

論文 ASR 膨張が内部コンクリートの強度特性に与える影響

久保 善司*¹ 渡邊 悠輔*² 森 寛晃*³ 小川 彰一*⁴

要旨: 近年, アルカリ骨材反応 (ASR) の過大膨張により著しく劣化した構造物が報告されている。膨張が適切に拘束されている場合には, 耐荷性状に与える影響は顕著でないと考えられている。ASR 膨張が与える影響の程度は拘束条件によって異なるものと考えられる。そこで, 鉄筋等の拘束下にある内部コンクリートの力学特性を明らかにすることとし, 拘束レベルの異なる構造物内部のコンクリートを模擬した供試体を作製し, 膨張収束後の供試体の一軸圧縮荷重試験を行い, その力学特性について検討を行った。その結果, 実構造物程度の拘束下にある内部コンクリートは顕著な強度低下を生じないことが明らかとなった。

キーワード: アルカリ骨材反応, 内部コンクリート, ASR 膨張, 拘束, 強度特性

1. はじめに

近年, アルカリ骨材反応 (ASR) による過大な膨張を生じて著しく劣化した構造物が報告されている。アルカリ骨材反応により劣化した構造物の耐荷性能については, 内部に配置された鉄筋によって適切に拘束されている場合には, 健全なものに比べて顕著な低下はないものとされてきた。しかし, 過大な膨張を生じて鉄筋破断, 内部コンクリートの強度低下などを生じた構造物も報告されるようになり, これらの構造物の補強対策が実施された事例も報告されている¹⁾。一方, アルカリ骨材反応により劣化したコンクリート構造物の補修・補強を含めた維持管理対策は確立されておらず, その確立が急務とされている。

アルカリ骨材反応による膨張がコンクリートの強度特性に与える影響については, その膨張によってコンクリート強度が低下することがこれまでの実験結果^{2),3)}や構造物から採取したコンクリートコアの圧縮試験⁴⁾より示されている。また, アルカリ骨材反応の補強設計に必要な ASR 劣化コンクリートの力学的性能に関する数値データの収集を目的として, 膨張量とその力学的性能について検討し, 膨張が圧縮強度に与える影響は顕著でなく, ヤング係数, ポアソン比など変形特性に与える影響が顕著であったとされている³⁾。海外では, 膨張量と圧縮強度との関係についての実験結果に基づき, その下限値をカバーする形でその関係式が提案されている例がある^{5),6)}。これらの検討は無拘束のコンクリートに関するものであり, 鉄筋拘束がある場合にはその膨張が抑制されることでその力学性状は大きく異なるものと考えられる。鉄筋拘束の影響を受けた場合のコンクリート供試体を用いた力学特性に関しては, きわめて鉄筋拘束が

小さいものでは, 拘束の大きなものより強度低下が大きいとされている⁷⁾。一方, 横拘束筋を配置した柱部材を想定した検討においては, 実構造物程度の拘束量を有するものでは, 最大耐力の大きな低下はないとされている⁸⁾。また, 帯筋を配置したものでは, コンクリート強度が同一の場合には, 10 ~ 20 % 程度耐力が大きくなるとされている⁹⁾。

これらの検討においては, 内部に配置された鉄筋拘束の影響について, コンクリート表面から膨張を計測しており, かぶりコンクリートの影響も大きいと考えられる。すなわち, 拘束下にあるコンクリート内部はかぶり部よりも大きな拘束を受けており, これまでの耐荷性状に関する実験結果において, 自由膨張やテストピース強度の強度低下に比して, 部材自身の耐荷性状に大きな影響がなかった大きな要因として, 拘束下にある内部コンクリートの強度特性は健全な状態に近く保たれているものと考えられる。

そこで, かぶりコンクリートの影響を受けない内部の状態を模擬したコンクリート供試体を作製し, ASR 膨張が内部コンクリートの強度特性に与える影響について検討することとした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) コンクリート

セメントには普通ポルトランドセメント (密度: 3.16g/cm³) を用いた。細骨材として非反応性骨材を用い, 静岡県産骨材 (密度 2.62g/cm³) を用い, 粗骨材には, 反応性骨材として安山岩砕石 (密度 2.68g/cm², 吸水率 1.48 %, Gmax : 20mm) を用いた。添加アル

*1 金沢大学 工学部土木建設工学科准教授 工博 (正会員)

*2 金沢大学 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (非会員)

*3 太平洋セメント (株) 中央研究所補修診断チーム 工修 (正会員)

*4 太平洋セメント (株) 中央研究所補修診断チーム 葉修 (正会員)

カリとしてNaOHを用い、短期間に大きな膨張が得られるよう等価アルカリ量を 8.6kg/m^3 とした。なお、NaOH(試薬特級)は練混ぜ水に添加した。コンクリートの配合を表-1に示す。

2.2 実験要因

(1) 拘束

実構造物および部材の拘束条件は、構造物・部材ごとに異なる。

また、同一部材においても主方向および配力筋方向とでも異なる。道路橋脚の軸筋量が1%程度であり、橋台などではこれよりも小さく、梁の場合には複鉄筋であれば1%を上回る。これらの拘束範囲を網羅できるように、主に部材軸方向の拘束量の影響について着目し、0.28～2.4%の範囲で4水準の軸拘束レベルを用意した。これらの拘束レベルの供試体作製においては、拘束用鋼材としてPC鋼材を用い、PC鋼材の直径を9.2mm、15mm、19mmおよび26mmのものを拘束筋として軸方向に配置することで拘束筋量を変化させた。また、鋼材降伏の影響についても検討するため、9.2mm径のPC鋼材と同程度の拘束量(0.28%)となる異形鉄筋D10を配置するものを用意した。使用した鋼材の機械的性質を表-2に示す。

軸直角方向の拘束には、鉄筋と同等のヤング係数を有する炭素繊維シートを用いた。炭素繊維シートの横拘束量として、実構造物でのアルカリ骨材反応による被害は1985年以前のアルカリ骨材反応抑制対策以前のものがほとんどであることから、平成8年度コンクリート標準示方書以前の最低レベルに相当する0.2% (体積比)とした。炭素繊維シートの物理的・機械的性質を表-3に示す。

(2) 載荷時期

各拘束供試体の膨張収束後に静的一軸圧縮載荷試験を実施した。なお、軸筋比0.80%のものについては、膨張収束後に軸拘束および横拘束を解放し、解放後の膨張が収束した時点で載荷試験を実施するものを用意し、拘束が解放された場合の力学的特性についても検討するこ

表-1 示方配合

W/C	s/a	空気量	スランプ	単位量 (kg/m^3)					
				W	C	S	G	AE 減水剤	AE 助剤
(%)	(%)	(%)	(cm)						
50	44.0	4.0 ± 1.5	12 ± 2.5	168	336	790	1029	2.69	0.67

表-2 鋼材の機械的性質

鋼材	直径 (mm)	断面積 (mm^2)	拘束筋比 (%)	引張強度 (N/mm^2)	降伏強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
$\phi 9.2$	9.04	64.1	0.30	1330	-	208.0
$\phi 15$	14.84	172.8	0.80	1303	-	205.9
$\phi 19$	18.84	278.7	1.29	1236	-	206.4
$\phi 26$	25.46	508.8	2.37	-	-	206.6
D10	8.81	61.0	0.28	560	361	186.5

表-3 シートの物理的・機械的性質

繊維目付 (g/m^2)	シート幅 (mm)	設計厚さ (mm)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
300	50	0.167	3400	245

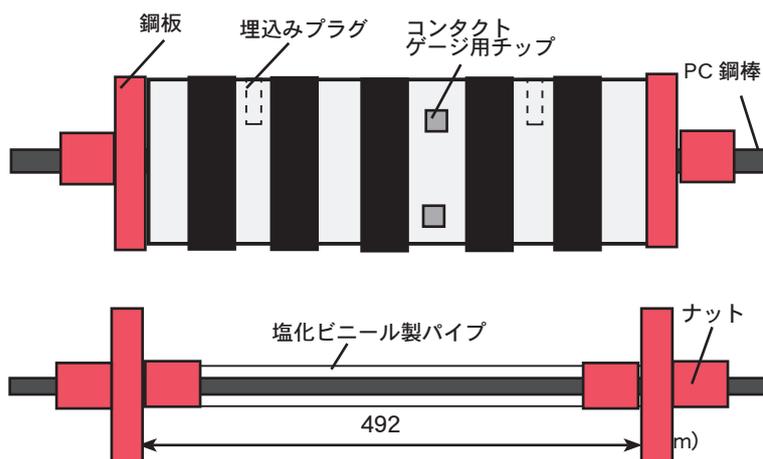


図-1 供試体概要

ととした。

2.3 供試体

供試体は $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 492\text{mm}$ の角柱供試体を作製した。コンクリート断面中央に塩化ビニール製パイプを配置し、パイプ内部に鋼材を配置した。鋼材による拘束がコンクリートに様に伝達されるように、供試体両端部に鋼板を配置し、鋼材をナットで固定した。供試体の概要を図-1に示す。

塩化ビニールパイプ内に鋼材を配置し、それらの両端部を鋼板に固定した状態で型枠内に納め、コンクリートを打設した。供試体側面には、軸方向の長さ変化測定用プラグを基長250mmとなるよう埋設した。コンクリート打設1日後、脱型し、材齢28日まで湿布養生を行った。なお、軸直角方向の長さ変化はコンタクトゲージ用チップ(検長100mm)を貼付けて測定を行った。

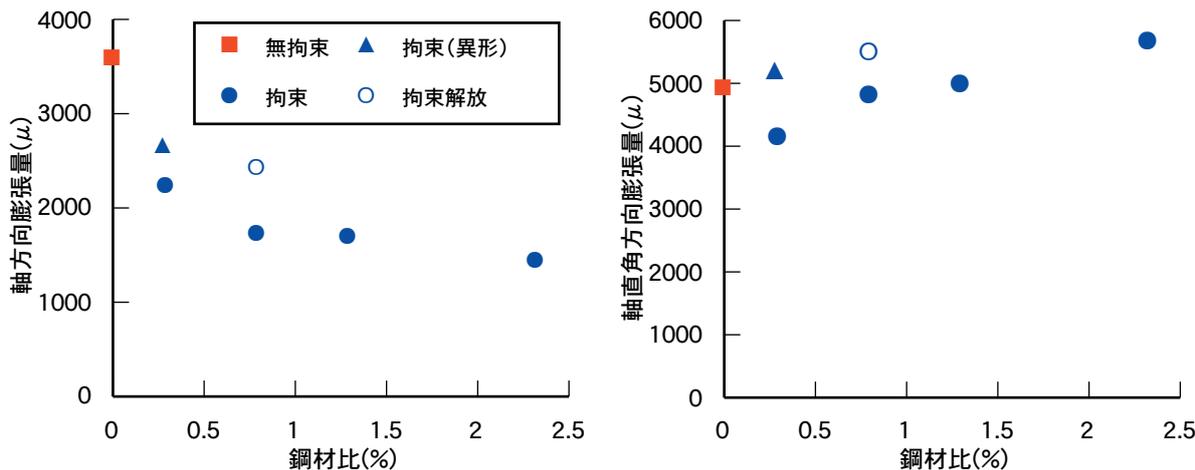


図-2 拘束が膨張に与える影響

炭素繊維シートの貼付けは、養生終了後、供試体を1週間乾燥させた後、下地処理を行い、プライマを塗布し、貼付けを行った。シート配置間隔を100mmとし、シート幅45mm、シート巻き数を1回とした。供試体一覧を表-4に示す。供試体作製後、40℃・98%R.H.の促進環境に、膨張が収束するまで静置した。

2.4 載荷試験

圧縮試験機を用いて、静的一方向圧縮荷重を行い、載荷時の荷重、変位およびひずみを測定し、最大荷重、圧縮強度、およびヤング係数を求めた。荷重はロードセル(容量1000kN)を用いて測定した。変位は高感度変位計(容量5mm)を用い、圧盤間変位を2点測定した。軸方向および軸直角方向のひずみは、シート配置したものはシート中心位置において検長5mmのひずみゲージを貼り付け、シート配置のないものは検長60mmのひずみゲージを貼り付けて測定した。

3. 結果および考察

3.1 拘束下の膨張

拘束が膨張に与える影響を図-2に示す。PC鋼材を配置したものでは、拘束が大きいものほど軸方向の膨張は小さくなり、他方、軸直角方向においては、拘束が大きいものほど膨張が大きくなった。

既往の研究では、軸方向の膨張量においては、鋼材比が大きいものほど膨張は小さくなり、鋼材比0.7%程度で大幅に膨張が抑制され、0.7%以上では約1000μ以下となったと報告されている¹⁰⁾。これに対して、拘束にともなう軸方向の膨張が小さくなる傾向は同様の傾向を示したものの、同一の拘束量における軸方向の膨張量は大きくなった。既往の研究では横拘束を行っておらず、軸直角方向にも大きな膨張が生じ、その分、軸方向の膨張が小さくなったものと考えられる。また、鉄筋比がきわめて小さい場合には、無拘束のものより膨張は抑

表-4 供試体一覧

名称	軸方向筋	拘束筋比 (%)	横拘束筋比 (%)	膨張解放
0	無	0	0	無
3	PC鋼棒φ9.2	0.30	0.2	無
8	PC鋼棒φ15	0.80	0.2	無
8解	PC鋼棒φ15	0.80	0.2	有
12	PC鋼棒φ19	1.29	0.2	無
24	PC鋼棒φ26	2.37	0.2	無
D3	異形棒鋼D10	0.28	0.2	無

制されたものの、4000μ以上の膨張を生じた結果も報告されている⁷⁾。本研究では、シートの横拘束によって軸直角方向の膨張が抑制されたため、軸方向の膨張が大きくなったものと考えられる。他方、軸方向の拘束が大きいものほど軸方向の膨張が抑制され、拘束の小さい軸直角方向の膨張が大きくなったものと考えられる。

軸拘束として異形棒鋼を用いた場合には、同一の拘束筋比のPC鋼材配置のものより、軸方向および軸直角方向のいずれの膨張も大きくなった。0.3%程度の拘束量においては、軸方向において2000μ以上の膨張が発生しており、鋼材が降伏したため大きな膨張を生じたものと考えられる。今回の範囲では、0.8%以上では、軸膨張が2000μ以下を示しており、0.8%以上の拘束があれば異形棒鋼であっても、膨張によって鋼材が降伏しないものと考えられる。

膨張収束後に軸方向および軸直角方向の膨張を解放した軸拘束0.80%ものでは、解放後、軸および軸直角方向の膨張が大きくなり、軸拘束0.30%のものと同程度の膨張量となった。鉄筋破断等によって拘束が解放された場合には、膨張がさらに進行するものと考えられる。

いずれにしても、実構造物程度の拘束量においては、軸方向および軸直角方向に大きな膨張が生じていたた

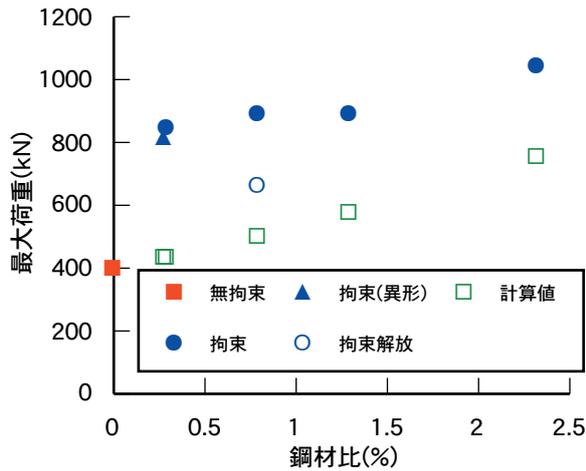


図-3 拘束が最大荷重に与える影響

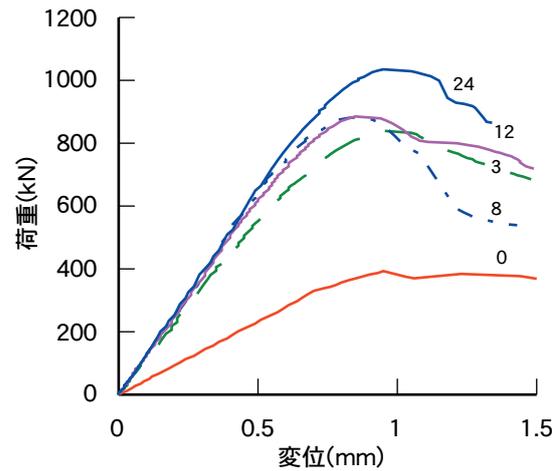


図-4 荷重-変位曲線

め、骨材の反応性が高い場合には、内部コンクリートにおいても大きな膨張が生じるものと考えられる。

3.2 内部コンクリートの強度特性

(1) 最大荷重

鋼材による拘束が最大荷重に与える影響を図-3に示す。図中には、無拘束の試験結果から得られたコンクリート強度 (17.5N/mm^2) から計算されたコンクリート負担力 ($P_c = f_c \cdot A_c$) と最大荷重時のひずみ、鋼材のヤング係数および断面積から計算した鋼材負担力 ($P_s = E_c \cdot \epsilon_c \cdot A_s$) の両者から求めた最大荷重 ($P_c + P_s$) の計算値も示した。

無拘束のものに比べていずれの拘束条件のものも大きな最大荷重を示し、計算値 ($P_c + P_s$) よりも大きな最大荷重を示した。一方、拘束が解放されたものは、軸筋および横拘束がないため、計算値 ($P_c + P_s$) よりも大きいものの、他のものより最大荷重が小さくなった。

鋼材によって拘束されたものでは、膨張が拘束されたことによって、膨張量が小さくなり、コンクリート自体の強度低下は小さく、拘束されたものの最大荷重の実測値は大きくなったものと考えられる。また、横拘束による効果も発揮されているものと考えられ、それらの影響も実測値の方が大きい結果が得られた理由として考えられる(コンクリート強度については後述の3.2(3)コンクリートの最大負担応力において詳細に述べる)。

最大荷重には、鋼材負担力が含まれ、コンクリート強度そのものを単純には比較できないものの、鋼材負担分を考慮しても、無拘束のものより大きな最大荷重を示しており、拘束されたものでは、無拘束のものより膨張による損傷は小さくなっているものと考えられる。

(2) 部材剛性

無拘束およびPC鋼材を配置したものの荷重-変位曲線を図-4に示す。荷重-変位曲線の載荷初期の傾きに

ついて拘束されたものと無拘束のものを比較すると、拘束されたものはいずれも無拘束のものより大きな部材剛性を示し、膨張による大きな剛性の低下は生じなかったものと考えられる。

(3) コンクリートの最大負担応力

3.2(1)で述べたと同様の考え方で、最大荷重から鋼材負担分を減じて、これをコンクリート面積で除してコンクリートの最大負担応力を求めた。なお、最大荷重時のひずみは変位より計算した値を用いた。膨張が各拘束条件下のコンクリート最大負担応力に与える影響を図-5に示す。拘束されたものにおいては、いずれのものも無拘束のものより大きな最大負担応力を示した。しかし、膨張量と最大負担力には明瞭な相関関係は認められなかった。無拘束の場合には、膨張に伴い強度は緩やかに低下するとされているものの^{3),5),6)}、それらとは異なる傾向を示した。膨張量のみでは単純に比較できないものと考えられる。しかし、膨張量との関係は不明であるものの、少なくとも、実構造物程度の拘束がある場合には、それらの拘束が十分に発揮されている範囲においては内部コンクリートの強度は維持されるものと考えられる。

拘束が大きい(軸直角方向膨張量が大きい)ものでの最大負担応力の低下については、次のように説明することが可能である。拘束が大きいものほど、ASR膨張を拘束することによって生じるケミカルプレストレスは大きくなる。載荷時に加わった応力との合計が負担できる限界の応力に達した時に破壊が生じるとすると、拘束が大きいものほどその限界値に達するのが早くなり、最大負担応力が小さくなったものと考えられる。

そこで、膨張収束後の軸膨張量は、鋼材のひずみと等しいとし、鋼材のひずみから各拘束条件下の供試体に導入されたケミカルプレストレスを算出した ($P_{cs} = \epsilon_s \cdot E_c \cdot A_s / A_c$)。ここで、最大荷重から算出された最大負

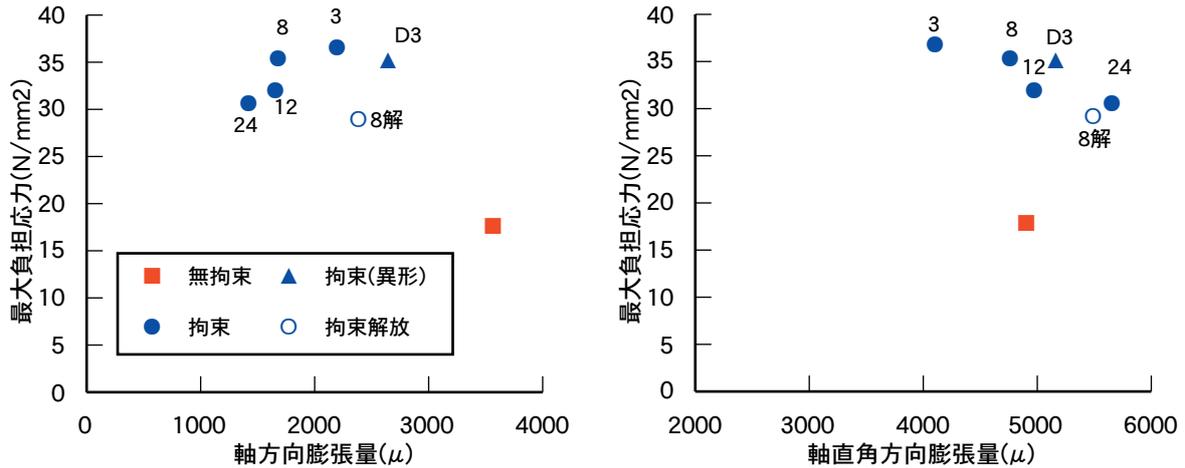


図-5 膨張がコンクリートの最大負担応力に与える影響

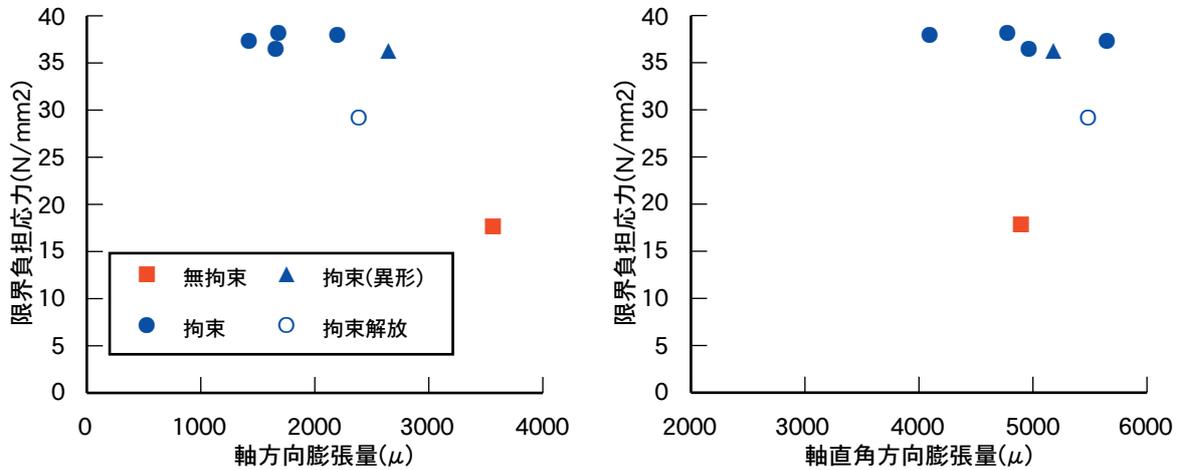


図-6 膨張がコンクリートの限界負担応力に与える影響

負担力とケミカルプレストレスの和を限界負担応力と定義した。膨張量が各拘束条件の限界負担応力に与える影響を図-6に示す。

軸方向および軸直角方向のいずれにおいても、拘束されたものの限界負担応力は、膨張にかかわらず同程度の値を示した。異形鉄筋を用いたものでは鋼材降伏が生じており、鋼材比の小さいものでは0.8%以上のものより大きな膨張が生じており、強度の低下が予想されたものの、同程度の限界負担応力となった。拘束されたものでは、膨張を生じた場合にもコンクリートに巨視的なひび割れが生じないため、膨張によって大きな強度の低下を生じなかったものと考えられる。

一方、拘束を解放したものでは、限界負担応力は他のものより小さく、30N/mm²であった。荷重時においては横方向の拘束も解されているため、横拘束による効果はなく、解放するまでの拘束条件が同様の0.8%のものから、横拘束効果分を減じたものと同程度、もしくはそれ以下になるものと予想される。他のものの横拘束効果による強度寄与が10～20%程度発揮されていたとする

と、限界負担応力は他の拘束されたものの約80%であり、横拘束による強度寄与分だけ小さな値となったものと考えられる。したがって、拘束が解放されたことによる大きな強度低下はなかったものと考えられる。拘束解放前には膨張は収束しており、それ以後は応力解放による膨張のみが生じたと考えられ、巨視的なひび割れ等が発生しなかったものと考えられる。

今回の範囲においては、いずれの拘束条件のものにおいても、膨張にかかわらずコンクリートの圧縮強度の低下はなかったものと考えられる。

(4) 静弾性係数

荷重時に計測されたコンクリートひずみ(貼付ゲージ)と鋼材のひずみは等しいと仮定し、荷重時の鋼材負担力を求め、ここから計算されたコンクリート応力を計算し、得られたコンクリートの応力-ひずみ曲線からヤング係数(弾性範囲と見なしうる部分の傾き)を求めた。膨張が各拘束条件のコンクリートのヤング係数に与える影響を図-7に示す。

拘束の有無にかかわらず、軸方向の膨張が大きいもの

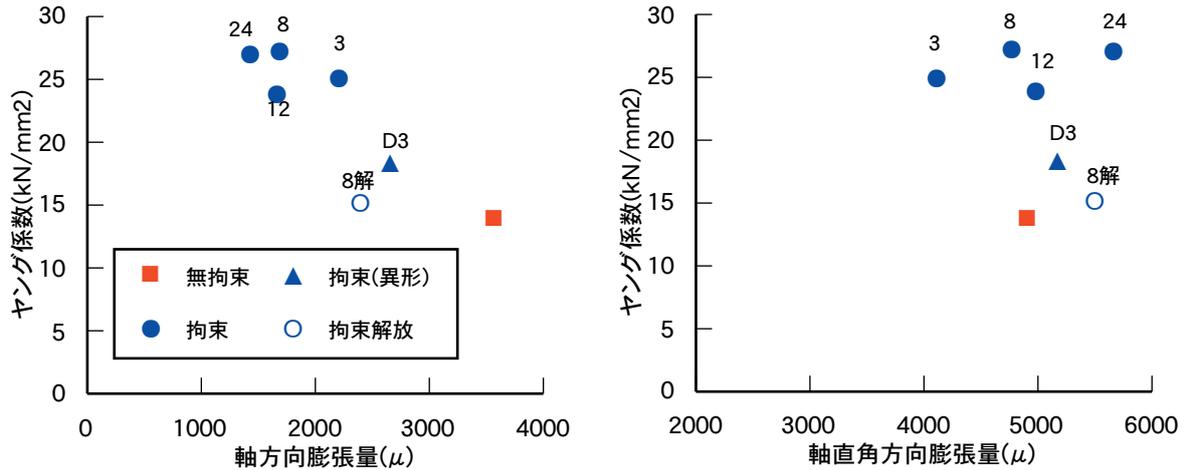


図-7 膨張がコンクリートのヤング係数に与える影響

ほどヤング係数は小さくなった。また、拘束解放したもののヤング係数は同一の拘束量のものより大きく低下した。一方、軸直角方向については、膨張量との明瞭な関係は認められなかった。荷重方向の変形特性は、同一方向の膨張量に支配されている可能性が高いものと考えられる。拘束されたものでは巨視的なひび割れは抑制されるものの、ASRゲルの膨張に伴う微細なひび割れは発生し、膨張が大きいのほど、微細ひび割れが多く発生し、ヤング係数の低下をもたらしたのと考えられる。したがって、拘束された場合にも、膨張が大きくなればヤング係数の低下が生じるものと考えられる。

拘束量に従い、膨張量は小さくなるものの、それらが十分でない場合には、微細ひび割れの影響によってヤング係数の低下が生じるものと考えられる。3.1 拘束下の膨張における結果からは、膨張によって鋼材の降伏を発生させず、大きな膨張を生じさせないためには、0.8%程度以上の拘束が必要であるものと考えられる。さらに、0.8%以上の拘束量においては、ヤング係数の顕著な低下は認められなかったため、ヤング係数を含むコンクリートの強度特性が健全に保たれる拘束量として、0.8%程度の拘束量がその目安となるものと考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 骨材の反応性が高い場合には、実構造物内部のコンクリートにも大きな膨張が生じうる。
- (2) 今回の拘束条件下においては、最大荷重および部材剛性に顕著な低下は生じなかった。
- (3) 拘束条件下の内部コンクリートには顕著な強度低下は生じなかった。他方、大きな膨張が生じた場合

には、ヤング係数の低下が生じた。

参考文献

- 1) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書，2005.8
- 2) 小林一輔ら：ASRを生じたコンクリートの圧縮強度に関する2,3の考察，土木学会論文集，第426号/V-14，pp.91-100，1991.2
- 3) 久保善司ら：アルカリ骨材反応による膨張がコンクリートの力学的性能に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1633-1638，2006.7
- 4) 池富修ら：ASRが発生したコンクリート構造物の耐久性調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.1141-1146，2001.6
- 5) The institute of Structural Engineering：Structural effect of alkali silica reaction，p12-14，1992.7
- 6) Clark L.A.：Structural aspect of alkali-silica reaction，Structural Engineering Review，Vol.2，No.2，pp.81-87，1990.6
- 7) 小柳治ら：低鉄筋比のRC部材におけるASRの膨張拘束に関する研究，セメント・コンクリート論文集工学年次論文集，No.52，pp.786-791，1998.12
- 8) 棚橋和夫ら：ASRによって劣化したRCはりおよび柱の力学挙動について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.843-849，1996.6
- 9) 竹村和夫ら：アルカリ骨材反応を生じた帯鉄筋柱の一軸圧縮特性：セメント・コンクリート論文集，No.44，pp.684-689，1990.12
- 10) 矢村潔ら：鉄筋拘束がアルカリ骨材反応に及ぼす影響に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.1，pp.135-140，1989.6