②使用機器の写真 ③作業性のうち、準備、検査、撤去に要したおおよその平均時間

### (3) 検査調書

検査調書は下記の 1)～6)について作成するものとした。

- 1)内部損傷位置図
- 2)検査写真
- 3)検査結果
  - a. 鋼材配置・寸法
  - b. 鉄筋配置図及び PC 鋼材配置図
  - c. 鋼材の健全性
  - d. プレストレス量
  - e. グラウト充填状況
  - f. コンクリート充填不良
  - g. コンクリートのうき、はくり、ひびわれ分布と深さ
- 4)検査条件
- 5)検査精度の評価
- 6)使用機器及び作業性

1)では、検査対象供試体の展開図を示し、検査によって内部損傷が確認された位置を図示することを求めた。2)では、データの改ざんや不正に対する一定の予防となることも期待し、また、データの保存も兼ねて測点毎の計測状況と計測結果の写真（機器の計測画面または計測後解析した結果のスクリーンショット等）を一組として掲載することを求めた。3)では、表-3.1.5 で定めた確認項目のうち、各非破壊検査技術が検査の対象とする内部損傷について検査結果の報告を求めた。4)では、検査を実施した時の検査条件（使用機器の設定値等）を具体的に示すことを求めた。5)では、検査結果に対して、使用した検査機器の計測原理等を根拠とした検査精度の自己評価を実施することを求めた。6)では、検査に使用した検査機器、使用機器の準備、撤去に要した時間、1 損傷あたりの検査に要した平均時間、作業人員等について報告することを求めた。

### (4) 結果の報告

結果の報告は検査調書の提出をもって行うこととし、検査終了後概ね 1 週間以内に提出を求めた。

### 3.1.7 解体調査による桁内部損傷の確認

実損傷供試体は撤去桁から作製したものであるため、実際のどのような内部損傷が生じているのか不明である。そこで、共同研究者による検査結果と比較するため、非破壊検査終了後に実損傷供試体の解体調査を実施した。解体調査はコア採取(φ50mm程度)や横断方向への桁断面切断(約1~3m)によって行った。なお、回答のあったすべての位置に対してコア採取や断面切断を行うことは難しいため、解体調査を実施する前に外観調査の結果、共同研究者による非破壊検査結果及び第三者による非破壊検査も踏まえ具体的な解体位置を決定した。

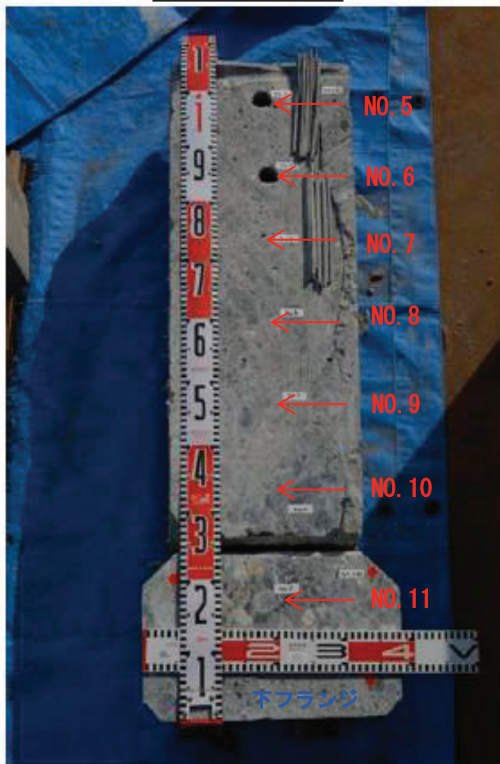
検査は実損傷供試体9体に対して行ったが、外観調査及び非破壊検査結果からグラウト充填不良や空隙等の内部損傷が多くあると推定されるC-4、C-6について解体調査を実施することとした。C-1~C-3、C-5、A橋、B橋、D橋については、今後も検査対象として活用することを想定し本調査で解体調査による結果の照合は行わなかった。

C-6の解体調査結果について変状を確認した箇所の例を写真-3.1.5~3.1.8に示す。写真-3.1.7は写真-3.1.5中に示したコア⑤の外観を示したものであり、写真-3.1.8はそのコアを解体し、ケーブルNO.4について取り出したものである。

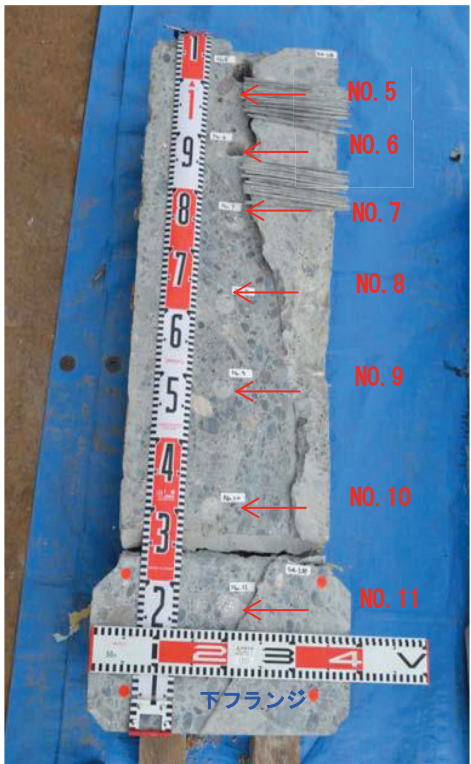


写真-3.1.5 解体調査状況 (C-6)

起 点



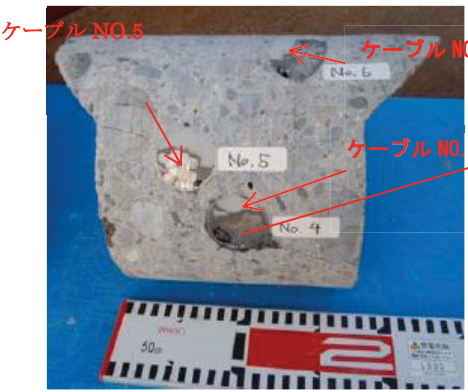
終 点



グラウト : PC ケーブル NO. 5, 6 は充填不足でその  
他は健全  
P C 鋼材 : PC ケーブル NO. 5, 6 は発錆があるが断  
面欠損なく、その他は健全  
鉄筋 : 確認できた鉄筋は全て健全

グラウト : PC ケーブル NO. 5, 6 は充填不足でその  
他は健全  
P C 鋼材 : PC ケーブル NO. 5, 6 は発錆があるが断  
面欠損なく、その他は健全  
鉄筋 : 確認できた鉄筋は全て健全

写真-3.1.6 切断後の桁断面 (C-6)



ケーブル NO. 4 (終点側) はグラウ  
ト充填不足があるが、その他は小  
さい気泡はあるものの健全

写真-3.1.7 コア外観 (コア⑤)



シース管 : 腐食の穴有り (直径約 8mm)  
グラウト : 未充填  
P C 鋼材 : 切断時に桁側シースに落ち  
込み一部のみ回収、表面錆のみ

写真-3.1.8 シース管取り出し状況 (ケーブル NO. 4)

※グラウト充填不足は一部充填されているものの空洞部分があるもの、グラウト未充填は、グラウトを行ったが何らかの理由でグラウトがまったく入っていなかったものを示す。

### 3.1.8 検査結果の整理

#### (1) 検査結果の評価方法

##### 1) 用語の定義

- ① 「検知対象」とは、検査機器の原理や仕様から検知できる（または検知できると想定される）内部損傷とした。
- ② 「一致」とは、推定された内部損傷の種類と、解体調査結果によって得られた内部損傷の種類が一致した場合とした。
- ③ 「不一致」とは、推定された内部損傷の種類と、解体調査結果によって得られた内部損傷の種類が一致しなかった場合とした。
- ④ 「空振」とは、推定された位置に内部損傷が存在しなかった場合とした。
- ⑤ 「検知不可」とは、検知対象を推定できなかった場合とした。
- ⑥ 「正答率」とは、検査技術の内部損傷の検知性能を表す指標として、内部損傷の種類ごとに下式のように定義した。

正答率（損傷の種類ごと）

$$= \text{一致 (2)} / (\text{一致 (2)} + \text{不一致 (3)} + \text{空振数 (4)})$$

##### 2) 計測誤差の評価

計測誤差は、損傷位置に関する誤差と損傷形状に関する誤差で評価した。

損傷位置の誤差は、内部損傷の判定が「一致」であった計測結果について算出した。実際の内部損傷の内部に、検査により推定された内部損傷の座標（X、Y、Z）（共同研究者が任意で設定した中心座標）が位置していた場合は誤差を（0、0、0）とした。ずれがあった座標においては、実際の内部損傷の中心座標と推定した内部損傷の座標から誤差を算出した。損傷位置の計測誤差算出方法を図-3.1.15 に示す。

損傷形状の誤差は、内部損傷の判定が「一致」であった計測結果について算出した。推定された内部損傷の形状寸法（x、y、z）と実際の内部損傷の形状寸法の差を誤差とした。

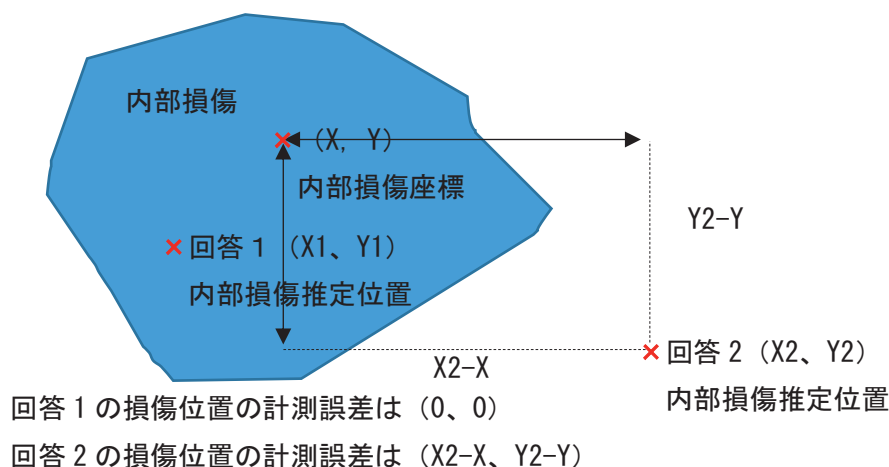


図-3.1.15 損傷位置の計測誤差算出方法の方法

### 3)作業性の評価

予備情報（図面）や内部損傷の種類等の予備情報がない状態で検査を行った場合の作業時間への影響、さらに作業時間が正答率に及ぼす影響について評価した。

### 4)作業要領の妥当性の評価

全ての検査終了後、共同研究者にアンケートとヒアリングを行い、本調査で用いた供試体、検査時間、検査手順、試験条件、結果の報告方法等について意見を収集し、作業要領の妥当性について評価した。なお、アンケートとヒアリングは、3.2 の検証で合わせて実施したため、作業要領の妥当性の評価は 3.2.7 (6) に示す。

## (2)内部損傷の推定結果

本調査で対象とした 9 体の実損傷供試体に対する内部損傷の推定箇所数を表-3.1.6、それらを展開図に図示したものを図-3.1.16～3.1.24 に示す。なお、図中の共同研究者番号は共同研究者が検査を実施した時に設定したものであり、本整理における検査ケースの番号とは一致していない。

- ・本調査では「PC 鋼材健全性（腐食、断面欠損、破断）」が推定された検査ケースはない。
- ・推定箇所数については検査ケースによって偏りがある。
- ・内部損傷が推定された検査ケースが多かったは、「うき」、「ひび割れ」、「グラウト充填不良」である。

表-3.1.6 検査ケース別の内部損傷の推定箇所数（全実損傷供試体）

内部損傷 検査ケース	空洞	うき	ひび割れ	グラウト 充填不良	PC鋼材健全性 (腐食、断面欠 損、破断)	鉄筋健全性 (腐食、断面欠 損、破断)	残存 プレスト レス量	内部欠陥 又は不明
①			18	1				
②								
③			20					
④								
⑤		10						
⑥				44				
⑦								
⑧			1	6		13		
⑨		8						
⑩		18						
⑪		5						
⑫		3	2	7				
⑬	4	12						
⑭								
⑮				2				
⑯								
⑰								
⑱	2			1				5
⑲			4	6				
⑳			1					
㉑		125						
㉒								

単位：箇所

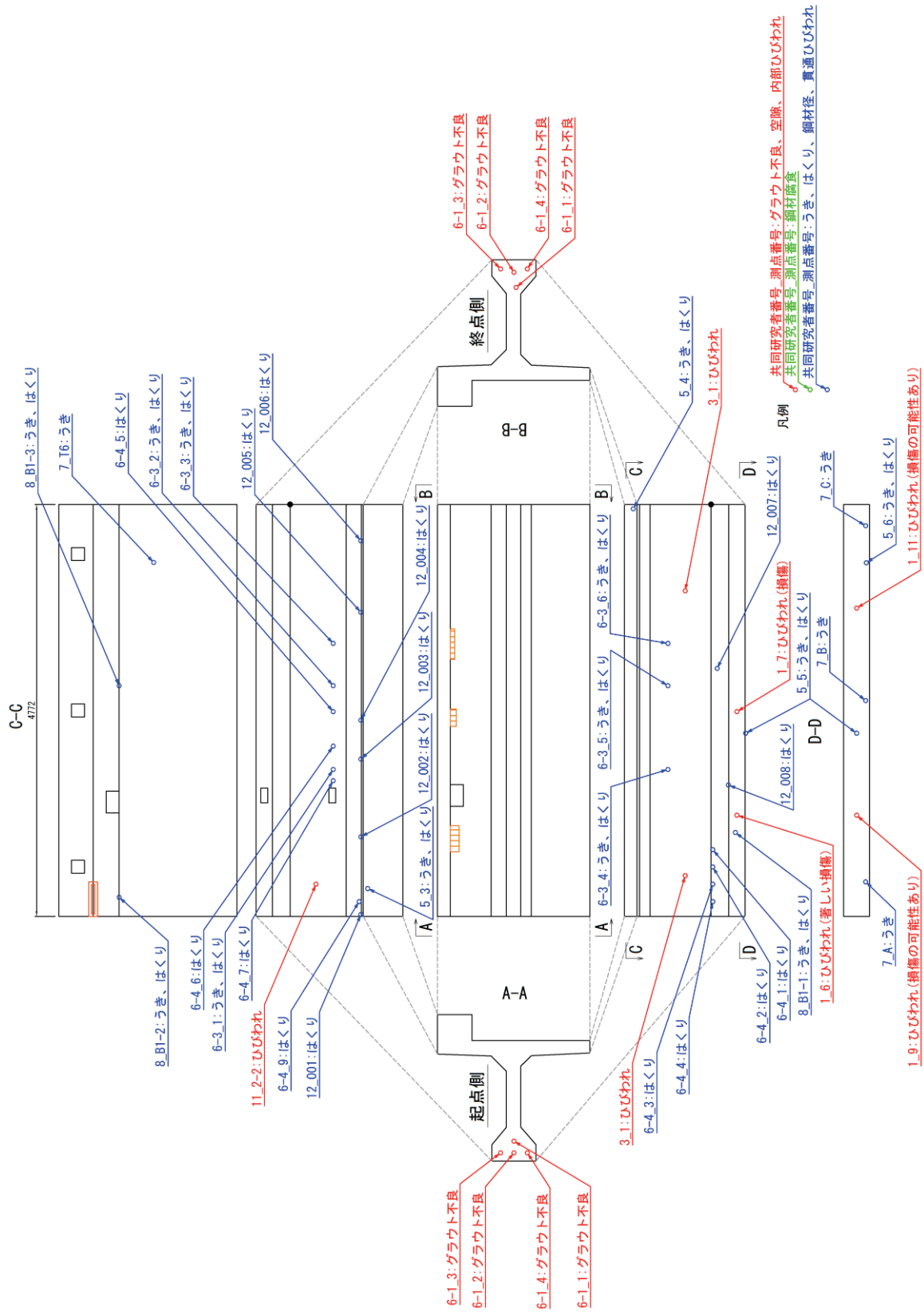


図-3.1.16 各共同研究者の内部損傷の推定結果 (A橋)

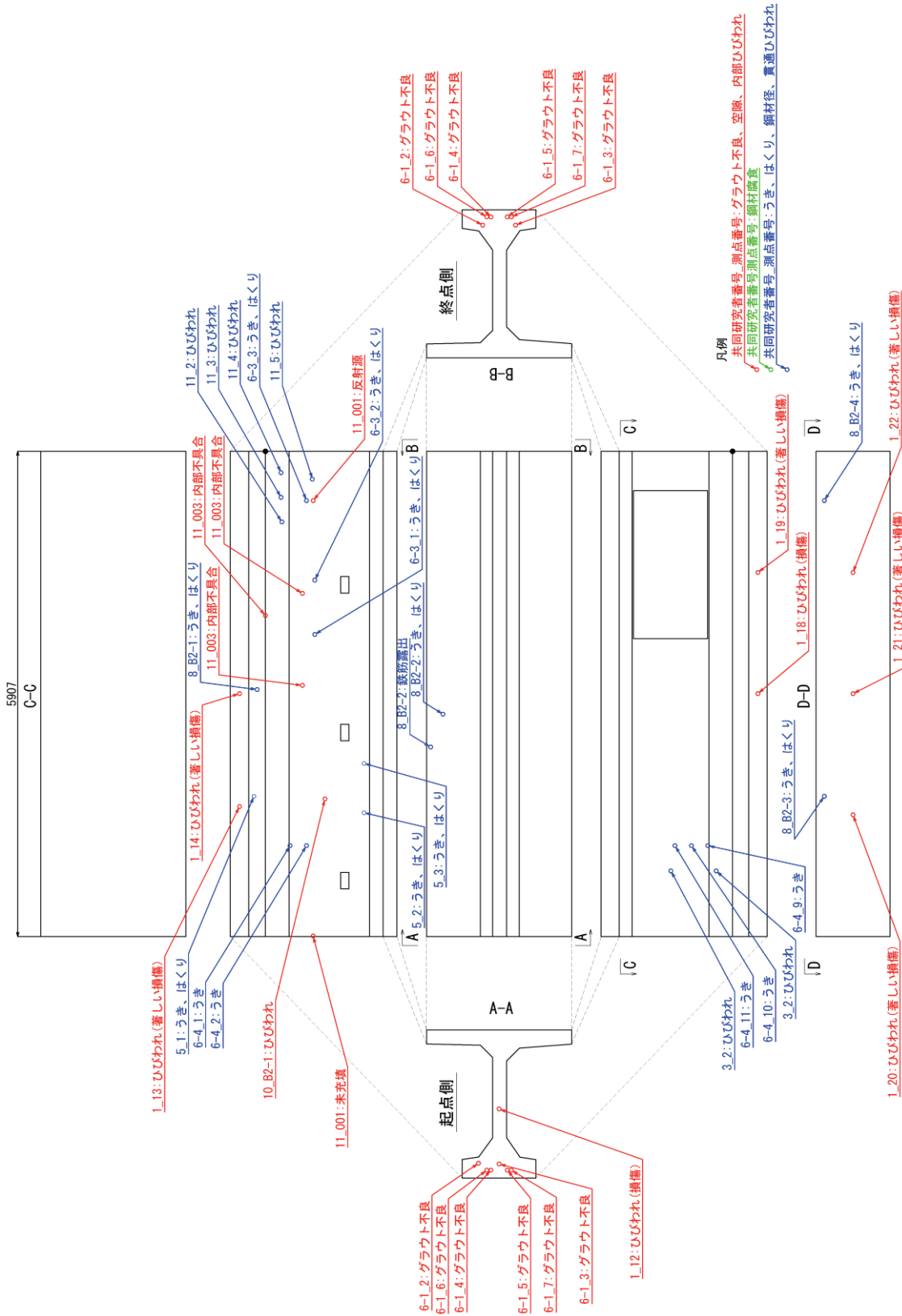


図-3.1.17 各共同研究者の内部損傷の推定結果 (B橋)



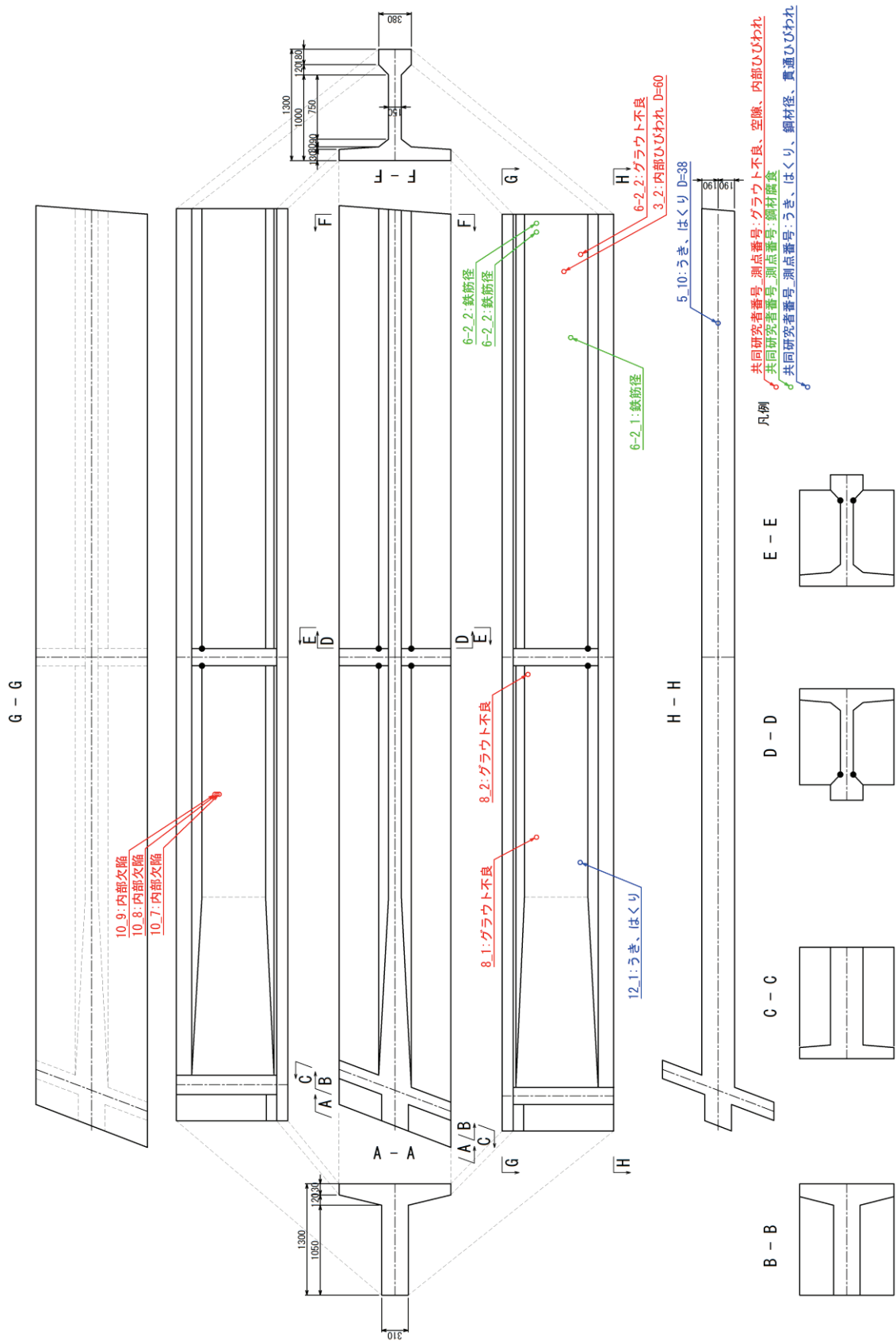


図-3.1.18 各共同研究者の内部損傷の推定結果 (C橋: C-1)

G - G

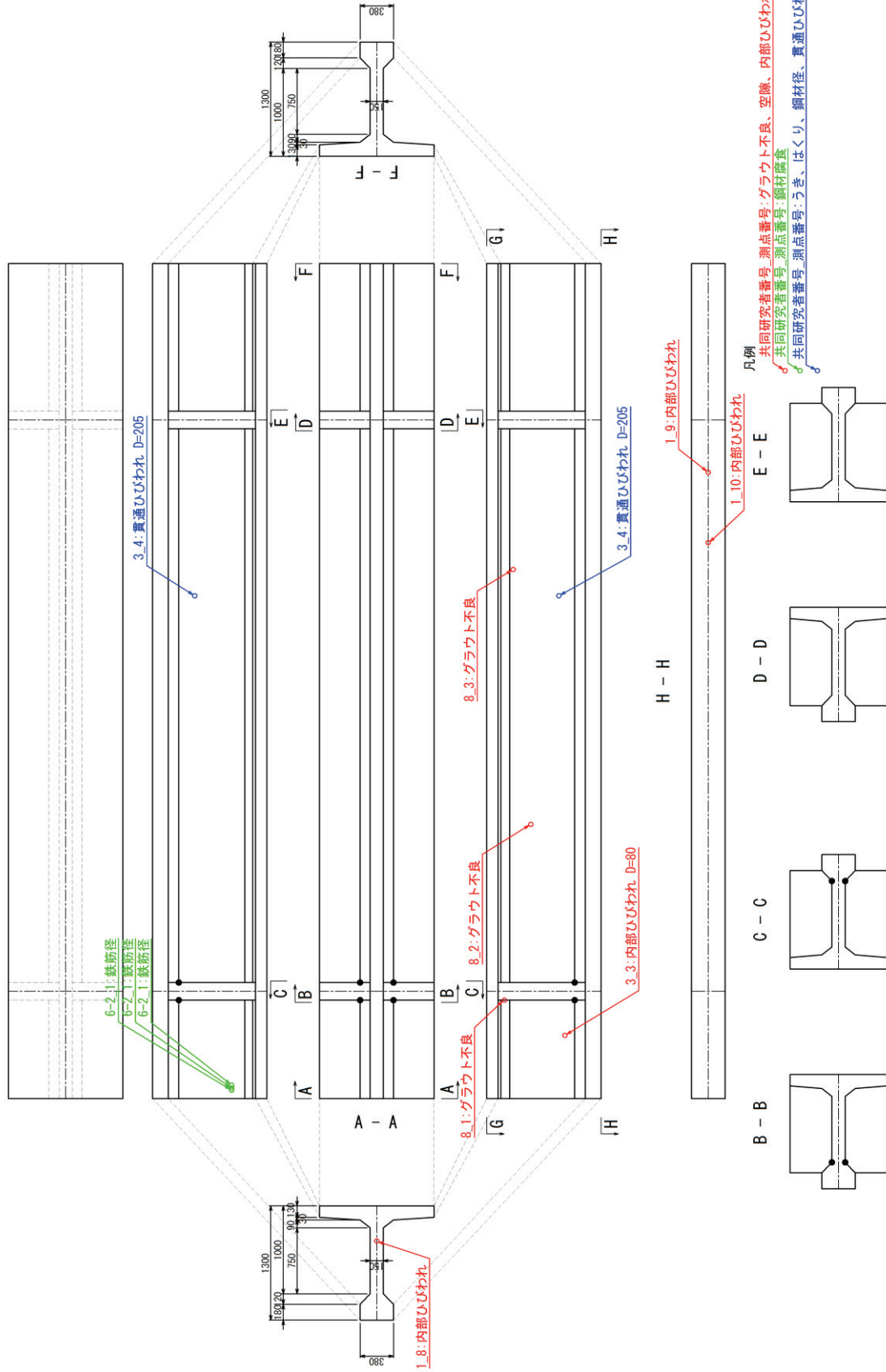


図-3.1.19 各共同研究者の内部損傷の推定結果 (C橋 : C-2)

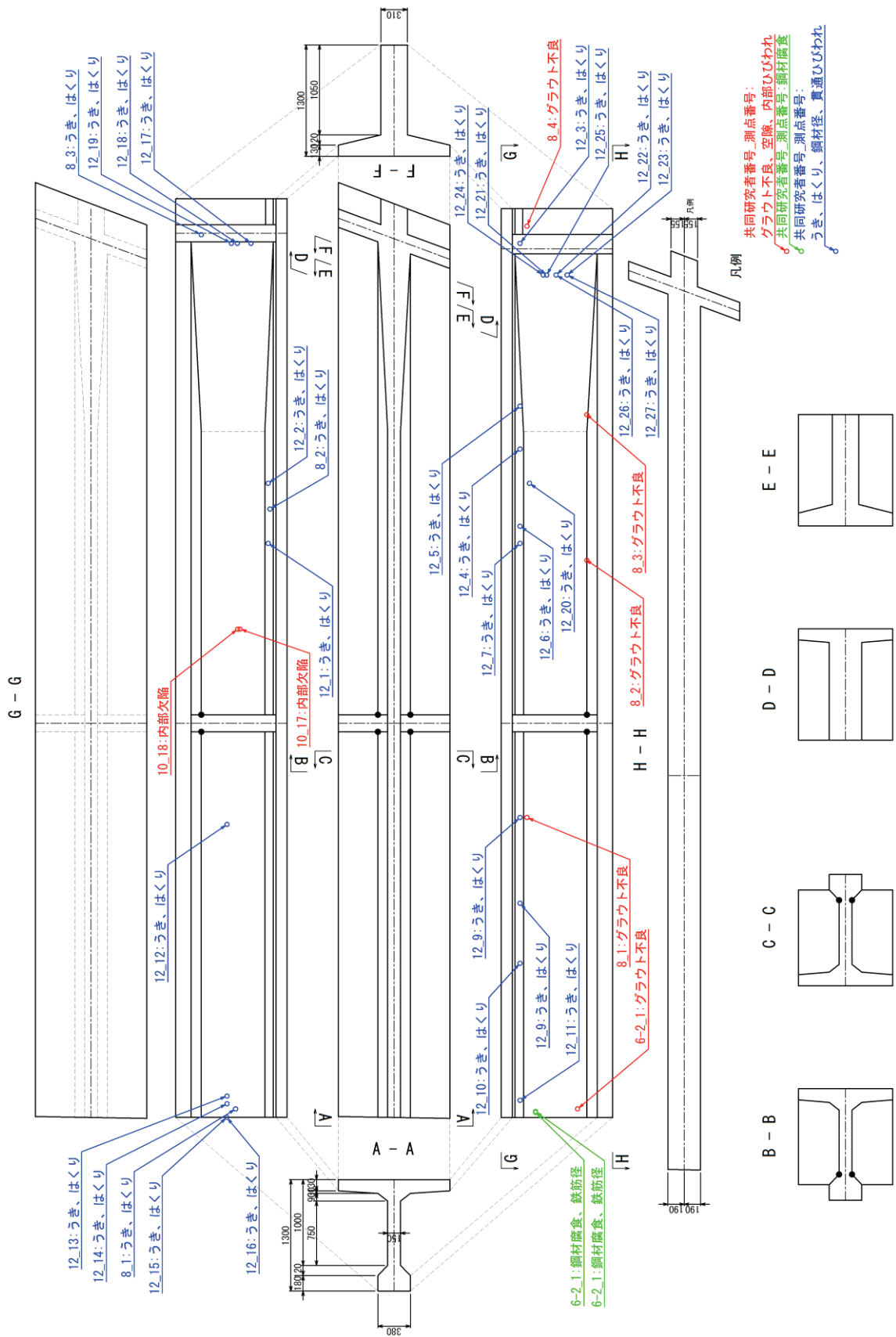
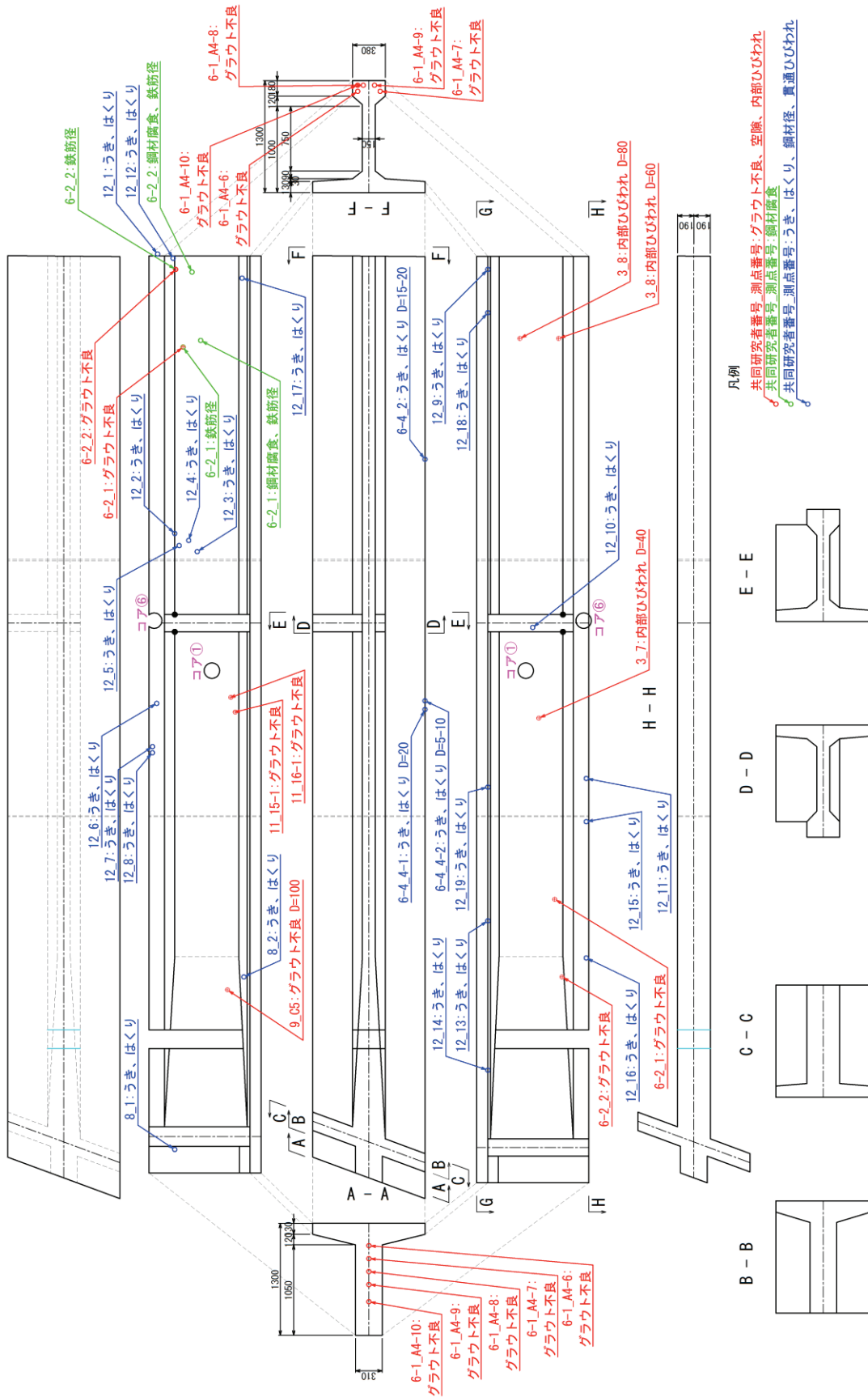


図-3.1.20 各共同研究者の内部損傷の推定結果 (C橋: C-3)

G - G

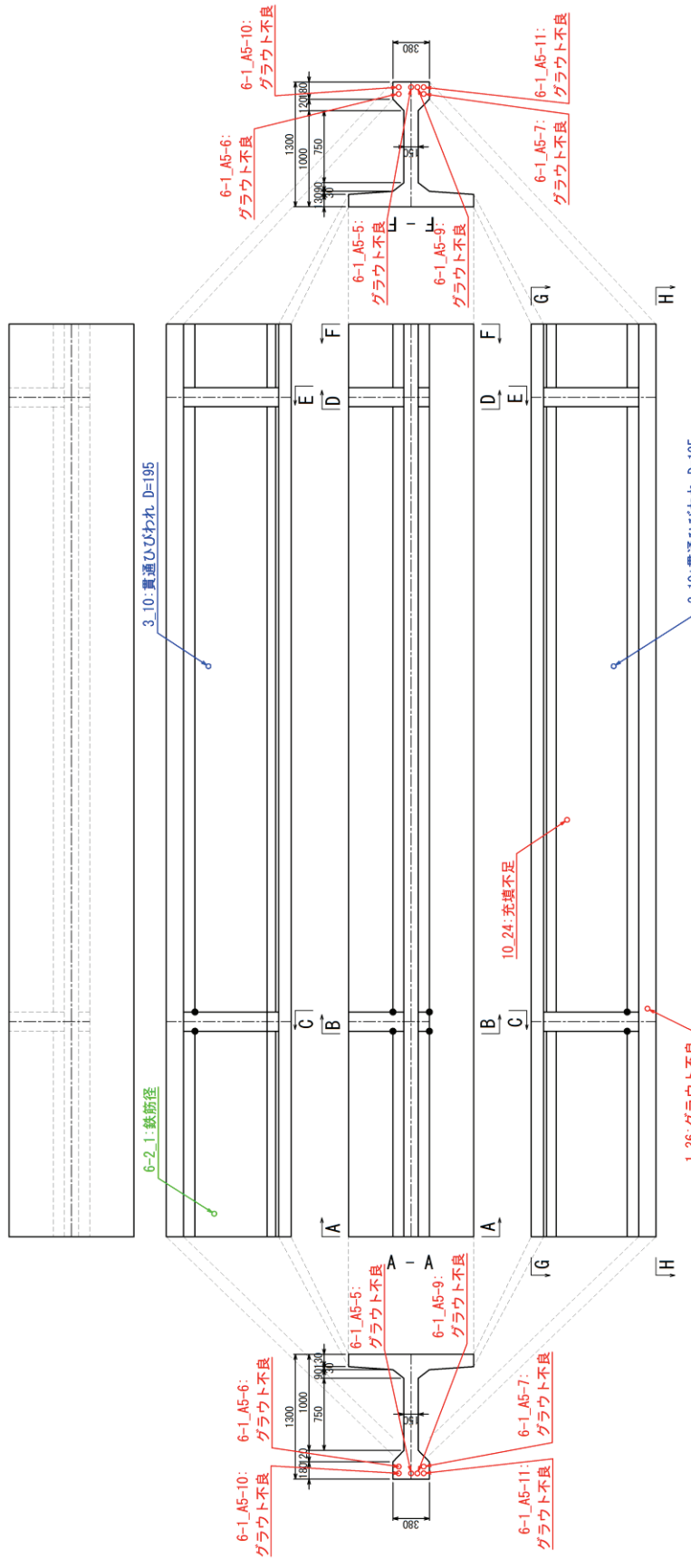


凡例

- 共同研究者番号 測点番号: グラウト不良、空隙、内部ひびわれ
- 共同研究者番号 測点番号: 鋼材腐食
- 共同研究者番号 測点番号: うき、はくり、鋼材径、貫通ひびわれ

図-3.1.21 各共同研究者の内部損傷の推定結果 (C-橋 : C-4)

G - G



H - H

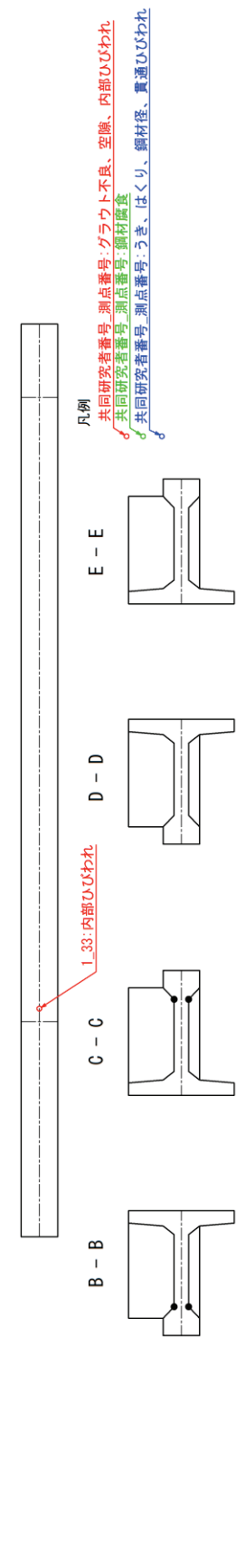


図-3.1.22 各共同研究者の内部損傷の推定結果 (C 橋: C-5)

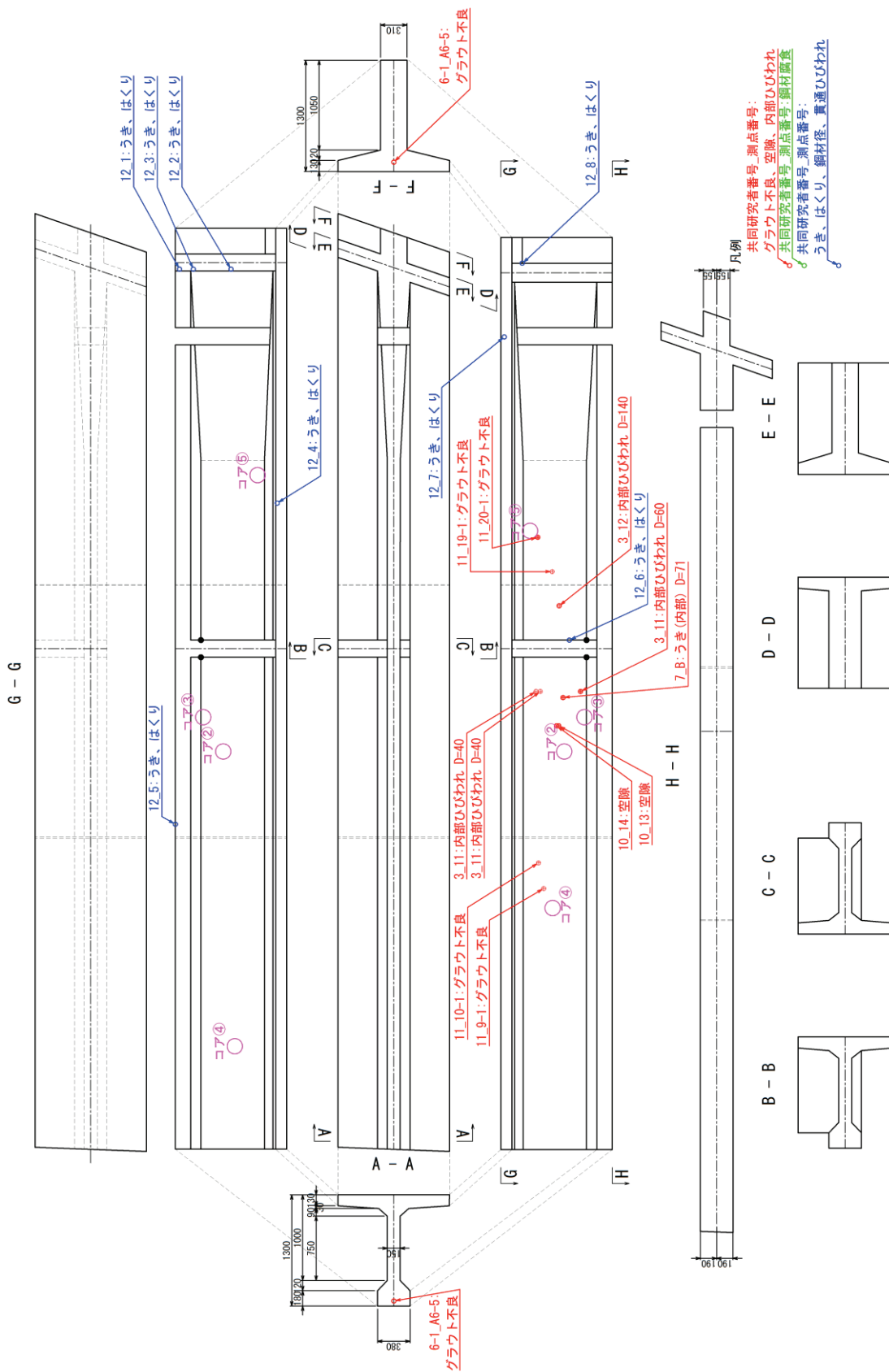


図-3.1.23 各共同研究者の内部損傷の推定結果 (C橋 : C-6)

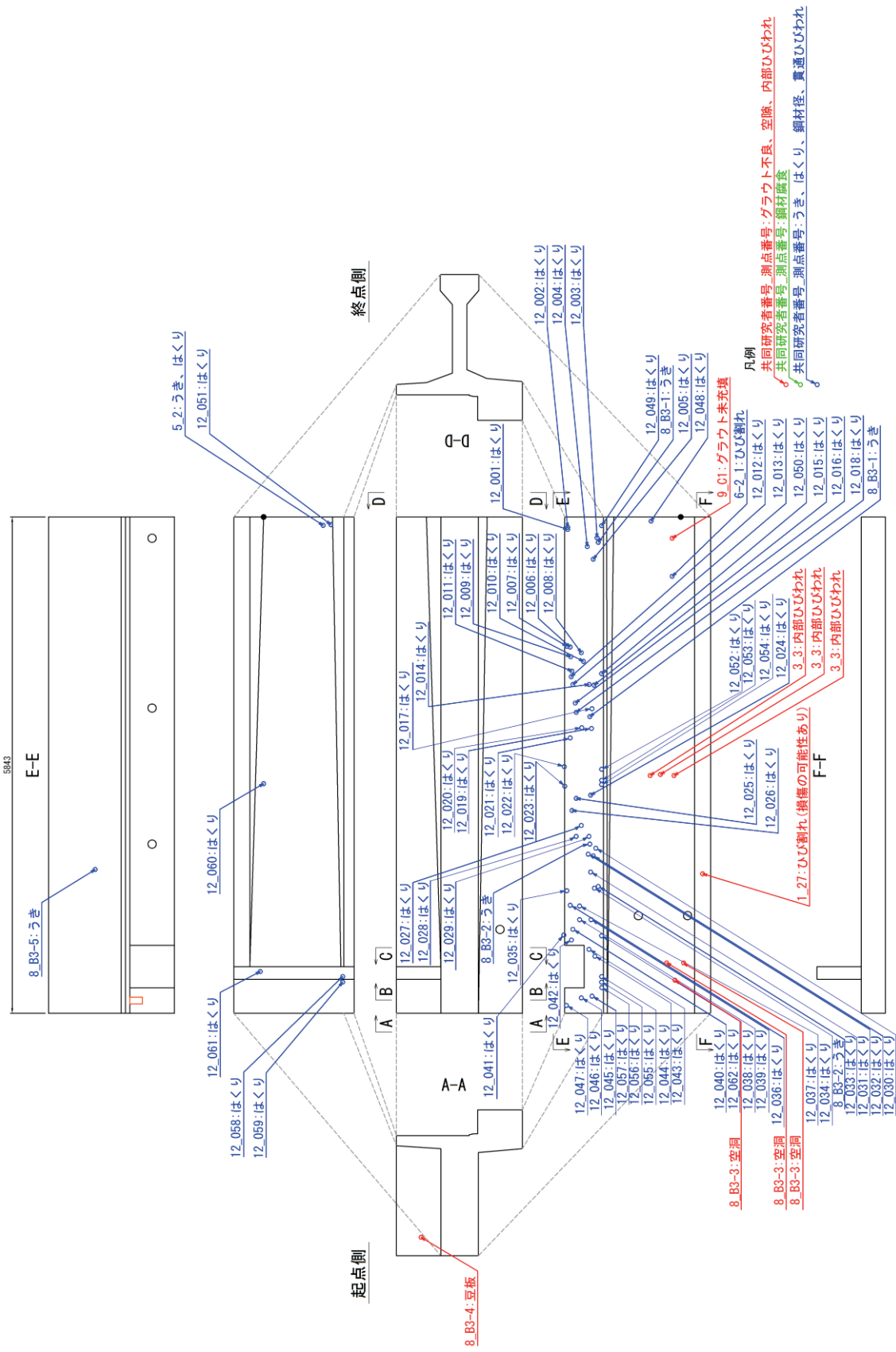


図-3.1.24 各共同研究者の内部損傷の推定結果 (D橋)

### (3) 検知可能な内部損傷

検査技術によっては、複数の変状を検知することが可能であるが、構造物の診断のための調査に用いる場合、どの種類の損傷をどの程度の正答率や空振り率で推定することができるのかについて予め明確にしておくことが、適切な使用機器の選択や、検査結果の評価を行うためには重要である。そこで、各検査ケースと C-4、C-6 の解体調査結果を照合し、検知可能な内部損傷および正答率について整理した。まず、各非破壊検査技術が検知対象とする項目を検知できているか把握するために、事前に実施したアンケートによる自己申告結果との対比を行った。対比結果を表-3.1.7 に示す。次に、C-4、C-6 に対する内部損傷の正答率について整理した。正答率の整理結果を表-3.1.8、図-3.1.25 に示す。

#### 1) 検知可能な内部損傷

- ・表 3.1.7 の通り、本調査で検査を実施した検査技術において、事前申告で検知可能とされた通りに内部損傷が検知されたのは 4 ケースである。
- ・事前申告通りに回答された内部損傷は「ひび割れ」と「グラウト充填不良」のみであり、「ひび割れ」は 1 ケース、「グラウト充填不良」は 3 ケースである。
- ・「PC 鋼材の健全性(腐食、断面欠損、破断)」はいずれの検査技術でも推定できておらず、「空洞」を推定した検査技術はあるものの、結果の評価は不一致である。

表-3.1.7 検査ケース別の検知可能な内部損傷の整理

内部損傷 検査ケース	空洞		うき		ひび割れ		グラウト 充填状態		PC鋼材の 健全性 (腐食、断面欠 損、破断)		鉄筋の 健全性 (腐食、断面欠 損、破断)		残存プレ ストレス量		損傷なし 検査結果
	事前申告	検査結果	事前申告	検査結果	事前申告	検査結果	事前申告	検査結果	事前申告	検査結果	事前申告	検査結果	事前申告	検査結果	
①	○	×	○	×	○	×									
②	○	×	○	×	○	×									
③	○	△	○	×	○	◎									◇
④									○		○				
⑤	○	×	○	×											
⑥							○	×							
⑦													○	×	
⑧							○	◎			◎				◇
⑨	○		○		○		○								
⑩			○												
⑪	○	△	○	×			○	×			○	×			
⑫															
⑬															
⑭	○	×													
⑮							○	◎							
⑯							○								
⑰							○								
⑱	○	×	○	×											◇
⑲	○	×					○	◎							
⑳	○	×													
㉑	○	×	○	×											
㉒	○		○												

○：検知対象 ◎：一致 △：不一致  
◇：空振 ×：検知不可  
空欄：不参加または計測データなし



## 2)内部損傷の正答率

- ・表-3.1.8、図-3.1.25 に示す通り、内部損傷の種類の内、一部のケースで正答率が高い内部損傷があるものの、全体の内部損傷の種類の内、正答率は 25%であり、低い結果であった。
- ・ただし、「空洞」については、今回解体調査をした範囲では、最大約 15mm 程度の気泡が数箇所確認されたのみであり、空洞と認められるほど大きなものは存在していない。
- ・「ひび割れ」について「一致」したのは 1 ケースであり、その 1 ケースにおける正答率は 57%である。
- ・「グラウト充填不良」について「一致」したのは 3 ケースであり、正答率は 75~100% である。対象橋梁の C 橋は古い PC 橋で PC 上縁定着部の構造のため、解体調査結果からもグラウト不良箇所が多く、確認した箇所によっては、全くグラウトが充填されていない箇所も存在していたため、検査が比較的容易であったと考えられる。
- ・「PC 鋼材健全性(腐食、断面欠損、破断)」について推定された検査ケースはない。その理由としては、PC 鋼材に大きな断面欠損を伴う腐食が発生していない可能性が挙げられる。解体調査において、実際にグラウト充填不良やシース管が腐食している箇所について PC 鋼線の断面減少率を測定した結果を表-3.1.9、写真-3.1.9 に示す。断面減少率が最も大きい PC 鋼材でも 1 本当たりの平均が 23%程度であり、断面減少と判定できずに「健全」と判定している可能性がある。
- ・「鉄筋健全性(腐食、断面欠損、破断)」については「一致」したのは 1 ケースであり、正答率は 75%である。ただし、表-3.1.9、写真-3.1.10 に示すように、解体調査で確認した箇所での鉄筋の断面減少率は最大で 7%程度とわずかであった。このような場合、検査結果が使用機器の計測原理や計測結果の処理方法に基づき正しく導き出された結果であることを確認する必要がある。そのため、測点毎の結果の記録(状況写真と結果の写真)を残すことは重要と言える。

以上の通り、実損傷供試体を用いた検査では、自己申告通りの内部損傷が推定されたのは 4 ケースと少なく、全体の内部損傷の種類の内、正答率も 25%と低かった。これは解体調査を行った範囲では「空洞」や「うき」がほとんど存在していなかったことが要因の一つと考えられるが、その他にも、予備情報(図面)がないことで鉄筋や PC 鋼材の配置状況がわからず、適切な検査位置を特定できなかつたり、鉄筋や PC 鋼材の影響を適切に考慮できなかつたりしたために、検査結果を正しく評価できなかつたり可能性も考えられる。

表-3.1.8 検査ケースの内部損傷正答率

内部損傷 検査ケース	空洞	うき	ひび割れ	グラウト 充填不良	PC鋼材の 健全性 (腐食、断面欠 損、破断)	鉄筋 健全性 (腐食、断面欠 損、破断)	残存プレスト レス量	全体
①								
②								
③			57% (4/7)					57% (4/7)
④								
⑤								
⑥				0% (0/12)				0% (0/12)
⑦								
⑧				75% (3/4)		75% (3/4)		75% (6/8)
⑨								
⑩		0% (0/3)						0% (0/3)
⑪		0% (0/1)						0% (0/1)
⑫								
⑬		0% (0/2)						0% (0/2)
⑭								
⑮				100% (1/1)				100% (1/1)
⑯								
⑰								
⑱	0% (0/2)			100% (6/6)				0% (0/2)
⑲								
⑳								
㉑		0% (0/27)						0% (0/27)
㉒								
合計				25% (17/69)				

※カッコ内：内部損傷一致数/回答数

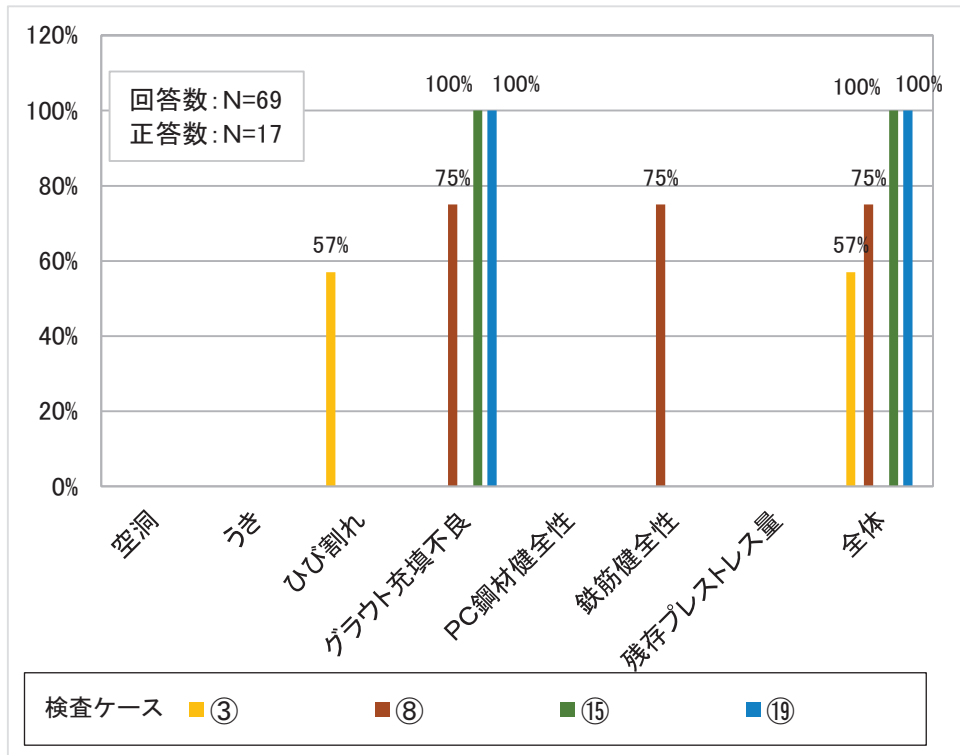


図-3.1.25 内部損傷の正答率

表-3.1.9 PC鋼材及び鉄筋の断面減少率

桁番号	ケーブル No.	グラウト 充填の 有無	試料 No.	断面減少率(%)									最大値	最小値	平均
				1	2	3	4	5	6	7					
C-4 PC鋼線	11 (コア⑥)	有	1	0.00	0.00	0.20	0.00	-	-	-	0.20	0.00	0.05		
			2	0.00	0.20	0.00	0.20	-	-	-	0.20	0.00	0.10		
			3	0.00	0.00	0.20	0.00	-	-	-	0.20	0.00	0.05		
			4	0.00	0.20	0.00	0.00	-	-	-	0.20	0.00	0.05		
			5	0.20	0.00	0.41	0.20	-	-	-	0.41	0.00	0.20		
			6	0.00	0.00	0.41	0.00	-	-	-	0.41	0.00	0.10		
			7	0.20	0.00	0.00	0.00	-	-	-	0.20	0.00	0.05		
			8	0.61	0.20	0.20	0.00	-	-	-	0.61	0.00	0.25		
			9	0.41	0.61	0.20	0.00	-	-	-	0.61	0.00	0.31		
			10	0.20	0.00	0.41	0.00	-	-	-	0.41	0.00	0.15		
			11	0.41	0.41	0.20	0.00	-	-	-	0.41	0.00	0.26		
			12	0.41	0.20	0.61	0.00	-	-	-	0.61	0.00	0.31		
C-6 PC鋼線	4 (コア③)	有	1	0.20	0.41	0.20	0.00	-	-	-	0.41	0.00	0.20		
			2	0.00	0.00	0.41	0.20	-	-	-	0.41	0.00	0.15		
			3	0.00	0.41	0.41	0.00	-	-	-	0.41	0.00	0.21		
			4	0.41	0.20	0.41	0.00	-	-	-	0.41	0.00	0.26		
			5	0.41	0.00	0.41	0.00	-	-	-	0.41	0.00	0.21		
			6	0.20	0.41	0.00	0.20	-	-	-	0.41	0.00	0.20		
			7	0.00	0.00	0.00	0.20	-	-	-	0.20	0.00	0.05		
			8	0.61	0.20	0.20	0.00	-	-	-	0.61	0.00	0.25		
			9	0.00	0.00	0.20	0.00	-	-	-	0.20	0.00	0.05		
			10	0.00	0.20	0.41	0.20	-	-	-	0.41	0.00	0.20		
			11	0.61	0.41	0.61	0.20	-	-	-	0.61	0.20	0.46		
			12	0.61	0.20	0.61	0.00	-	-	-	0.61	0.00	0.36		
C-6 PC鋼線	4 (コア⑤)	無	1	0.00	0.20	0.20	0.00	-	-	-	0.20	0.00	0.10		
			2	0.20	0.20	0.20	0.00	1.63	-	-	1.63	0.00	0.45		
			3	0.61	0.00	0.00	0.81	0.81	1.83	-	1.83	0.00	0.68		
			4	0.00	0.20	0.20	0.20	-	-	-	0.20	0.00	0.15		
			5	0.00	2.39	0.20	0.00	1.83	-	-	2.39	0.00	0.88		
			6	0.41	0.41	0.00	0.00	3.00	1.22	-	3.00	0.00	0.84		
			7	0.61	1.02	0.41	0.41	1.63	0.61	2.04	2.04	0.41	0.96		
			8	0.00	0.41	0.00	0.41	1.22	3.00	0.20	3.00	0.00	0.75		
			9	0.00	0.20	0.00	0.00	-	-	-	0.20	0.00	0.05		
			10	0.00	0.00	0.20	0.00	-	-	-	0.20	0.00	0.05		
			11	0.20	0.00	0.00	0.00	-	-	-	0.20	0.00	0.05		
			12	0.00	0.00	0.20	0.00	-	-	-	0.20	0.00	0.05		
C-4 (主鉄筋)	-	-	1	3.06	2.48	2.25	2.59	-	-	-	3.06	2.25	2.60		
			2	7.00	4.93	5.04	-	-	-	-	7.00	4.93	5.66		
C-6 PC鋼線	4	追加 試料	1	0.00	10.54	58.55	-	-	-	-	58.55	0.00	23.03		
			2	5.96	6.31	4.18	3.97	0.00	-	-	6.31	0.00	4.08		
			3	0.00	3.77	3.97	0.61	6.31	-	-	6.31	0.00	2.93		



写真-3.1.9 C-6 供試体  
PC鋼線 (ケーブルNO.4 試料NO.1)



写真-3.1.10 C-4 供試体  
主鉄筋 (試料NO.2)

#### (4) 内部損傷の位置

非破壊検査では検査技術によって位置の特定が可能なもの、他の損傷の情報との相对比较によって定性的な評価を行うために正確な位置や範囲の推定が難しいものなど評価方法が様々である。そこで、内部損傷の位置に関する検査ケースを座標値 (X、Y、Z) で整理し、解体調査で確認された内部損傷位置の座標と照合することで、検査精度について整理した。座標 (X、Y、Z) は検査面に対して (横方向、縦方向、深さ方向) を意味する。内部損傷の判定が「一致」であった検査ケースの計測誤差について整理した。各検査ケースの計測誤差度数分布を表-3.1.10～3.1.12、図-3.1.26～3.1.28、計測誤差分布を図-3.1.29～3.1.32 に示す。なお、平面 (XY) の計測誤差分布については、X 座標と Y 座標の両方の結果が得られているもののみ図示している。

- ・「ひび割れ」の計測誤差は X、Y 方向ともに誤差 0mm であり、Z 方向 (深さ方向の中心位置) ではばらつきが大きい傾向である。
- ・「グラウト充填不良」の計測誤差は X、Y 方向ともに比較的ばらつきは小さい傾向であるが、Z 方向については検知できていない。
- ・「鉄筋健全性」の計測誤差は Y 方向で誤差は 0mm であり、X 方向ではばらつきが見られた。Z 方向については検知できていない。

表-3.1.10 ひび割れ位置の計測誤差度数分布

計測誤差(mm)	X	Y	Z
-100~-81	0	0	0
-80~-61	0	0	0
-60~-41	0	0	0
-40~-21	0	0	2
-20~-1	0	0	0
0	4	4	0
1~20	0	0	0
21~40	0	0	0
41~60	0	0	1
61~80	0	0	0
81~100	0	0	1

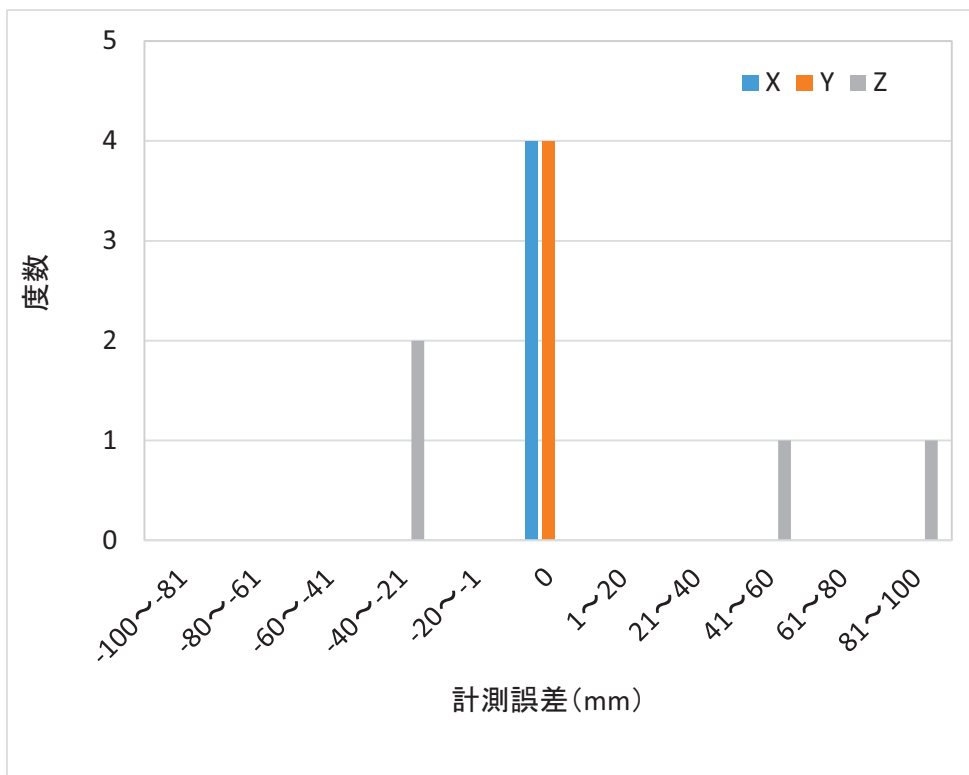


図-3.1.26 ひび割れ位置の計測誤差度数分布

表-3.1.11 グラウト充填不良位置の計測誤差度数分布

計測誤差(mm)	X	Y
-100~-81	0	0
-80~-61	0	0
-60~-41	0	1
-40~-21	0	1
-20~-1	1	1
0	9	5
1~20	0	0
21~40	0	0
41~60	0	0
61~80	0	1
81~100	0	1

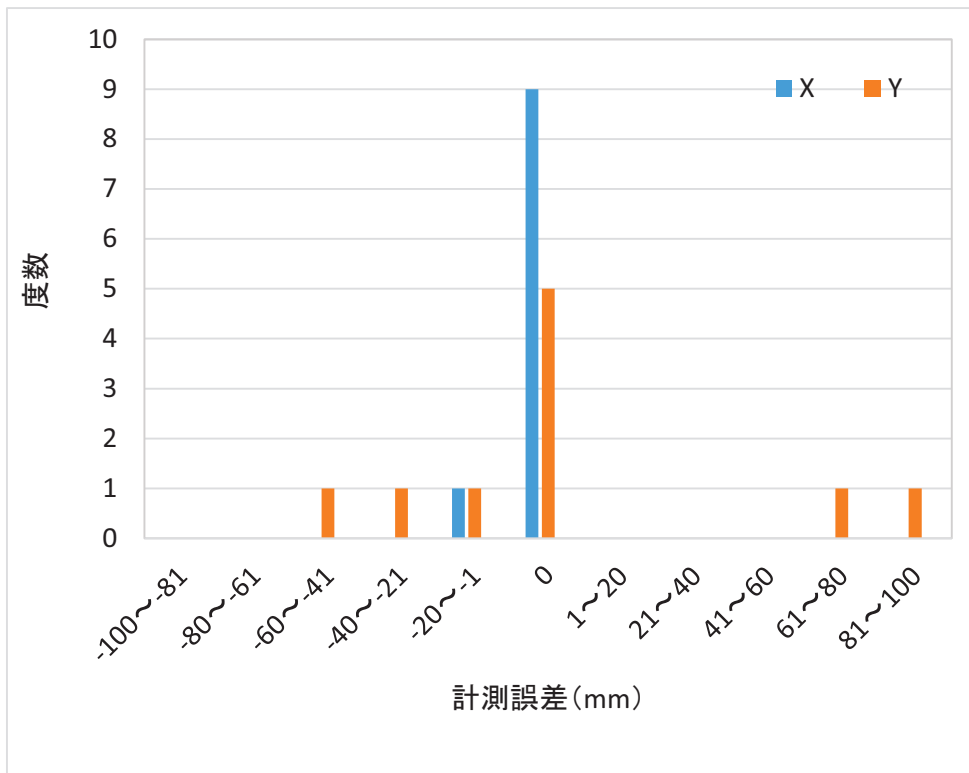


図-3.1.27 グラウト充填不良位置の計測誤差度数分布

表-3.1.12 鉄筋健全性(腐食、断面欠損、破断)位置の計測誤差度数分布

計測誤差(mm)	X	Y
-100~-81	0	0
-80~-61	2	0
-60~-41	2	0
-40~-21	0	0
-20~-1	0	0
0	2	6
1~20	0	0
21~40	0	0
41~60	0	0
61~80	0	0
81~100	0	0

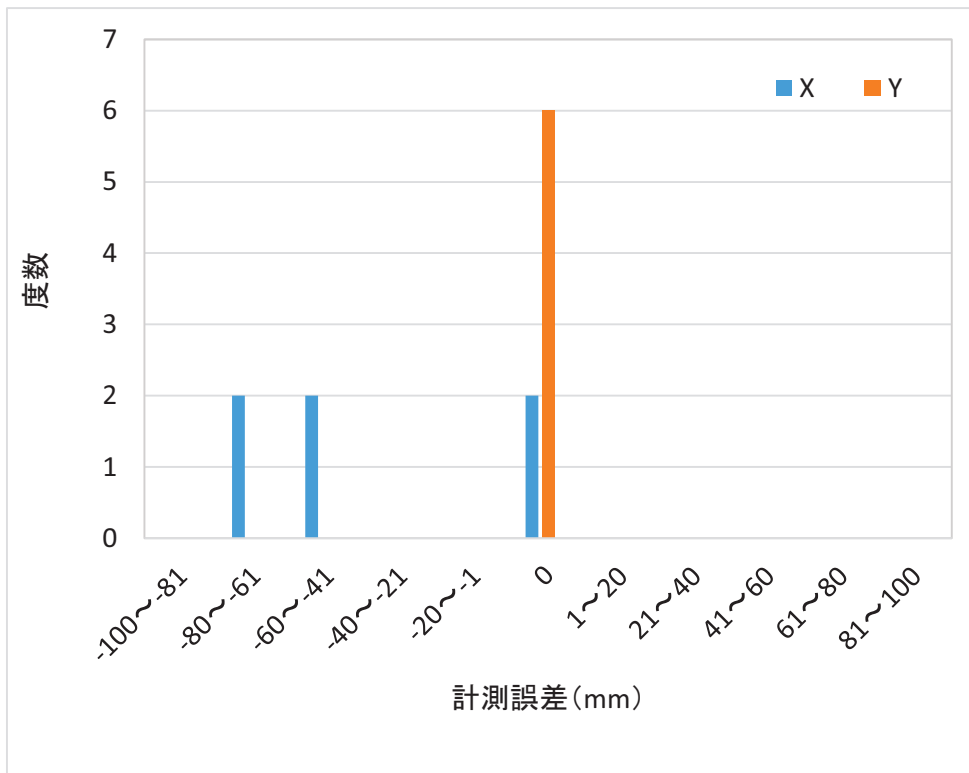


図-3.1.28 鉄筋健全性(腐食、断面欠損、破断)位置の計測誤差度数分布

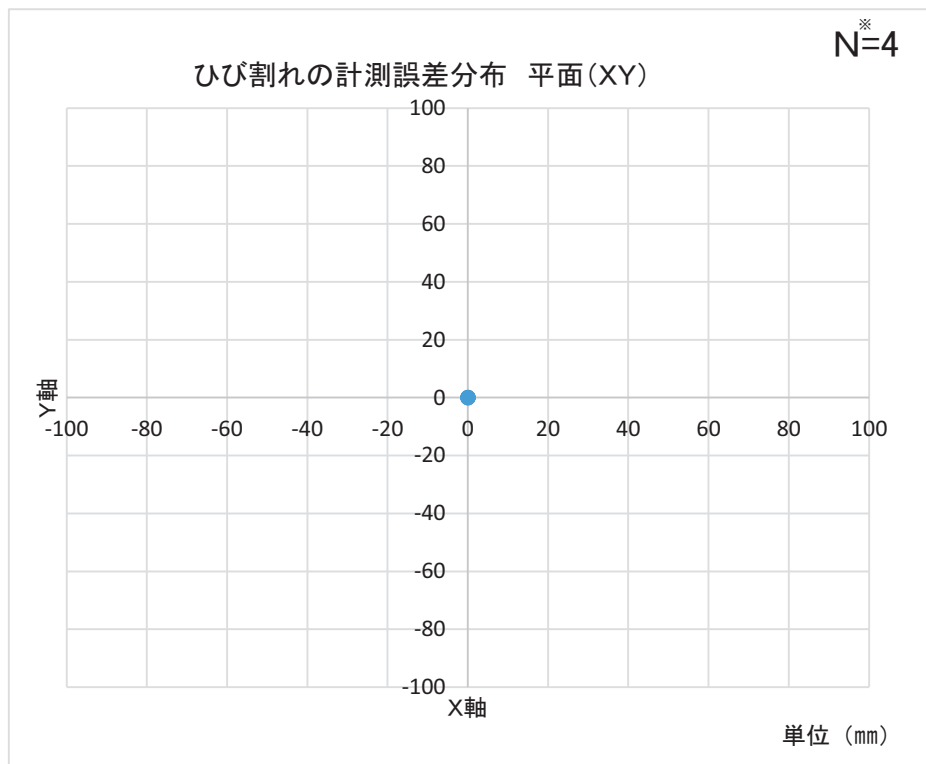


図-3.1.29 ひび割れ位置 計測誤差分布 平面 (XY)

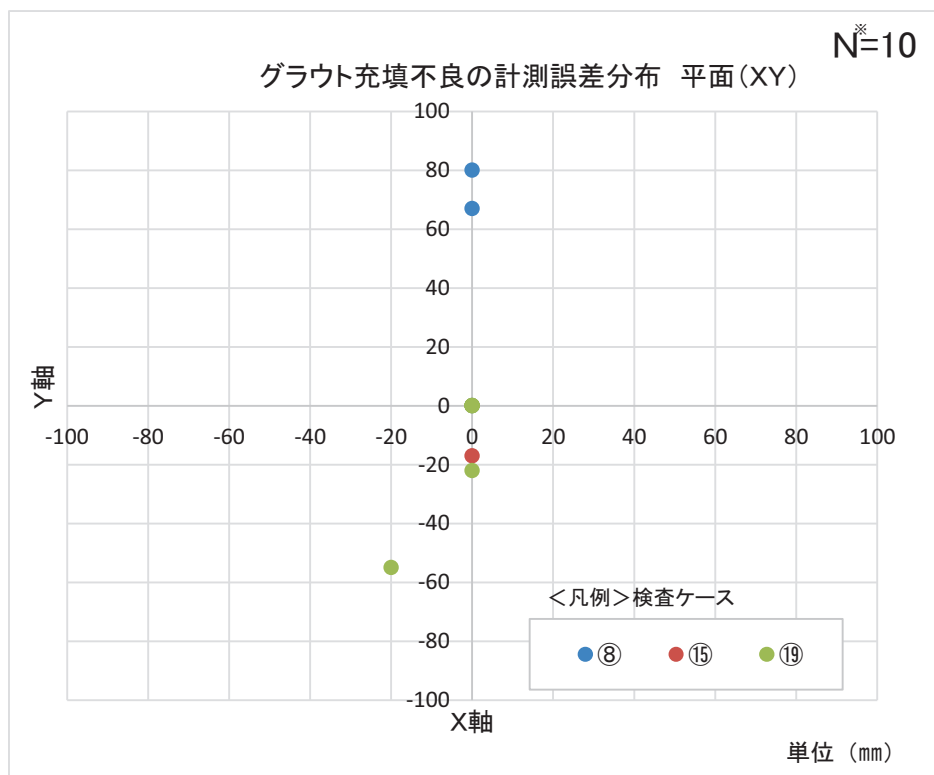


図-3.1.30 グラウト充填不良位置 計測誤差分布 平面 (XY)

※N はサンプル数 (点が重なっている場合あり)



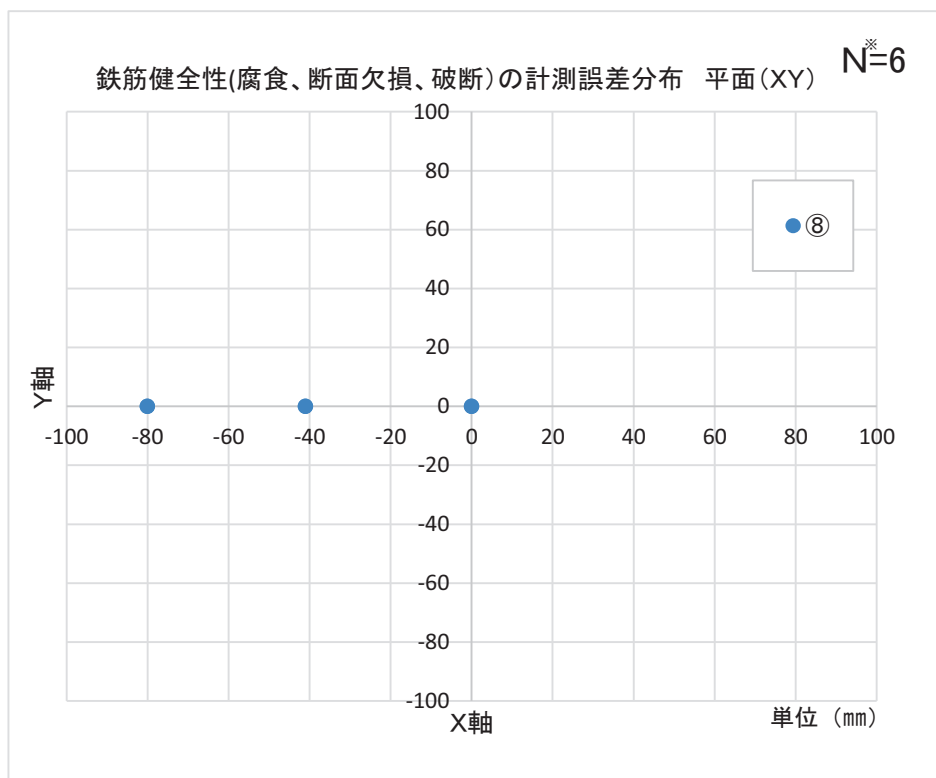


図-3.1.31 鉄筋健全性(腐食、断面欠損、破断)位置 計測誤差分布 平面(XY)

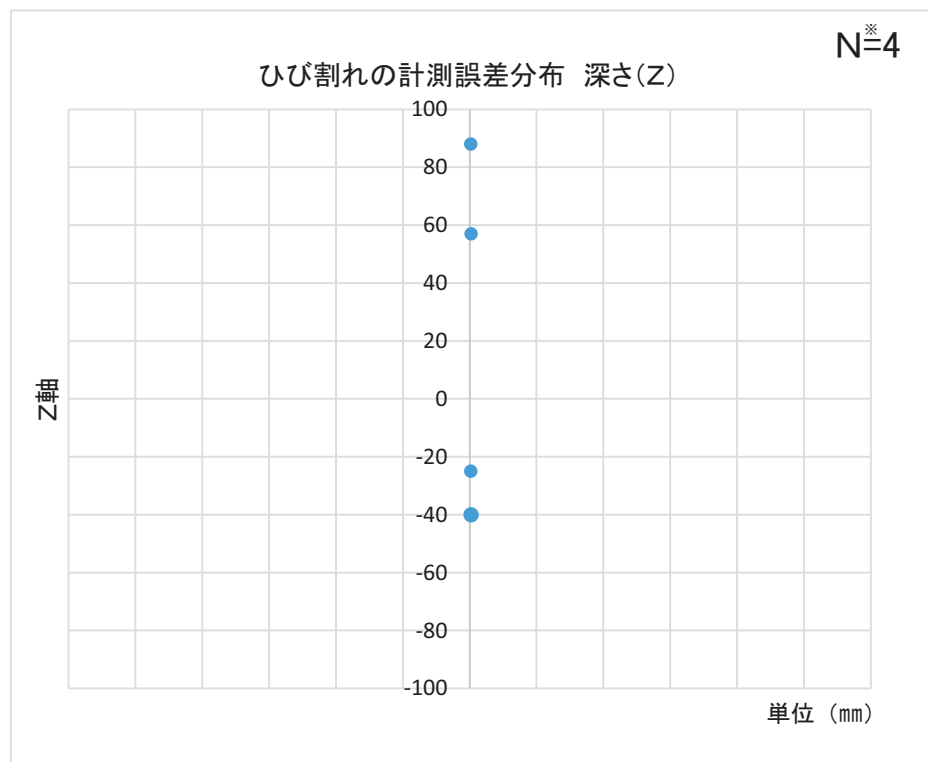


図-3.1.32 ひび割れ位置 計測誤差分布 深さ(Z)

※Nはサンプル数(点が重なっている場合あり)

### (5) 内部損傷の形状

内部損傷の形状に関する検査ケースを寸法値 (x、y、z) で整理し、解体調査で確認された内部損傷形状の座標と照合することで、検査精度について整理した。寸法値 (x、y、z) は検査面に対して (横方向、縦方向、深さ方向) を意味する。内部損傷の判定が「一致」であった検査ケースの計測誤差について整理した。計測誤差度数分布を表-3.1.13、図-3.1.33、計測誤差分布を図-3.1.34 に示す。

- ・「グラウト充填不良」の y 方向の計測誤差は-20~40mm の範囲にありばらつきは小さい傾向である。

表-3.1.13 グラウト充填不良形状の計測誤差度数分布 (y)

計測誤差(mm)	y
-100~-81	0
-80~-61	0
-60~-41	0
-40~-21	0
-20~-1	2
0	0
1~20	2
21~40	1
41~60	0
61~80	0
81~100	0

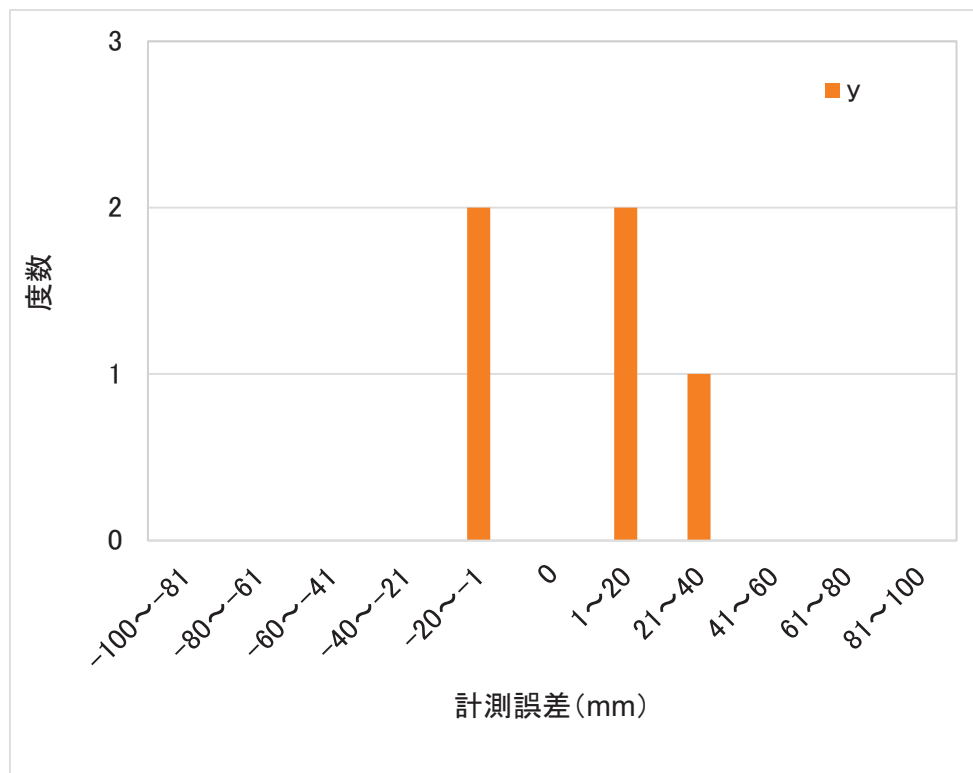


図-3.1.33 グラウト充填不良形状の計測誤差度数分布

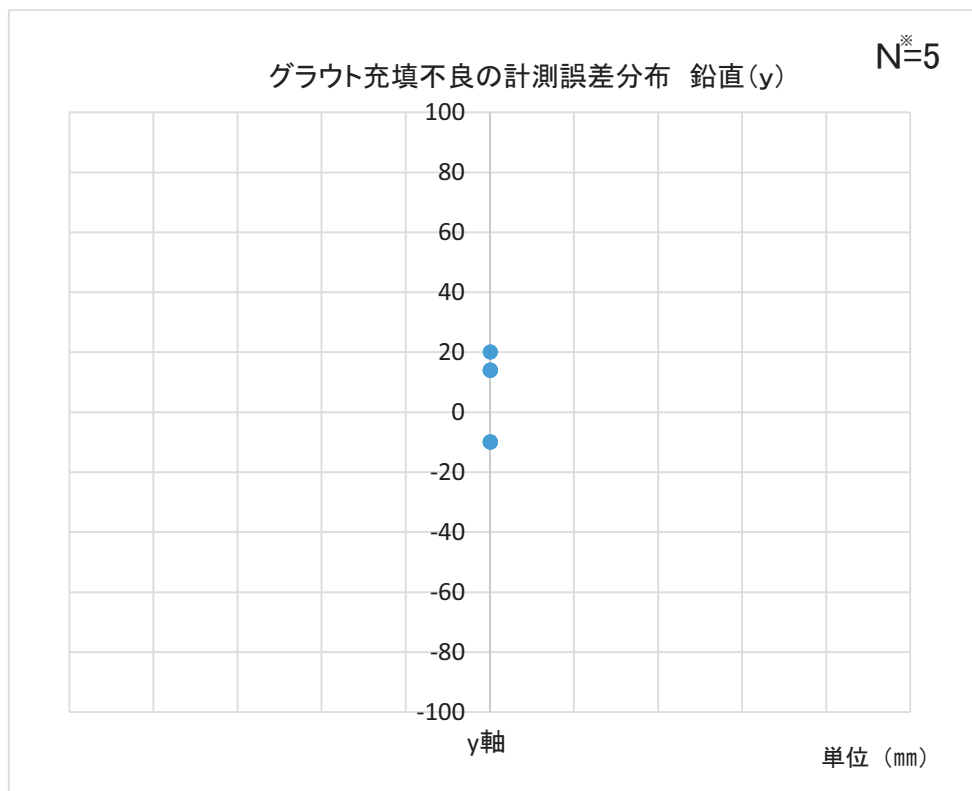


図-3.1.34 グラウト充填不良形状 計測誤差分布 縦方向 (y)

※Nはサンプル数 (点が重なっている場合あり)

## (6)各検査技術の作業性能の把握

非破壊検査を活用する場合、検査機器の大きさや作業時間、作業人員などの作業性能に関わる項目は現地での調査計画を立てるうえで重要な要素である。そこで、各検査ケースの検査機器の情報（形状寸法、重量等）、作業性（準備・撤去を含む検査時間、キャリブレーションの有無）について、事前に実施したアンケート結果及び検査結果から表-3.1.14、図-3.1.35の通り整理した。また、各検査ケースの作業時間と内部損傷の正答率の関係について、図-3.1.36の通り整理した。

### 1)検査機器

- ・各検査ケースの検査機器の寸法と重量は、最大値は総重量：約 210kg で寸法：約 400×700×500mm である。最小値は総重量：約 1.5kg で寸法：約 70×70×180mm である。

### 2)作業性

#### ①キャリブレーションの有無と必要な時間

- ・キャリブレーションを必要としない検査ケースは 8 ケースである。キャリブレーションに長い時間を要する検査ケースは 30～60 分である。それ以外は約 1 分～10 分と比較的短時間である。

#### ②検査以外に要した時間（準備＋撤去）

- ・準備の時間が 30 分以上の検査ケースは 7 ケースあり、最も長いもので 90 分である。準備の時間が最も短いものは 6 分である。
- ・撤去の時間が 30 分以上の検査ケースは 7 ケースあり、いずれも 30 分である。撤去の時間が短いものは 6 分である。

#### ③作業人数

- ・作業人数が多かった検査ケースは 4 人であり、少ないものは 1 人である。

#### ④作業時間

- ・検査ケース全体での 1m<sup>2</sup>当たりの作業時間は平均で約 27 分/m<sup>2</sup> である。
- ・1m<sup>2</sup>当たりの作業時間が短かった検査ケースは 4 分/m<sup>2</sup> であり、最も長かったのは 68 分/m<sup>2</sup> で平均値を大きく上回る結果である。

#### ⑤作業時間とキャリブレーションの有無の関係

- ・図-3.1.35の通り、各検査ケースにおいてキャリブレーションの有無と作業時間に相関は見られない。

#### ⑥作業時間及びキャリブレーションの有無と内部損傷正答率の関係

- ・図-3.1.36の通り、キャリブレーション有の検査ケースにおいて、作業時間が短く内部損傷正答率が高くなる傾向である。



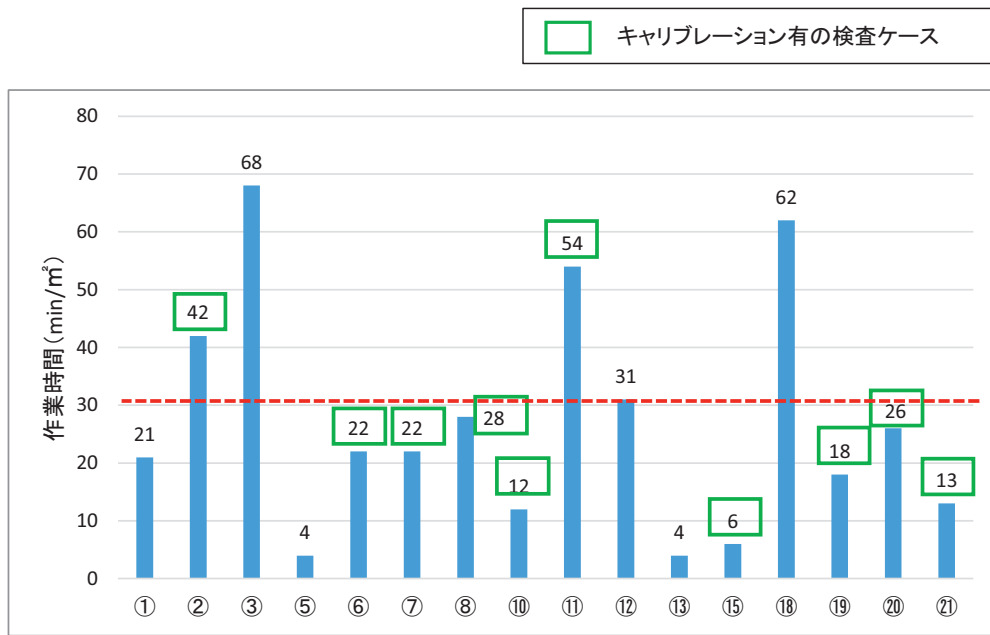


図-3.1.35 作業時間とキャリブレーションの有無の関係

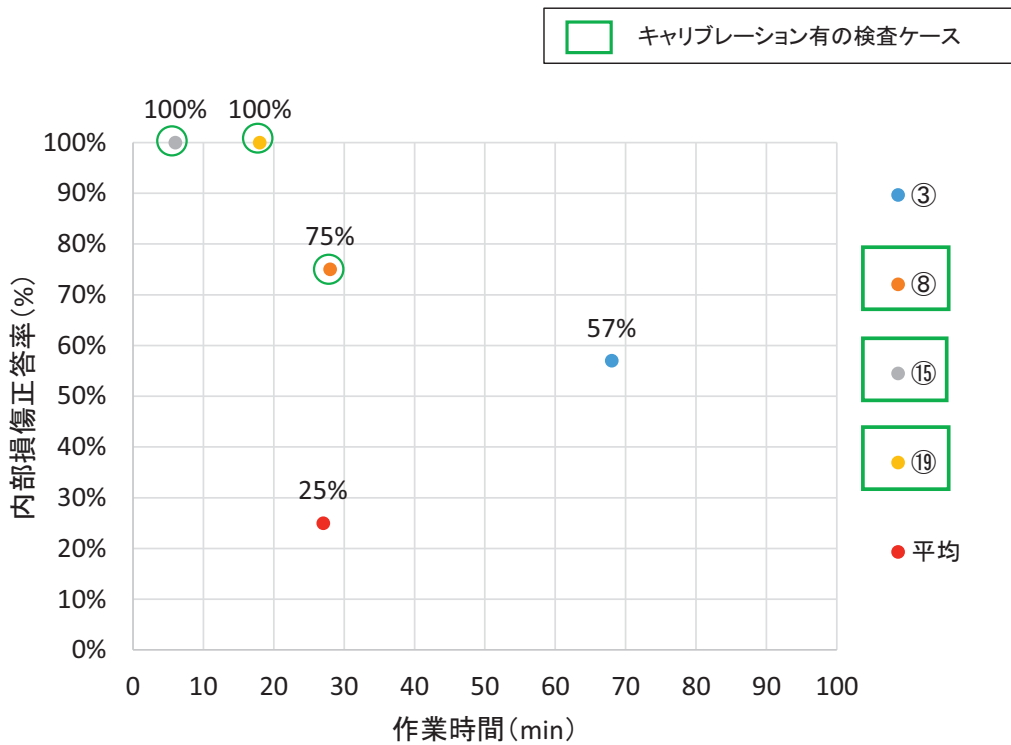


図-3.1.36 各検査ケースの作業時間と内部損傷正答率の関係

## (7) 検査要領書

検査要領書の妥当性を確認するため、共同研究者から提出された検査調書について確認し、検査調書の様式等について課題を抽出した。また、提出された検査結果を整理・分析したうえで共同研究者へ報告し、設定した評価項目や検査調書の確認項目について共同研究者へアンケート及びヒアリングを実施した。アンケート及びヒアリングは 3.2 模擬損傷供試体を用いた基礎的調査後に行ったため、検査要領書の妥当性については 3.2 で考察する。

### 3.1.9 まとめ

実橋レベルでの基礎的調査では、撤去桁から作製した実損傷供試体に対して共同研究者が非破壊検査を実施し、共同研究者より提供を受けた検査結果を整理することで実橋を想定した検査における各検査技術の基本的な検査性能（検知可能な内部損傷の種類、検査精度、作業性能）について確認した。本調査から得られた結果は以下の通りである。

- ・実損傷供試体の内部損傷に対する検査結果について損傷の種類が「一致」したのは、検査を行った 20 技術のうち 4 技術である。
- ・実損傷供試体の内部損傷に対する検査結果について「一致」した項目は「ひび割れ」、「グラウト充填不良」、「鉄筋の健全性(腐食、断面欠損、破断)」であり、事前申告された各検査技術の検知可能な損傷通りに回答された項目は「ひび割れ」、「グラウト充填不良」である。
- ・事前に検知対象と申告した通りに内部損傷を回答した検査技術は少なく、全体の内部損傷の種類の内正答率は 25%と低い。
- ・実損傷供試体の内部損傷に対する検査結果が「一致」した検査技術では、損傷位置や形状の計測誤差は比較的小さい。
- ・キャリブレーション有の検査技術において、作業時間が短く内部損傷正答率が高くなる傾向である。

しかし、実損傷供試体の解体調査の結果から、本調査で確認項目として設定した「空洞」や「うき」、「ひび割れ」等が実損傷供試体にはほとんど存在していなかったことや、経年によって供試体表面に生じているコンクリートの劣化等が検査結果に影響を及ぼしていることから、これらの要因を除いて性能を測ることも必要と考えられる。供試体に生じている内部損傷の種別や位置・形状について事前に把握することが困難な実損傷供試体を用いて初めから検査を実施した場合と何らかの事前情報がある場合で、調査の結果が変わることも想定される。そのため、検査性能を適切に把握するためには、条件を単純化した模擬供試体を用いて検証を行うことも必要と考えられる。

### 3.2 模擬損傷供試体を用いた基礎的調査

#### 3.2.1 概要

人工的にコンクリート中に内部損傷を模擬した模擬損傷供試体を国総研が作製し、それに対して共同研究者が非破壊検査を実施する。そして、国総研は共同研究者より提供された検査結果を整理する。検査結果の整理では、共同研究者から提供された検査結果と模擬損傷供試体の内部損傷の正解値（内部損傷の種類、損傷位置、損傷形状）を比較する。模擬損傷供試体における各検査技術の性能（検知可能な内部損傷の種類、検査精度、作業性能）を把握する。また、実損傷供試体に対する検査結果と比較することで、検査面のコンクリートの状態や人工的な損傷と実損傷との違いが検査性能に与える影響について把握する。

#### 3.2.2 調査対象とした検査ケース

模擬損傷供試体を用いた基礎的調査では4体の模擬損傷供試体に対して非破壊検査を実施した。各検査技術によって得られた結果は「検査ケース」と呼ぶこととし、①～②の番号を付して整理した。検査対象毎の検査ケース数を表-3.2.1に示す。各検査技術によって検知対象とする損傷の種別や適用範囲等（部材寸法や作業時間等）が異なるため、すべての供試体に対して検査することを求めておらず、検査ケース数が検査対象によって異なっている。22技術中、模擬損傷供試体を用いた基礎的調査を実施した技術は20技術である。検査は共同研究者がそれぞれ行った。

表-3.2.1 模擬損傷供試体の基礎的調査の検査ケース数

検査対象	D-1	D-2	D-3	E-1
検査ケース数	19	20	17	13

#### 3.2.3 検査に用いる供試体

##### (1) 模擬損傷供試体の作製

模擬損傷供試体を用いた基礎的調査では、供試体の図面や内部損傷の種類等の予備情報を与えない状態で検査を実施する。模擬損傷供試体は今回の共同研究での非破壊検査技術の調査の他に、今後の点検等で非破壊検査を使用する場合の検査機器の精度や作業性能等を検証していくための性能評価試験用の供試体としても使用することを想定している。そのため、作製した模擬損傷供試体の内部損傷の模擬方法および配筋状態等の詳細については本報告書では明記しない。

作製した模擬損傷供試体の種類は、ポストテンション方式 PC 桁を模擬した供試体 (D-1、D-2)、ポストテンション方式 PC 中空床版を模擬した供試体 (D-3)、ボックス



カルバートを模擬した供試体（E-1）の3種類、合計4体である。模擬損傷供試体の諸元を表-3.2.2、形状を図-3.2.1～図-3.2.3、全景を写真3.2.1～写真-3.2.3に示す。

表-3.2.2 模擬損傷供試体の諸元

橋梁名称	模擬する構造物の形式	供試体長さ	供試体幅	供試体高さ	作製数
D-1	ポストテンション方式PCT桁	7.6m	0.7m	0.5m	1体
D-2	ポストテンション方式PCT桁	7.6m	0.7m	0.5m	1体
D-3	ポストテンション方式PC中空床版	7.6m	1.0m	0.4m	1体
E-1	ボックスカルバート	2.55m	1.2m	2.55m	1体

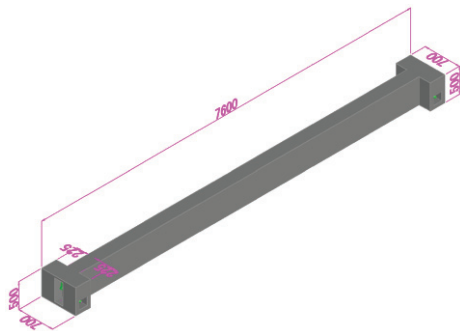


図-3.2.1 供試体の形状（D-1、D-2）



写真-3.2.1 模擬損傷供試体（D-1、D-2）

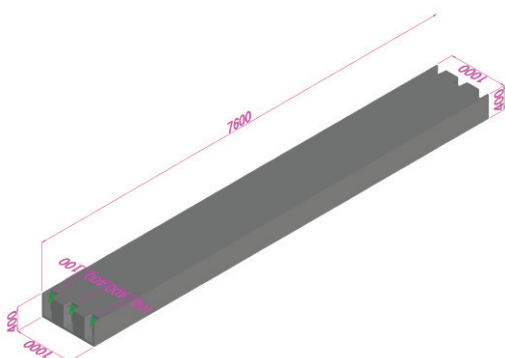


図-3.2.2 供試体の形状（D-3）



写真-3.2.2 模擬損傷供試体（D-3）

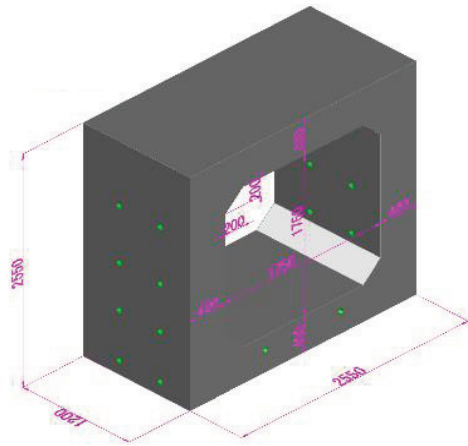


図-3.2.3 供試体の形状 (E-1)



写真-3.2.3 模擬損傷供試体 (E-1)

## (2) 模擬した内部損傷の種類

模擬損傷供試体に模擬した内部不具合の種別と損傷数を表-3.2.3 に示す。なお、模擬損傷供試体に模擬されている内部損傷の種類と損傷数の特定を避けるため、ここでは、D-1、D-2、D-3、E-1 それぞれの模擬損傷供試体にどの種別の内部損傷が模擬されているかについては明記せず、損傷数については4体の合計を示す。また、模擬した内部損傷のうち、「PC 鋼材健全性(腐食、断面欠損、破断)」を模擬した箇所では、PC 鋼材の腐食や破断、シースの損傷、定着具の損傷のうちいずれかの損傷を模擬している。同様に、「鉄筋健全性(腐食、断面欠損、破断)」は鉄筋腐食や鉄筋破断のいずれかの損傷を模擬している。

表-3.2.3 模擬損傷供試体に模擬した内部損傷種別及び損傷数

内部損傷	損傷数(箇所)
空洞	68
うき	20
ひび割れ	5
グラウト充填不良	16
PC 鋼材健全性 (腐食、断面欠損、破断)	6
鉄筋健全性 (腐食、断面欠損、破断)	29

### 3.2.4 調査項目と着目点

調査項目と着目点は表-3.2.4 の通りである。各非破壊検査技術のコンクリート構造物の詳細調査への適用性を評価するためには、評価に必要なデータが得られ、検査精度や作業性等が把握できるように適切な検査要領が用意される必要がある。本研究では、検査要領の確立も着目の一つとし検討を行った。

表-3.2.4 調査項目と着目点

調査項目	着目点
検知可能な内部損傷の種類に関する性能評価方法	模擬損傷供試体に模擬された内部損傷の正解値と検査結果を照合し、検知可能な内部損傷の種類について把握する。また、模擬損傷供試体と実損傷供試体の検査結果を比較・整理して供試体の違いによる影響を把握する。
内部損傷の位置の検査精度に関する性能評価方法	内部損傷の推定位置 (X、Y、Z) を整理し、検知可能な方向や深さについての推定精度について把握する。
内部損傷の形状の検査精度に関する性能評価方法	内部損傷の推定形状 (x、y、z) を整理し、検知可能な形状 (平面的 or 立体的) についての推定精度について把握する。
各検査技術の作業性能に関する性能評価方法	作業性 (準備・撤去を含む検査時間、キャリブレーションの有無) について把握する。
検査要領書	確認項目や検査調書の様式等に不備がないか検査結果と併せて整理する。

### 3.2.5 試験実施条件

本調査では、実橋レベルでの基礎的調査と同様に、完成図等がない場合の橋梁を想定して、予備情報 (図面) のない条件で検査を実施した。供試体設置場所は屋外とした。検査時間は D-1、D-2、D-3 の 3 体に対して 3.5 時間 (0.5 日)、E-1 の 1 体に対して 3.5 時間 (0.5 日) を見込み、複数の共同研究者が同時に検査を行わないようにした。また、供試体に跡が残るようなマーキングは禁止とした。検査対象面はすべての面とした。また、試験の公平性及び客観性を確保するため、試験開始時から終了時まで立会者を配置した。

### 3.2.6 検査要領

検査に参加した共同研究者には、検査要領書を事前に配布し、検査手順や検査項目、結果の報告について通知した。この検査要領に従って各共同研究者が非破壊検査を実施した。以下に検査要領書の内容を示す。

#### (1) 検査手順

検査手順は実橋レベルでの基礎的調査（図-3.1.14）と同様とし、検査は検査機器の準備から検査調書の提出までを一連の手順で行うこととした。

#### (2) 確認項目

確認項目は実橋レベルでの基礎的調査（表-3.1.5）と同様とした。

#### (3) 検査調書

検査調書は 3.1.6 (3) と同様とした。

#### (4) 結果の報告

結果の報告は検査調書の提出をもって行うこととし、検査終了後概ね 1 週間以内に提出を求めた。

### 3.2.7 検査結果の整理

#### (1) 検査結果の評価方法

##### 1)用語の定義

- ①「検知対象」とは、検査機器の原理や仕様から検知できる（または検知できると想定される）内部損傷とした。
- ②「一致」とは、推定された内部損傷の種類と、解体調査結果によって得られた内部損傷の種類が一致した場合とした。
- ③「不一致」とは、推定された内部損傷の種類と、解体調査結果によって得られた内部損傷の種類が一致しなかった場合とした。
- ④「空振」とは、推定された位置に内部損傷が存在しなかった場合とした。
- ⑤「検知不可」とは、検知対象を推定できなかった場合とした。
- ⑥「正答率」とは、検査技術の内部損傷の検知性能を表す指標として、下式のように定義した。

正答率（内部損傷の種類毎）

$$= \text{一致 (②)} / (\text{一致 (②)} + \text{不一致 (③)} + \text{空振 (④)})$$

##### 2)計測誤差の評価

計測誤差は、損傷位置に関する誤差と損傷形状に関する誤差で評価した。

損傷位置の誤差は、内部損傷の判定が「一致」であった計測結果について算出した。推定された内部損傷の座標（X、Y、Z）と供試体に模擬された内部損傷の座標との差から誤差を算出した。損傷位置の計測誤差算出イメージを図-3.2.4 に示す。

損傷形状の誤差は、内部損傷の判定が「一致」であった計測結果について算出した。

推定された内部損傷の形状寸法（ $x$ 、 $y$ 、 $z$ ）と実際の内部損傷の形状寸法の差を誤差とした。

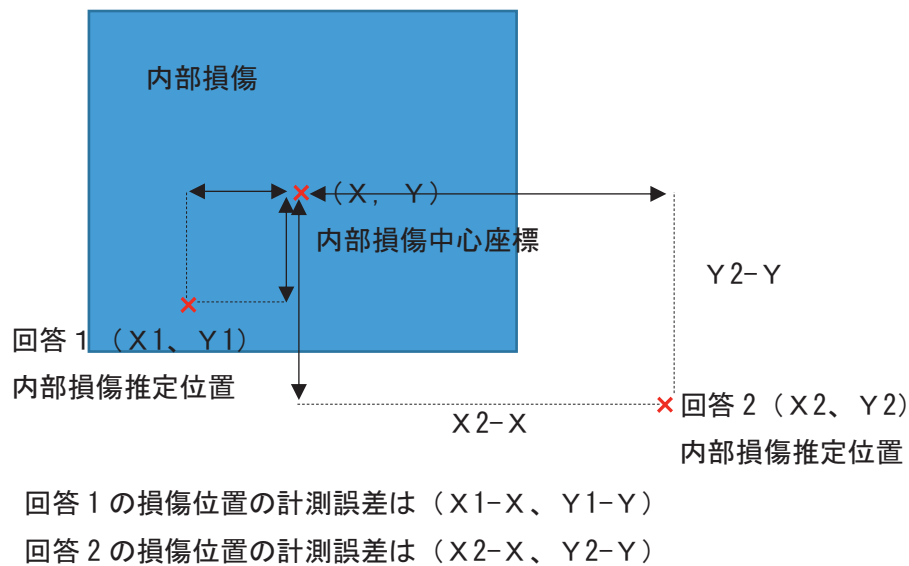


図-3.2.4 損傷位置の計測誤差算出方法

### 3)作業性の評価

予備情報（図面）や内部損傷の種類等の予備情報がない状態で検査を行った場合の作業時間への影響、さらに作業時間が正答率に及ぼす影響について評価した。

### 4)作業要領の妥当性の評価

全ての検査終了後、共同研究者にアンケートとヒアリングを行い、本調査で用いた供試体、検査時間、検査手順、試験条件、結果の報告方法等について意見を収集し、作業要領の妥当性について評価した。

## (2) 内部損傷の推定結果

本調査で対象とした 4 体の模擬損傷供試体に対する内部損傷の推定箇所数を表-3.2.5 に示す。

- ・本調査では「PC 鋼材健全性(腐食、断面欠損、破断)」、「鉄筋健全性(腐食、断面欠損、破断)」が推定された検査ケースはない。
- ・「ひび割れ」と「残存プレストレス量」が推定されたのはそれぞれ 1 ケースのみである。
- ・内部損傷が推定された検査ケースが多かったは、「空洞」、「グラウト充填不良」である。

表-3.2.5 検査ケース別の内部損傷の推定箇所数（全模擬損傷供試体）

検査ケース	内部損傷								
	空洞	うき	ひび割れ	グラウト 充填不足	PC鋼材健全性 (腐食、断面欠 損、破断)	鉄筋健全性 (腐食、断面欠 損、破断)	残存 プレス トレス量	異物	内部欠陥 又は不明
①									5
②									
③			3						
④									
⑤									25
⑥				5					
⑦							18		
⑧	10								
⑨	16								4
⑩		3							
⑪	26								2
⑫				1					15
⑬									
⑭	5			1					
⑮				13					
⑯									
⑰									
⑱									11
⑲	12			6					
⑳	21			19					
㉑		3							
㉒									

単位：箇所

### (3) 検知可能な内部損傷

各検査ケースと模擬損傷供試体の内部損傷を照合し、検知可能な内部損傷および正答率について整理した。まず、各非破壊検査技術が検知対象とする項目を検知できているか把握するために、事前に実施したアンケートによる自己申告結果との対比を行った。対比結果を表-3.2.6 に示す。次に、模擬損傷供試体を用いた場合の内部損傷の正答率について整理した。正答率の整理結果を表-3.2.7、図-3.2.5 に示す。さらに実損傷供試体の検査結果と模擬損傷供試体の検査結果を比較することで、検査面のコンクリートの状態や人工的な損傷と実損傷との違いが検査性能に与える影響について確認した。比較結果を表-3.2.8 に示す。

#### 1) 検知可能な内部損傷

- ・表 3.2.6 の通り、本調査で検査を実施した検査技術において、内部損傷の判定が「一致」したのは「空洞」、「うき」、「グラウト充填不良」である。
- ・自己申告通りに回答された内部損傷は「空洞」、「うき」、「グラウト充填不良」であり、「空洞」は 4 ケース、「うき」は 1 ケース、「グラウト充填不良」は 2 ケースである。
- ・それ以外の内部損傷については、「不一致」または「検知不可」である。
- ・自己申告では検知対象としていないが、「空洞」で 1 ケース、「グラウト充填不良」で 2 ケースの判定が「一致」している。

表-3.2.6 検査ケース別の検知可能な内部損傷の整理

○：検知対象 ◎：一致 △：不一致  
◇：未特定 ×：検知不可  
空欄：不参加または計測データなし

内部損傷 検査ケース	空洞		うき		ひび割れ		グラウト 充填状態		PC鋼材の 健全性 (腐食、断面 欠損、破断)		鉄筋の 健全性 (腐食、断面 欠損、破断)		残存プレ ストレス量		その他	
	事前申告	検査結果	事前申告	検査結果	事前申告	検査結果	事前申告	検査結果	事前申告	検査結果	事前申告	検査結果	事前申告	検査結果	事前申告	検査結果
①	○	×	○	×	○	×										
②	○	×	○	×	○	×										
③	○	×	○	△	○	×										
④									○		○					
⑤	○	△	○	△												
⑥							○	×								
⑦													○	×		
⑧		◎					○	×								
⑨	○	◎	○	△	○	△	○	◇								
⑩			○	×												
⑪	○	◎	○	△			○	×		○	×					
⑫																
⑬																
⑭	○	◎		△				◎		△						
⑮							○	◎		△		△				
⑯							○									
⑰							○									
⑱	○	×	○	×												
⑲	○	◎					○	◎								
⑳	○	△		△				◎		△						
㉑	○	×	○	◎												
㉒	○	×	○	×												

2)内部損傷の正答率

- ・表-3.2.7、図-3.2.5 に示す通り、内部損傷の正答率は「空洞」と「グラウト充填不良」で高く、全体の内部損傷正答率は56%であり、実橋レベルでの基礎的調査での正答率25%と比較して高い結果である。
- ・「空洞」について「一致」したのは5ケースであり、正答率は40~100%である。実損傷供試体はわずかに小さな気泡が生じているだけだったため、「空洞」を推定した検査技術はなかったが、模擬損傷供試体では比較的大きな空洞を模擬しているため、検知し易かったと考えられる。
- ・「うき」について「一致」したのは1ケースであり、正答率は100%である。
- ・「ひび割れ」について「一致」した検査ケースはない。
- ・「グラウト充填不良」について「一致」したのは5ケースであり、正答率は53~100%である。
- ・「PC鋼材健全性(腐食、断面欠損、破断)」と「鉄筋健全性(腐食、断面欠損、破断)」、「残存プレストレス量」について「一致」した検査ケースはない。「PC鋼材健全性(腐食、断面欠損、破断)」と「鉄筋健全性(腐食、断面欠損、破断)」については、



腐食や破断など模擬している内部損傷の範囲や形状が「空洞」や「グラウト充填不良」等と比較して小さいために、推定できなかった可能性が考えられる。

表-3.2.7 検査ケースの内部損傷正答率

内部損傷 検査ケース	空洞	うき	ひび割れ	グラウト 充填不良	PC鋼材 健全性 (腐食、断面 欠損、破断)	鉄筋 健全性 (腐食、断面 欠損、破断)	残存プレス トレス量	全体
①								
②								
③			0%(0/3)					0%(0/3)
④								
⑤								
⑥				0%(0/5)				0%(0/5)
⑦							0%(0/18)	0%(0/18)
⑧	100%(10/10)							100%(10/10)
⑨	69%(11/16)							69%(11/16)
⑩		0%(0/3)						0%(0/3)
⑪	92%(24/26)							92%(24/26)
⑫				0%(0/1)				0%(0/1)
⑬								
⑭	40%(2/5)			100%(1/1)				50%(3/6)
⑮				85%(11/13)				85%(11/13)
⑯								
⑰								
⑱	100%(12/12)			100%(6/6)				100%(18/18)
⑳	0%(0/21)			53%(10/19)				25%(10/40)
㉑		100%(3/3)						100%(3/3)
㉒								
合計								56%(90/162)

※かっこ内：内部損傷一致数/回答数

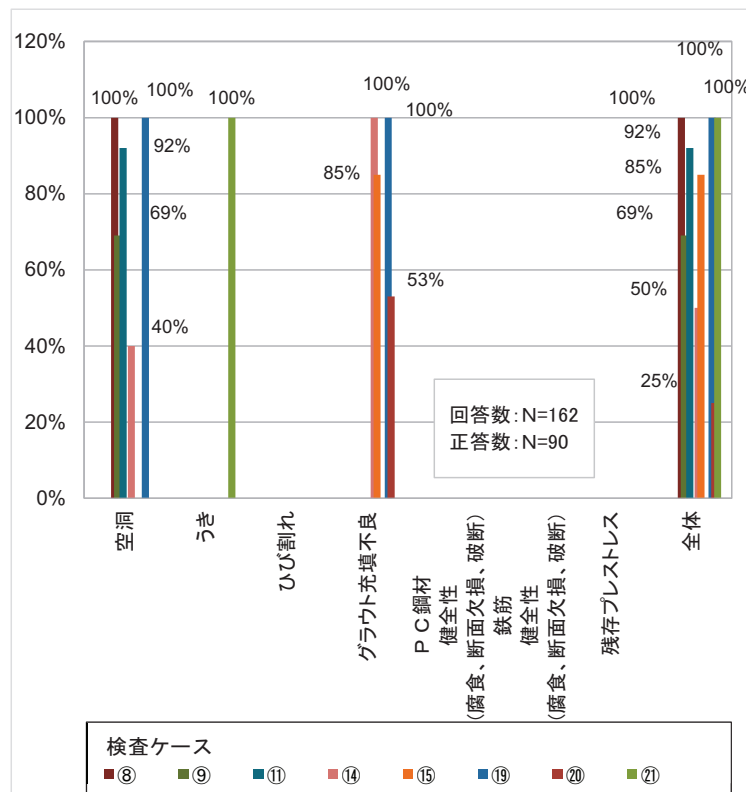


図-3.2.5 内部損傷の正答率

3)実損傷供試体の検査結果との比較

- ・表-3.2.8 のとおり、実損傷供試体の検査結果と模擬損傷供試体の検査結果を比較すると、7ケースで検知性能が向上している。
- ・反対に、2ケースで検知性能が低下している。

表-3.2.8 実損傷供試体と模擬損傷供試体の検知可能な損傷の整理

○：検知対象    ◎：一致    △：不一致  
◇：未特定    ×：検知不可  
空欄：不参加または計測データなし

検査技術 \ 損傷	空洞		うき		ひび割れ		グラウト 充填状態		PC鋼材の 健全性 (腐食、断面 欠損、破断)		鉄筋の 健全性(腐 食、断面欠 損、破断)		残存プレ ストレス量	
	実損傷	模擬	実損傷	模擬	実損傷	模擬	実損傷	模擬	実損傷	模擬	実損傷	模擬	実損傷	模擬
①	×	×	×	×	×	×								
②	×	×	×	×	×	×								
③	△	×	×	△	◎	×								
④														
⑤	×	△	×	△										
⑥							×	×						
⑦													×	×
⑧		◎					◎	×		◎				
⑨		◎		△		△		◇						
⑩				×										
⑪	△	◎	×	△			×	×		×	×			
⑫														
⑬														
⑭	×	◎		△				◎		△				
⑮							◎	◎		△		△		
⑯														
⑰														
⑱	×	×	×	×										
⑲	×	◎					◎	◎						
⑳	×	△		△				◎		△				
㉑	×	×	×	◎										
㉒		×		×										

以上の通り、模擬損傷供試体を用いた検査では、自己申告通りの内部損傷が推定されたのは8ケースで、全体の内部損傷正答率は56%であった。これは、実損傷供試体を用いた検査よりも、内部損傷の判定が「一致」であった検査ケース数並びに内部損傷正答率ともに増加している。この要因として、模擬損傷供試体には撤去桁から作製した実損傷供試体に見られるようなコンクリート表面の劣化（凹凸等）が存在しないため、検査機器の操作や入出力に影響を及ぼしにくいこと等が考えられる。一方で、内部損傷を検出できなくなった検査技術も存在した。これは、実損傷供試体と比較して供試体の寸法が小さくなったことで、検査原理によっては反射波などの影響を受けたり、隣接する損傷や鉄筋などの影響を受けたりすることで正確な判定ができなくなる等が要因とな

っている可能性が考えられる。

#### (4) 内部損傷の位置 (X、Y、Z)

内部損傷の位置に関する検査ケースを座標値 (X、Y、Z) で整理し、模擬損傷供試体の内部損傷位置の座標と照合することで、検査精度について整理した。座標 (X、Y、Z) は検査面に対して (横方向、縦方向、深さ方向) を意味する。内部損傷の判定が「一致」であった検査ケースの計測誤差について整理した。計測誤差度数分布を表-3.2.9～3.2.11、図-3.2.6～3.2.8、計測誤差分布を図-3.2.9～3.2.13 に示す。なお、平面 (XY) の計測誤差分布については、X 座標と Y 座標の両方の結果が得られているもののみ図示している。

- ・「空洞」の計測誤差は X、Y、Z いずれの方向においても、誤差-50～50 mmを中心に概ね山なりの分布となっており、誤差が大きくなるほど度数は小さくなる傾向である。
- ・「うき」については、内部損傷の判定が「一致」であった検査ケースが少なかったため明確な傾向は見られない。
- ・「グラウト充填不良」については、Y 方向と Z 方向で誤差が小さく、X 方向でばらつきが大きい傾向である。
- ・「空洞」の計測誤差分布は、検査ケースによって分布に偏りが見られる。

表-3.2.9 空洞位置の計測誤差度数分布

計測誤差(mm)	X	Y	Z
~-301	0	1	0
-300~-251	0	1	0
-250~-201	0	5	1
-200~-151	0	5	0
-150~-101	2	4	0
-100~-51	8	6	5
-50~-1	16	11	7
0	7	4	5
1~50	12	12	7
51~100	8	6	5
101~150	1	2	13
151~200	2	0	4
201~250	2	1	0
251~300	0	1	0
301~	1	0	0

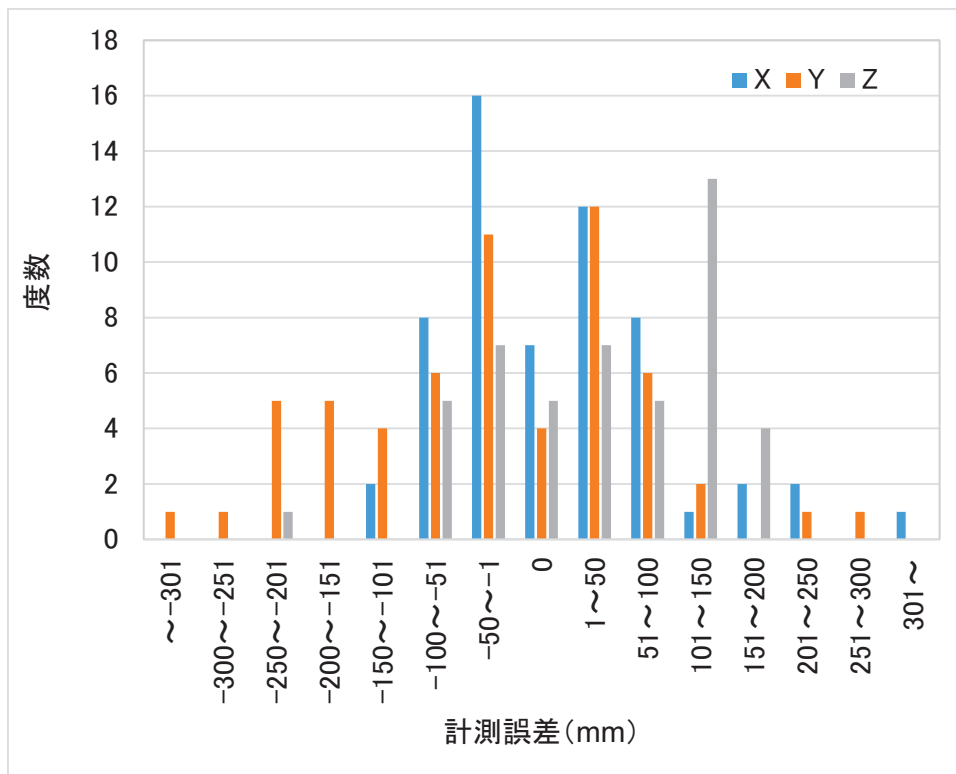


図-3.2.6 空洞位置の計測誤差度数分布

表-3.2.10 うき位置の計測誤差度数分布

計測誤差(mm)	X	Y
~-301	0	0
-300~-251	0	0
-250~-201	0	0
-200~-151	0	1
-150~-101	0	0
-100~-51	0	0
-50~-1	1	0
0	1	1
1~50	0	0
51~100	0	1
101~150	0	0
151~200	0	0
201~250	0	0
251~300	1	0
301~	0	0

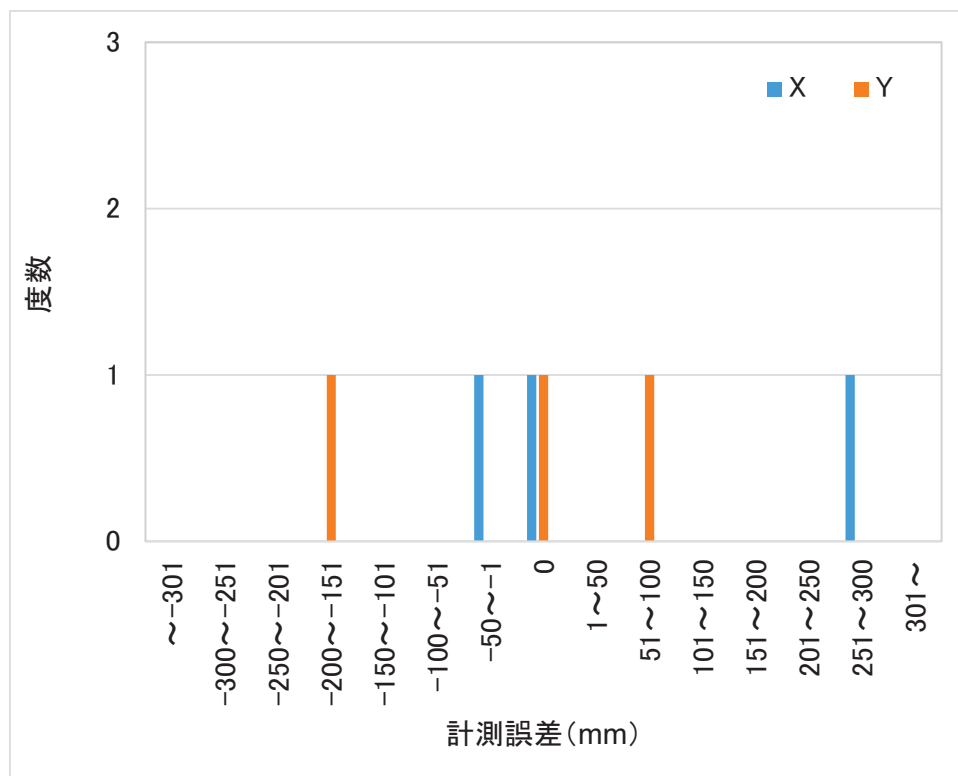


図-3.2.7 うき位置の計測誤差度数分布

表-3.2.11 グラウト充填不良位置の計測誤差度数分布

計測誤差(mm)	X	Y	Z
~-301	1	0	0
-300~-251	0	0	0
-250~-201	0	0	0
-200~-151	0	0	0
-150~-101	1	2	0
-100~-51	0	2	1
-50~-1	2	2	0
0	0	0	0
1~50	0	2	3
51~100	1	0	0
101~150	0	0	0
151~200	1	0	0
201~250	0	0	0
251~300	0	0	0
301~	2	0	0

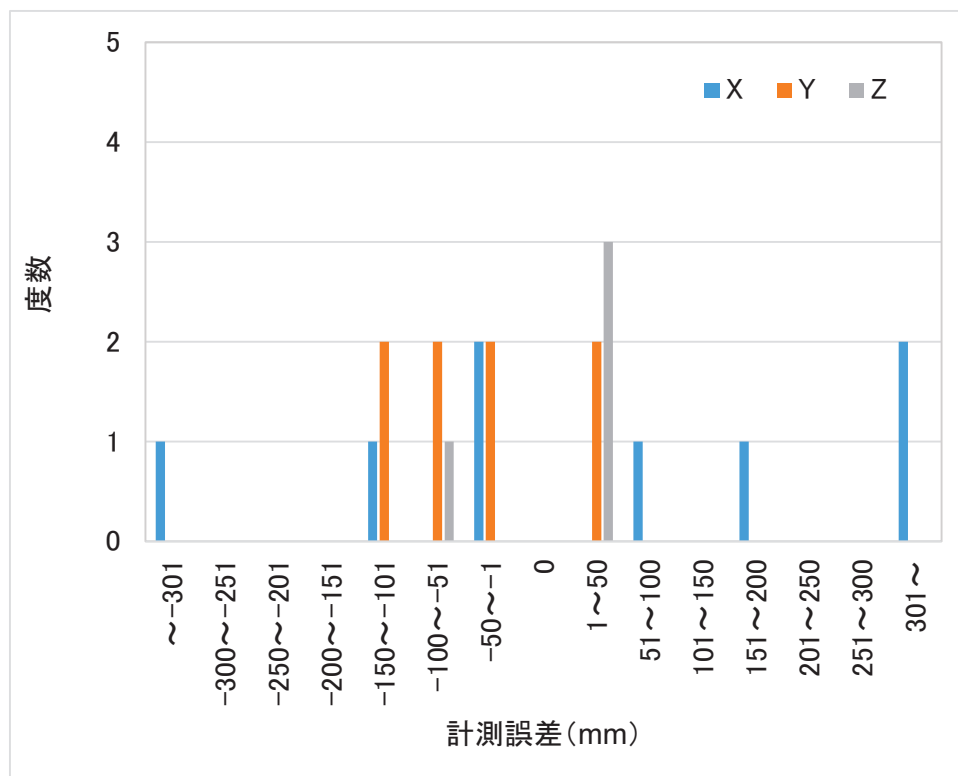


図-3.2.8 グラウト充填不良位置の計測誤差度数分布

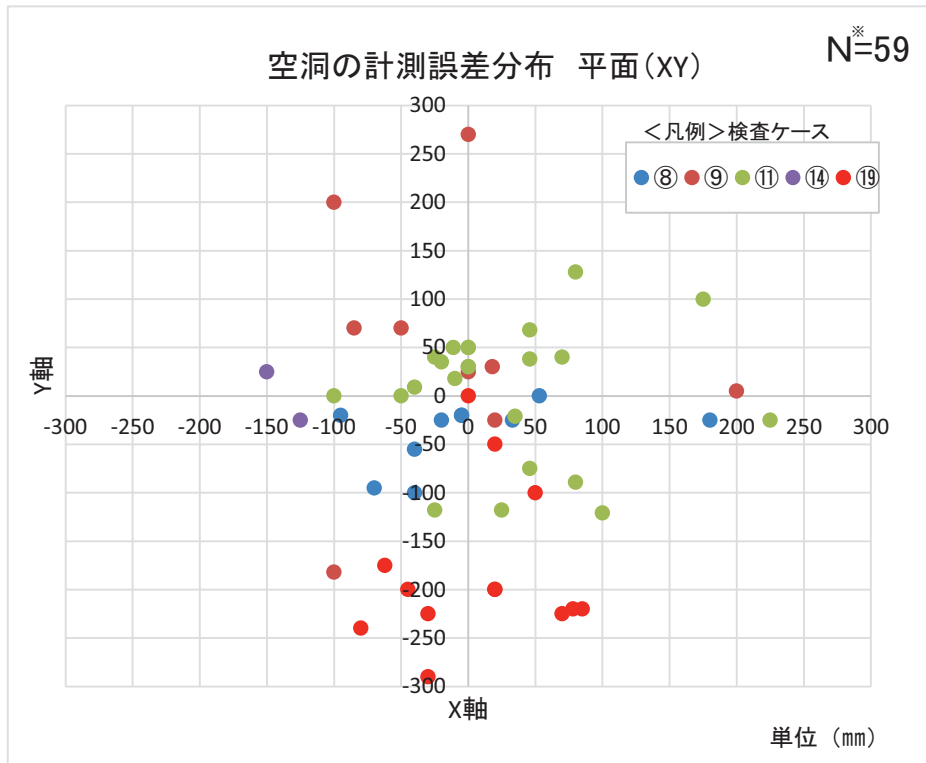


図-3.2.9 空洞位置 計測誤差分布 平面 (XY)

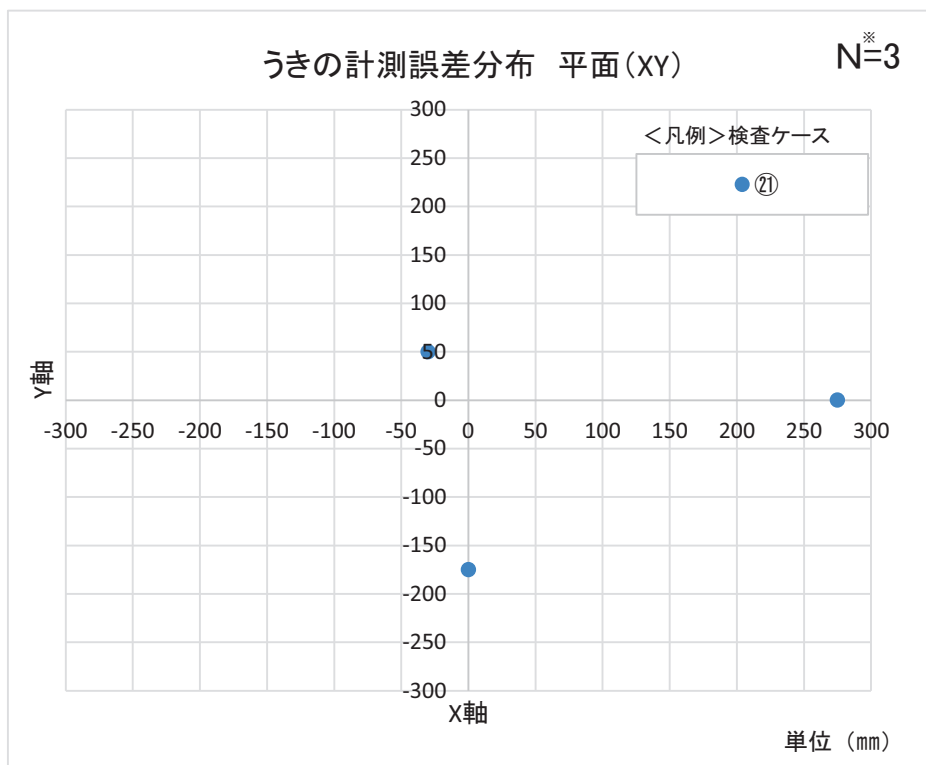


図-3.2.10 うき位置 計測誤差分布 平面 (XY)

※Nはサンプル数 (点が重なっている場合あり)

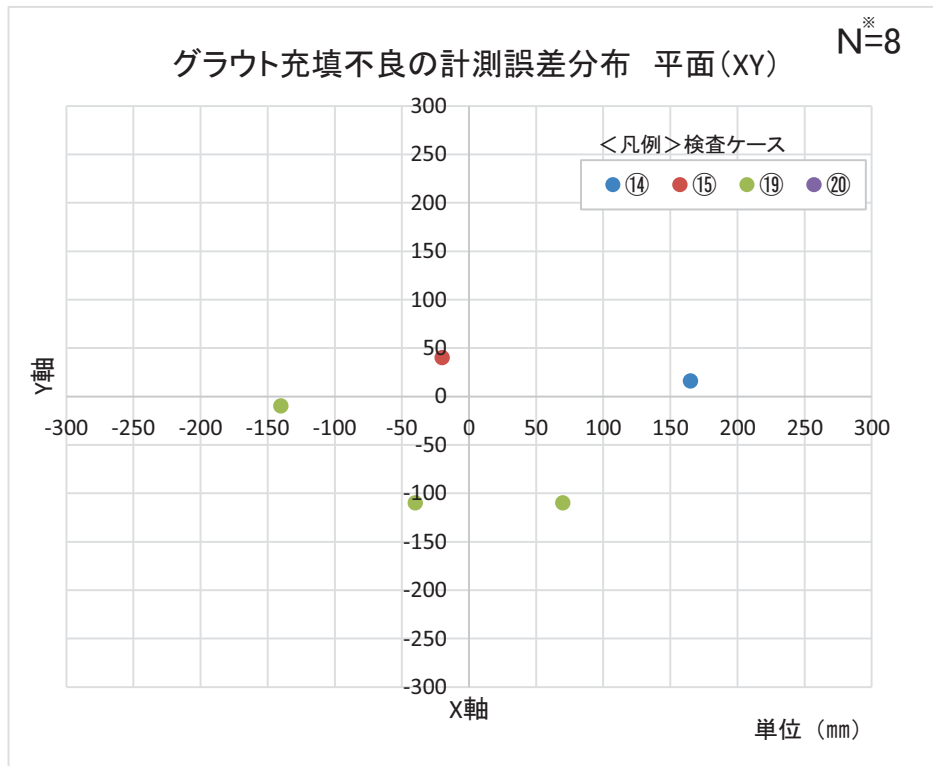


図-3.2.11 グラウト充填不良位置 計測誤差分布 平面 (XY)

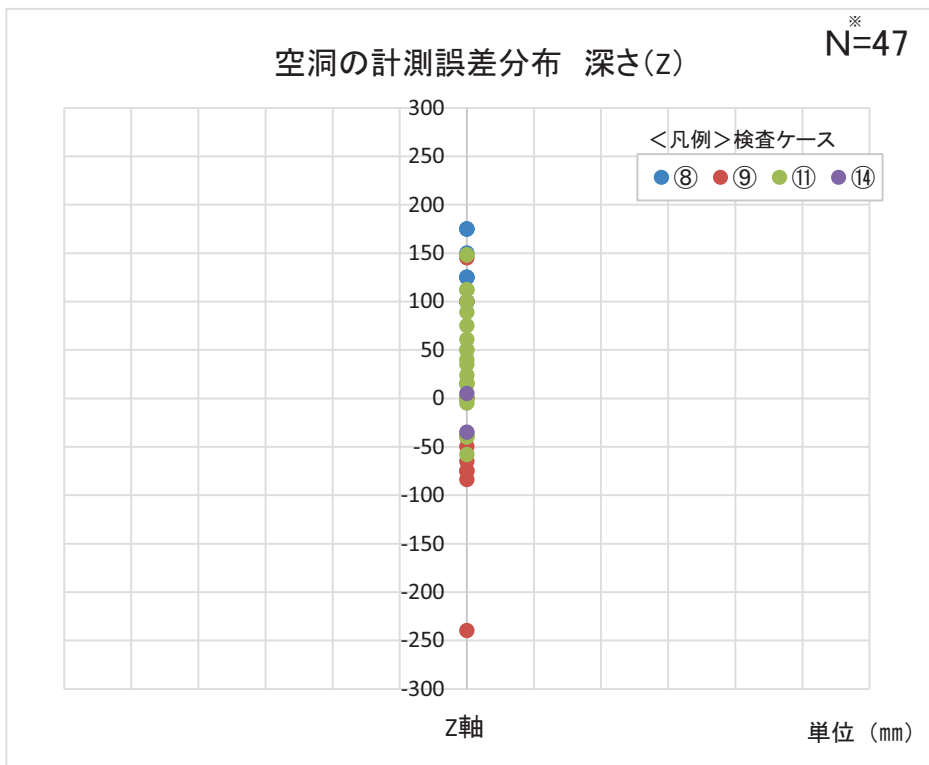


図-3.2.12 空洞位置 計測誤差分布 深さ (Z)

※Nはサンプル数 (点が重なっている場合あり)



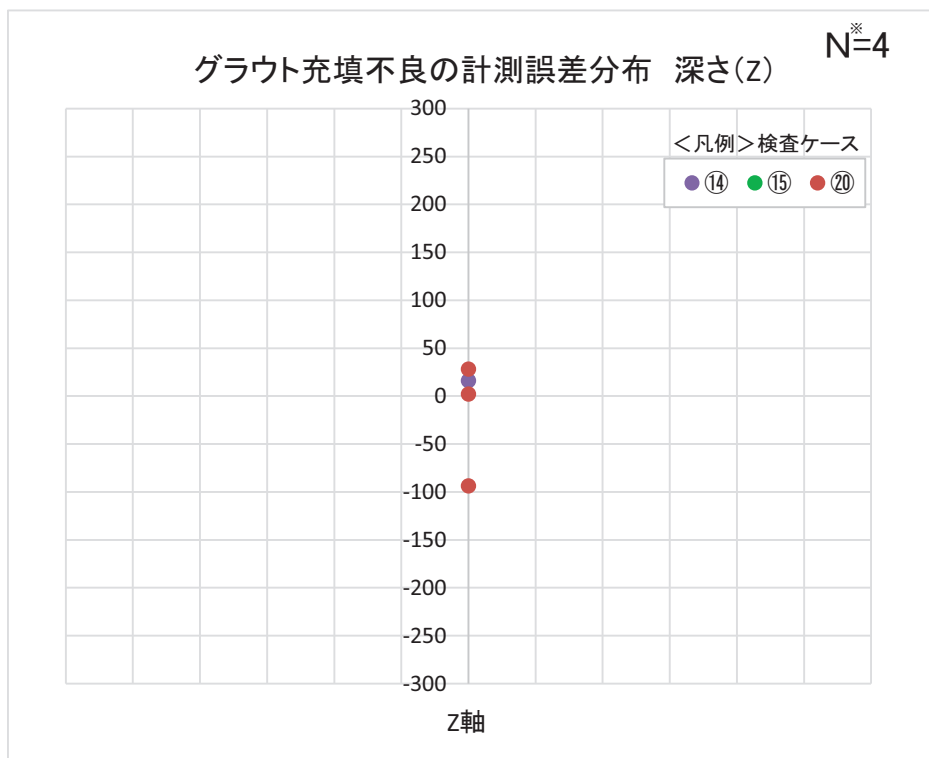


図-3.2.13 グラウト充填不良位置 計測誤差分布 深さ (Z)

※N はサンプル数 (点が重なっている場合あり)

#### (5) 内部損傷の形状誤差 (x、y、z)

内部損傷の形状に関する検査ケースを寸法値 (x、y、z) で整理し、模擬損傷供試体の内部損傷位置の座標と照合することで、検査精度について整理した。寸法値 (x、y、z) はそれぞれ横方向、縦方向、深さ方向を意味する。内部損傷の判定が「一致」であった検査ケースの計測誤差について整理した。計測誤差度数分布を表-3.2.12～3.2.13、図-3.2.14～3.2.15、計測誤差分布を図-3.1.16～3.2.17 に示す。

- ・「空洞」の計測誤差は x 方向 (横方向)、y 方向 (縦方向) とともに、約 80%が-50～50 mmの誤差範囲に収まっており、ばらつきは小さい傾向である。z 方向 (深さ方向) については検知できていない。
- ・「うき」については、内部損傷の判定が「一致」であった検査ケースが少なかったため明確な傾向は見られない。

表-3.2.12 空洞形状の計測誤差度数分布

計測誤差(mm)	x	y
~-301	0	0
-300~-251	0	0
-250~-201	0	0
-200~-151	0	0
-150~-101	0	0
-100~-51	0	0
-50~-1	11	13
0	33	31
1~50	1	1
51~100	5	6
101~150	4	3
151~200	0	0
201~250	0	0
251~300	0	0
301~	0	0

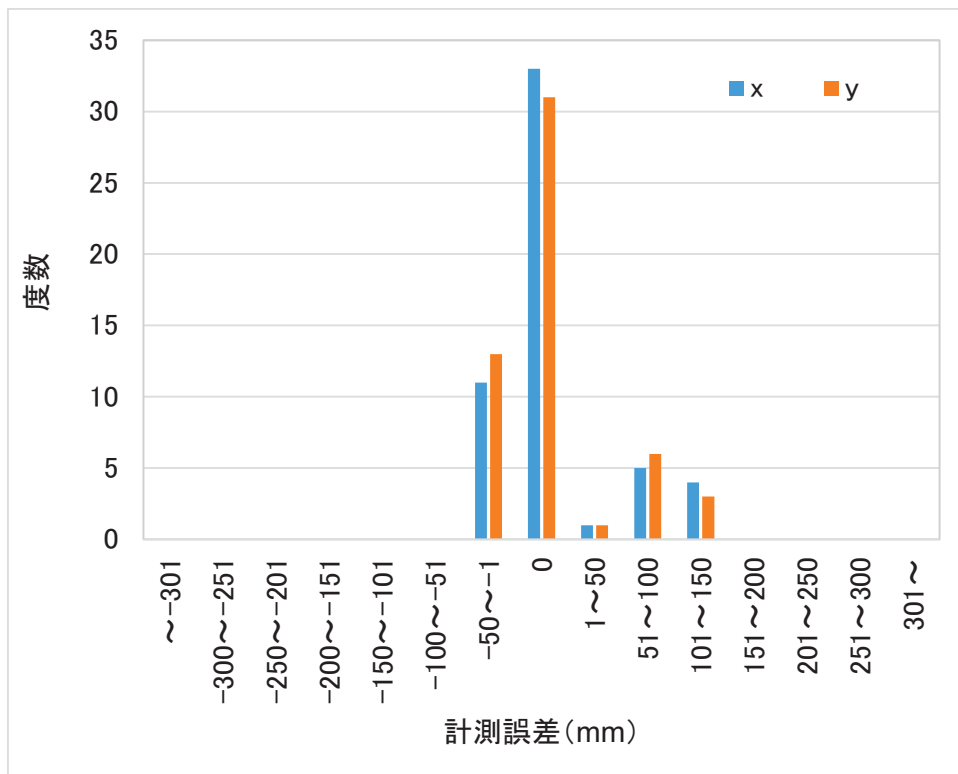


図-3.2.14 空洞形状の計測誤差度数分布

表-3.2.13 うき形状の計測誤差度数分布

計測誤差(mm)	x	y
~-301	0	0
-300~-251	0	0
-250~-201	0	0
-200~-151	0	0
-150~-101	0	0
-100~-51	1	1
-50~-1	0	0
0	2	2
1~50	0	0
51~100	0	0
101~150	0	0
151~200	0	0
201~250	0	0
251~300	0	0
301~	0	0

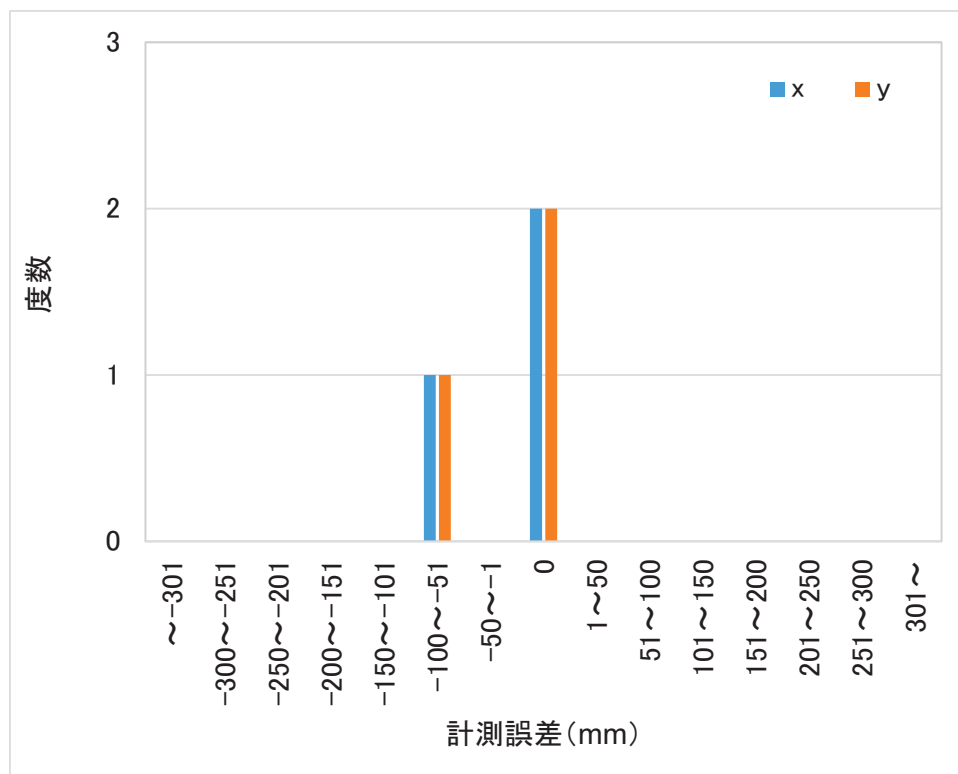


図-3.2.15 うき形状の計測誤差度数分布

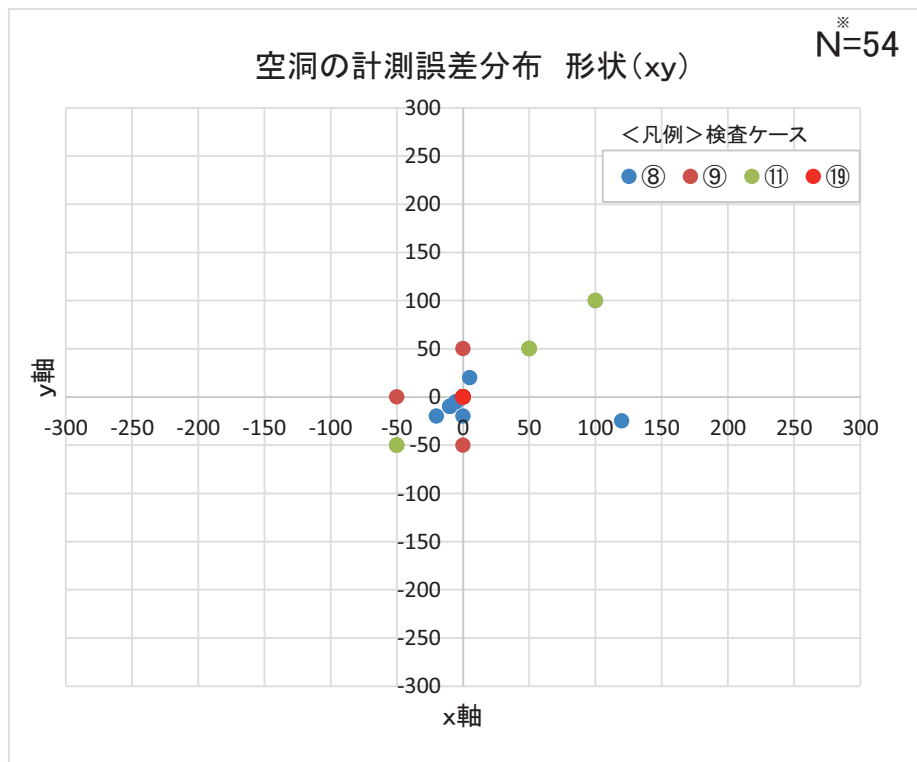


図-3.2.16 空洞形状 計測誤差分布 平面 (XY)

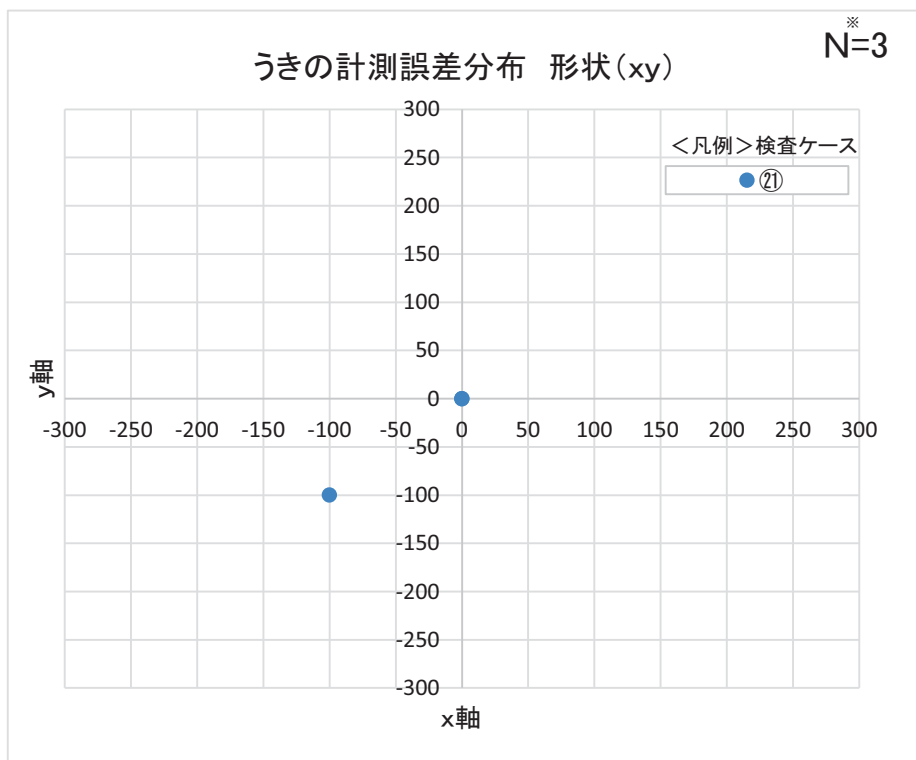


図-3.2.17 うき形状 計測誤差分布 平面 (XY)

※Nはサンプル数(点が重なっている場合あり)

## (6)各検査技術の作業性能

各検査ケースの検査機器の情報（形状寸法、重量等）、作業性（準備・撤去を含む検査時間、キャリブレーションの有無）について、事前実施したアンケート結果及び検査結果から表-3.2.14 のとおり整理した。なお、各検査機器の情報（形状寸法、重量等）については、実橋レベルでの基礎的調査と同様のため省略し、作業性（準備・撤去を含む検査時間、キャリブレーションの有無）のみ整理した。また、各検査ケースの作業時間と内部損傷の正答率の関係について図-3.2.19 のとおり整理した。

### 1)検査機器

- ・ 3.1.8(6)の表-3.1.14 を参照のこと。

### 2)作業性

#### ①キャリブレーションの有無と必要な時間

- ・ 3.1.8(6)の 2)①を参照のこと。

#### ②検査以外に要した時間（準備+撤去）

- ・ 準備の時間が 30 分以上の検査ケースは 7 ケースあり、最も長いもので 90 分である。準備の時間が短いものは 6 分である。
- ・ 撤去の時間が 30 分以上の検査技術は 7 ケースあり、いずれも 30 分である。撤去の時間が短いものは 6 分である。

#### ③作業人数

- ・ 作業人数が多かった検査ケースは 4 人であり、少ないものは 1 人である。

#### ④作業時間

- ・ 検査ケース全体での 1m<sup>2</sup>当たりの作業時間は平均で約 30 分/m<sup>2</sup>である。
- ・ 1m<sup>2</sup>当たりの作業時間が短かった検査ケースは 2 分/m<sup>2</sup>であり、最も長かったのは 111 分/m<sup>2</sup>で平均値を大きく上回る結果である。

#### ⑤作業時間とキャリブレーションの有無の関係

- ・ 図-3.2.18 の通り、各検査ケースにおいてキャリブレーションの有無と作業時間に相関は見られない。

#### ⑥作業時間及びキャリブレーションの有無と内部損傷正答率の関係

- ・ 図-3.2.19 の通り、キャリブレーション有の検査ケースにおいて、キャリブレーション有の方が正答率は高くなる傾向である、作業時間と内部損傷正答率に相関は見られない。

以上のとおり、撤去桁と模擬供試体の違いによる作業時間への影響は確認されなかった。また、撤去桁の場合と同様に、作業時間が長く、キャリブレーションを必要とする検査技術の方が正答率は高くなる結果であった。以上を踏まえると、非破壊検査

技術の作業性能については、模擬供試体を用いる場合でも適切に評価可能であると考えられる。

表-3.2.14 各検査技術の使用検査機器及び作業性

評価項目	検査ケース																				平均
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑳	㉑	
キャリブレーションの有無	無	有	無	有	無	有	有	有	無	有	有	無	無	無	無	有	有	有	有	有	有
キャリブレーションに必要な時間 (min)	-	約5	-	数分	-	約10	約10	不明	-	30~60	臨時	-	-	-	-	約5	約5	約5	5	1	3~5
検査機器の準備時間 (min)	30	90	-	-	6	24	24	60	12	90	30	30	6	6	12	12	12	6	30	20	-
検査時間(1操働当たり平均)(min)	1	-	-	-	30	-	-	4	60	25	60	15	6	6	12	12	12	18	9	-	-
作業性																					
検査時間(1操働体当たり平均)(min)	-	90	-	-	-	18	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
検査機器の撤去時間 (min)	30	30	-	-	6	30	30	60	12	60	30	12	6	6	6	6	6	6	15	20	21
作業人数(人)	3	1.3	-	-	2	4	4	4	2	2	3	3	1	2	2	2	2	2	2	1	2
推定操働数(検査対象のみ)	5	-	-	-	42	-	-	22	38	3	40	14	15	19	7	6	6	16	5	-	18
延べ作業時間 (min x 人)	735	273	-	-	2616	288	1312	4752	750	7920	1134	138	552	276	216	216	624	360	130	-	1316
検査面積 (㎡)	81.06	20	-	-	81.06	11.29	11.78	81.06	53.09	81.06	81.06	81.06	81.06	81.06	11.78	11.78	11.78	11.78	33.86	10	46
1㎡当たり作業時間 (min/㎡)	9	14	-	-	32	26	26	111	59	14	98	14	2	7	8	18	53	11	13	30	30
内部操働正答率(%)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	69%	0%	92%	0%	0%	50%	85%	0%	100%	25%	100%	0%	56%



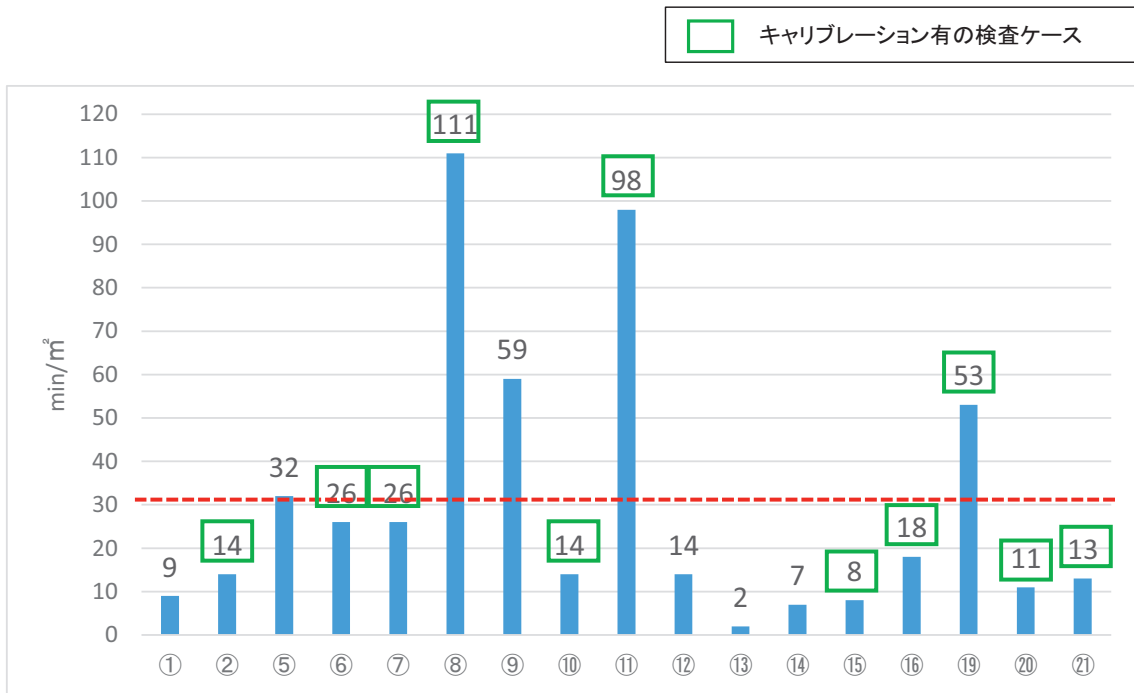


図-3.2.18 作業時間とキャリブレーションの有無の関係

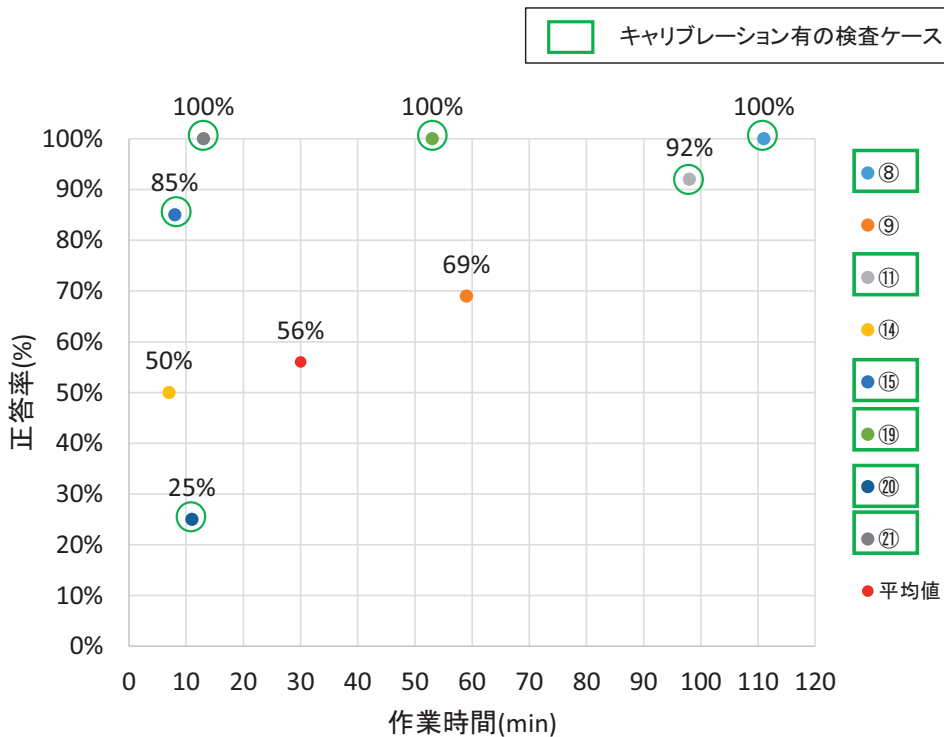


図-3.2.19 各検査ケースの作業時間と内部損傷正答率の関係

## (7) 検査要領書

検査要領書の妥当性を確認するため、共同研究者から提出された検査調書について確認し、検査調書の様式や検査方法等について課題を抽出した。また、提出された検査結果を整理・分析したうえで共同研究者へ報告し、設定した評価項目や検査調書の確認項目について共同研究者へアンケート及びヒアリングを実施した。本検証で用いた検査調書と結果報告様式は巻末の付属資料3に示す。共同研究者からのアンケート及びヒアリング内容を整理した結果を表-3.2.15に示す。整理した結果から抽出した検査調書に関する課題と検査方法や供試体に関する課題を以下に示す。また、アンケート及びヒアリング結果を踏まえて、性能評価手法に活用するために修正を加えた検査調書と結果報告様式を巻末の付属資料2に示す。

### 1) 検査調書に関する課題

- ・内部損傷を記入するための図面（展開図）の表示方法がわかりにくく、原点と座標の取り方に関する説明が不十分であった。
- ・検査項目に対して検査技術の検知の対象外なのか、供試体の条件や検査条件等によって検知することが不可能なのか明確でない回答があった。
- ・検査対象とする供試体の配置や検査条件等が試験当日まで明示されなかったため、適切な準備や判定ができず、検査時間が不足している場合が見受けられた。

### 2) 検査方法や供試体に関する課題

- ・他の内部損傷が検査結果に及ぼす影響が大きく、目的とする内部損傷を検知できない場合があるため、隣接する内部損傷が検査結果に及ぼす影響を確認する必要がある。
- ・実橋の調査では、構造物の形状寸法、配筋状況、ケーブル位置、使用材料などの情報を事前に入手するのが一般的であるが、それらを事前に入手できなかった場合の検査結果への影響を確認する必要がある。
- ・1種類の検査技術で橋梁全体を調査することは稀であり、調査範囲や検査対象とする損傷種類を限定した検査も実施する必要がある。
- ・検査技術によっては、検査空間が狭小で適切な検査ができなかったものもあるため、検査空間が検査精度に及ぼす影響を確認する必要がある。
- ・供試体の形状や部材厚さ、配筋状態、コンクリート補修・補強（表面塗装や鋼板接着等）の有無が検査結果に及ぼす影響を確認する必要がある。
- ・検知対象とする内部損傷に対する検知性能をより明確にするために、検査結果に影響を及ぼす要因をできるだけ取り除いた単純な供試体での確認が必要である。

表-3.2.15 検査結果報告後の共同研究者へのアンケート及びヒアリング結果

アンケート項目	回答
<p>1)計測結果の通知を受けての反省点や課題</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・主旨と異なる測定を行っていた可能性がある。測定方法を含めた変更が必要。</li> <li>・他の内部損傷が検査結果に与える影響が大きき、目的とする内部損傷を検知できない場合がある。</li> <li>・予備調査として鉄筋位置、PC鋼材の位置を電磁波レデータ法等により事前調査を行い、その結果をふまえて本調査を実施したほうが効率的である。</li> <li>・事前情報がなく比較対象とする指標が未定であったため、解析条件を決定する時間が足りなかった。</li> <li>・検査対象や検査条件等が試験当日まで明示されないため、使用する検査機器の適用範囲外の検査を実施して検査精度が低くなったケースがあった。</li> <li>・供試体の間隔が狭かったため、検査機器の適切な方法で検査できなかった。</li> <li>・要求された検査項目と使用した検査機器の検知可能対象物が異なっていた。</li> <li>・検査の対象となる変状がどの部分のどのようなもの、どれくらいの規模であるかを十分に把握していなかったため、計測方法が目的に合致していなかった恐れがある。</li> <li>・検査技術によって対象の向き・不向き、適用の限界が異なる。精度があまり高くなりなくとも安価・簡易で実施できる手法は、概況把握やスクリーニングに使える。また、全体で評価する手法と局部を評価する手法がある。何でもかんでも同列(局部的な精査等)で評価するのは適切でないと思われる。</li> <li>・シースの設計位置などの情報があれば、より精度の高い判断が出来る可能性がある。</li> </ul>
<p>2)検査要領、計測方法及び計測結果の通知等についての改善点</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・損傷位置を示す図面や、空隙やひび割れはどのようにして模擬したかなどの情報開示を望む。</li> <li>・健全な部分と変状が生じている部分を限定して検査を実施して、キャリブレーションが必要。</li> <li>・図面がわかりにくく、理解しにくかった。</li> <li>・対象とする内部損傷の大きさ(規模)の目安を事前に知りたい。</li> <li>・検査対象物の情報が少ないため、適用範囲や限界を適切に判断できなかった。適用範囲外で検査を行っても精度が下がりが評価を落とすだけである。</li> <li>・突橋での調査でも、構造物の形状寸法、配筋状況、ケーブル位置、使用材料などの情報を事前に入手するため、本検査でも事前情報を提供してほしい。</li> <li>・計測結果の計測精度比率は母集団に測定を行っていない箇所も入っているため、測定を行った箇所を母集団にするべき。</li> </ul>
<p>3)次回の非破壊検査の計測についての要望事項(計測条件、計測時間、供試体の配置等)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・雨天影響を受けない場所で検査してほしい。</li> <li>・使用する検査機器が適用可能な寸法や形状の供試体としてほしい。</li> <li>・構造図と内部損傷の種類を事前に明示してほしい。</li> <li>・最初からブライインド検査をするのではなく、被検出物の既知なものから検査を行い、基本的な性能を確認してから次のステップに進むべき。</li> </ul>
<p>4)計測不可になる構造上の問題点は何か(部材厚など)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・部材が厚くなると計測不可となる場合がある。</li> <li>・計測ピッチが広いと損傷を見落とす可能性があり、精度も落ちる。</li> <li>・コンクリート表面塗装やその種類によって計測不可になる場合がある。</li> <li>・天候やコンクリートの状態によって計測不可になる場合がある。</li> <li>・測定面がアスファルトに覆われている場合、計測結果に影響が出る。</li> <li>・測定面が鋼材であると計測不可になる場合がある。</li> <li>・測定面が曲面であると機器を走査できない場合がある。</li> <li>・入り隅部は、93mmの範囲は測定不可。</li> <li>・直視できない箇所。5cmより深い位置にある損傷の検知。</li> <li>・隅角部は弾性波がうまく反射しないので計測が難しい。</li> </ul>
<p>5)今回設定した計測時間が適正かどうか</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・図面等の情報がないため時間が足りなかった。</li> </ul>

### 3.2.8 まとめ

模擬損傷供試体を用いた基礎的調査では、人工的にコンクリート中に内部損傷を模擬した模擬損傷供試体に対して共同研究者が非破壊検査を実施し、共同研究者より提供を受けた検査結果を整理することで模擬損傷供試体を用いた検査における各検査技術の検査性能（検知可能な内部損傷の種類、検査精度、作業性能）について確認した。本調査から得られた結果は以下の通りである。

- ・ 模擬損傷供試体の内部損傷に対する検査結果について「一致」したのは、検査を行った 20 技術のうち 8 技術である。
- ・ 模擬損傷供試体の内部損傷に対する検査結果について「一致」したのは「空洞」、「うき」、「グラウト充填不良」であり、事前申告された各検査技術の検知可能な損傷通りに回答された項目も同様である。
- ・ 事前に検知対象と申告した内部損傷を実際に検知できた検査技術は 6 技術であり、全体の内部損傷正答率は 56% である。
- ・ 模擬損傷供試体の内部損傷の位置や形状に対する計測誤差は、実損傷供試体の場合と比べて大きい。これは、実損傷供試体では推定位置に内部損傷が生じている場合は誤差を 0mm としているのに対し、模擬損傷供試体は、推定位置の座標と内部損傷の中心位置の座標から誤差を算出していることが影響していると考えられる。
- ・ キャリブレーション有の検査技術において、内部損傷正答率は高くなる傾向であるが、作業時間と内部損傷正答率の関係には明確な傾向は見られない。

表-3.2.8 に示したように、実損傷供試体と比べて、内部損傷の形状や大きさが検査結果に影響を及ぼしにくかったことやコンクリート表面の劣化（凹凸等）の影響を受けにくいことで、検査結果を適切に評価可能となった検査技術がみられた。その一方で、正答率が低くなったり、計測誤差が大きくなったりする検査技術があることも確認された。検査技術によっては、実損傷供試体に比べて模擬損傷供試体のように供試体の大きさが小さくなることで、供試体寸法や配筋状態、隣接する内部損傷等が検査結果に影響を及ぼす可能性が考えられる。実構造物における検査では、様々な形状や配筋状態の部位を検査することが想定されるため、検査対象の大きさや形状、配筋状態が検査結果に及ぼす影響についても事前に評価できるような検証を行うことも必要と考えられる。

### 3.3 非破壊検査技術の基礎的調査から得られた知見と課題

第3章では、実損傷供試体を用いた実橋レベルでの基礎的調査及び模擬損傷供試体を用いた基礎的調査において、共同研究者が非破壊検査を実施し、共同研究者より提供を受けた検査結果を整理することで各検査技術の基礎的な性能（検知可能な内部損傷の種類、検査精度、作業性能）について確認した。基礎的調査から得られた知見と性能評価手法を策定するために検討すべき課題を以下に示す。

#### (1) 非破壊検査技術の基礎的調査から得られた知見

- ・非破壊検査技術毎に検知可能な内部損傷の種類や程度は異なる。また、検査精度や誤差特性（誤差の範囲や偏り）も検査技術によって異なる。
- ・一部の検査技術においては検知対象とする内部損傷や検知性能、誤差特性について概ね把握することが可能であることが確認されたが、非破壊検査技術によって原理や仕様、作業条件などで検査性能に大きな差があり、実損傷供試体のみでの検証では正確な検査性能の把握が困難であることが確認された。
- ・表面の劣化がない模擬損傷供試体を用いた検査においても、内部損傷の正答率や検査精度が低下する検査技術があることが確認された。これは、検査原理や検査機器に固有の特性に加えて、検査技術が想定していない内部損傷が模擬されている場合等において、検査結果を適切に評価できなかつたり、供試体の形状や寸法の影響、隣接する内部損傷の存在によって検査精度が影響を受けたりすることも要因となっていると考えられる。
- ・事前に検査対象の形状寸法や、配筋状態、ケーブル位置、使用材料等の情報を入手することを前提としている検査技術もあり、これらが無い場合は検査精度が低下する可能性が考えられる。
- ・検査調書において、検査項目に対して検査技術の検知の対象外なのか、供試体の条件や検査条件等によって検知することが不可能なのか明確な回答が得られない場合があるため、検査調書では内部損傷の定義を明確にするとともに、あいまいな点が介在しない検査調書とする必要がある。

#### (2) 性能評価手法策定のために検討すべき課題

- ・実損傷供試体と模擬損傷供試体を用いた基礎的調査で、一部の非破壊検査技術の基本的な検査性能を概ね把握することが可能であることが確認されたが、半数以上の検査技術で本来想定している検査性能を確認できていない。これは、様々な損傷が複数存在する実損傷供試体や模擬損傷供試体では、検査対象とする内部損傷以外の他の内部損傷の存在や検査対象の部材厚さや配筋状態等が検査性能へ影響を及ぼしていることが要因と考えられる。そのため、非破壊検査技術の基本的な検査性能を適切に把握するためには、実損傷供試体や模擬損傷供試体のように大型の供試体

による検証の前に、単純な検査条件で一定の予備情報（内部損傷の種類や供試体の配筋状態）を与えた上で検証を行うことも必要と考えられる。さらに、そのような条件で検査を行うことで、内部損傷を検知可能な部材厚さや内部損傷のかぶり等の限界値について把握することも必要である。そして、模擬損傷供試体、実部材供試体と段階的に非破壊検査を実施することで、非破壊検査技術の検査性能についてきめ細やかに評価可能になるものと考えられる。

- 検査技術によっては局所的な検査を対象としているものも存在する。そのような検査技術に対して、供試体全体の検査を求めても、非破壊検査技術の検査性能について適正な評価をできない可能性がある。検査技術の検査性能を適切に把握するためには、検査する内部損傷の種類や検査範囲を限定した検査を実施することで、検査技術が対象としている適用範囲での検証も必要と考えられる。
- 非破壊検査技術の基礎的調査では、供試体に補修や補強等（表面塗装や鋼板接着等）が実施されている場合の検査性能への影響を検証していない。非破壊検査を点検等に活用するような場合には、検査区間全体にわたって表面被覆等が施工されている場合も想定されるため、これらの影響についても確認する必要がある。