

論文 実構造物における ASR 損傷度の定量的評価

川島 恭志*¹・幸左 賢二*²・佐々木 一則*³・眞野 裕子*⁴

要旨：本研究では ASR により劣化した実構造物を対象とし、ひび割れ性状および圧縮強度に着目した検討を行った。その結果、圧縮強度がひび割れの進展に伴い低下することを確認した。圧縮強度の低下は竣工後 10 年程度で漸減する傾向が見られたが、これは補修したひび割れが再開口し、新しいひび割れの発生が少ないことが影響していると考えられる。また、圧縮強度の分布について、コア採取位置のひび割れ損傷とコア採取深さによる影響を評価した。

キーワード：ASR, 実構造物分析, 圧縮強度, 劣化

1. はじめに

現在、アルカリ骨材反応（以下 ASR と表記）により劣化した構造物の損傷が数多く発生しており、さらに鉄筋破断の事例も確認されており、ASR による構造物の長期劣化が問題視されている。ASR による劣化は長期的な圧縮強度・静弾性係数の低下、鉄筋の定着不足等が考えられており、既設構造物において補修・補強が行われている。しかし、現時点での圧縮強度・静弾性係数、鉄筋破断の有無等、不確定な要素が多く、ASR 劣化構造物の現存耐力を評価できないため、補強設計段階においては多くの仮定が用いられているのが現状である。

そこで本研究では、維持管理における基礎的資料を得ることを目的として、劣化構造物の点検および詳細調査結果を用いて、外観劣化状況（特にひび割れ性状）および圧縮強度等の力学的特性の關係に着目した検討を行い、ASR による劣化が確認された構造物の劣化度の定量的評価を試みた。

2. 検討対象橋梁および調査概要

2.1 検討対象橋梁

検討対象は、ASR と判定された柱および梁部が鉄筋コンクリート製の橋脚（以下、RC 橋脚と

表記）と梁部にプレストレスを導入した橋脚（以下、PC 梁橋脚と表記）を対象とした。

ASR の判定は、定期点検による外観目視および簡易計測などにより、RC 橋脚では、ひび割れ幅 0.3mm 以上で総ひび割れ延長が 30m 以上、PC 梁橋脚では、ひび割れ幅 0.2mm 以上で総ひび割れ延長が 20m 以上のものについて、ASR の可能性がある判断し、コア試験等の詳細点検を行っている。詳細点検の結果、ゲルが確認され、RC 橋脚では幅 0.3mm 以上、PC 梁橋脚では幅 0.2mm 以上のひび割れ総延長が 100m を超えるもの、または、ゲルが確認され採取コアの全膨張ひずみが 0.1% を超えるものを ASR 橋脚と判定している¹⁾³⁾。

ASR と判定された橋脚の内、劣化進行が顕著なものを基本に追跡点検（橋脚寸法、超音波伝播速度、ひび割れ幅の測定など）が行われており、本検討では、データが比較的多くとられており、長期的にひび割れが進展している橋脚 21 基（RC 橋脚 7 基、PC 梁橋脚 14 基）を対象に検討を行った。

表-1 に検討対象橋脚の種類、竣工年、コア試験（物性試験、膨張量試験）の調査回数を示す。表-1 より、多くの橋脚が昭和 55 年以前建設のもので、竣工後 20 年以上経過しており、最

*1 中研コンサルタント 関西支店 技術部 コンクリート技術課(正会員)

*2 九州工業大学 工学部 建設社会工学科教授 Ph.D. (正会員)

*3 阪神高速道路株式会社 技術管理室 技術開発グループ係長(正会員)

*4 九州工業大学大学院 工学研究科 建設社会工学専攻(正会員)

も古い橋脚では竣工後 37 年経過していることがわかる。コア試験回数については、多くの橋脚が 1, 2 回であるが、3 回以上コア試験が行われている橋脚も 20%程度存在し、最大で 7 回行われている橋脚もあった。

2.2 代表的調査例

検討対象橋脚のうち、鉄筋破断が確認されたことから、ASR による劣化が著しいと考えられる N 橋脚に着目し、補修および点検の概要を表 2 に示す。

N 橋脚においては、竣工直後に幅 1mm 以上の顕著なひび割れが確認され補修が実施された以降、竣工後 10 年、13 年、24 年の計 4 回補修が行われている。ひび割れからの水分の浸入による ASR 膨張の進行を防止するため、ひび割れへの樹脂注入とともに、撥水系または防水系の表面保護工による補修が行われている。また、竣工後 11 年からほぼ毎年、橋脚寸法、超音波伝播速度、ひび割れ幅の測定を実施している。コア試験に関しては、竣工後 10 年、20 年、24 年の計 3 回行われている。

図 1 に N 橋脚のひび割れ損傷図を示す。ひび割れ損傷図は定期点検時と補修時の調査において作成されているが、定期点検時のひび割れ損傷図は簡易的なものであるため、補修時の詳細なひび割れ損傷図を基に作成した。ひび割れは梁の側面および上面に橋軸直角方向に発生している。補修前のひび割れ損傷 (図 1 上段) と、補修後のひび割れ損傷 (図 1 下段) を比較すると、その間に補修が 2 回行われたにもかかわらず、ひび割れが再発生している。図 1 において、補修後に再度開いたひび割れを点線で示しているが、補修後のひび割れは新しい箇所に発生している場合と、補修が行われた箇所に発生している場合がある。

また、図 1 に竣工後 20 年に採取されたコア採取位置を示す。表 3 に N 橋脚のコア試験結果を示す。物性試験は直径 68mm×高さ 130mm のコアで行われており、その際に計測された圧縮強度の値は、JIS A 1107「コンクリートからの

表 1 検討対象橋脚概要

橋脚	種類	竣工年	コア試験回数		橋脚	種類	竣工年	コア試験回数	
			物性試験	膨張量試験				物性試験	膨張量試験
A	RC	S51	4	4	L	PC	S44	2	2
B	RC	S51	5	3	M	PC	S44	1	1
C	RC	S47	4	3	N	PC	S54	3	3
D	PC	S54	7	6	O	RC	S52	1	1
E	PC	S44	1	1	P	RC	S56	2	2
F	PC	S44	1	1	Q	RC	S53	2	2
G	PC	S44	1	1	R	PC	S44	1	1
H	PC	S45	2	2	S	PC	S44	1	1
I	RC	S48	1	1	T	PC	S55	1	1
J	PC	S55	1	1	U	PC	S44	1	1
K	PC	S55	1	1					

表 2 補修および調査の概要

補修	竣工後経過年		補修内容	
		0		モルタル塗布
	10		F種撥水系リマーゼント系表面保護	
	13		F種撥水系リマーゼント系表面保護	
	24		梁部CFRP補強	
			F種撥水系リマーゼント系表面保護	
調査項目			調査回数	
定期点検	目視によるひび割れの観察		竣工後1年, 5年, 10年, 16年, 18年, 22年の計6回	
	コア試験	圧縮強度	竣工後10年, 20年, 24年の計3回	
静弾性係数		竣工後10年, 20年, 24年の計4回		
膨張量		竣工後10年, 20年, 24年の計5回		
詳細点検	超音波伝播速度		竣工後10年, 20年の計2回	
	外観変状調査		竣工年, 竣工後10年, 24年の計3回	
	鉄筋変状調査		竣工後22年, 24年の計2回	
	外部環境調査		竣工年, 竣工後10年, 24年の計3回	
追跡点検	橋脚寸法		竣工後11年に測定を開始してから、ほぼ毎年行われている	
	ひび割れ幅			
	超音波伝播速度			

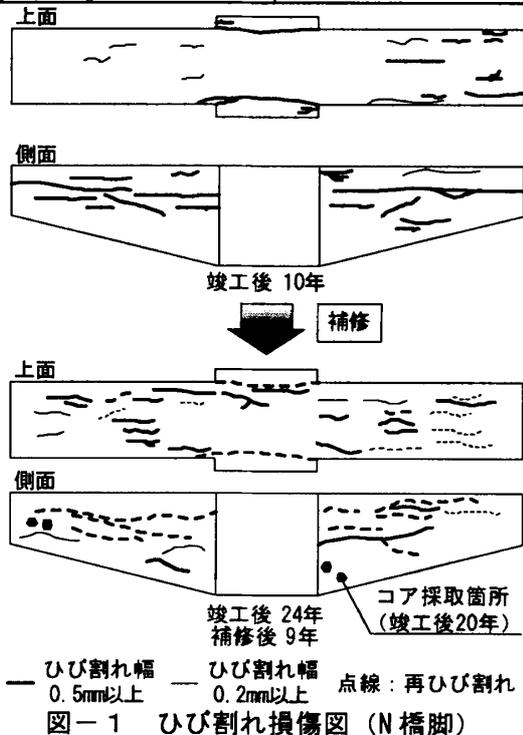


図 1 ひび割れ損傷図 (N 橋脚)
 コアおよびはりの切取り方法および強度試験方法」に基づいて、高さ/直径による補正係数を用いて補正している。No.2 の内部コアで圧縮強度が設計基準強度 (35N/mm²) を下回っているが、

その他は比較的高い値を示している。一方、静弾性係数は $1.20 \sim 1.96 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ となっており、土木学会のコンクリート標準示方書式より算出される $2.78 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ と比較して低い値を示していることがわかる。

$$(E'_c = 8500 \times f'_c)^{1/3} \text{ :N/mm}^2$$

膨張量試験では、全膨張量が 300μ 以下の値を示しているため、本構造物のように今後ともアルカリの供給をされない環境においては ASR 膨張は小さいと考えられる。

3. ひび割れ損傷度

3.1 ひび割れ損傷の評価方法

本検討では、定期点検や補修時の調査で作成されているひび割れ損傷図を用いて、ひび割れ密度を算出し、損傷度の評価を行うこととした。

定期点検と補修時の調査では点検手法が異なり、定期点検が点検者を用いて主要なひび割れを計測しているのに対し、補修時の調査では全クラックを詳細に計測している。

検討対象面積は、ひび割れ損傷図が多く取られている梁側面（2面）および上面とした。また、定期点検において、PC 梁橋脚はひび割れ幅 0.2mm 以上、RC 橋脚はひび割れ幅 0.3mm 以上に着目していることから、PC 梁橋脚、RC 橋脚ともに 0.2mm 以上のひび割れを対象に検討を行った。検討対象とする RC 橋脚は、主鉄筋量が比較的多く、PC 橋脚と同一の主鉄筋方向に沿ったひび割れ性状が得られている。よって、梁部水平方向のひび割れに着目して PC 橋脚と同一に評価している。ひび割れ密度の算出方法を図-2 および以下の式に示す。

$$D = L/A \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、D：ひび割れ密度 (mm/m^2)

L：ひび割れ総延長 (mm)

A：対象断面（梁2面+上面）(m^2)

また、構造物中の残存膨張量に着目するため、補修後のひび割れ密度は補修前の値に加算し、累積で示している（図-2）。

表-3 コア試験結果(竣工後20年)

No.	位置	圧縮強度	静弾性係数	
		(N/mm^2)	($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)	
No.1	表面	37.9	1.20	
	内部	44.4	1.95	
No.2	表面	51.3	1.96	
	内部	28.7	1.35	
		解放4W	残存9W	全膨張量
No.3	表面	120 μ	160 μ	280 μ
	内部	190 μ	85 μ	275 μ
No.4	表面	120 μ	145 μ	265 μ
	内部	15 μ	65 μ	80 μ

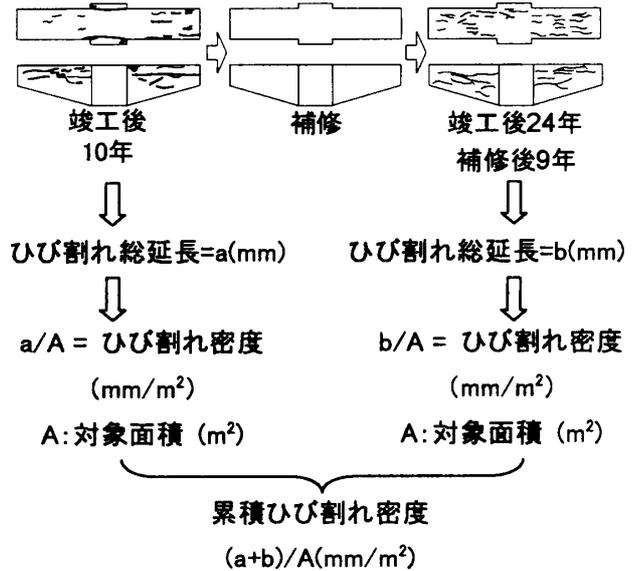


図-2 ひび割れ密度の算出方法

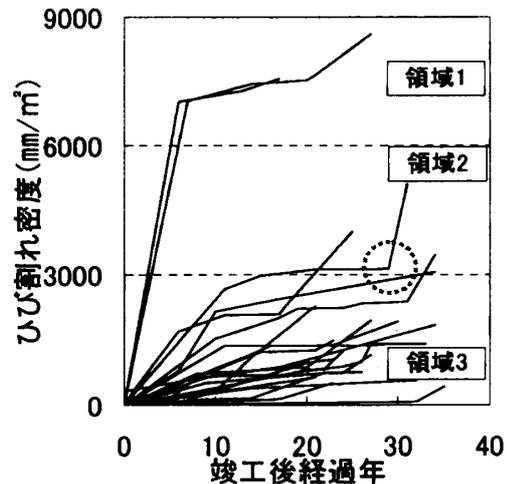


図-3 ひび割れ密度の経年変化

3.2 ひび割れ密度の算出結果

図-3にひび割れ密度の経年変化を示す。図-3より、竣工直後に急激にひび割れ密度が上昇している橋脚が2基あるが、その他の橋脚については大きな差はない結果となった。

また、ひび割れ損傷による劣化分類を行う上で、ひび割れ密度は検討対象橋脚の平均値を用

いた。ひび割れ密度の平均値を算出すると、約 3000mm/m²となる。そこで、平均値を下回る橋脚を領域3と設定した。また、平均値を上回る橋脚のうち、竣工後突出したひび割れ密度が確認された2基を領域1と設定し、その他の橋脚を領域2とした。以下に今回の検討で設定した領域を示す。

- 領域1：ひび割れ密度 6000mm/m²以上
 - 領域2：ひび割れ密度 3000~6000mm/m²
 - 領域3：ひび割れ密度 3000mm/m²以下
- 以降の章では、領域による検討を行う。

ここで、図-3において、急激にひび割れ密度が上昇する箇所（図中の点線部分）に着目する。図-4に詳細にひび割れ計測が実施されている補修時のみのデータと概略的な定期点検のデータも含めた場合のひび割れ密度の経過図を示している。補修時のみに着目した場合、ほぼ線形的にひび割れ密度が増加しているため、ひび割れは線形的に増加していたと考えられる。

4. 分析結果

4.1 圧縮強度と静弾性係数

検討対象橋脚から採取されたコアの圧縮強度と静弾性係数の関係を図-5に示す。

図-5には、示方書に基づいた圧縮強度に対する静弾性係数の算定値と領域1~3の近似曲線を示している。ASR劣化構造物は健全なコンクリートと比較すると、圧縮強度に比べ静弾性係数の低下が著しく、著しく、多機関で行われている調査結果と同様の傾向が得られた。

また、各領域の静弾性係数の平均値は、示方書式算定値と比較すると領域1で33%、領域2で49%、領域3で72%に低下しており、特に損傷の大きな領域1では著しく低下している。

4.2 ひび割れ密度と圧縮強度

図-6に検討対象橋脚における最終累積ひび割れ密度と圧縮強度の関係を示す。圧縮強度は各橋脚において測定されたデータのうち最も新しいものを用いており、コアが複数個採取されている場合は平均値を用いた。図-6より、ひ

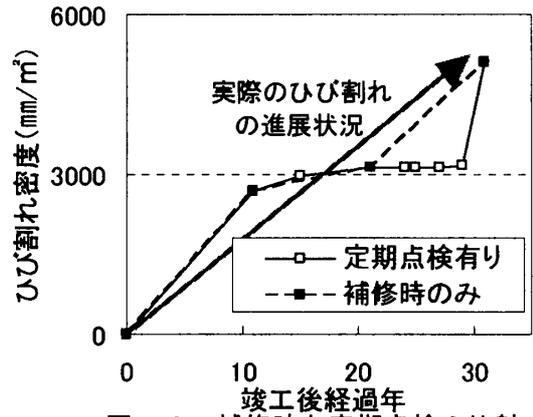


図-4 補修時と定期点検の比較

E'平均値の示方書式算定値に対する割合	領域1	33%
	領域2	49%
	領域3	72%
示方書式	$E'/E'_{cd}=8500f_{ck}^{1/3}(f/f_{ck})/E'_{cd}$	
近似曲線	$E'/E'_{cd}=17.35\ln(f/f_{ck})-43.9$	

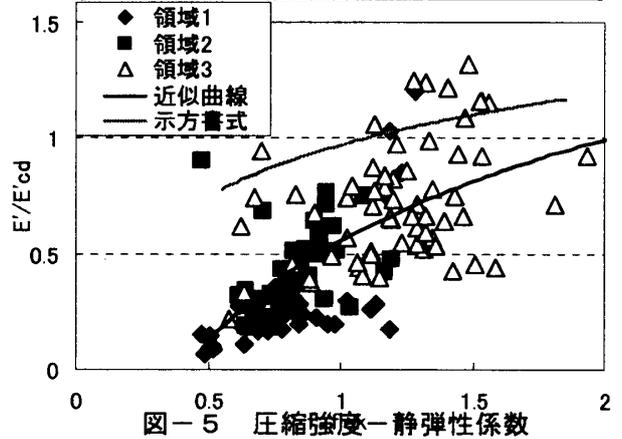


図-5 圧縮強度-静弾性係数

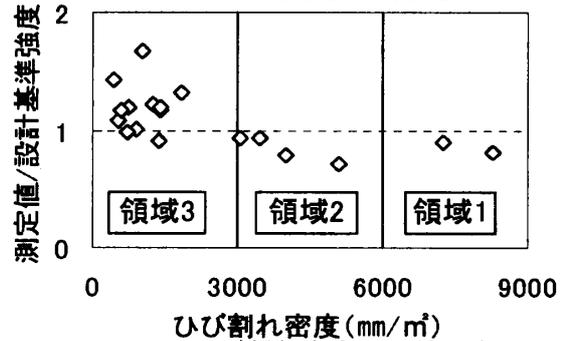


図-6 ひび割れ密度-圧縮強度

び割れ密度が増加するに従って、圧縮強度が低下する傾向が見受けられる。

特に累積ひび割れ密度が 3000mm/m²以上の領域1, 2では圧縮強度が設計基準強度の80%に低下するものもある。

4.3 膨張量に関する検討

図-7に全膨張量と最終累積ひび割れ密度の関係を示す。全膨張量は各橋脚において、コア試験が行われたデータのうち、ASR膨張性の大

きいデータを用いた。図-7より、膨張量が大きいほどひび割れ密度が大きく、ひび割れ損傷の大きい領域1、2の橋脚は500 μ を超える膨張量を示していることがわかる。

4.4 圧縮強度の経年変化

図-8に継続的に3回以上コア試験が行われている橋脚5基に着目した圧縮強度の経時変化を示す。ここでは、同一年に複数回コア試験が行われている場合は、平均値を用いた。

図-8より、時間の経過に伴う圧縮強度の低下が見られるが、竣工後10年程度経過した後は低下勾配が緩やかになり、下限値は20N/mm²程度となった。

2.2節および図-1において、補修後のひび割れは補修が行われた箇所に再発生している場合が比較的多いことを示した。図-3、4において、累積ひび割れ密度はほぼ一定の割合で増加しているが、図-1に示すように、補修前の顕著なひび割れ発生位置において、補修した塗膜上にひび割れの再開口が確認された。よって、補修後のひび割れ密度の増加はこのひび割れの累積による影響と考えられ、実際の進行は累積ひび割れ密度の増加勾配に比べ緩やかになっていると考えられる(図-9)。この影響により、圧縮強度の低下が漸減したと考えられる。

また、小林らの実験²⁾によると、時間の経過に伴い供試体表面のひび割れは増加するが、安山岩の場合、骨材の周辺が反応し、内部では反応が進まないため骨材の強度は保たれ、圧縮強度の低下が緩やかになると述べられている。実橋においても安山岩が多く用いられていたため、実験と同様の傾向が見られたと考えられる。領域3-N橋脚の圧縮強度が大きい値を示しているが、これはPC梁橋脚であり、施工時の圧縮強度が高かったためであると考えられる。

5. 詳細分析

図-8において、圧縮強度は同一採取年の平均値を用いているが、各々の圧縮強度には大きな差異が発生している。そこで、同一橋脚における圧縮強度の分布について考察を行った。

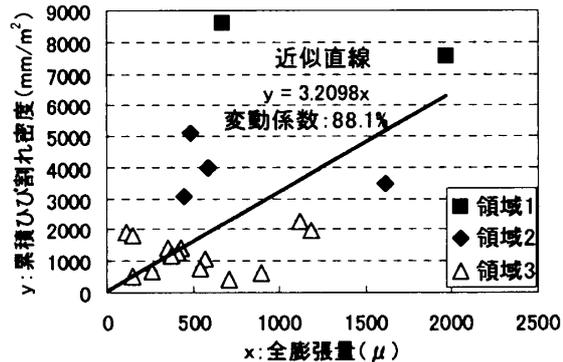


図-7 全膨張量と累積ひび割れ密度との関係

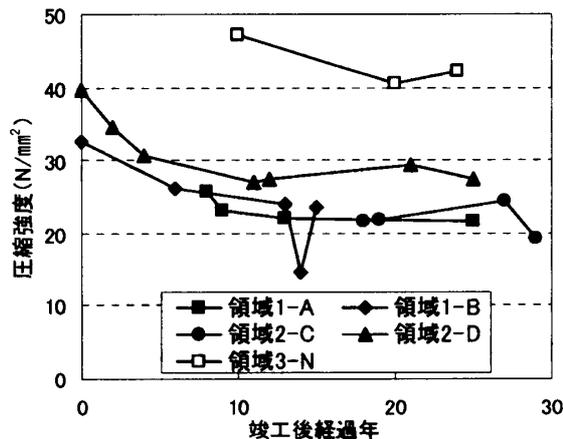


図-8 圧縮強度の経年変化

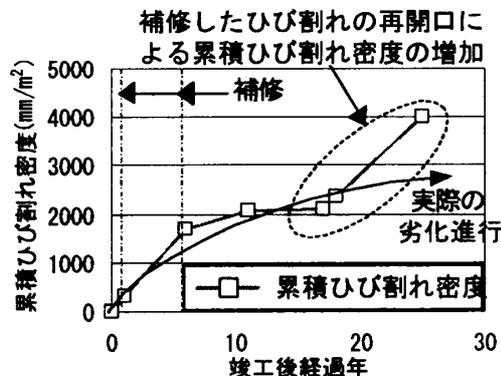


図-9 ひび割れ密度の増加傾向(領域2-D)

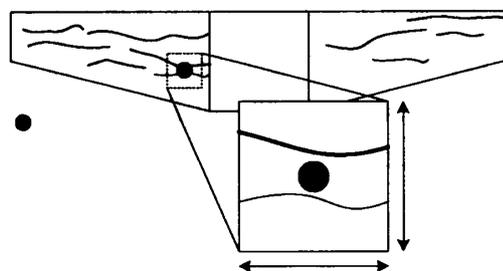


図-10 コア採取箇所の検討面積

5.1 コア採取箇所の損傷度の影響

本節では、同一橋脚におけるひび割れ分布が圧縮強度に及ぼす影響について検討した。図-

10に検討面積を示すが、検討面積はコア採取箇所を中心とした1000mm×1000mmの範囲とした。以上の定義に従い、図-8で圧縮強度の低下が見られた領域1-B橋脚の竣工後13年、15年のコア試験結果を検討対象として、それぞれのコア採取箇所でのひび割れ密度と圧縮強度の関係を図-11に示す。圧縮強度のデータはひび割れ損傷の影響を顕著に受けると考えられる表面の値を用いた。

コア採取箇所のひび割れ密度に着目すると、測定年が近いにも関わらず、コア採取箇所においてひび割れ密度に大きな差異が生じており、最小で2000mm/m²、最大で7000mm/m²の値を示している。また、ひび割れ密度の増加に伴い、圧縮強度が低下していることが確認できる。このように、同一橋脚においても算出されたひび割れ密度の差異が大きい場合には、圧縮強度の差が大きくなると考えられる。

5.2 コア深さの影響

図-12にコア採取深さと圧縮強度の関係を示す。図-12においては、同一コアにおいて、深さの異なった圧縮強度試験が行われている橋脚12基に着目した結果を示している。ここで、表面のコアは橋脚表面より約100~200mmの区間で採取されており、内部のコアは橋脚のほぼ中央(例:橋脚幅3500mm, コア採取深さ1800mm)において採取されている。図-12より、ほとんどの橋脚において表面のコア強度に比べ内部のコア強度が低下していることが確認される。内部のコア強度がより低下する要因としては、表面の大きなひび割れから内部まで水分が浸入し、内部でASRの損傷が進行したためであると考えられる。

6. まとめ

- (1)ひび割れ密度算出による橋脚の損傷度の分類を行い、ひび割れ密度の増加に伴い圧縮強度が低下することを示した。
- (2)竣工後10年まで圧縮強度は大きく低下し、その後漸減する傾向にあるが、これは補修さ

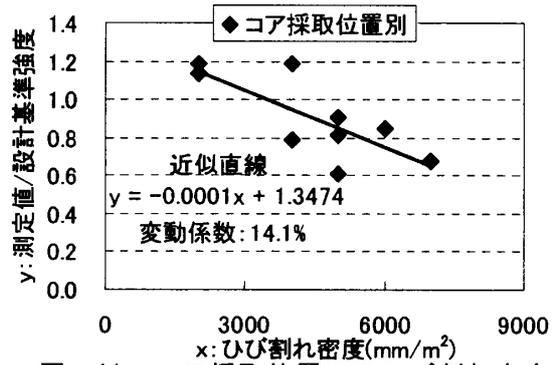


図-11 コア採取位置でのひび割れ密度と圧縮強度との関係

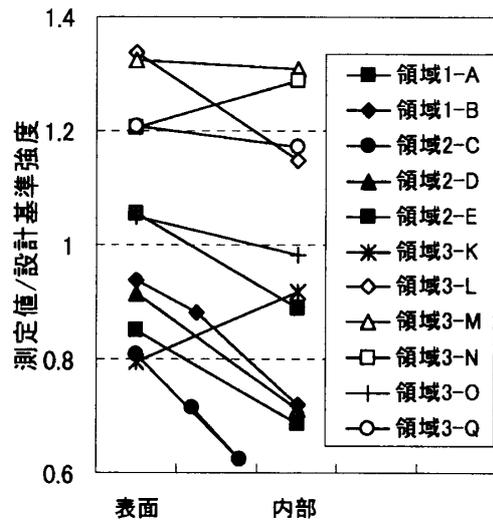


図-12 コアの採取深さと圧縮強度の関係

れたひび割れの再開口が多く、新しいひび割れの発生が少なくなり、ひび割れによる損傷が緩やかになることが影響していると考えられる。

- (3)コア採取位置のひび割れ損傷の差異により圧縮強度に差異が生じやすいこと、および表面の圧縮強度と内部の圧縮強度は対応した強度となっていることが多いことを示した。

参考文献

- 1)阪神高速道路公団：アルカリ骨材反応に関する調査研究委員会報告書、アルカリ骨材反応に関する調査研究委員会、1986.9
- 2)小林一輔, 白木亮司, 森弥広：ASRを生じたコンクリートの圧縮強度性状に関する2, 3の考察, 土木学会論文集, 第426号/V-14, pp.91-100, 1991
- 3)阪神高速道路公団：道路構造物の点検要領, 2005.10