

論文

ASR 劣化床版の弾性挙動に関する基礎的研究

久保善司*, 市原鴻**, 横山広***, 梶谷浩****

*博 (工), 金沢大学准教授, 理工学域環境デザイン学類 (〒920-1192 石川県角間町)

**学生, 金沢大学大学院, 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県角間町)

***博 (工), 株式会社国土開発センター技術開発研究所 (〒924-0838 石川県白山市八束穂 3 丁目 7 番地)

****工博, 金沢大学教授, 理工学域環境デザイン学類 (〒920-1192 石川県角間町)

促進養生によって ASR を生じさせた劣化床版および比較用の健全床版の供試体を作製し, 静的載荷試験を実施した. 載荷試験結果により得られた荷重-たわみ関係およびたわみの分布に対して, 有限要素法による弾性解析を実施し, 弾性範囲内の挙動における ASR 劣化の影響について検討した. その結果, 劣化が進行した供試体と健全な供試体とでは弾性域において荷重-たわみ曲線の形状に差異があることを確認した. また, 劣化供試体においては円柱供試体の圧縮強度に基づく構成式を用いた弾性解析によって評価した剛性よりも, 実際の剛性は小さくなった. 床版においては, ASR 膨張が部材剛性に顕著な影響を与える可能性が示唆された.

キーワード: アルカリ骨材反応, コンクリート床版, 力学特性

1. はじめに

コンクリート構造物において床版は走行時の安全性, 快適性に直接関わり, 変状に対する考え方も一般の部材と異なる. 通行止め等の影響による交通障害を最小限に押さえることが要求されるため, 走行安全性を確保するには, より早期の補修対策が必要となる. また道路橋示方書の改訂前に設計され, 現在の設計基準に比べ耐久性が低い床版が損傷する事例も多数報告されている. 結果として, 橋梁構造物の維持管理費に占める床版の費用は大きな割合を占めている. 他方, 劣化進行についても, 荷重繰返しによる疲労を受けるため, 他のコンクリート部材とは異なる. 現在でも, コンクリート床版の疲労損傷は報告されており, 疲労によりコンクリートが劣化するメカニズムは解明されつつあるものの, 全ての課題が解消されているわけではない.

コンクリート床版は他の部材とは異なり上下方向の膨張を拘束する鉄筋が存在せず, アルカリシリカ反応 (以下, ASR) が起こるとコンクリートに水平方向の水平ひび割れが生じることが知られている¹⁾. 他 ASR が床版の力学性能に与える影響については, 国内外を通じてその検討例は少なく, 十分な知見が得られていないのが現状である. そのため, ASR により劣化を生じた床版部材の力学的挙動を把握しておく必要がある. 本研究では, ASR による劣化を再現した床版供試体および同寸法の健全な床版供試体を作製し, 静的載荷試験を実施してそ

の結果を比較, 検討した. また載荷試験から得られた荷重-たわみ関係およびたわみの分布に対して有限要素法による弾性解析を実施し, 弾性範囲内の力学挙動における ASR 劣化の影響についても検討した.

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本実験で用いた示方配合を表-1 に示す. 水セメント比は, 標準的なコンクリートを想定し 55%とした. 等価アルカリ量は, セメントのアルカリ量を考慮し, 短期間で大きな膨張が得られるように Na_2O 等量で 8kg/m^3 となるよう調整した. 反応性細骨材の混入割合は, 細骨材全体質量の 30%とした.

供試体の寸法は縦 1150mm×横 1150mm, 厚さ 100mm とした. 鋼材として D10 の異形鋼棒を用いた. 鉄筋比は主筋方向, 配力筋方向共に 1.07% (圧縮側: 0.36%, 引張側: 0.71%) とした. 主鉄筋は床版の上面および下面から 20mm (上面から 20mm および 80mm) の位置に配置し, 配力鉄筋は上面および下面から 30mm (上面から 30mm および 70mm) の位置に配置したため, 有効高さ

表-1 示方配合

W/C	単位量 (kg/m^3)						
	W	C	G	Sn	Sr	AE 助剤	NaCl
55	168	305	980	550	236	0.16	12.1

Sn: 非反応性細骨材, Sr: 反応性細骨材

で計算した場合は主筋方向と配力筋方向の鉄筋比は異なる。それによって橋軸方向（配力筋方向）および橋軸直角方向（主筋方向）を区別した。作製供試体の鋼材配置を図-1 に示す。

2.2 ASR 促進環境

市販の家庭用プールを使用し、プール底面から供試体下面まで約 10cm のスペースを確保するよう設置した。プール底面から 7~8 cm 程度まで約 80°C の温水を流しこみ、常時供試体に熱と蒸気を与えた。供試体の温度低下を防ぐために養生マットと断熱材で供試体上面を覆い、プール全体をブルーシートで覆った。

ASR による膨張が顕著ではなかったため、促進養生 8 週目（養生 50 日目）からはプール内に市販の家庭用湯沸ヒーター（1000kW、上限温度 45°C）を入れ、コンクリート温度を 30°C から 39°C に保つようにした。

2.3 測定項目および载荷試験

(1) 膨張によるひずみの測定

供試体内部の膨張挙動を把握するため、供試体中央に埋込み式モールドゲージ（東京測器社製、PMFL-50、基長：50mm）を設置した。これにより厚さ方向のコンクリートひずみを測定した。

(2) テストピース（円柱供試体）の载荷試験

床版供試体のコンクリートの性質を把握し、解析に用いるパラメータを得るため、床版供試体の静的载荷試験を行う前日に、床版供試体と同じ条件で養生を行った円柱供試体（φ100×200mm）の一軸圧縮試験を健全供試体、劣化供試体それぞれに実施した。測定項目は荷重およびひずみとした。

(3) 床版供試体の载荷試験

载荷試験では静的载荷試験を実施し、支間 1m の 2 辺単純支持、2 辺自由の支点条件とした。供試体中央位置の 0.1m×0.1m 正方形範囲に荷重を载荷した。測定項目は载荷時の荷重および床版（中央付近、支点および自由端）の変位である。促進養生により ASR 劣化が認められる劣化床版供試体と、促進養生を実施していない健全供試体の 2 体に対し载荷試験を行った。荷重による床版の変形を観察するため、床版中央から十字を切るように変位計を配置した。変位計による床版の変位測定位置を図-2 に示す。ここで支持辺から支持辺へ向かう直線（黄線）による断面を A 断面、自由端から自由端への直線（緑線）による断面を B 断面とした。

2.4 有限要素解析

汎用有限要素解析ソフト DIANA を用い、床版を鉄筋の影響を無視した連続な等方弾性体のコンクリート板として解析を行った。実際の床版供試体には ASR による微小ひび割れや表面の剥離が確認されるため、厳密には弾性体とは見なし得ない。しかし、弾性範囲内の挙動に

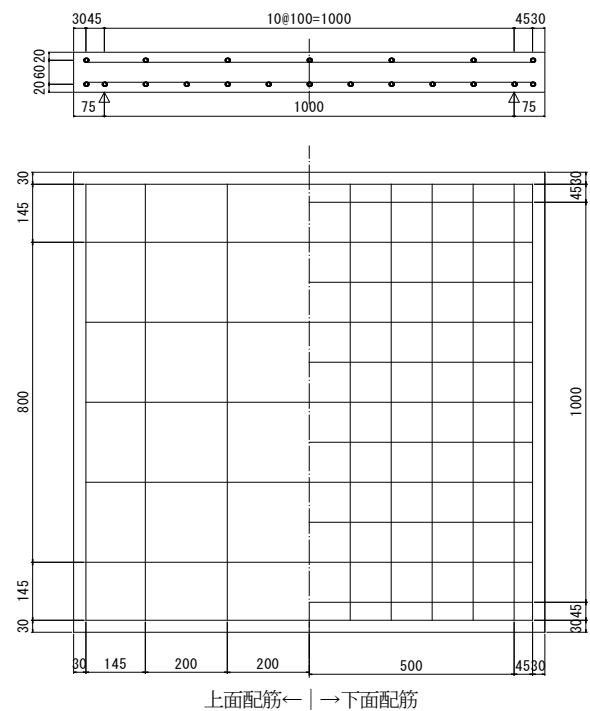


図-1 床版供試体鋼材位置

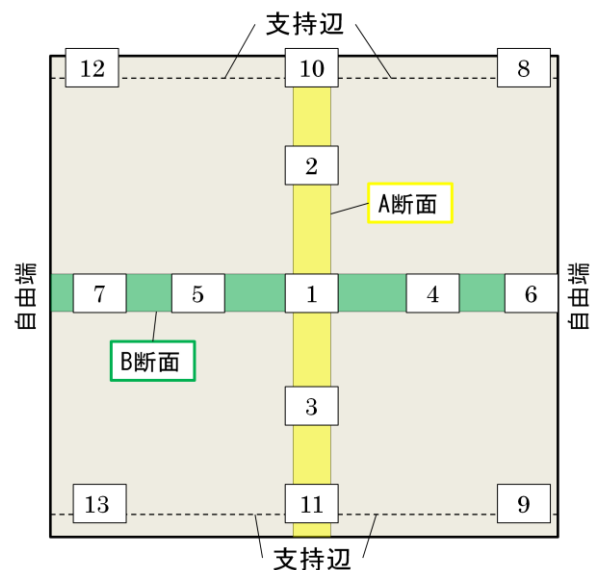


図-2 変位測定位置

健全供試体は 6, 7 の位置の変位は測定していない

においては巨視的に弾性体とみなし、床版部材の剛性、すなわち、弾性係数を検討することが可能であるとして、上記の解析を適用した。

3. 実験結果および考察

3.1 膨張挙動と劣化状況

促進日数と板の厚さ方向のひずみの経時変化を図-3 に示す。湯沸ヒーター投入以降（50 日以降）に膨張によるひずみの増加が確認された。

養生開始から 122 日時点で床版供試体の側面を一周す

るように幅 0.3mm ほどの水平方向のひび割れが生じた。ひび割れ幅がより顕著となった 140 日時点で载荷に適した膨張量に達したと判断した。

载荷試験前日の厚さ方向の膨張量は 3600 μ に達し、载荷試験の際に支持辺となる側面にはおよそ 0.6mm、自由端となる側面にはおよそ 0.3mm の水平ひび割れが見られた。上下方向の鉄筋間隔が広い側面の方が生じたひび割れ幅が大きくなった。水平方向に配置した鉄筋が厚さ方向の膨張を若干抑制したものと考えられる。なお、床版の上面および底面には幅 0.2mm 程度の方向性のないひび割れが見られた。

3.2 テストピースの载荷試験結果

健全および劣化円柱供試体の圧縮強度試験結果を表-2 に示す。劣化供試体には ASR による膨張ひび割れがいくつも見られたにもかかわらず、圧縮強度は健全供試体とほぼ同程度となった。静弾性係数は劣化供試体の方が小さくなったが、顕著な差は見られなかった。健全供試体は材齢 42 日、劣化供試体は材齢 207 日で圧縮試験を実施している。そのため ASR によってコンクリートの弾性係数は低下しているものの、本来生じるはずの弾性係数の差が材齢の差によってある程度打ち消されたものと考えられる。ポアソン比については ASR の影響により横方向の拘束力が低下したことから、劣化供試体のポアソン比は健全供試体よりも大きくなったと考えられる。

有限要素法を用いた解析においては、健全な円柱供試体の圧縮試験より得られた静弾性係数およびポアソン比をコンクリートのパラメータとして使用した。

3.3 床版供試体载荷試験結果

健全および劣化した床版供試体の载荷試験結果を以下に記す。健全供試体の結果を青線、劣化供試体の結果を赤線で示す。また有限要素法を用いた弾性解析結果は黒の点線で示す。解析モデルはソリッド要素で作成し、実験と同じ支持条件、载荷条件で解析を行った。

(1) 荷重—たわみ曲線

健全供試体、劣化供試体の実験結果および有限要素法での解析結果における版中央の荷重—たわみ曲線を図-4 に示す。健全供試体および劣化供試体は曲げ破壊が生じて荷重が上がらなくなるまで载荷した後に除荷した。最大荷重は健全供試体が 115kN、劣化供試体は 108kN となり、健全供試体のほうが若干耐荷性能は高くなったものの顕著な差は見られなかった。劣化供試体は健全供試体に比べたたわみ量が半分程度の時点で荷重が上がらなくなり载荷を終了している。また健全と劣化の 2 つの実験値は共に低い荷重段階から有限要素法による解析値のたわみ量を大きく上回り、荷重に対するたわみの増加量は荷重の増加とともに大きくなった。

コンクリートの弾性範囲的挙動の境となる荷重 30kN

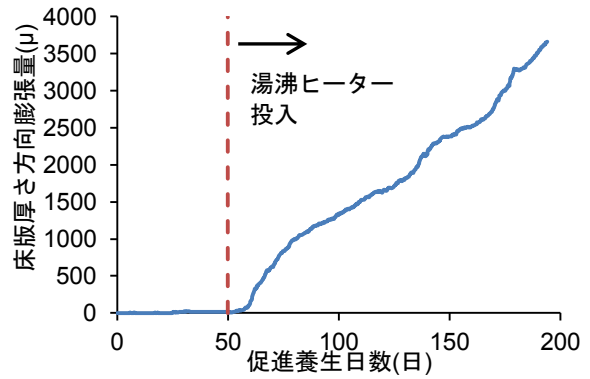


図-3 内部膨張量(厚さ方向)

表-2 円柱供試体の圧縮試験結果

	圧縮強度	静弾性係数	ポアソン比
健全	37.4N/mm ²	23.0 kN/mm ²	0.21
劣化	37.3N/mm ²	19.8 kN/mm ²	0.39

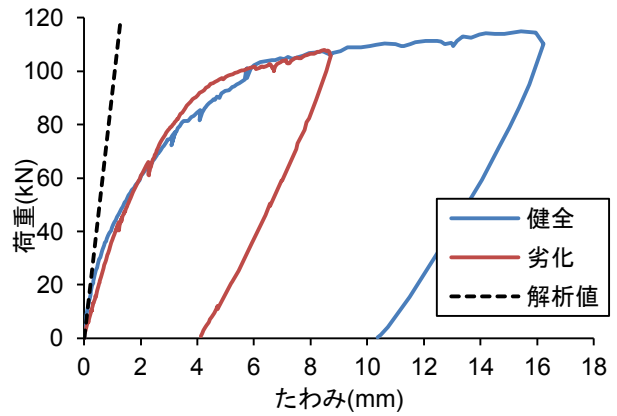


図-4 版中央の荷重—たわみ曲線

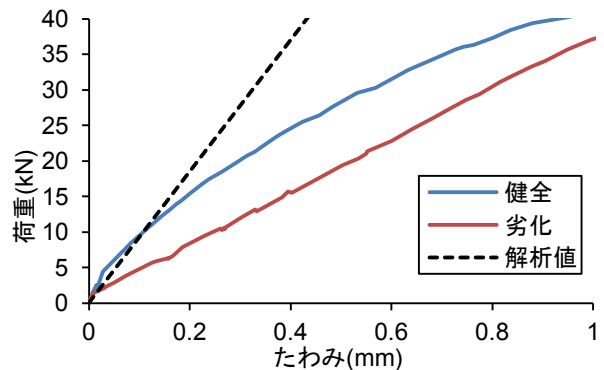


図-5 版中央の荷重—たわみ曲線 (弾性領域を拡大)

付近までの荷重—たわみ曲線を拡大した様子を図-5 に示す。実験値は共に早い段階からたわみが解析値を上回っているが、劣化供試体の方がたわみは大きく、剛性が小さい板としての挙動が見られた。また荷重—たわみ曲線の形に注目すると、健全供試体は解析値に近かった曲線の勾配が段々と緩やかになっていったのに対し、劣化供試体は荷重のかかり始めの段階から曲線の勾配は解析値からかけ離れており、荷重 40kN まではその勾配は

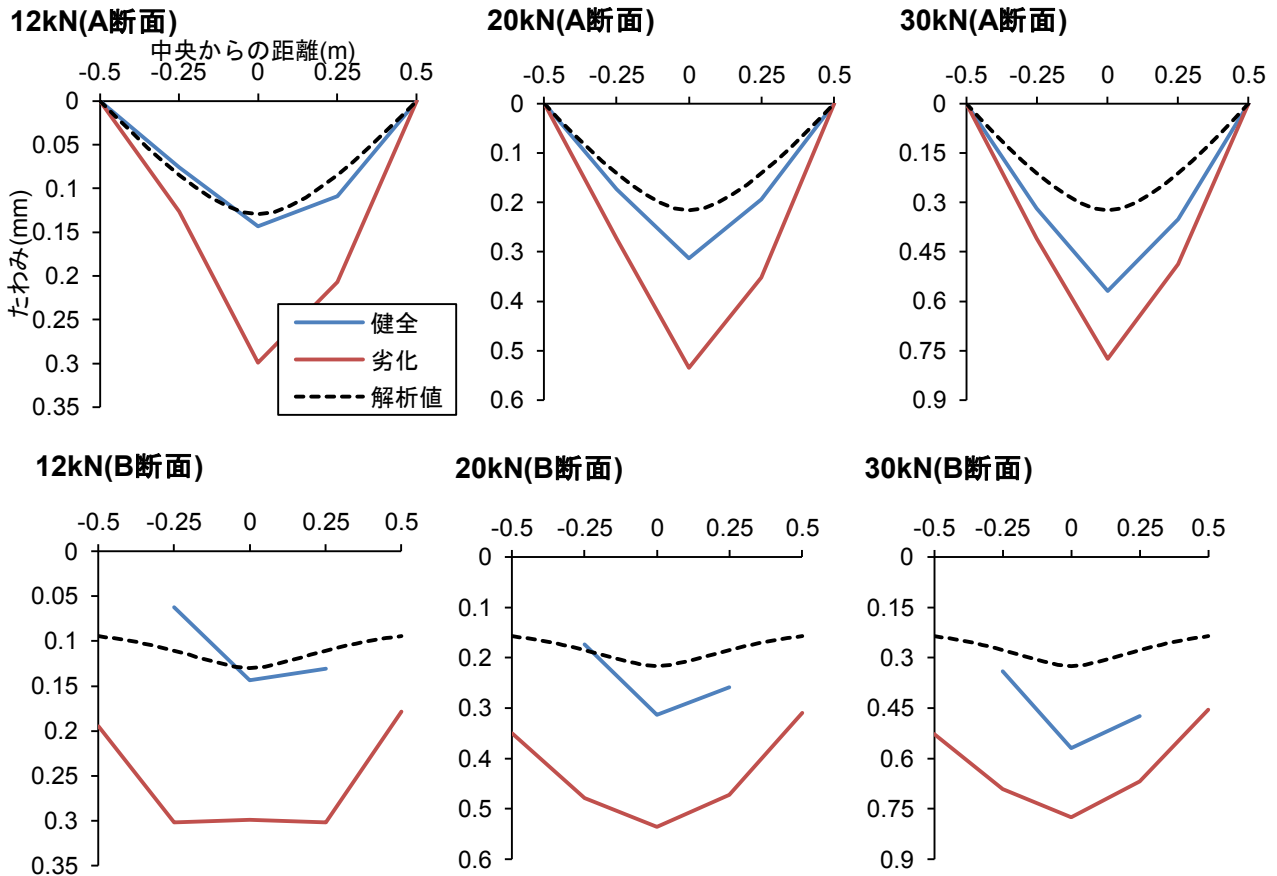


図-6 たわみの分布

大きく変化していない。この荷重—たわみ曲線の形状は過去に実施した、ASR 劣化が確認された実橋の切出し床版の載荷試験²⁾においても同様の特徴が確認される。

(2) たわみの分布

健全供試体および劣化供試体の荷重 12kN, 20kN, 30kN 時点における A 断面および B 断面のたわみの分布を図-6 に示す。それぞれのグラフには解析による計算結果も黒点線で示した。図に示すように健全供試体のたわみ分布はある程度解析値に近い結果となったが、劣化供試体は健全供試体の 2~3 倍程度のたわみ量となった。コンクリートの静弾性係数には極端な差は無いにもかかわらず、たわみ量には顕著な差が現れた。ASR の膨張によるひび割れが床版の剛性を大きく下げる要因になったものと考えられる。また、健全供試体も荷重が大きくなるごとにたわみ量は解析値から離れていった。荷重が塑性域に近くなるほどこの傾向は大きく、60kN 付近を超えてからは健全供試体と劣化供試体のたわみ量が同程度の値となった。今回の実験において塑性域とみなしうる荷重領域では、ASR に起因する膨張ひび割れによる剛性低下よりも、荷重増加に伴う曲げひび割れの進展による剛性低下が大きく作用したものと考えられる。

4. まとめ

本研究では促進養生によって ASR を生じさせた劣化床版および比較用の健全床版の供試体を作製し、静的載荷試験を実施すると共に有限要素法による解析的検討を行った。得られた結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 劣化が進行した供試体と健全な供試体とでは弾性域において荷重—たわみ曲線の形状に明らかな差異があることを確認した。
- 2) 圧縮強度に基づく構成式を用いた弾性解析によって評価した剛性よりも実際の剛性は小さく、劣化供試体においてその傾向はより顕著であった。床版において ASR 膨張が部材挙動に顕著な影響を与える可能性が示された。

参考文献

- 1) 宮野ら：ASR 劣化床版の力学的性能に関する基礎的研究，土木学会第 64 回年次学術講演会概要第 5 部，pp.247-248, 2009.9
- 2) 横山ら：ASR により劣化した道路橋床版の重錘落下载荷試験による健全度評価，土木学会第 68 回年次学術講演会，pp.841-842, 2013.9