

論文 ASR 劣化上部工コンクリート部材の力学的特性

青山 實伸^{*1}・菊池 徹^{*2}・川村 満紀^{*3}・戎家 隆^{*4}

要旨: ASR 劣化発生地域にある既設コンクリート上部工部材の強度性状等の調査を行った。調査の結果、上部工部材には表面ひび割れは顕在化していないが、コンクリートの圧縮強度や静弾性係数の低下の特徴から ASR 劣化が進行していると推察された。特に PC 構造物ではセメント量が多いので RC 構造物より ASR による劣化進行度合いが大きい可能性がある。過去の調査データを分析した結果から、ASR 劣化が進行すると圧縮強度や静弾性係数が小さくなり、圧縮破壊時の最大ひずみが増大することを検証した。また、静弾性係数と圧縮強度試験において圧縮破壊時の最大ひずみを求める推定式を提案した。

キーワード: ASR, 圧縮強度, 弾性係数, 最大ひずみ

1. はじめに

アルカリシリカ反応（以下 ASR）劣化発生地域にあるコンクリート構造物では、水の影響を受ける橋台や橋脚の部位で ASR によるひび割れ発生が顕在化している。他方、上部工部材は雨水の影響を受けにくいいため、ひび割れ発生が顕在化することが少ない。そのため、上部工コンクリート部材の強度性状等の劣化状況を俯瞰的に調査された事例が少ない。このことから、ASR 劣化発生地域にある北陸自動車 小矢部 IC～朝日 IC 間の建設後 35～45 年経過した 46 橋梁で、雨水の影響を受けていない異なるタイプの上部工部材（鋼橋 RC 床版, RC 中空床版, PC 部材）からコアを採取して圧縮強度や静弾性係数の強度性状等を調査した。

さらに、著者らが過去に実施したコアの圧縮強度と静弾性係数の試験データを含めて、圧縮強度と静弾性係数の関係や、圧縮強度とひずみの関係を分析した。分析では、ASR の劣化の指標になると考えた圧縮破壊時の最大ひずみに着目して、圧縮破壊時の最大ひずみを求める推

定式の検討や最大ひずみの回帰分析を行った。

2. 調査方法

2.1 調査橋梁の概要

調査の対象となった橋梁の存在する地域を図-1 に示す。調査した橋梁は各 IC 間から鋼橋, RC 中空床版橋, PC 桁橋をそれぞれ 1～2 橋を選定したものである。調査部位は、鋼橋の RC 床版下面（以下 Steel-Deck）, RC 中空床版橋の主版側面（以下 RC-Slab）, PC 桁橋の端横桁側面（以下 PC-Beam）である。調査した橋梁数は、Steel-Deck 13 橋, RC-Slab 16 橋, PC-Beam 17 橋である。各部位のコンクリートの示方配合を表-1 に示す。示方配合の設計基準強度は Steel-Deck および RC-Slab が 24 N/mm², PC-Beam が 35 N/mm² で、使用セメント量はそれぞれ 300 kg/m³, 350 kg/m³ である。使用した骨材は河川産である。各部位から径 55mm×長さ約 150mm のコア 2 本を採取した。

2.2 試験概要

採取コアを用いて実施した試験概要を以下に示す。

(1) コア観察および粗骨材の岩種構成率の算定

コア観察は、採取したコアの表面を目視観察し、ASR ゲルの有無等を確認した。

粗骨材の岩種構成率の算出は、残存膨張量の試験に用いたコアの表面の展開写真から、コア表面に現れた粗骨材の岩種を判定して、岩種ごとの面積を算出して岩種構成率を求めた。



図-1 調査対象橋梁の地域

表-1 コンクリートの示方配合

部 位	設計基準強度 f _{ck} (N/mm ²)	配合目標強度 f _{ck} (N/mm ²)	最大粗骨材 寸法(mm)	水 W (kg)	セメント C(kg)	W/C (%)	粗骨材 G (kg/m ³)	細骨材 S (kg/m ³)	減水剤 (kg/m ³)
Steel Deck & RC-Slab	24	28.4	25	160	300	53	1,108	750	0.75
PC-Beam	35	40.6	25	162	350	46	1,115	718	0.87

*1 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株）金沢支店 道路技術部 上席調査役 博士(工) (正会員)

*2 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株）金沢支店 道路技術部 構造技術課

*3 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株）金沢支店 特別技術顧問 金沢大学名誉教授 工学博士 (名誉会員)

*4 中日本高速道路（株）金沢支社 保全サービス事業部 保全チーム 担当リーダー

(2) 圧縮強度・静弾性係数試験

試験は、JIS A 1107「コンクリートからのコア及びはりの切り取り方法並びに強度試験方法」、JIS A 1108「コンクリートの圧縮試験方法」およびJSCE-G502「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じて実施した。圧縮試験時の変位性状を把握した。

(3) アルカリ量分析・残存膨張量

コンクリート中のアルカリ量は、コア深部の試料を用いて「建設省総合開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発(コンクリート中の水溶性アルカリ金属の分析方法(案))」に従って実施した。コア深部の試料を用いた理由は、飛来塩分等による外部からのアルカリ供給や長年にわたる表面部分からのアルカリの漏出の影響を避けるためである。

残存膨張量は、コアを用いて ASTM C 1260 に準じ(カナダ法)、温度 80℃ の 1N の水酸化ナトリウム溶液(NaOH 溶液)に浸漬し、14 日経過時の基点間膨張量を測定した。

(4) 中性化深さ測定

中性化深さの測定は、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さ測定方法」に準じて実施した。

2.3 過去の圧縮強度・静弾性係数データの分析

筆者らが、過去に実施した既設コンクリート構造物から採取したコアの圧縮強度と静弾性係数の試験データを分析した。本調査における上部工部材の調査結果と比較するため、上部工と下部工他の 2 種類に分類して圧縮強度、静弾性係数、圧縮破壊時の最大ひずみの関係を分析した。過去の試験データは、北陸自動車道および地方公共団体が管理する橋梁およびボックスカルバートから採取した径 55mm のコアを用いて実施した試験で得られたものである。データ総数は 181 で、下部工他部材が 103 データ、上部工部材が 78 データである。上部工部材のデ

ータには、上部工の調査を行った 46 データの試験結果を含めている。

3. 試験結果と考察

3.1 コア観察・粗骨材の岩種構成率

コアの採取箇所は雨水等の影響を受けない位置にあり、いずれも ASR ひび割れは顕在化していなかった。コアの目視観察の結果、すべてのコアで反応リムと骨材ひび割れ、白色ゲルや透明ゲルなど ASR 反応が生じている兆候が認められた。

これらの観察結果から考えて、今回の調査の対象となったコンクリート部材において ASR は発生しているが、雨水等外部からの水の浸入がないために全体に膨張量はあまり大きくはなく、現時点において表面ひび割れは見られない。しかし、これらのコンクリート構造物が存在する地域は年間平均湿度の高い地域であるので表面における結露などに伴って表面部分のアルカリが漏出し、また長年にわたり表面部分の湿度は低下し、表面部分と深部との間における膨張量に差異が生じて深部の膨張が進行すると、将来表面ひび割れが顕在化する可能性が高い。

粗骨材の岩種構成の平均値を表-2 に示す。河川産の粗骨材は多様な岩石から構成されている。構成率の高い岩種は片麻岩や花崗岩である。反応性骨材であることが確認されている安山岩・流紋岩・溶結凝灰岩等の構成率の平均値は 22% である。調査した部材ごとの反応性骨材の構成比を図-2 に示す。反応性骨材の構成比は、Steel-Deck 16%, RC-Slab 27%, PC-Beam 21% である。各部材の安山岩の構成率の頻度分布を図-3 に示す。コアによっては安山岩が含有しないものもある。これは、骨材産地の河川水系が異なることによるもので、反応性骨材の構成も多様になっている。

表-2 コアの粗骨材の岩種構成の平均値

反応性骨材					その他骨材						
安山岩	流紋岩	溶結凝灰岩	頁岩	小計	花崗岩	閃緑岩	片麻岩	砂岩	蛇紋岩	片岩	小計
3.6%	4.4%	13.2%	0.6%	21.8%	22.1%	17.8%	31.6%	3.5%	1.7%	1.5%	78.2%

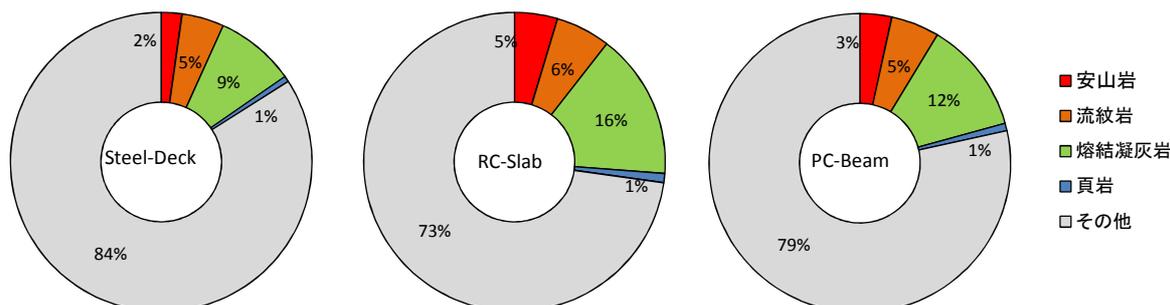


図-2 部位ごとの反応性骨材の構成比

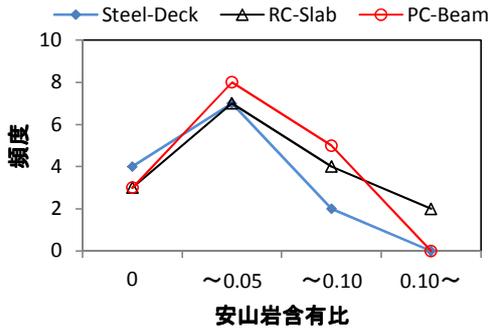


図-3 各部材の安山岩の構成率の頻度分布

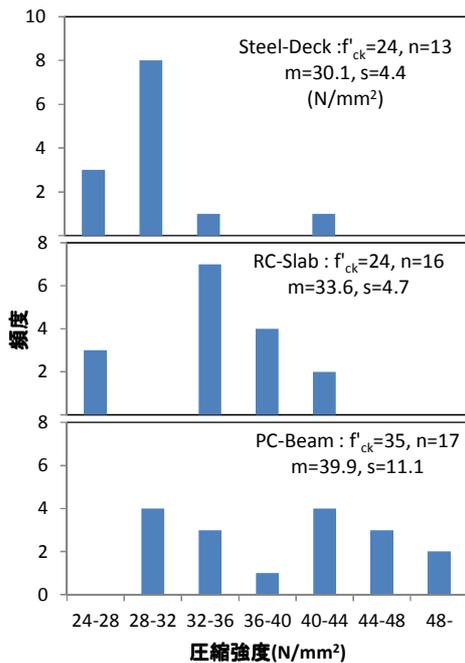


図-4 コアの圧縮強度の部材ごとの頻度分布

3.2 圧縮強度・静弾性係数

コアの圧縮強度の部材ごとの頻度分布を図-4に示す。これらの図中に示す記号 n はコア数、 m は測定値の平均値、 s は測定値の標準偏差値を示している。頻度分布の平均値と標準偏差値より部材ごとに設計基準強度を下回る確率を求めると、Steel-Deck 3%、RC-Slab 2%、PC-Beam 17%となる。この結果、PC部材の圧縮強度は、設計基準強度を下回る確率（示方配合では5%）が大きく、ASRに起因する強度低下が顕著であることが確認できる。

コアの静弾性係数の部材ごとの頻度分布を図-5に示す。図よりPC部材の静弾性係数の平均値が小さく、バラツキも大きいことがわかる。PC部材の弾性係数は、圧縮強度の場合と同様に大きく低下している。

3.3 アルカリ量・残存膨張量

コアのアルカリ量の部材ごとの頻度分布を図-6に示す。アルカリ量の平均値は 3.9 kg/m^3 であり、93%のコアが JISA 5308 付属書 B に規定するアルカリ総量規制値 3 kg/m^3 以下の規定を満たしていない。部材ごとの頻度分

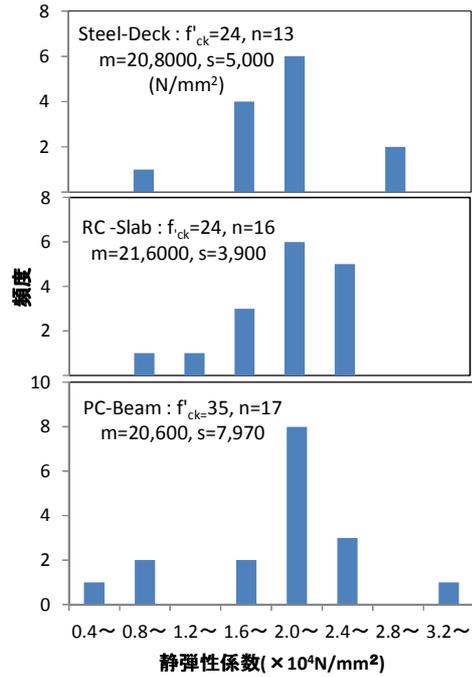


図-5 コアの静弾性係数の部材ごとの頻度分布

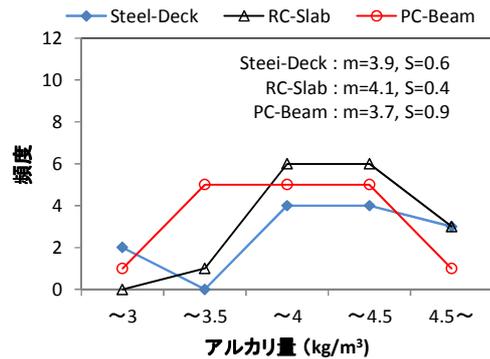


図-6 コアのアルカリ量の頻度分布

布の差異は明確ではない。ただし、規制値は骨材中にもアルカリが存在することがあることは考慮に入っていない。

残存膨張量（14日）の部材ごとの頻度分布を図-7に示す。ASTM C 1260による残存膨張量の判定は、0.1%未満が「無害」、0.2%以上が「潜在的に有害」としている。「無害」と「潜在的に有害」に該当するコアが、それぞれ48%と46%ある。残存膨張量の大きいコアが半数を占めている。部材ごとの頻度分布には大きな違いが認められない。ただし、この規格は骨材のアルカリ反応性の判定法として開発されたものであることに注意する必要がある。この結果は実際のASR劣化コンクリートの残留膨張の有無を示すものではない。

3.4 中性化深さ

コアの中性化深さの測定結果の平均値は 17.5 mm 、標準偏差は 5.6 mm である。部材ごとの中性化速度係数を

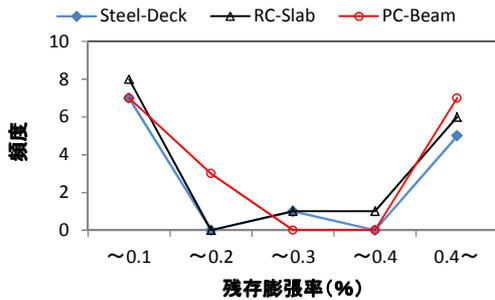


図-7 コアの残存膨張量の頻度分布

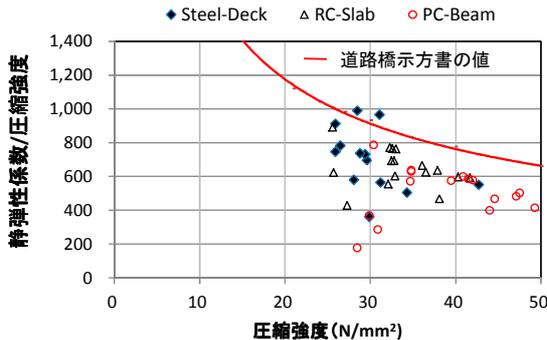


図-9 静弾性係数/圧縮強度比と圧縮強度の関係

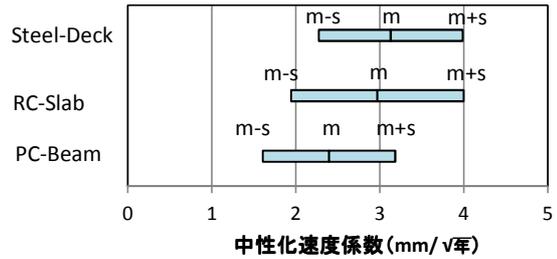


図-8 中性化速度係数の分布

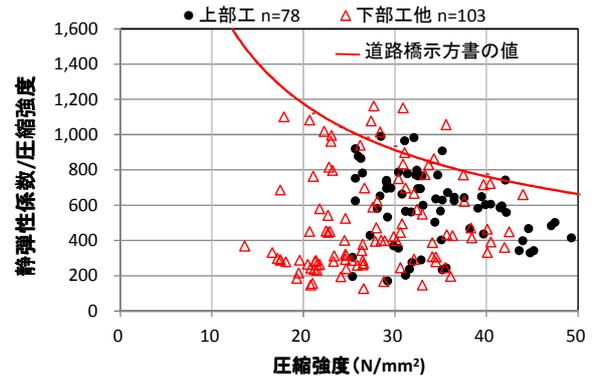


図-10 過去のデータを含めた静弾性係数/圧縮強度比と圧縮強度の関係

求め、その分布を図-8に示す。中性化速度係数はSteel-Deck, RC-Slab, PC-Beamの順になっている。北陸地方の既往の調査結果³⁾と比較すると、Steel-Deck, RC-Slabは変わらないがPC-Beamは既往の調査結果(1.94 mm/√年)より大きな値になっている。ASR劣化進行に伴う微視ひび割れ¹⁾の影響によって中性化進行が早くなっていると推察される。

4. 圧縮強度・静弾性係数・圧縮破壊ひずみの関係

4.1 圧縮強度と静弾性係数の関係

(1) 上部工部材の分析

静弾性係数/圧縮強度比と圧縮強度の関係からコアのASR劣化度を評価する方法がある²⁾。図-9に各部材に分類した両者の関係を示す。静弾性係数/圧縮強度比は、道路橋示方書の値より低下している。PC部材は圧縮強度の小さいコアの静弾性係数/圧縮強度比の低下傾向が大きい。コンクリートのASR劣化が進行していることを示している。

(2) 過去の試験データを含めた分析

過去のデータを含めた静弾性係数/圧縮強度比と圧縮強度の関係を図-10に示す。図より明らかなように、多くの下部工他の打点は上部工のそれに比べ静弾性係数/圧縮強度比や圧縮強度ともに小さい。下部工は上部工に比べ、雨水やジョイントからの漏水等の影響を受けやすくASR膨張が促進されたものと推定する。

図-9に示す上部工の調査結果と図-10に示す過去のデータの分布傾向との間に差はない。

4.2 圧縮強度とひずみの関係

(1) 上部工部材の分析

図-11は、コアの静弾性係数および静弾性係数/圧縮強度比と圧縮破壊時の最大ひずみとの関係を各部材ごとに区分して示している。下段の図は静弾性係数と圧縮破壊時の最大ひずみの関係が示す。上段の図中の近似式はPC-Beamのものを示す。両者間には比較的良好な相関性があり、静弾性係数が小さくなると最大ひずみは大きくなる。特に静弾性係数の小さいPC部材の最大ひずみはRC部材に比べ大きくなっている。ASR劣化が進行すると微視ひび割れ¹⁾が増加して静弾性係数が小さくなり、微視ひび割れの増加に伴って最大ひずみが増大することが考えられる。すなわち、ASRによる微視ひび割れの存在によってコンクリートはより伸びやすい材料となるといえる。図の上段の静弾性係数/圧縮強度比と最大ひずみの関係は、部材の違いによる差が小さくなり、下段の静弾性係数と最大ひずみの関係より良い相関を示す。

(2) 過去の試験データを含めた分析

過去のデータを含めた静弾性係数/圧縮強度比と圧縮破壊時の最大ひずみとの関係を図-12に示す。両者の関係は比較的良好な相関関係にある。上部工部材と下部工他部材は同じ分布傾向にある。また、上部工の調査結果と過去のデータとの間の差は小さい。圧縮破壊時の最大ひずみは静弾性係数/圧縮強度比の変化に比べて変化が大きい。このことは、前者は後者よりASR劣化進行度を評価するのに鋭敏な指標といえる。図-12から最大ひず

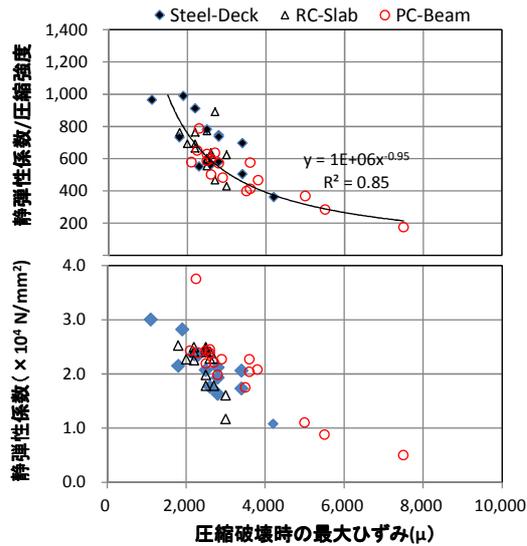


図-11 静弾性係数および静弾性係数/圧縮強度比と圧縮破壊時の最大ひずみとの関係

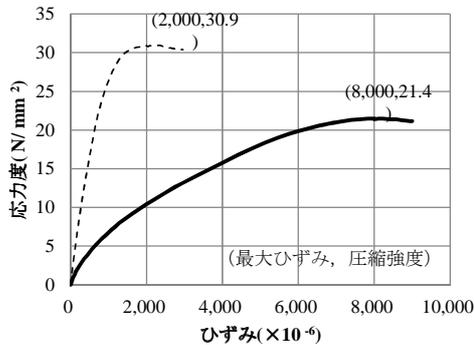


図-13 圧縮試験時の応力-ひずみ曲線の例

みが概ね 3,000 μ を超えると静弾性係数/圧縮強度の値が少し減少するだけで最大ひずみの伸びが大きくなっていることがわかる。

4.3 圧縮破壊時の最大ひずみの推定

応力度-ひずみ曲線の例を図-13に示す。両者の関係が2次曲線で示されると仮定すると、圧縮強度と静弾性係数の値から、以下のように圧縮破壊時の最大ひずみを推定することができる。

コア圧縮強度試験の応力度(σ)とひずみ(ϵ)とすると両者の関係は、式(1)の2次曲線では示される。

$$\sigma = a\epsilon^2 + b\epsilon + c \quad (1)$$

式(1)で原点で $\sigma = 0$ 、 $\epsilon = 0$ から $c = 0$ が求まる。頂点で $d\sigma/d\epsilon = 0$ であり、式(1)は $d\sigma/d\epsilon = 2a\epsilon + b = 0$ となり、圧縮強度(最大応力度)(σ_m)、圧縮破壊時の最大ひずみ(ϵ_m)とすると、 $b = -2a\epsilon_m$ が求まる。さらに頂点での式(1)は、 $\sigma_m = a\epsilon_m^2 - 2a\epsilon_m \cdot \epsilon_m + c = -a\epsilon_m^2$ となり、 $a = -\sigma_m/\epsilon_m^2$ が求まる。従って式(1)は、式(2)に変換できる。

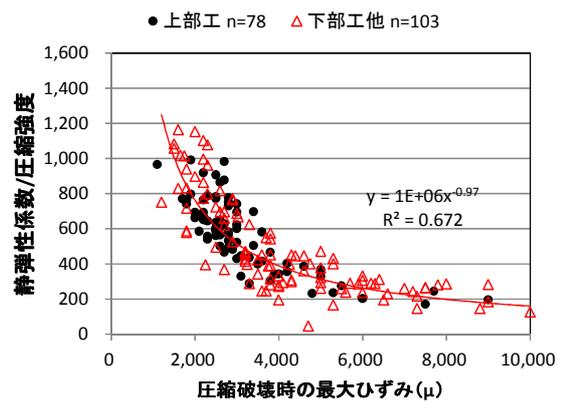


図-12 過去のデータを含めた静弾性係数/圧縮強度比と圧縮破壊時の最大ひずみとの関係

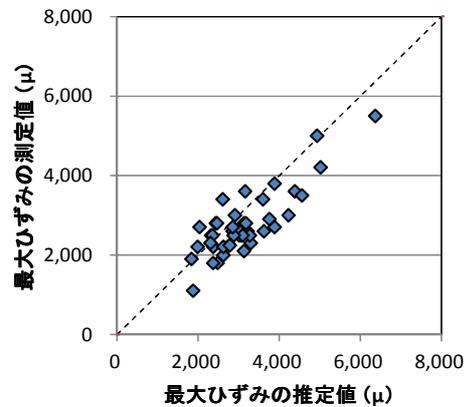


図-14 圧縮破壊時の最大ひずみの測定値と推定値との関係

$$\sigma = -\sigma_m/\epsilon_m^2 \cdot \epsilon^2 + 2\sigma_m/\epsilon_m \cdot \epsilon \quad (2)$$

弾性係数(E)を圧縮強度の1/3の応力度(σ_e)($=\sigma_m/3$)と原点を結ぶ割線とみなすと、弾性係数(E)は応力度(σ_e)をそのひずみ(ϵ_e)で除した次式のように示すことができる。

$$E = \sigma_e / \epsilon_e = (-\sigma_m/\epsilon_m^2 \cdot \epsilon_e^2 + 2\sigma_m/\epsilon_m \cdot \epsilon_e) / \epsilon_e \\ = -\sigma_m/\epsilon_m^2 \cdot \epsilon_e + 2\sigma_m/\epsilon_m$$

ここで $\epsilon_e = \sigma_e/E = \sigma_m/3E$ であることから、弾性係数(E)は式(3)で表すことができる。

$$E = -\sigma_m^2/\epsilon_m^2 \cdot 3E + 2\sigma_m/\epsilon_m \quad (3)$$

式(3)は圧縮破壊時の最大最大ひずみ(ϵ_m)を関数とする式(4)に示す2次方程式に変換できる。

$$E \cdot \epsilon_m^2 - 2\sigma_m \cdot \epsilon_m + \sigma_m^2/3E = 0 \quad (4)$$

式(4)の2次方程式の解として圧縮破壊時の最大ひずみ(ϵ_m)は式(5)によって求めることができる。

$$\epsilon_m = \{2\sigma_m \pm (4\sigma_m^2 - 4\sigma_m^2/3)^{1/2}\} / 2E \\ = 3.63\sigma_m/2E \quad (5)$$

上部工の圧縮破壊時の最大ひずみの測定値と式(5)を

用いて求めた推定値との関係を図-14に示す。両者には良好な相関がみられるが、最大ひずみが大きくなると推定値は測定値より大きくなる傾向にある。このように、圧縮破壊時の最大ひずみの概略値を、圧縮強度と静弾性係数の値より、式(5)を用いて推定することができる。

4.5 圧縮破壊時の最大ひずみの回帰分析

ASR劣化進行を判定する敏感な指標といえる圧縮破壊時の最大ひずみについて回帰分析を実施した。分析因子として、セメント量、経過年数、反応性骨材含有率、アルカリ量、残存膨張量を検討対象とした。

分析の結果、良好な回帰式を求めることができなかったが、セメント量、経過年数、残存膨張量を説明因子とすると分析結果のそれぞれのt値(推定係数/推定係数の標準誤差)は妥当と考えられた。求めた回帰式を式(6)に示す。

$$\epsilon_m = 17.5 x_1 + 44.5 x_2 + 377 X_3 - 4.630 \quad (6)$$

ここに、 ϵ_m ：圧縮破壊時の最大ひずみ、 x_1 ：セメント量(kg/m³)、 x_2 ：経過年数(年)、 x_3 ：残存膨張量(%)

圧縮破壊時の最大ひずみの測定値と回帰式による予測値との関係を図-15に示す。図より明らかなように、ばらつきが大きいですが、ASR劣化判断の指標となる最大ひずみの説明因子として、セメント量の分析結果のt値が最も大きく、経過年数と残存膨張量のt値がほぼ同じになり、セメント量が最も大きく寄与している。

4. まとめ

ASR劣化発生地域にある既設コンクリート上部工部材のコアによる強度性状等の調査結果をまとめると次のようになる。

- (1) ASR劣化発生地域にある上部工部材のコンクリートは、表面ひび割れが顕在化していないがASR劣化が進行していた。特にPC部材ASR劣化の進行が大きい。劣化因子としてセメント量の寄与が大きい。
- (2) 調査対象となったコンクリート部材において将来表面ひび割れが顕在化する可能性がある。
- (3) ASR劣化の進行したPC部材の中性化速度係数が大きくなっている。ASR劣化進行に伴う微視ひび割れの影響によって中性化進行が早くなっていること

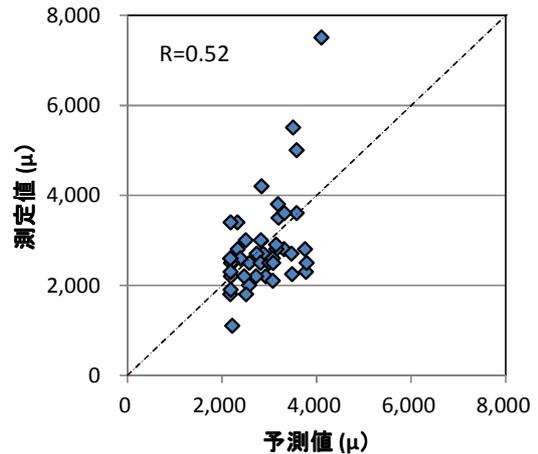


図-15 圧縮破壊時の最大ひずみの測定値と回帰式による予測値との関係

が推察される。

- (4) ASR劣化の指標として静弾性係数/圧縮強度比と圧縮強度の関係のほかに、圧縮破壊時の最大ひずみで示すことができる。これはASR劣化進行によって微視ひび割れが増加することによって圧縮破壊時の最大ひずみが増えると推察される。圧縮破壊時の最大ひずみはASR劣化進行を評価するのに静弾性係数/圧縮強度比より敏感な指標といえる。
- (5) 提案した式を用いて圧縮強度と静弾性係数の値から圧縮破壊時の最大ひずみを推定することができる。

参考文献

- 1) 川村 満紀：現場技術者のためのASR対策ノート、中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) pp.36-37, 2
- 2) 鳥居 和之, 野村 昌弘, 本田 貴子：北陸地方の反応性骨材の岩石学的特徴と骨材のアルカシリカ反応性試験の適合性, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.185-197, 2004.8
- 3) 青山 實伸^{*1}・石川 裕一^{*2}・足立 嘉文^{*3}・西尾 守広^{*4}：北陸地方での道路構造物の中性化深さの進行特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.635-640, 2010.7