

アルカリ骨材反応に関する研究 (その3)

——養生条件, 拘束度などがコンクリートの膨張に及ぼす影響——

新 開 千 弘 久保田 昌 吾
中 根 淳 芳 賀 孝 成

Studies on Alkali-Aggregate Reaction (Part 3)

——Influences of Curing, Restraint, and Other Conditions on Expansion of Concrete——

Chihiro Shinkai Shogo Kubota
Sunao Nakane Takashige Haga

Abstract

From among the many factors influencing alkali-silica reaction, the authors selected and tested the effects of alkali content, moisture condition, restraint condition, etc., on the amount of expansion of concrete. The results were as follows: (1) The influence of alkali content of concrete upon expansion is great. (2) The influence of the moisture condition upon expansion is substantial. Especially, the amount of expansion of concrete cured in water is large. Moreover, even when cured in alternating wet and dry conditions, the amount of expansion is much the same as when cured continuously in a wet condition. (3) Even when the reinforcement ratio is low, the effect of restraint by reinforcing bars in reducing expansion is significant. The expansive force of alkali-silica reaction under restraint conditions was 33 kgf/cm² at maximum. (4) Compressive strength of concrete is decreased by long-term accelerated reaction, but Young's modulus is reduced prominently from an early age.

概 要

アルカリ・シリカ反応に影響を及ぼす要因のうち、コンクリート中のアルカリ量、養生中の水分条件、拘束状態などについて、主としてコンクリート供試体の膨張量との関連を実験により調べた。その結果以下のことが分かった。(1) コンクリート中のアルカリ量が膨張に及ぼす影響は大きい。(2) 養生中の含水状態が膨張に及ぼす影響は大きく、特に水中で養生したものの膨張量が多い。また、乾燥と湿潤を繰返しても、継続して湿潤養生を行なったものと同等の膨張を示す。(3) 鉄筋拘束による膨張抑制効果は大きく、低い鉄筋比においてもコンクリートの膨張はかなり抑制される。また拘束下でのアルカリ・シリカ反応による膨張力は最大33kgf/cm²程度であった。(4) 反応を促進させたコンクリートの圧縮強度は長期において低下するが、静弾性係数の低下は初期から顕著である。

1. はじめに

アルカリ・シリカ反応(以下ASRと呼ぶ)によるコンクリートの膨張は、セメントのアルカリ度や各種養生条件、拘束状態などによって大きく影響されると言われている。しかし、これらの要因がASRによるコンクリートの膨張に対して、どの程度影響するかについては、十分に把握されていない。そこで、主としてコンクリートを対象とした場合のNa₂O等価アルカリ量(以下アル

カリ量と呼ぶ)、含水状態、拘束条件などがコンクリートの膨張にどのような影響を及ぼすかについて実験・検討を行なった。

2. 実験概要

2.1. 実験要因

実験を行なった要因は、主としてアルカリ量、養生条件、拘束条件で、その他にもコンクリートとモルタルなど材料の相違による比較やコンクリート供試体の寸法の

違いについても併せて検討を行なった。実験要因と組合せは、表-1に示すとおりで、要因ごとにI~Vに分類し、実験を行なった。

2.2. 使用材料と配合

実験には、粗骨材としてASR反応性の高い輝石安山岩砕石および反応性の低い硬質砂岩砕石を、細骨材には、珪砂を使用した。骨材の諸物性を表-2に示す。なお、表-2中に示した潜在反応性試験は、ASTM-C-289(化学法)に準じて実施した結果である。セメントは、比重3.16、アルカリ量0.88%の普通ポルトランドセメントを使用した。アルカリ量の調整には、水酸化ナトリウムの30%水溶液を使用し、練混水と混合して使用した。

コンクリートの配合は表-3に示すとおりで、条件に合わせてNaOH添加量および、粗骨材を変えた。なお、1m³あたりのアルカリ量は、2.0%で7.16kg/m³、1.4%で5.01kg/m³、0.88%で3.15kg/m³である。

実験Vのモルタルによる試験は、骨材として表-2に示した粗骨材を粉砕したものを使用し、ASTM-C-227(モルタルバー法)に準じて、モルタルの作製および試験を行なった。

2.3. 供試体

各供試体の寸法は、表-1に示すとおりで、実験I~IIIについては各条件につき3本、実験IVは1本、実験Vは4本の供試体を作製した。また、実験Iについては、圧縮強度および静弾性係数測定のためにφ10×20cm供試体も作製した。実験IIIの拘束供試体は、長さ方向中心にそれぞれφ11mm、17mm、23mmのPC鋼棒を入れ、両端を鋼板で固定して一軸拘束したものをを用いた。実験IVの供試体は、図-1に示す配筋のあるものと、無筋のものを用いた。

2.4. 脱型・養生

実験I~IIIについては、材令2日で脱型し、以後表-1に示す各条件で養生を行なった。実験IVは、材令5日で脱型し、以後8週間室内気中養生を行なった後、40℃pH=95%以上の養生槽内で養生を行なった。なお、各測定時においてはコンクリート温度を約20℃までに下げた。

2.5. 試験項目と方法

各実験シリーズの試験項目は表-4に示すとおりである。膨張量の測定は、実験IVについてはコンタクトゲージ法を、それ以外はダイヤルゲージ法によって行なった。鉄筋応力の測定は図-1に示す位置に配した2本の鉄筋計によった。その他、動弾性係数の測定などについて

実験No.	要因	供試体寸法	粗骨材	等価アルカリ量	養生条件	拘束条件
I	アルカリ量(岩種)	10×10×40cm	硬質砂岩	0.88%	40℃RH=95%以上	
			輝石安山岩	1.40%		
				2.00%		
II	養生条件	10×10×40cm	輝石安山岩	2.00%	40℃RH=95%以上	
					40℃留水浸漬	
					40℃半分浸漬	
					40℃乾湿繰り返し	
					40℃乾燥	
III	拘束条件	10×10×40cm	輝石安山岩	2.00%	40℃RH=95%以上	無拘束
						拘束棒φ=11mm
						拘束棒φ=17mm
						拘束棒φ=23mm
IV	拘束条件(岩種)	30×20×200cm	硬質砂岩	2.00%	40℃RH=95%以上	有筋
			輝石安山岩			P=0.47%
						無筋
V	アルカリ量(モルタル)	2.5×2.5×28.5cm	硬質砂岩	0.88%	38℃RH=95%以上	
			輝石安山岩	1.40%		
				2.00%		

表-1 実験要因と組合せ

	岩種	表乾比重ρ	吸水率Q(%)	粗粒率FM	潜在反応試験	
					Sc(mmol/t)	Rc(mmol/t)
細骨材	珪砂	2.54	1.87	2.83	63.1	57.3
粗骨材	輝石安山岩	2.59	1.87	6.90	64.9	16.5
	硬質砂岩	2.60	0.71	6.83	33.5	40.1

表-2 使用骨材の物性

スランパ(cm)	空気量(%)	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位重量(kg/m ³)			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
12	2	50	46	197	358	803	963

表-3 コンクリートの配合

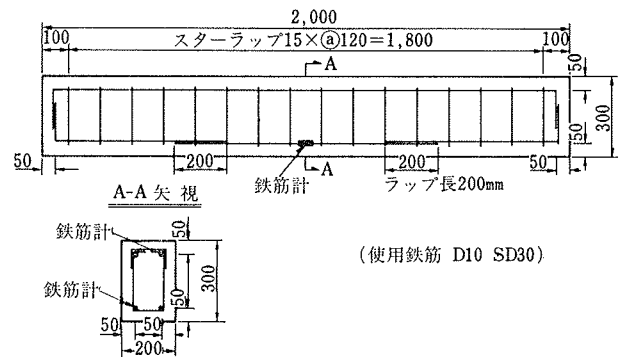


図-1 供試体寸法および配筋(実験IV)

実験No.	測定項目
I	膨張率、動弾性係数、圧縮強度、静弾性係数、重量、ひびわれ観察
II	膨張率、動弾性係数、重量、ひびわれ観察
III	膨張率、重量、ひびわれ観察
IV	膨張率、鉄筋応力、ひびわれ観察
V	膨張率、重量

表-4 測定項目

ではJISに準じて実施した。

3. 実験結果と考察

3.1. アルカリ量の影響

図-2に、実験Iにおけるコンクリートの膨張率，相対動弾性係数と材令の関係を示す。また、図-3に実験Vにおけるモルタルの膨張率と材令の関係を示す。

輝石安山岩を用いたコンクリートの膨張率は、材令23週において、アルカリ量2.0%では0.2%以上と著しく大きく、アルカリ量1.4%の4倍以上の膨張量である。一方、アルカリ量1.4%は0.88%の2倍程度であり、いずれもあまり大きな膨張を示しておらず、このコンクリートでは、アルカリ量1.5%~2.0%の間にASRによる膨張が顕著となるアルカリ量が存在するものと思われる。また、アルカリ量0.88%では、輝石安山岩、硬質砂岩ともにほとんど膨張を示さない。一方、モルタルの場合は、同一アルカリ量であっても、膨張率はコンクリートの2倍程度大きい。特にアルカリ量0.88%では、輝石安山岩と硬質砂岩に明確な差が生じ、モルタルでは、輝石安山岩の場合ASTM規準において有害と判定される膨張を示すが、コンクリートの場合は、いずれの骨材も過大な膨張を示さず、有害であるとは言えない。これは、反応性骨材量とセメント量の比がコンクリートの場合2.55であるのに対してモルタルでは2.69となり、実質的にモルタルのアルカリ量が多いことや、コンクリートに混入する細骨材の影響、骨材の粒径などによるものと思われる。従って、モルタルパーによるASTMの有害判定基準は、かなり厳しいものとなっている。

相対動弾性係数は、膨張率に対応して低下する傾向を示し、ASRによるコンクリートの膨張劣化を知ることができる。

表-5に円柱供試体の圧縮強度，静弾性係数試験結果の標準養生に対する促進養生の比を示す。材令28日では、いずれの条件においても強度の低下は見られないが、材令6箇月においては、アルカリ量2.0%の場合に強度低下が見られる。一方、静弾性係数は、材令28日において、すでに大幅な低下が見られる。従って、ASRによるコンクリート劣化の兆候は、まずその変形特性に現われ、圧縮強度の低下はかなり膨張が進まないと思われ、膨張が進まないと思われ、また、アルカリ量2.0%の静弾性係数は、膨張が材令28日から6箇月の間で大幅に増加しても、その間にほとんど低下しておらず、静弾性係数の低下は膨張量の増加とは対応していない。

3.2. 養生条件(含水状態)の影響

図-4に実験IIにおけるコンクリートの膨張率，相対動弾性係数，重量変化率と材令の関係を示す。浸漬，半分浸漬，湿潤の3条件の膨張を比較すると、材令4週までの初期の段階ではほとんど差がないが、それ以降、温水中に浸漬された場合の膨張量が大きくなる。また、同様に温水中にある場合でも、材令9週まではほぼ等しい

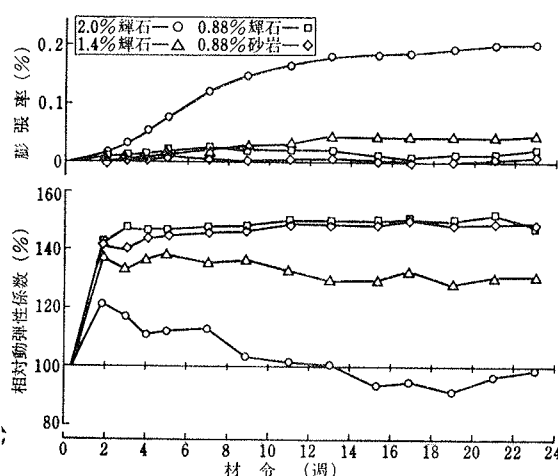


図-2 膨張率・相対動弾性係数と材令の関係(実験I)

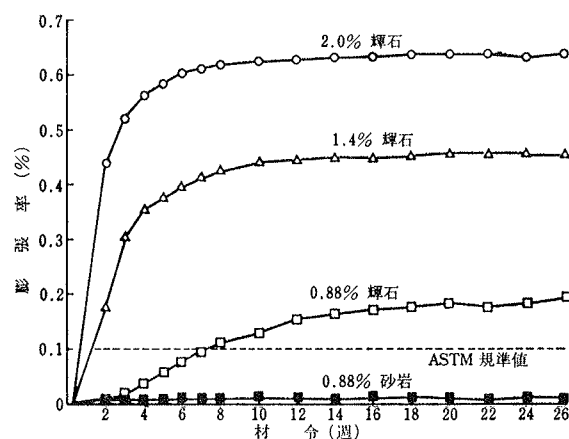


図-3 膨張率と材令の関係(実験V・モルタル)

岩種	アルカリ量 (%)	圧縮強度比		静弾性係数比	
		28日	6箇月	28日	6箇月
輝石	2.0	1.03	0.91 (1.08)	0.57	0.88 (0.56)
	1.4	1.08	1.09 (1.31)	0.89	0.88 (0.94)
	0.88	1.03	1.12 (1.32)	1.04	1.04 (1.15)
砂岩	0.88	1.03	1.09 (1.27)	1.02	1.00 (1.13)

()は材令28日標準養生に対する比

表-5 圧縮強度および静弾性係数比

膨張を示すが、それ以降では、温水中に全浸漬した場合の膨張率が大きくなる。湿潤養生の膨張率に対する比では、材令23週において、浸漬条件は約1.6倍、半分浸漬条件は約1.3倍となる。この様に、ASRによる膨張には、周辺環境条件に大きく影響され、温水中において、水がコンクリート内へ進入しやすいものほど膨張が大きくなる傾向が見られる。この原因については明確ではないが、ASRによって生成されたゲルが吸水膨張する過程において、水の供給がより積極的に行なわれるものほど大きな膨張力を発生するためではないかと思われる。この吸水量の違いは、重量変化率においてある程度知るこ

とができ、膨張量の大きさに対して、重量増加率が大きいことが確認できる。乾燥と湿潤を繰返したものは、乾燥時に収縮するが湿潤時に膨張し、湿潤時の膨張率は湿潤状態で養生を続けたものと差がない。一方、乾燥養生を続けたものは、収縮しており膨張の傾向は見られない。このことから、乾燥状態にあって常に脱水されている条件下ではASRによる膨張は見られないが、断続的に水分が供給される条件においても、湿潤状態と変わらない膨張を生ずることが分かり、一般の構造物でも、屋外であれば、ASRの膨張に必要な水分は十分に供給されるものと思われる。

相対動弾性係数は、材令とともに低減の傾向にあり、この中でも乾燥と乾湿くり返しによるものの低減が他に比べてやや大きい。これは、動弾性係数には膨張による劣化よりも、乾燥の影響を大きく受けるためと思われる。

3.3. 拘束による影響

実験Ⅲにおける拘束棒の鉄筋比と膨張率の関係を図-5に示す。材令3週程度の膨張が小さい段階では、鉄筋が大きい場合でも無拘束のものとあまり膨張率に差がなく、鉄筋比と膨張率はほぼ比例関係にある。しかし、材令の経過とともに無拘束の場合は膨張量が大幅に増加するが、鉄筋比が大きくなるに従って膨張抑制効果が増し、膨張量は減少する。特に、鉄筋比4.3%の場合では、わずかな膨張量の増加を示す程度になる。また、鉄筋比が小さい場合においても膨張量はかなり抑制され、材令23週では鉄筋比1.0%の場合でも、無拘束の膨張率の45%程度になる。さらに、材令13週以降で無拘束の膨張率増加が小さくなると、拘束した供試体はほとんど膨張をせず、鉄筋比が大きい場合では逆に膨張率が減少する状況も見られる。この様に、無拘束では膨張率が増加傾向にあるにもかかわらず、拘束下では膨張率が増加しないのは、ASRによる膨張力が拘束力と釣合うためと考えられる。従って、無拘束状態で膨張率の増加が低下する材令では、膨張力は増加せずむしろ低下する傾向にあるものと推される。表-6は拘束棒のひずみから求めたASRによる膨張力の推定結果である。拘束力が大きいものほどコンクリートの膨張力は大きく、今回の実験結果からはASRによる最大膨張力は33 kgf/cm²程度と推定される。

図-6は、材令7週におけるひびわれ観察結果の例を

No.	鉄筋比 (%)	コンクリートの膨張力(kgf/cm ²)			
		9週	13週	17週	23週
Ⅲ-1	1.0	14.5	15.7	17.5	17.3
Ⅲ-2	2.3	23.9	25.8	25.8	27.2
Ⅲ-3	4.3	28.2	33.6	22.7	31.8

表-6 コンクリート膨張力の推定値 (実験Ⅲ)

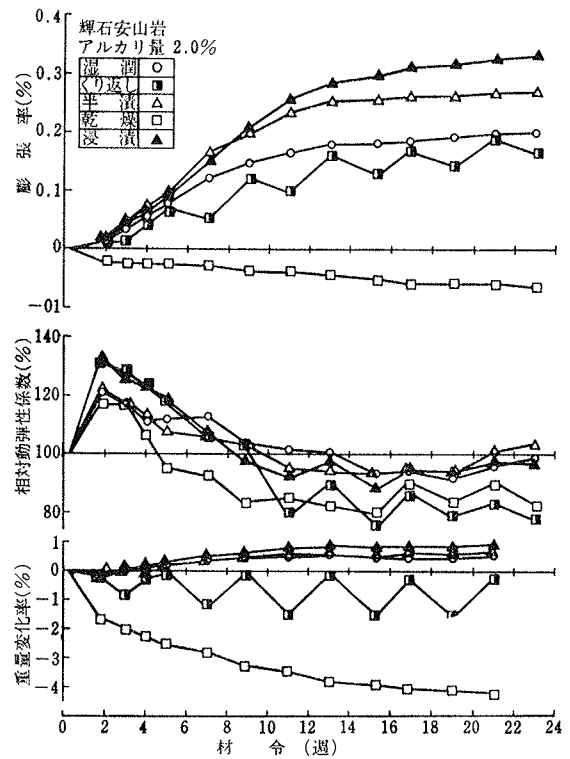


図-4 膨張率・相対動弾性係数・重量変化率と材令の関係 (実験Ⅱ)

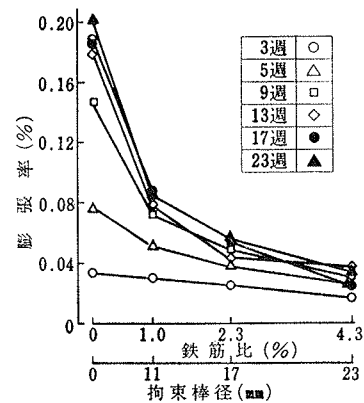


図-5 鉄筋比と膨張率の関係 (実験Ⅲ)

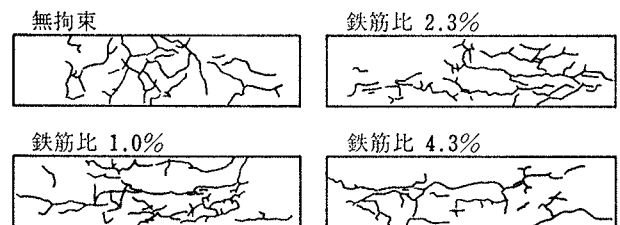


図-6 ひびわれ観察結果 (実験Ⅲ)

示したものである。無拘束のものではひびわれの方向性は特に見られないが、拘束したものは長辺方向(拘束方向)にひびわれが集中しており、拘束によって抑制された膨張が非拘束方向に集中したものと考えられる。

図-7に、実験Ⅳにおける膨張率(長辺方向)、鉄筋応

力と促進養生経過時間の関係を示す。膨張率の増加は促進養生20週の時点でほぼ収束しており、その時の膨張率は、無筋供試体で約0.32%、有筋供試体で約0.17%である。無筋供試体の膨張率を実験I-4の□ 10×10×40 cm 供試体の膨張率と比較すると、実験I-4では収束値が0.2%程度であり、供試体寸法の大きい実験IVの膨張率が1.5倍程度大きい。実験IVは、実験Iと異なり初期に室内乾燥養生を行なったため、膨張率に初期に乾燥収縮したひずみの戻りが加わっていることが考えられるが、その量を、硬質砂岩を用いた供試体の膨張量で相殺しても、大型の供試体の膨張量が大きい。表-7は、無拘束の供試体について、長辺(2m長さ)と短辺(30cm長さ)の膨張率を比較したものである。長辺の膨張率に比べて短辺の膨張率はさらに1.3倍程度大きい。この様に、同じ材料を用いたコンクリートでも、供試体の寸法や方向によってASRによる膨張量は異なり、膨張量への影響因子としてこの点も考慮する必要があるものと思われる。

鉄筋による拘束下での膨張率は、促進養生20週の時点で無筋のもの約55%に低減されており、配筋による膨張抑制効果が確認できる。拘束による膨張抑制率(拘束膨張率/無拘束膨張率)を、実験III, IVについて鉄筋比との関係で図-8に示す。実験III, IVでは拘束方向などの条件が異なるが、総じて低い鉄筋比における膨張抑制効果の上昇が大きく、少ない配筋においても膨張はかなり抑制されるものと思われる。

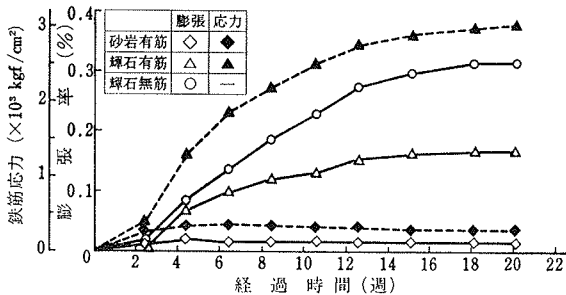


図-7 膨張率・鉄筋応力度の経時変化(実験IV)

経過時間(日)	17	31	45	74	106	141
長辺膨張率(%)	0.017	0.084	0.136	0.229	0.295	0.315
短辺膨張率(%)	0.017	0.107	0.178	0.316	0.374	0.423

表-7 長辺および短辺の膨張率の比較(実験IV)

供試体No.	総ひびわれ数(本)	総ひびわれ幅(mm)	1mあたりのひびわれ数(本)	平均ひびわれ幅(mm)
IV-1 砂岩有筋	0	0	0	0
IV-2 有筋	91	5.09	22.8	0.06
IV-3 輝石無筋	104	9.31	26.0	0.09

表-8 ひびわれ観察結果(実験IV)

鉄筋に発生する応力度は図-7に示すように、促進養生20週において約3,000 kgf/cm²に達する。また、鉄筋応力度より求めたコンクリートの膨張力は約20 kgf/cm²であった。

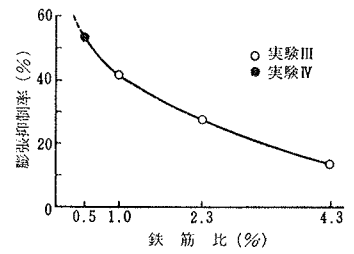


図-8 鉄筋比と膨張低減率の関係(実験III, IV)

実験IVのひびわれ観察結果として、促進養生23週経過時における、供試体の長さ方向にひいた2本の基準線に交わるひびわれに対する測定値を表-8に示す。硬質砂岩を用いた供試体ではひびわれは見られないが、輝石安山岩を用いた供試体では多数の細かいひびわれが見られる。配筋の有無では、ひびわれの本数にあまり差がなく、総ひびわれ幅および平均ひびわれ幅が、有筋は無筋の約55%に低減されている。これは、配筋による膨張量の低減量にほぼ等しく、ひびわれは、配筋によって数量的には減少しないが、その幅を減少させることに役立つことが分かる。

4. まとめ

ASRによるコンクリートの膨張について、アルカリ量、含水状態、拘束条件などを要因として、それぞれの特性を調べた。その結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) コンクリート中のアルカリ量がASRの膨張に及ぼす影響は極めて大きい。また、モルタルの場合と比べると、膨張量は小さく、初期の膨張も小さい。
- (2) ASRによるコンクリートの劣化によって、初期に静弾性係数が大幅に低下し、長期的には圧縮強度も徐々に低下する。
- (3) ASRによるコンクリートの膨張は、周辺の水分条件によって異なり、同一温度条件であれば温水中の方が湿潤状態より大きくなる。また、乾湿が繰り返す条件においても湿潤と同様の膨張量を示す。
- (4) 少ない配筋においても拘束下では、ASRによる膨張はかなり減少する。また今回の実験ではASRによる最大膨張力は33 kgf/cm²程度であった。
- (5) ASRによるコンクリートの膨張量は、供試体の寸法や方向によっても異なる。

各種条件下におけるASRの膨張特性を知ることは、実構造物の被害実態を把握のために重要であり、今回の実験によっていくつかの要因について知ることができた。これらの研究成果を生かし、今後は耐力的な問題などの検討により、被害を受けた構造物の補修法の確立を図る必要がある。