

論文

[1144] アルカリ骨材反応が生じた鉄筋コンクリート梁の変形と
耐荷重性状に関する研究

正会員○山田 昌郎（東京大学大学院）

正会員 魚本 健人（東京大学生産技術研究所）

1. はじめに

アルカリ骨材反応が生じた構造物の維持管理を適切に行うためには、この種の構造物の膨張およびひびわれ性状さらに耐荷重性状を明らかにする必要がある。

鉄筋コンクリートにアルカリ骨材反応が生じた場合の膨張性状に関しては、白石ら¹⁾矢村ら²⁾Herathら³⁾の拘束膨張試験により、鉄筋比と膨張量の関係について貴重な資料が得られている。一方、単鉄筋梁供試体にアルカリ骨材反応が生じた結果、梁にそり変形が生じた現象が小柳ら⁴⁾Swamyら⁵⁾により報告されている。本研究で用いた梁供試体にもアルカリ骨材反応によるそり変形が生じており、その変形、ひびわれを測定し、載荷試験を行った結果、若干の知見を得たのでここに報告する次第である。

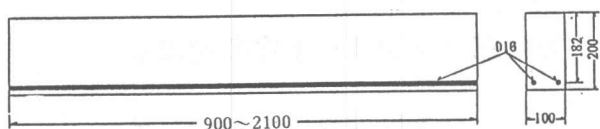
2. 実験概要

2. 1 供試体の種類

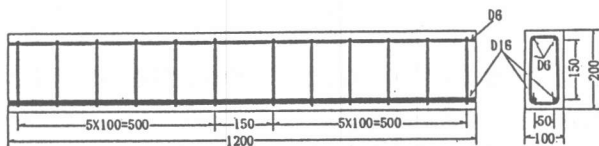
実験に用いたRC梁供試体の種類を表1に、形状・寸法を図1に示す。また10×10×40cm角柱供試体の配筋を図2に示す。なお角柱供試体の使用材料、養生方法はFシリーズの梁供試体と同一である。

表1 RC梁供試体の種類

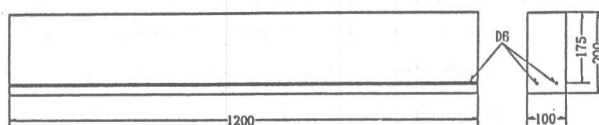
供試体名	寸法 (cm×cm×cm)	鉄筋比と鉄筋位置				腹鉄筋 比 (%)	骨材	セメントの R ₂ O量 (%)	養生 条件	養生 期間(週)
		p (%)	d (cm)	p' (%)	d' (cm)					
F1	10×20×90	2.18	18.2	0	—	0	反応性	2.0	40℃水中	88
G1	10×20×90	2.18	18.2	0	—	0	非反応性	0.77	20℃水中	88
F2	10×20×120	2.18	18.2	0	—	0	反応性	2.0	40℃水中	108
G2	10×20×120	2.18	18.2	0	—	0	非反応性	0.77	20℃水中	108
F3	10×20×160	2.18	18.2	0	—	0	反応性	2.0	40℃水中	88
G3	10×20×160	2.18	18.2	0	—	0	非反応性	0.77	20℃水中	88
F4	10×20×210	2.18	18.2	0	—	0	反応性	2.0	40℃水中	108
G4	10×20×210	2.18	18.2	0	—	0	非反応性	0.77	20℃水中	108
F5	10×20×120	2.27	17.5	0.36	17.5	0.63	反応性	2.0	40℃水中	18
G5	10×20×120	2.27	17.5	0.36	17.5	0.63	非反応性	0.53	20℃水中	18
F6	10×20×120	0.36	17.5	0	—	0	反応性	2.0	40℃水中	18
G6	10×20×120	0.36	17.5	0	—	0	非反応性	0.53	20℃水中	18



a) 供試体F1, F2, F3, F4, G1, G2, G3, G4



b) 供試体F5, G5



c) 供試体F6, G6

図1 RC梁供試体の形状寸法

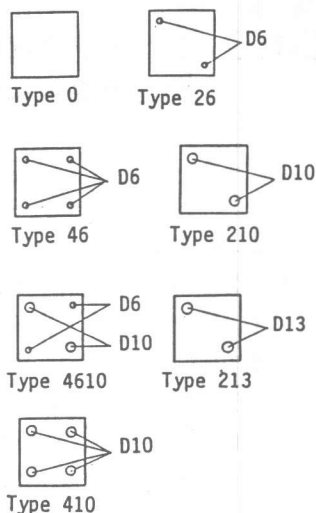


図2 10×10×40cm角柱
供試体の配筋

2. 2 使用材料

使用セメントは普通ポルトランドセメントである。原セメント中に含まれる Na_2O 等価アルカリ量(R_2O)は、供試体G5, G6, F5, F6に使用したものについては0.53%であり、その他の供試体に使用したものについては0.77%である。Fシリーズについては、これに練り混ぜ水とともに、 NaOH (試薬特級)を加えて、 $\text{R}_2\text{O}=2.0\%$ となるように調整した。

Fシリーズには粗骨材として山形県産のガラス質両輝石安山岩(比重: 2.76, 吸水率: 0.717% 最大寸法: 20mm, 粗粒率: 6.66)を使用した。この安山岩中の火山ガラスの体積混入率は約40%であり、ASTM C289 (化学法)の結果では、 $\text{R}_c=106(\text{mmol/l})$, $\text{S}_c=430(\text{mmol/l})$ で潜在的有害と判定されている。Gシリーズに用いた粗骨材は、秩父両神産砕石であり、粒度が5~13mm(比重: 2.69, 吸水率: 0.658%)のものと13~20mm(比重: 2.70, 吸水率: 0.604%)のものを、体積比 6:4で混合して用いた。細骨材としては、Fシリーズ、Gシリーズともに非反応性の大井川産川砂(比重: 2.64, 吸水率: 1.00%, 粗粒率: 3.04)を用いた。

使用した鉄筋の引張試験結果を表2に示す。

コンクリートの示方配合を表3に示す。供試体は温度20℃湿度60%の室内で打込んだ。なお、材料は打込み前日から恒温室内に保管したものを用いた。

供試体は打込み後24時間で脱型しその後7日間20℃の室内にて湿潤養生した後、Fシリーズは40℃水中で、Gシリーズは20℃水中で所定の材令まで養生した。

表2 鉄筋の引張試験結果

規格	種類	公称断面積 (cm^2)	降伏荷重 (kgf)	最大荷重 (kgf)	降伏点 (kgf/mm^2)	引張強さ (kgf/mm^2)	弾性係数 ($\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$)
SD30	D6	0.317	990	1330	31.3	42.0	1.9
SD30	D10	0.713	2780	3910	39.0	54.8	1.9
SD30	D13	1.267	4670	6690	36.9	52.8	2.0
SD30	D16	1.986	7150	10650	36.0	53.6	2.1

表3 示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単 位 量 (kg/m^3)			
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
20	50	46	193	385	827	1027

* Fシリーズには、 $\text{R}_2\text{O}=0.02 \times \text{C}$ となるように NaOH を加えた。

2. 3 実験方法

所定の養生を終えた梁供試体底面のそり形状をダイヤルゲージ(1/100mm)で測定した。供試体F5、F6については、養生期間中を含めて3回にわたり測定を行った。10×10×40cmの角柱供試体については膨張量の測定を行った。膨張量の測定方法は、端面中心に埋め込んだ測定用チップ間の距離を、ダイヤルゲージ(1/1000mm)で測定したものである。またこれらの角柱供試体端面の高さ分布をダイヤルゲージ(1/100mm)で測定した。

梁供試体表面のひびわれはトラバース法で測定した。本研究で用いたトラバース法は、供試体に格子状に測線を記入し、測線を横切るひびわれの幅を、ひびわれと直角にクラックスケールを用いて測定するものである。測線の配置を図3に示す。また、各ひびわれが測線となす角度を分度器で測定した。

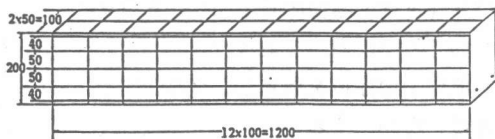


図3 測線の配置

梁供試体について図4に示すような対称2点载荷により静的破壊試験を行った。せん断スパン比は供試体によって変え、1.5~4.8とした。

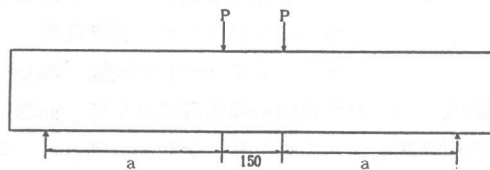


図4 载荷試験方法

3. 実験結果および考察

3. 1 角柱供試体の膨張量と端面の変形

図5は、材令104週までの10×10×40cm角柱供試体の膨張量測定結果であり、材令40週までのHerathらのデータもあわせて示したものである。既にHerathが指摘しているように、鉄筋比1.26%以上の供試体については膨張量がほぼ一定となっている。

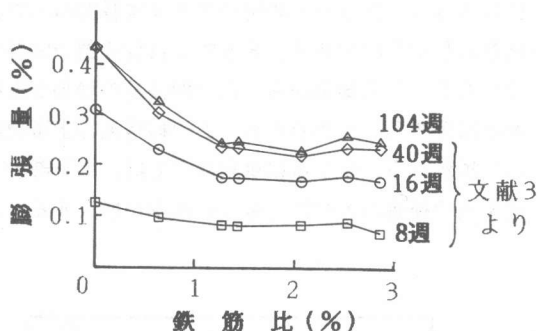
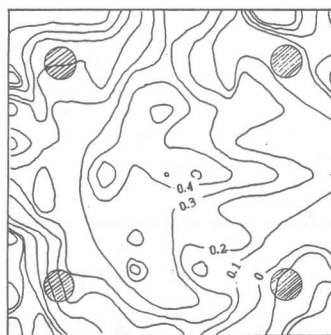


図5 鉄筋比と膨張量の関係

鉄筋比2.85%の供試体の端面形状測定結果を図6に示す。鉄筋付近を基準にすると、中心部は約0.4mm盛り上がっていることがわかる。両端ではほぼ同じ膨張を示していることから、この値を膨張量に換算すると0.2%であり、測定された膨張量の大部分をしめているといえる。

この結果から、平面保持は成り立たないといえる。この原因は、鉄筋付近と中心部の間のコンクリートの各層にすべりが生じているため、言い換えれば、コンクリートのせん断剛性が低下しているためである。表面のひびわれが長手方向に卓越していることから、内部では長手方向に卓越したマイクロクラックが生じており、その結果せん断剛性が低下したと考えられる。



材令118週 Type 410

図6 角柱供試体端面の高さ分布図

3. 2 梁供試体のそり

測定された梁のそり曲線は、いずれも放物線として近似することができた。一例として図7に供試体F4についての測定結果を示す。近似曲線から求めた曲率は0.042(1/m)であった。この値はF4と同一断面のF1, F2, F3についてもほぼ同一であった。

仮に平面保持を仮定し、クリープを考慮しないとすると

$$Pe = EI\kappa$$

ただし、P：鉄筋の引張力 e：偏心距離

E：コンクリートの弾性係数

I：コンクリートの断面2次モーメント κ ：曲率

が成立つ。Pを鉄筋の降伏荷重として、曲率 κ の測定値からEIの値を試算すると、円柱供試体の圧縮試験から求めたEと全断面有効として求めたIを用いたEIの約1/10となる。

次に、供試体F5, F6の曲率の経時変化を図8に示す。単鉄筋梁F6の曲率が材令9週以降急増している。図9は、角柱供試体の自由膨張量と、F5, F6の底面から2.5cm(主鉄筋高さ)におけるコンクリートの維ひずみ(検長20cmのコンタクトゲージを用い4か所で測定)の経時変化を示したものである。F6では材令9週以降ひずみの増加速度が低減し、14週以降定常となりつつある。この結果から、自由膨張量の増加が進行中であっても鉄筋位置のコンクリートの膨張量は収束することがわかる。この膨張量の上限值は、鉄筋径、生成するゲルの剛性によって決まると思われる。要するに単鉄筋梁では、梁下部の鉄筋付近での膨張が収束したあと梁上部の無拘束領域の膨張の進行にともない曲率が増大すると考えられる。

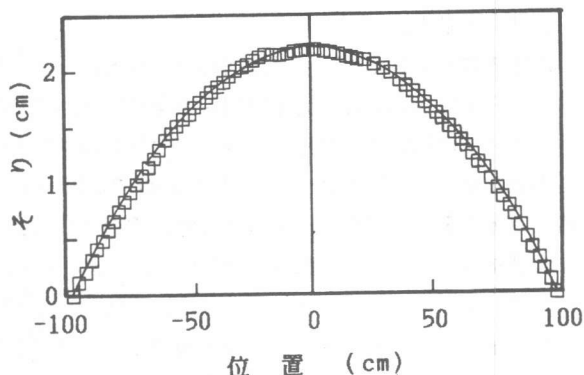


図7 そりの測定結果の一例

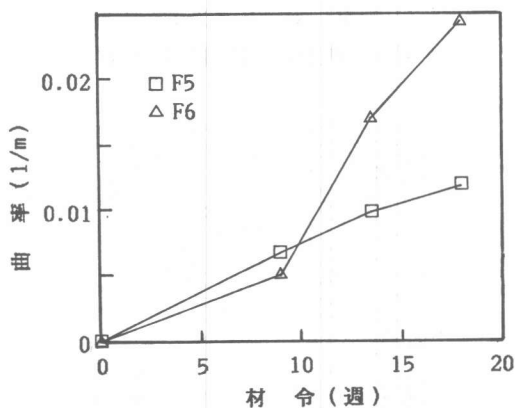


図8 梁の曲率の経時変化

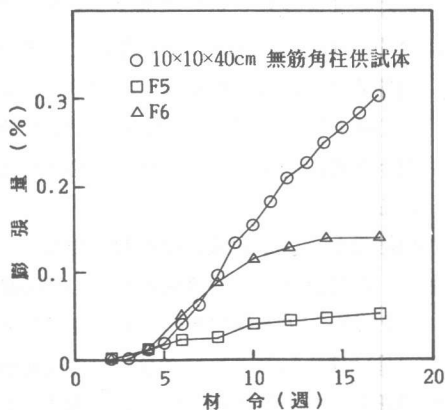


図9 自由膨張量および梁の鉄筋位置での膨張量

3. 3 ひびわれ性状

ひびわれ発生状況の一例を図10に示す。

図10から底面や側面下部では長手方向のひびわれが卓越しており、側面上部や打込み面では無方向性のひびわれとなっているように見える。こうしたひびわれの異方性を定量化するために、ひびわれ角度を用いた。データ整理の方法としては

まず梁底面からの高さ別にひびわれ角度のヒストグラムを作製した。次に頻度を各階級の中央値の正弦で除して補正した。最後にこの補正したヒストグラムから平均角度を求めた。単鉄筋梁供試体F4について上のようにして求めた平均角度の分布を図11に示す。高さが増すにつれて

平均角度が増し、約15cmで45°となっている。純引張応力下では応力と直角な方向にひびわれが発生し、純圧縮応力下では応力と平行な方向にひびわれが発生することから、F4の断面内の直応力は、15cm以上で引張

15cm以下で圧縮となっていることが推定できる。

3. 4 載荷試験

各梁供試体と同一の養生条件としたφ10×20cm 円柱供試体による圧縮強度および静弾性係数の測定値を表4に示す。

梁供試体の載荷試験結果を表5に示す。圧縮強度の低下度と比較して、梁の耐力の低下度は小さい。

表4 強度試験結果

供試体	圧縮強度 (kgf/cm ²)	静弾性係数 (kgf/cm ²)	材令 (週)
F1, F2 F3, F4	359	2.1×10^5	91
G1, G2 G3, G4	580	3.9×10^5	26
F5, F6	282	1.4×10^5	18
G5, G6	602	3.7×10^5	18

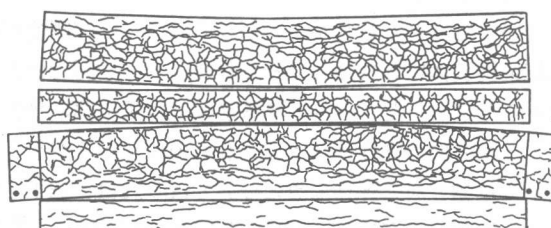


図10 ひびわれ状況(展開図)

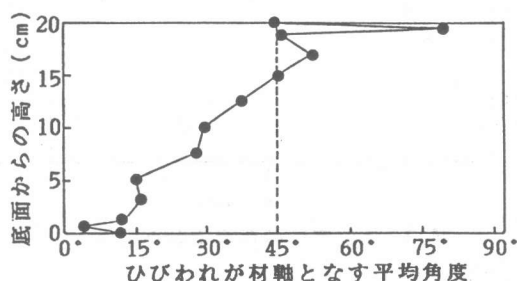


図11 ひびわれ角度の分布

表5 梁の載荷試験結果

供試体	せん断 スパン比	耐力 (tonf)	破壊モード	F/G	鉄筋比 (%)
F1	1.5	8.8	せん断	0.67	p=2.18 (単鉄筋)
G1	1.5	13.2	せん断		
F2	2.4	7.7	せん断	1.01	p=2.18 (単鉄筋)
G2	2.4	7.6	せん断		
F3	3.5	5.5	せん断	0.90	p=2.18 (単鉄筋)
G3	3.5	6.1	せん断		
F4	4.8	5.3	曲げ	0.91	p=2.18 (単鉄筋)
G4	4.8	5.8	曲げ		
F5	2.4	10.2	曲げ	0.92	p=2.27 (複鉄筋)
G5	2.4	11.1	曲げ		
F6	2.4	2.2	曲げ	0.88	p=0.36 (単鉄筋)
G6	2.4	2.5	曲げ		

注) F/G: Fシリーズの耐力/Gシリーズの耐力

図12、図13はF2、G2およびF5、G5の荷重たわみ曲線である。図12では載荷初期の剛性についてはほとんど差がないが、その後F2の剛性が徐々に低下している。この傾向は、他の単鉄筋梁供試体にも共通してみられた。一方、図13のように複鉄筋梁F5ではこうした剛性の低下はみられなかった。これは単鉄筋梁では梁上部は無拘束膨張か、あるいは引張応力下での膨張となり、軸方向の弾性係数は健全なものに比べてかなり低下していると思われるのに対して、複鉄筋梁では軸方向の弾性係数についてはそれほど低下しないためと考えられる。

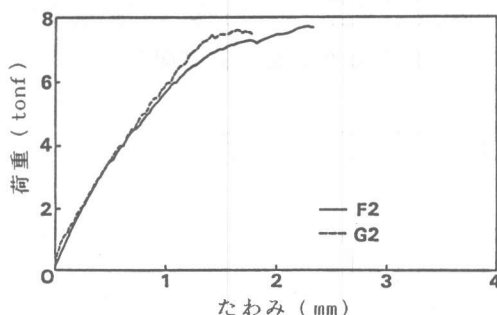


図12 単鉄筋梁の荷重たわみ関係

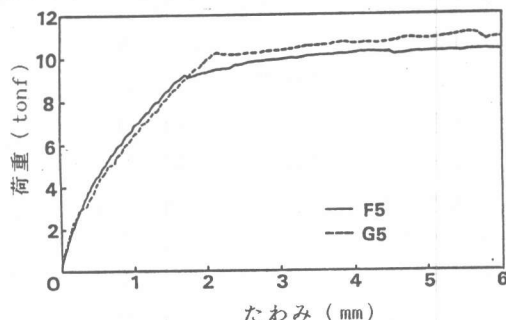


図13 複鉄筋梁の荷重たわみ関係

4. まとめ

本研究を行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 鉄筋コンクリート部材にアルカリ骨材反応が生じた場合、平面保持は成り立たず、複鉄筋部材では断面が凸状に変形する。また単鉄筋部材では、鉄筋付近の膨張量が収束したあと著しいそりが生じる。
- 2) アルカリ骨材反応によって生ずるひびわれを、トラバース法により数多く測定し、統計的に処理することによって、内部応力の分布を推定できる可能性がある。
- 3) アルカリ骨材反応が生じた梁の載荷試験から、単鉄筋梁については荷重の増加に伴う剛性の低下が、健全なものよりも大きい。

【謝辞】

本研究を行うにあたり、千葉工業大学卒論生 陳 統評君に多大な協力を頂いた。厚く感謝する次第である。

【参考文献】

- 1) 本田裕夫、白石文雄、植田浩吉、林 芳尚：アルカリ骨材反応に対する鉄筋拘束の影響，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.8, pp.169～172, 1986
- 2) 矢村 潔、西林新蔵、田中修一：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
- 3) Herath, A. and Uomoto, T.: Effect of Steel Reinforcement on Concrete Expansion due to Alkali Silica Reaction, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10.No.2, pp.843～848, 1988
- 4) 小柳 治、六郷恵哲、石田裕哉：アルカリ骨材反応によるひびわれとRC部材の性状、セメント技術年報39, pp.352～355, 1985
- 5) Swamy, R.N. and Al-Asali, M.M.: Effect of Alkali-Silica Reaction on the Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams, ACI Structural Journal, Vol.86, No.4, 1989, pp.451～459