

論文 ASR 膨張により劣化した RC 部材の耐荷性能について

田附 伸一*1・津吉 毅*2・松田 芳範*3・今井 勉*4

要旨：ASR によりひび割れが発生している完成後約 24 年経過した鉄道ラーメン高架橋から RC スラブ部材を切出し、外観状況の観察および材料強度試験、また梁試験体を成形して静的載荷試験を実施した。その結果、RC スラブ部材には層状のひび割れが卓越していることが確認された。テストピースによるコンクリート圧縮強度、静弾性係数の測定結果は、設計値よりも低下している結果だった。しかし、載荷試験の結果、ASR 梁試験体は ASR のない梁試験体よりも新たなひび割れが進展しにくく、大きな耐荷性能を有していた。

キーワード：ASR、ひび割れ、鉄筋付着応力度、鉄筋ひずみ、せん断耐力

1. はじめに

アルカリシリカ (ASR) 反応によりひび割れを生じた鉄筋コンクリート部材の耐荷力は、鉄筋が適切に配置されている場合には、ほとんど低下しないことが報告されている¹⁾。しかし、これらの報告は、ASR を人為的に発生させた模型部材を用いたものが多く、実際に供用中に ASR によりひび割れが発生した部材を用いた例は少ない。

著者らは、ASR によりひび割れが発生している完成後約 24 年経過した鉄道ラーメン高架橋から RC スラブ部材を切出し、外観状況の観察および材料強度試験を行うとともに、RC スラブ部材から梁試験体を成形し、静的載荷試験を実施したので、その結果について報告する。

2. 部材外観状況

当該の RC スラブ部材は、スパン約 8m の 3 径間の鉄道 RC ラーメン高架橋の側径間および中央径間の 2 箇所の間中スラブである。切出した RC スラブ部材の寸法は、長さ 6m × 幅 2m × 厚さ 0.25m である。設計図によると鉄筋は、橋軸方向では D16 が 200mm 間隔 (スラブ下側) および 400mm 間隔 (スラブ上側) に配置されており、軸直角方向では D19 が 125mm 間隔 (スラブ下側) および 250mm 間隔 (スラブ上

側) に配置されている。

RC スラブ部材の外観のひび割れ状況を図 - 1 に示す。スラブの上下面においては、亀甲状の不規則なひび割れが発生しており、下面のひび割れからは白色の析出物が発生していた。ひび割れ幅は 0.05mm ~ 0.30mm の範囲であった。

この RC スラブ部材を切断し、厚さ方向のひび割れ状況を確認したところ、ひび割れが層状に生じていることが確認された。梁形状に切断した ASR 梁試験体のひび割れ展開図を図 - 2 に示す。これは、ASR による膨張が高架橋の梁部材およびスラブの鉄筋により拘束されたために、層状のひび割れが卓越したものと推察される。

3. 材料強度特性

コンクリートの材料特性の変化を確認する目的で、RC スラブ部材からコア供試体を採取した。コア供試体は、層状にひび割れが進展している部材軸方向に採取したものと部材軸直角方向に採取したものと (以下、A 方向) の 2 種類を採取した。部材軸方向については、RC スラブ部材の長辺方向 (以下、B 方向) と短辺方向 (以下、C 方向) にそれぞれ採取した。コア供試体の採取方向を図 - 3 に示す。

*1 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター コンクリート構造 G 主席 (正会員)

*2 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター コンクリート構造 G 課長 博士(工学) (正会員)

*3 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター コンクリート構造 G 主席 (正会員)

*4 東日本旅客鉄道株式会社 設備部 鉄道防災 G 主席

これらのコア供試体を用いて圧縮強度試験 (JIS A 1108), 静弾性係数試験 (JIS A 1149), 割裂試験 (JIS A 1113) を行った。圧縮強度試験, 静弾性係数試験には直径 100mm のコア供試体を使用し, 割裂試験には直径 50mm のコア供試体を使用した。

なお B 方向 C 方向から採取したコア供試体は, 軸方向にひび割れが進展していたため, 割裂試験は行っていない。

試験結果の一覧を表 - 1 に示す。A 方向に採取したコア供試体は, ASR により発生したひび割れにより折損しており, 長さのばらつきが大きい。そのため試験結果には, 供試体の長さが 200mm に満たないコア供試体の圧縮試験結果も含んでおり, コア供試体寸法による補正を行った値を示している。

A 方向のコア供試体の圧縮強度は平均で $17.3\text{N}/\text{mm}^2$ で最も小さく, B 方向のコア供試体では $25.5\text{N}/\text{mm}^2$, C 方向のコア供試体では $22.4\text{N}/\text{mm}^2$ であった。当該箇所のコンクリート設計基準強度は $27\text{N}/\text{mm}^2$ であるが, 建設当時の 28 日強度は, $35\text{N}/\text{mm}^2$ であったことが財産図に残されていた。この値と比較すると, ASR によりコンクリート圧縮強度が 50% ~ 70% 程度に低下している結果となった。

静弾性係数は, A 方向のコア供試体が $1.8\text{kN}/\text{mm}^2$ と非常に小さい結果であった。B 方向, C 方向のコア供試体はそれぞれ, $15.6\text{kN}/\text{mm}^2$, $17.7\text{kN}/\text{mm}^2$ であった。圧縮試験結果と同様に, A 方向ではコア供試体の軸方向と直角にひび割れが進展している影響により値が小さくなったものと考えられる。

コンクリートの 28 日強度 ($f_{ck} = 35\text{N}/\text{mm}^2$) から推定される設計静弾性係数 $^{2)}29.5\text{kN}/\text{mm}^2$ と比較すると, A 方向では 6% 程度, B 方向および C 方向では 53% ~ 60% 程度に低下していた。

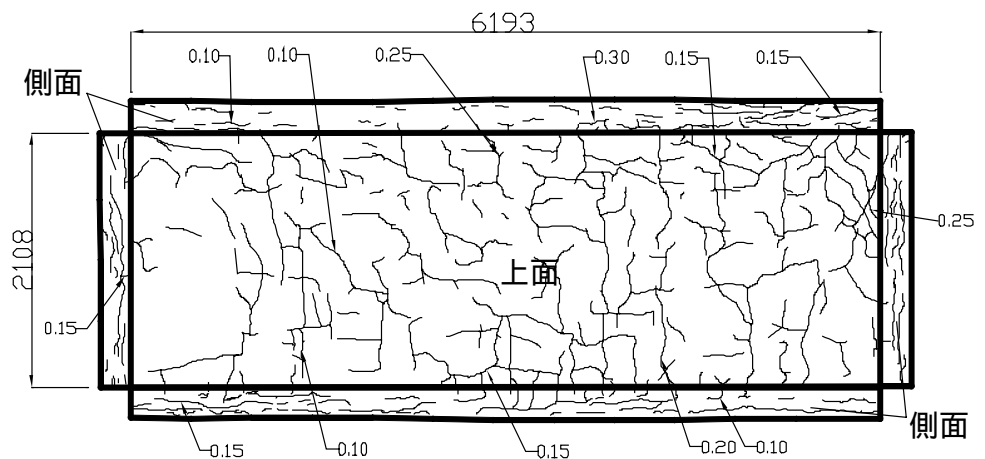


図 - 1 RC スラブ部材の外観状況 (展開図)

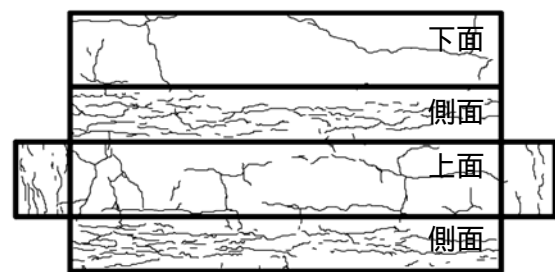


図 - 2 梁試験体のひび割れ展開図
スラブ部材

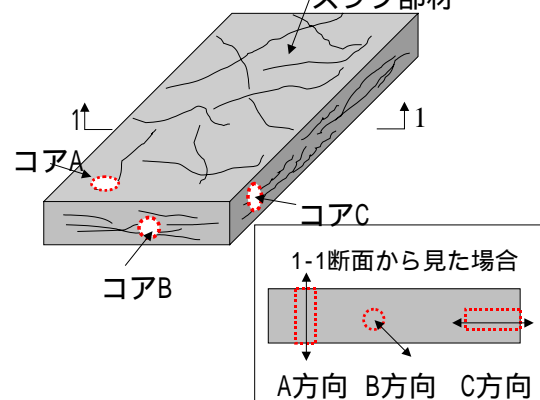


図 - 3 コア供試体の採取方向

割裂強度は前述のとおり, A 方向から採取したコア供試体でのみ行った。結果は $2.6\text{N}/\text{mm}^2$ であり, コンクリート 28 日圧縮強度から推定される設計引張強度 $^{2)}2.45\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の強度であった。

4. 載荷試験

4.1 鉄筋の引抜き試験

RC スラブ部材は, 部材厚さ方向に層状にひび割れが進展しているため, 軸方向鉄筋の付着強度が劣化していることが考えられた。そこで, 軸方向

鉄筋の付着強度を確認する目的で、鉄筋の引抜き試験を行った。試験方法は土木学会基準（JSCE-G 503-1999）に準拠した。ただし、試験体はスラブ部材から切出して成形したため、軸方向鉄筋が部材軸中心に配置されていない。最もかぶり薄い箇所では 70mm であった。試験体の全長は 1000mm である。鉄筋定着長は 15 程度となるように 300mm を確保することとして、残りの 700mm はジャッキを設置できるように鉄筋をはつり出した。

試験結果を比較するために同じ配筋状況を再現し、ASR のない試験体（コンクリート圧縮強度 27N/mm²）を製作した。

ASR 試験体の試験略図を図 - 4 に、試験結果を図 - 5 に示す。ASR のない試験体の最大付着応力度は 24.6N/mm² であった。一方、ASR 試験体の最大付着応力度は 21.4 N/mm² であり、ASR のない健全な試験体よりも 13% 程度小さくなる結果であった。

4.2 梁試験体の鉄筋ひずみ測定試験

ASR 梁試験体では、ASR の膨張圧を軸方向鉄筋が拘束していることにより、梁試験体に軸圧縮力が作用していると考えられる。そこで、梁形状に切断した試験体を用いて、主として ASR により生じたと考えられる鉄筋ひずみ測定を行うこととした。

鉄筋切断後のひずみと鉄筋応力の推定値を表 - 2 に示す。長さ 2000mm の梁試験体の両側面から、片側 2 箇所ずつ引張鉄筋を 100mm 程度はつり出してひずみゲージが貼り、ひずみを計測しながら鉄筋を切断した。はつり出す位置は、1000mm 程度離して相互に干渉しないように配慮した。

鉄筋ひずみの測定値は、平均値は 271×10^{-6} であり、梁試験体に作用する鉄筋応力は 54.2N/mm² であった。

4.3 梁試験体の載荷試験

梁試験体の諸元を表 - 3 に、梁試験体の材料強度、耐力の計算値²⁾³⁾⁴⁾と実験結果を表 - 4 に、試験全体図を図 - 6 に示す。梁試験体長さは 2.0m である。表 - 4 の材料強度は、供試体の試験結果である。

K-1, K-2 試験体は、比較用として新たに製作した ASR のない基準試験体である。鉄筋配置および

表 - 1 コア供試体試験結果

名称	圧縮強度 (N/mm ²)			静弾性係数 (kN/mm ²)			割裂強度 (N/mm ²)
	A	B	C	A	B	C	A
	17.6	24.6	26.8	1.9	16.2	22.0	2.1
	19.6	30.1	19.0	2.2	14.4	19.1	2.5
	14.7	21.8	21.4	1.5	16.3	12.1	3.1
平均	17.3	25.5	22.4	1.9	15.6	17.7	2.6
BCの平均	-	24.0	-	-	16.7	-	-

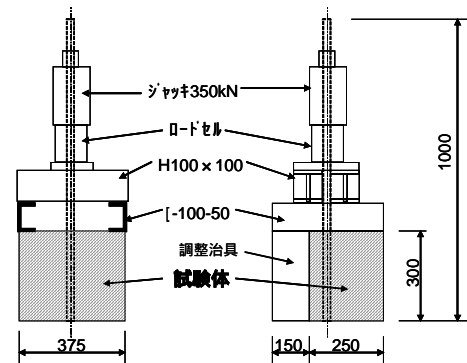


図 - 4 引抜き試験略図

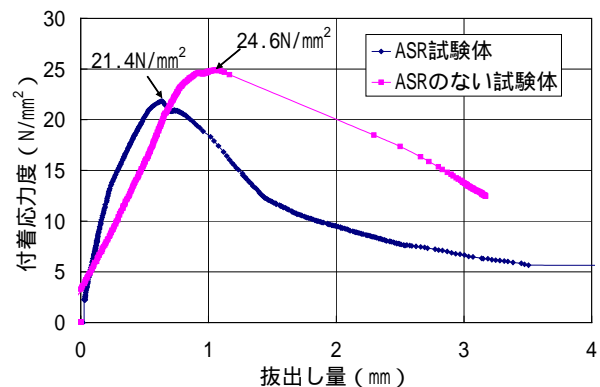


図 - 5 引抜き試験結果

表 - 2 鉄筋ひずみ測定結果

No.	鉄筋ひずみ ($\times 10^{-6}$)	鉄筋応力度 (N/mm ²)
	189	37.8
	443	88.6
	182	36.4
	270	54.0
平均値	271	54.2

鉄筋のヤング係数：200kN/mm²

寸法については、ASR 試験体の状態を再現して製作し、コンクリート圧縮強度は ASR 試験体に近づけるように低めに設定した。また、引張鉄筋のスパン中央付近にひずみゲージを貼り付けている。

A-1 から A-5 試験体は RC スラブ部材から成形し

表 - 3 梁試験体諸元

試験体名称	断面高さ (mm)	断面幅 (mm)	上縁かぶり (mm)	下縁かぶり (mm)	有効高さ d (mm)	載荷点	せん断スパン a (mm)	a/d	端部から支点までの距離 (mm)	鋼板溶接	上縁側鉄筋本数
K-1	250	375	50	39	211	1点	800	3.8	100	無し	1
K-2	250	375	50	39	211	2点	500	2.4		無し	2
A-1	260	375	75	35	225	1点	800	3.6		無し	1
A-2	260	375	70	40	220	1点	800	3.6		有り	1
A-3	265	375	78	45	220	2点	500	2.3		無し	2
A-4	260	375	70	40	220	2点	500	2.3	有り	2	
A-5	262	375	77	42	220	2点	500	2.3	300	有り	1

表 - 4 梁試験体の材料強度と耐力計算値、最大荷重

試験体名称	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋降伏強度 (N/mm ²)	曲げ耐力換算荷重 (kN)	せん断耐力換算荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	引張鉄筋のめり込み
K-1	19.2	360	141	144	163	無し
K-2	19.2	360	226	179	185	無し
A-1	24.0	390	171	163	162	有り
A-2	24.0	390	165	160	186	無し
A-3	24.0	390	270	206	274	有り
A-4	24.0	390	266	206	283	有り
A-5	24.0	390	267	206	319	無し

た ASR 試験体である。切出しの都合上, ASR 試験体の上側鉄筋は 1 本または 2 本配置されている。A-2, A-4, A-5 試験体は, 試験体端部において鋼板 (t=3.2mm) を引張鉄筋に溶接し, 引張鉄筋の定着劣化によるめり込み防止を行っている。コンクリート圧縮強度は, コア供試体の B 方向の結果と C 方向の結果の平均値を用いることとした。

(1) 基準試験体結果

K-1 試験体の荷重変位関係を図 - 7 に示す。図には, 表 - 4 に示した曲げ耐力, せん断耐力の計算値の換算荷重も示した。

載荷を開始して, 30kN 載荷時にスパン中央付近に曲げひび割れが発生した。その後, 曲げひび割れが進展し, 133kN 載荷時に引張鉄筋のひずみが 2000×10^{-6} を超え, 支点部と載荷点を結ぶようにひび割れが卓越して耐力低下に至った。試験体端部における引張鉄筋のめり込みは目視では確認できなかった。最大荷重は 163kN で引張鉄筋のひずみは 3000×10^{-6} , 圧縮側のコンクリート表面ひずみは 1400×10^{-6} であった。

K-2 試験体の荷重変位関係を図 - 8 に示す。

載荷を開始して, 50kN 載荷時にスパン中央付近

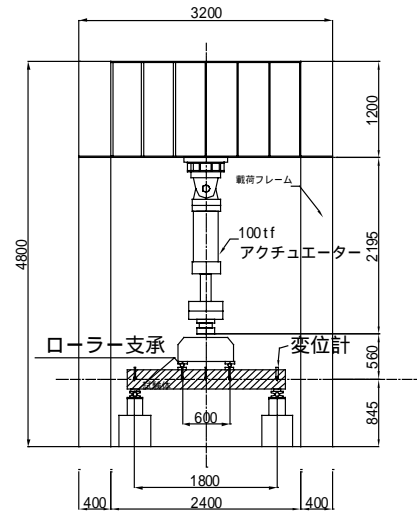


図 - 6 載荷試験全体図

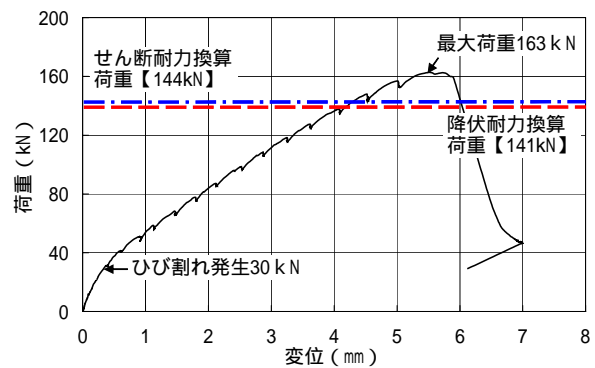


図 - 7 荷重変位関係 (K-1)

に曲げひび割れが発生した。その後, 支点部と載荷点を結ぶようにひび割れが卓越して耐力低下に至った。試験体端部における引張鉄筋のめり込みは目視では確認できなかった。最大荷重は 185kN で引張鉄筋のひずみは 1800×10^{-6} , 圧縮側のコンクリート表面ひずみは 1000×10^{-6} であった。

(2) ASR 試験体結果

A-2 試験体の試験状況を写真 1 に, 荷重変位関係を図 - 9 に示す。図には, 表 - 4 に示した曲げ耐

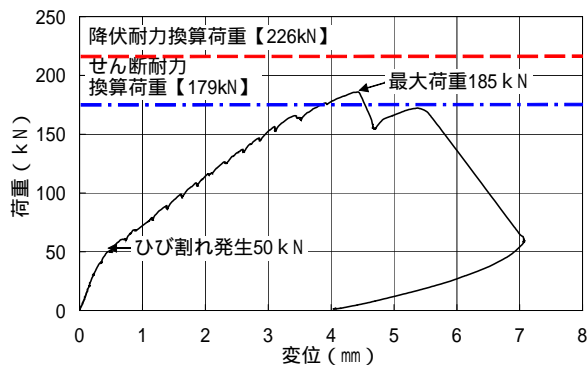


図 - 8 荷重変位関係 (K-2)

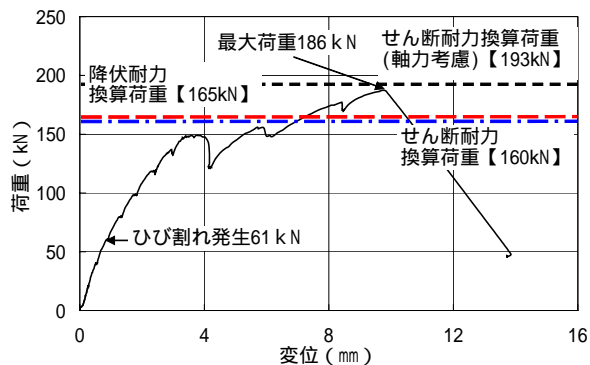


図 - 9 荷重変位関係 (A-2)

力, せん断耐力の計算値の換算荷重も示した。

載荷を開始して, 61kN 載荷時にスパン中央付近に曲げひび割れが発生した。その後, 支点部と載荷点を結ぶようにひび割れが卓越して耐力低下となったが, 支点付近ではひび割れが, 引張鉄筋に沿って試験体端部まで進展していた。引張鉄筋のめり込みは目視では確認できなかった。最大荷重は 186kN であり, 圧縮側のコンクリート表面ひずみは 1800×10^{-6} であった。ASR のない K-1 試験体と比較すると, 載荷による新たなひび割れが進展しにくい傾向が見られた。これは, 層状に発生した ASR によるひび割れの影響によると思われる。

A-5 試験体は, 試験体端部から 300mm の位置を支点とした。これは, 試験体端部から 100mm の位置を支点とした A-4 試験体が, 載荷により溶接した鋼板から鉄筋が拔出して, めり込んでしまったためである。せん断スパンは, 載荷点間隔を狭くすることで 500mm を確保している。

A-5 試験体の試験状況を写真 2 に, 荷重変位関係を図 - 10 に示す。

載荷を開始して, 80kN 載荷時にスパン中央付近に曲げひび割れが発生した。その後, 支点部から載荷点に向かってひび割れが進展したが, 載荷点には到達せず, 両支点部から進展したひび割れがアーチ型を形成した。その後, 載荷点付近のコンクリートが圧縮破壊して耐力低下となった。試験体端部での引張鉄筋のめり込みは確認できなかった。最大荷重は 319kN で圧縮側のコンクリート表面ひずみは 4151×10^{-6} であった。A-2 試験体と同様に, ASR によるひび割れが新たなひび割れの進展を



写真 1 A-2 試験状況

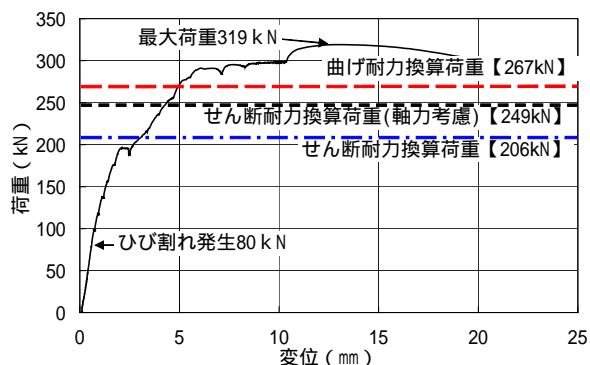


図 - 10 荷重変位関係 (A-5)

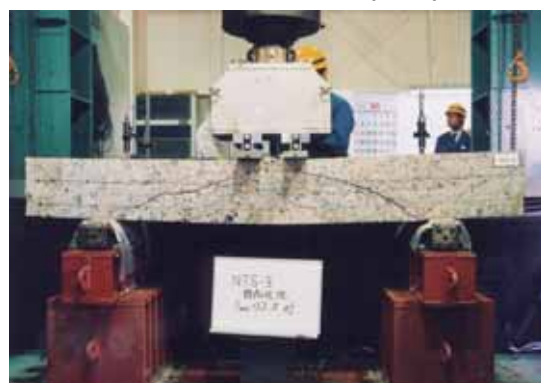


写真 2 A-5 試験状況

阻害する影響が確認された。

5. せん断耐力の再検討

表 - 4 中の引張鉄筋がめり込んだ試験体を除い

て、ASR 試験体の実験結果は計算値よりも大きく、基準試験体の K-1 K-2 試験体がそれぞれ 1.13、1.04 であるのに対して、A-2、A-5 試験体では 1.16、1.55 であった。

ASR 試験体では ASR の膨張圧を軸方向鉄筋が拘束していることにより、試験体に軸圧縮力が作用して、せん断耐力が向上していることが考えられる。そこで、前述した鉄筋ひずみ試験結果を用いて平面保持の仮定により、試験体に作用する軸圧縮力を推定した。このときのコンクリートのヤング係数は、コア供試体の B 方向と C 方向の結果の平均値 16.7kN/mm^2 を用いた。

せん断耐力の計算値と A-2、A-5 試験体の実験結果の比較を表 - 5 に示す。また、図 - 9 および図 - 10 には、それぞれの軸圧縮力を考慮したせん断耐力の換算荷重を示した。軸圧縮力を考慮すると、せん断耐力の計算値はそれぞれ 96.7kN、124.4kN となり、軸圧縮力を考慮しない場合のせん断耐力よりも約 21% 向上した。

表 - 5 せん断耐力の比較

No.	実験結果 (kN)	Vc (kN)	
		軸力考慮しない	軸力考慮する
A-2	93.0	79.9	96.7
A-5	160.0	102.8	124.4

実験結果の最大荷重を1/2してせん断力を算出

この結果、ASR 試験体の実験結果と軸力を考慮した場合の計算値との比は、A-2 試験体では 0.96、A-5 試験体では 1.29 となったが、A-5 試験体では実験値がまだ 30% 程度大きい。これは、もともと ASR により発生していたひび割れが、載荷によるひび割れの進展を妨げるように影響したことなどにより、アーチ機構が形成されたものと推定される。このことは、ASR の損傷を受けた部材では耐荷機構が変化することを示唆しているもので、部材性能を把握する上でその評価が重要であることを示していると考えられる。

また、コンクリート圧縮強度はコンクリートコアの採取方向により大きくばらつくため、せん断耐力を算定する際のコンクリート圧縮強度の評価

が困難なものとなっている。これらについては、今後さらに検討していきたい。

6. まとめ

以上の結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) RC スラブ部材の四辺が高架橋の梁部材および鉄筋で拘束されているため、層状のひび割れが卓越していた。
- (2) コンクリート圧縮強度、静弾性係数はひび割れの影響により、コアの採取方向でばらつく結果であった。それぞれ $f_{ck}=35\text{N/mm}^2$ と比べると、コンクリート圧縮強度では 50% ~ 70% 程度、静弾性係数では 6% ~ 60% 程度であった。
- (3) 主として ASR の膨張圧によるものと考えられる鉄筋ひずみは、 271×10^{-6} 程度であった。
- (4) 載荷試験の結果、ASR 梁試験体は ASR のない梁試験体よりも新たなひび割れが進展しにくい傾向が見られた。これは、層状に発生した ASR によるひび割れが影響しているものと考えられる。

参考文献

- 1) 棚橋ほか：ASR によって劣化した RC はりおよび柱の力学的挙動について、コンクリート工学年次論文集，vol.18，No.1，1996
- 2) 運輸省鉄道局：鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物，1999.11
- 3) 石橋ほか：少数本の杭を用いたフーチングのせん断設計について、土木学会論文報告集，第 337 号，pp197-204，1983.9
- 4) 二羽ほか：せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集第 372 号，pp167-176，1986.8
- 5) 鳥取ほか：プレストレストコンクリートはりのせん断耐力，PC 技術協会第三回シンポジウム論文集 pp5-8，1992.11