

論文 メタケイ酸ナトリウム九水和物を使用したアルカリ活性材料コンクリート梁の曲げ耐荷性能に関する基礎的実験

篠原 弘充^{*1}・安 琳^{*2}・高橋 良和^{*3}

要旨: 本研究では、アルカリ活性材料 (AAMs) コンクリートによって作製した RC 梁 (AAMs 梁) に対して、4 点単調曲げ載荷試験を行い、その曲げ耐荷性能を明らかにすることを目的とした。当該 AAMs コンクリートには、活性フィラーとしてフライアッシュと高炉スラグ微粉末、アルカリ活性化剤としてメタケイ酸ナトリウム九水和物を使用した。結果から、本実験の AAMs 梁のひび割れ発生荷重、主鉄筋降伏時荷重及び中立軸位置、最大荷重は現行の RC 部材の設計式で概ね評価可能であることが確認できた。また、本実験の AAMs 梁は OPC 梁と比較して靱性に富んでおり、かつ、ひび割れ分散性に優れることが明らかとなった。

キーワード: AAMs, メタケイ酸ナトリウム九水和物, RC 梁, 曲げ載荷

1. はじめに

近年、地球温暖化やエネルギー資源の枯渇など、人類の活動範囲の拡大による地球環境の破壊が大きな社会問題となりつつある。特に、大量生産・大量消費・大量廃棄型の経済発展とともに増大してきた CO₂ 及び産業廃棄物の排出量の削減は持続型社会を目指す上で大きな課題となっている。セメント産業は CO₂ 排出量が多く環境負荷が大きい産業の一つであり、近年、フライアッシュ (FA) や高炉スラグ微粉末 (BFS) などの産業廃棄物を有効利用するための研究開発が進められている。中でも注目されているのが、Davidovits が提唱したジオポリマー (geopolymer, 以下 GP) ¹⁾ を始めとするアルカリ活性材料 (AAMs) である。AAMs はセメントを使用せず、代わりに FA や BFS を利用する為、環境負荷を大幅に低減することができる。その為、現在 AAMs コンクリートは国内外で適用事例が増えつつあり、梁等の構造部材への適用に向けた検討も行われている ^{2,3)}。

現在の最も一般的な AAMs コンクリートは、アルカリ活性化剤として水ガラスと水酸化ナトリウム水溶液 (NaOH) の混合溶液を用いる。しかし、NaOH が劇薬であることや、水ガラスと NaOH を混合する際に激しく発熱するために、打設日の前日にアルカリ活性化剤を準備しておく必要があることといった課題を抱えている。そこで、アルカリ活性化剤に粉体状の物質のみを使用した AAMs の開発が進められている ⁴⁾。粉体状のアルカリ活性化剤は前日の準備が必要なく、OPC と同様の方法で練混ぜることができるといった利点を有する。しかし、従来型の AAMs と比較してその研究事例は非常に少なく、特に構造部材に関する検討例はほとんどない。

そこで本研究では、粉体状のアルカリ活性化剤としてメタケイ酸ナトリウム九水和物 (以下、SS とする) に着

目し、SS のみを使用した AAMs コンクリートによって RC 梁 (AAMs 梁) を作製した。加えて、OPC コンクリートを用いて同様の梁供試体 (OPC 梁) を作製した。これらの梁供試体に対して 4 点曲げ載荷試験を行い、その結果から、本実験の AAMs 梁に対する現行の RC 部材の設計式の適用可能性を評価しつつ、その力学性能について、OPC 梁と比較しながら考察した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に使用材料の基本物性を示す。本実験では、AAMs の活性フィラーとして JIS フライアッシュ II 種と JIS 高炉スラグ微粉末 4000 を併用した。表-2 に FA と BFS の化学組成を示す。また、アルカリ活性化剤として用いた SS は内部に結晶水を有した白色粉体であり、Na/Si 比がほぼ 1 の結晶性物質である。

2.2 配合及び練混ぜ方法

AAMs コンクリートに関しては、総水量 (AW)、高炉スラグ置換率 (BFS 置換率)、アルカリ水比 (A/AW)、水バインダー比 (AW/AB)、細骨材率 (s/a) を表-3 に示す値に固定して配合を決定した。ここで、総水量 (AW) は付加水 (W) と SS から溶出する結晶水 (9H₂O) の和である。BFS 置換率、A/AW、AW/AB は AAMs の強度に大きく影響することが知られている。筆者らは以前の研究 ^{5,6)} で、SS のみを用いた AAMs における BFS 置換率及び A/AW と強度の関係を評価した。これらの検討結果をもとに、本実験では BFS 置換率を 60wt%、A/AW を 8wt% とした。なお、本実験では A/AW を $A/AW = Na_2O / (W + 9H_2O)$ として質量比で表している。AW/AB は、AW と活性フィラー (FA+BFS) の質量比であり、OPC コンクリートにおける水セメント比と対応す

*1 京都大学 工学研究科社会基盤工学専攻 (学生会員)

*2 京都大学 工学研究科都市社会工学専攻 准教授 (正会員)

*3 京都大学 工学研究科社会基盤工学専攻 教授 (正会員)

る。本実験では予備試験の結果から、流動性、強度ともに優れた AW/AB=40wt%を採用した。表-4 に本実験で用いた AAMs コンクリートの配合の詳細を示す。

OPC コンクリートに関しては、水セメント比を 60wt%、細骨材率を 45vol%とし、AAMs コンクリートと同程度の強度になるように配合設計を行った。用いた OPC コンクリートの配合を表-5 に示す。

また、練混ぜ方法には AAMs コンクリート、OPC コンクリートともに、施工性に優れる乾式添加法を採用した。フロー図を図-1 に示す。

2.3 供試体作製及び養生方法

供試体は、100mm×200mm×1600mm の矩形梁とし、AAMs 梁は 2 体（それぞれ AAMs1 梁、AAMs2 梁とする）、OPC 梁は 1 体作製した。図-2 のように、主鉄筋(D13-SD345) は 2 本単段配筋とし、最終破壊形式が曲げ破壊になるように、せん断補強鉄筋（D6-SD295A）を梁全体

に 100mm 間隔で配筋した。その際、せん断補強鉄筋の固定の為、圧縮側には竹ひごを配置した。また、引張鉄筋比 0.015 は釣り合い鉄筋比 0.054 以下の値とし、引張鉄筋の降伏後にコンクリートの圧壊が起こるように設計した。なお、前述のように本実験で対象とする AAMs コンクリートを構造部材に適用した事例はほとんどなく、その知見は乏しい。一方で、OPC コンクリートに対する同様の検討はこれまでに非常に多くなされてきた。以上より、本実験では実務上の実現可能性を考慮した上で、AAMs 梁のデータをできる限り多く得ることでばらつきの影響を抑えるため、AAMs 梁のみ 2 本作製した。

コンクリート打設後、供試体上面をプラスチックシートで覆い、AAMs 梁は 1 週間、OPC 梁は 1 日経過後に脱型した。脱型後は、全体をプラスチックシートで覆い、水分が保持されるように試験時（材齢 28 日）まで、20℃60%RH の室内で常温封緘養生を行った。また、封緘が不十分で供試体が乾燥した際には、霧吹きを用いて水分が保持されるようにした。

2.4 曲げ載荷試験方法

等曲げモーメント区間を 300mm、支点間距離を 1400mm として 4 点単調曲げ載荷を行った。また、圧縮

表-1 使用材料の基本物性

材料名	表記	基本物性
付加水	W	水道水
メタケイ酸ナトリウム九水和物	SS	Na ₂ O:20.50% SiO ₂ :21.00% 密度:1.67g/cm ³
早強ポルトランドセメント	C	密度:3.13g/cm ³ 比表面積:4690cm ² /g
フライアッシュ	FA	種類:JIS A6201-II種 密度:2.24g/cm ³ 比表面積:3290cm ² /g
高炉スラグ微粉末	BFS	種類:JISA6206-高炉スラグ微粉末4000 密度:2.88g/cm ³ 比表面積:4250cm ² /g
細骨材	S	表面水率:2% 密度:2.60g/cm ³ 粗粒率:2.68
粗骨材	G	表乾状態 最大粒径:20mm 密度:2.62g/cm ³ 粗粒率:6.69
AE減水剤	Ad	主成分:リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体 密度:1.25g/cm ³

表-2 FA と BFS の化学組成

組成 [%]	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	ig. loss	合計
FA	46.7	23.6	7.8	1.7	1.4	0.8	1.1	0.7	2.3	86.1
BFS	29.1	14.7	0.5	35.6	7.0	0.3	0.2	4.5	1.2	93.1

表-3 固定したパラメータ

総水量(AW)	156.8g/L
高炉スラグ置換率	60wt%
アルカリ水比 (A/AW)	8wt%
水バインダー比 (AW/AB)	40wt%
細骨材比(s/a)	45vol%

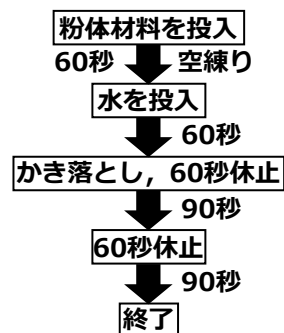


図-1 乾式添加法

表-4 AAMs コンクリートの設計配合

単位量[g/L]					
W	SS	FA	BFS	S	G
125	61	157	235	813	990

表-5 OPC コンクリートの設計配合

単位量[g/L]				
W	C	S	G	Ad
167	278	760	922	0.7

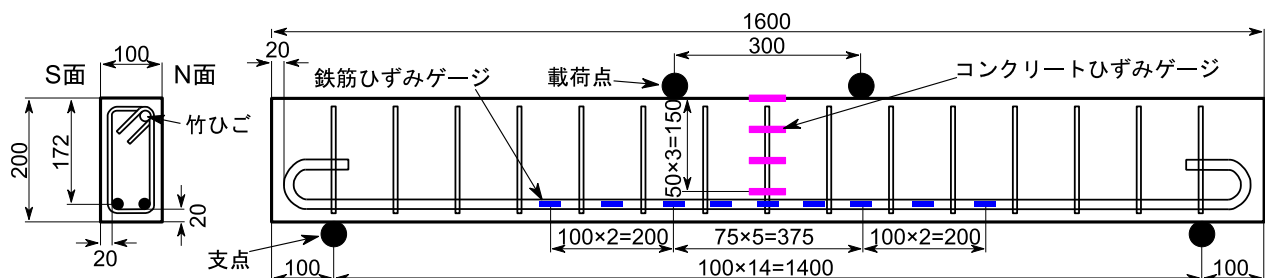


図-2 供試体概要（単位：mm）

縁の明確な圧壊を確認するまで、荷重制御により載荷を継続した。

3. 実験結果及び考察

3.1 強度特性

本実験で用いた AAMs コンクリート、OPC コンクリートの強度特性を表-6 に示す。両コンクリートは同程度の強度になるように配合設計を行ったが、圧縮強度は OPC コンクリートの方が約 5MPa 大きくなった。一方で、割裂引張強度は AAMs コンクリートの方が大きく、静弾性係数は同程度になっている。これは、筆者らの過去の検討⁷⁾と同様の結果であり、NaOH と水ガラスを使用する一般的な GP コンクリートとは異なる性質である。

3.2 計算値と実験値の比較

本実験で作製した AAMs 梁及び OPC 梁の曲げ試験の結果と、現行の RC 部材に使用されている設計式の計算結果を比較し、AAMs 梁に対する現行の設計式の適用可能性を検証した。比較した項目は、ひび割れ発生荷重、主鉄筋降伏荷重、主鉄筋降伏時の中立軸位置、最大荷重である。設計式に関して、ひび割れ発生荷重の算出には、以下の式(1)を用いた。

$$P_{cr} = \frac{f_b Z_e}{a}, \quad f_b = 0.56\sqrt{f_c} \quad (1)$$

このとき、 P_{cr} : ひび割れ荷重、 f_b : コンクリートの曲げ引張強度、 Z_e : 断面係数、 a : 支点から載荷点までの距離、 f_c : コンクリートの圧縮強度である。また、主鉄筋降伏荷重及び主鉄筋降伏時の中立軸位置は、コンクリートの引張応力を無視し、平面保持の仮定のもと弾性解析によって算出した。最大荷重は、等価応力ブロック法を用いて算出した。実験値に関して、 P_{cr} は載荷中に供試体を両側面から観察し、目視でひび割れを確認した時点の荷重であり、 P_y は主鉄筋ひずみの測定データから明らかに主鉄

表-6 強度特性

(a) コンクリート

	圧縮強度 f_c [MPa]	割裂引張強度 f_t [MPa]	f_t/f_c	静弾性係数 [GPa]	圧縮強度時の ひずみ[μ]
AAMs	34.9	3.81	0.109	30.5	1986
OPC	39.8	3.24	0.081	30.6	2255

(b) 主鉄筋

	引張降伏強度 f_y [MPa]	降伏ひずみ [μ]
主鉄筋	383	2022

筋が降伏したと判断できる時点の荷重とした。また、中立軸位置は梁の側面に貼付したひずみゲージから得た、ひずみ分布のデータを用いて算出した。設計式による計算値と実験値の比較を表-7 に示す。 P_{cr} に着目すると、実験値と計算値の比が 1.15 以上であり、式(1)で概ね評価可能であることがわかる。また、AAMs コンクリートの圧縮強度は OPC コンクリートの圧縮強度より小さいにも関わらず、 P_{cr} が OPC コンクリートと同等以上であることがわかる。これは、本実験で使用した OPC コンクリートより AAMs コンクリートの方が大きい引張強度を有することが原因であると考えられる。 P_y 及び中立軸位置に関しては、実験値と計算値の比が 1.01~1.12 の範囲に分布しており、今回の算出方法で概ね評価可能であるといえる。加えて、図-3 に示すように AAMs 梁の主鉄筋降伏以前のコンクリートひずみは中立軸からの距離に概ね比例する。以上から、平面保持の仮定を適用することは妥当であるといえる。また、最大荷重に関しても、AAMs 梁及び OPC 梁の実験値と計算値の比は 1.00 以上かつほとんど差異がないため、等価応力ブロック法を使用した今回の算出方法で評価可能であることがわかる。

3.3 荷重—たわみ関係

荷重—たわみ関係を図-4 に示す。図中には比較の為、梁全体をファイバー要素でモデル化した数値解析の結果を理論値として示している。数値解析において、断面は図-5(a)に示すように 10mm×10mm の正方形で分割し、ノード数は図-5(b)に示すように 19 個とした。数値解析における材料モデルには表-6 に示した実験値に加えて、

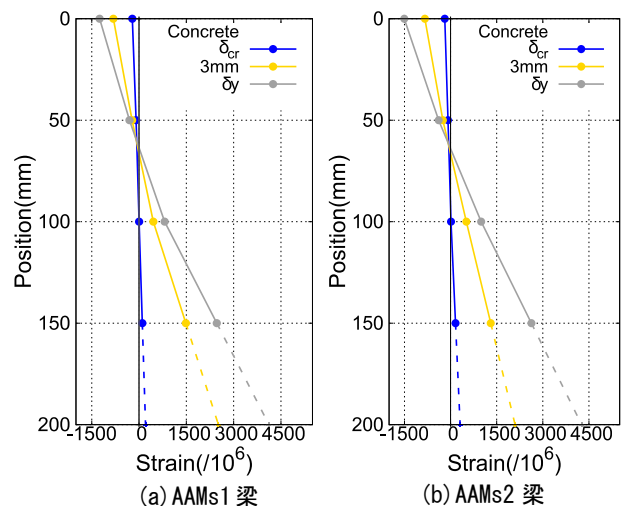


図-3 高さ方向のコンクリートひずみ

表-7 計算値と実験値の比較

	ひび割れ発生荷重 P_{cr} [kN]			主鉄筋降伏荷重 P_y [kN]			主鉄筋降伏時の 中立軸位置x[mm]			最大荷重 P_{max} [kN]		
	計算	実験	実験/計算	計算	実験	実験/計算	計算	実験	実験/計算	計算	実験	実験/計算
AAMs1梁	4.01	5.24	1.31	24.1	24.4	1.01	61.9	63.6	1.03	27.9	30.6	1.10
AAMs2梁		4.93	1.23		26.8	1.12		64.4	1.04		28.9	1.03
OPC梁	4.28	4.93	1.15	24.1	25.5	1.06	62.0	65.7	1.06	28.3	32.1	1.14

主鉄筋の静弾性係数 E_s を 200GPa, 2 次剛性 b を 0.01 と
して用いた。また, コンクリートは引張強度を考慮する
一方, 圧縮強度以降の軟化挙動は考慮しないものとした。
用いた材料モデルを図-6 に示す。

図-4(a) は梁のたわみが 10mm までの荷重—たわみ関
係であり, 図中にはひび割れ発生点と主鉄筋の降伏点を
プロットしている。図より, AAMs 梁, OPC 梁はいずれ
もたわみが約 0.5mm 付近で曲げひび割れ発生に起因し
て, 剛性が低下し, その後たわみが約 5mm に達した段階
で主鉄筋の降伏が確認できる。一方で, 数値解析の結果
と比較すると, ひび割れ発生点は概ね実験結果と一致し
ているが, それ以降の主鉄筋の降伏点までの挙動に乖離
がある。この理由として, 本解析では主鉄筋とコンクリ

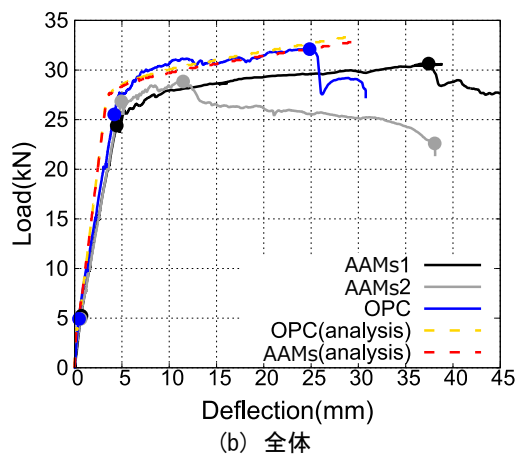
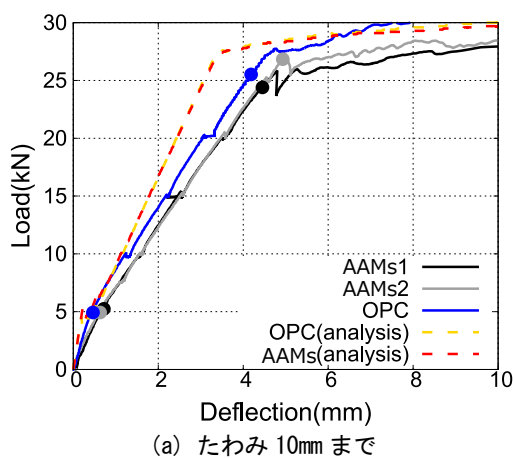


図-4 荷重—たわみ関係

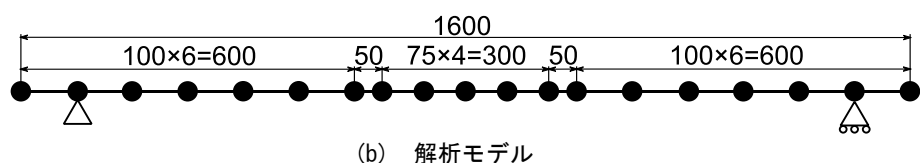
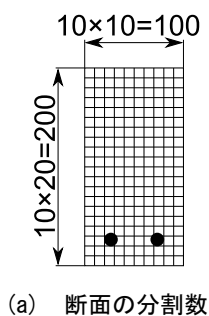


図-5 解析条件 (単位 : mm)

ートを完全付着としてモデル化したが, 実際の供試体の
付着挙動は後述する乾燥収縮などの影響によって, 完全
付着ではなかったことが考えられる。また, AAMs1 梁及
び AAMs2 梁のいずれも, 降伏点付近で荷重が一時的に
低下していることが確認できる。この要因について考察
する為, OPC 梁及び AAMs 梁のたわみと各種ひずみの関
係を図-7 及び図-8 に示し, 荷重が低下した地点を点線
で示す。図より, AAMs 梁では, 荷重—たわみ曲線にお
いて荷重が低下した時点と同時に, 全ての主鉄筋ひずみ
の測定点でひずみ低下が確認できることから, 荷重—た
わみ曲線における AAMs 梁の荷重の低下は局所的な付着
すべりが原因ではないと考えられる。なお, 荷重の一時的
的な低下が見られなかった OPC 梁では, たわみと各種ひ
ずみの関係において, 主鉄筋降伏点付近でひずみに変化す
るような様子は確認できなかった。

図-4(b) は荷重—たわみ曲線の全体図である。主鉄筋降
伏後の OPC 梁の荷重—たわみ曲線は解析結果と, 概ね一
致していることがわかる。一方で, AAMs 梁は解析結果
と比較して, 主鉄筋降伏後の荷重増加が緩やかであり,
剛性が小さいことがわかる。このような, AAMs コンク
リート梁の剛性が小さくなるという報告は散見される。
Tran et al⁸⁾は, 一般的な GP コンクリート (GPC) を使用
した GPC 梁と OPC 梁の単純曲げ載荷試験を行い, 荷重
—たわみ関係を比較した。そこで, GPC 梁は OPC 梁よ
り低い剛性を示し, この曲げ剛性の低さは GPC の静弾性
係数の低さ及び乾燥収縮に起因する可能性があると言
明している。一方で, 本実験の AAMs コンクリートは静
弾性係数が OPC コンクリートと同程度であるにも関わ
らず, AAMs 梁の曲げ剛性は OPC 梁よりが低くなった。

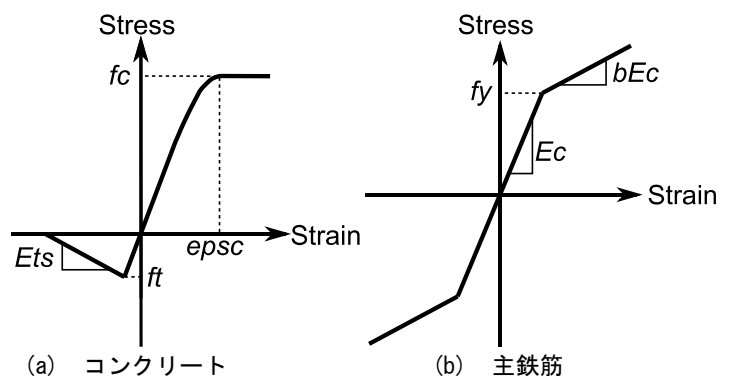


図-6 材料モデル

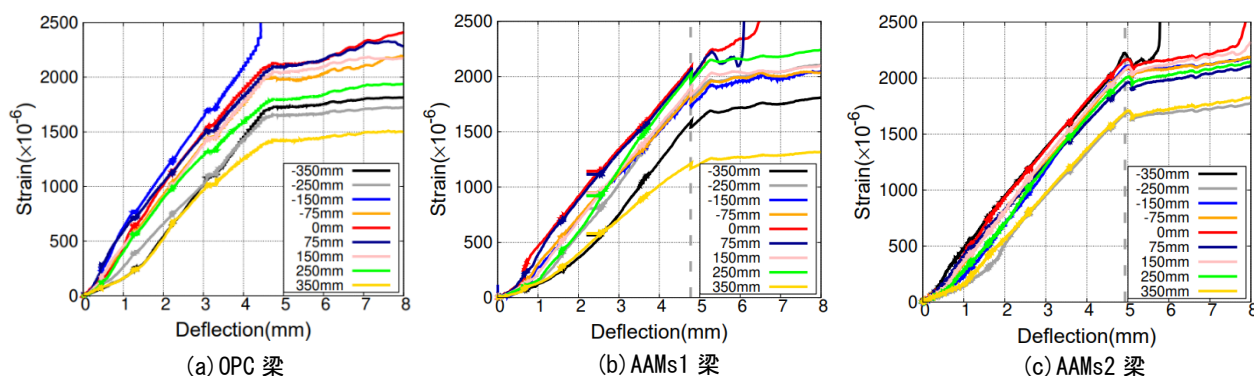


図-7 たわみー主鉄筋ひずみ関係

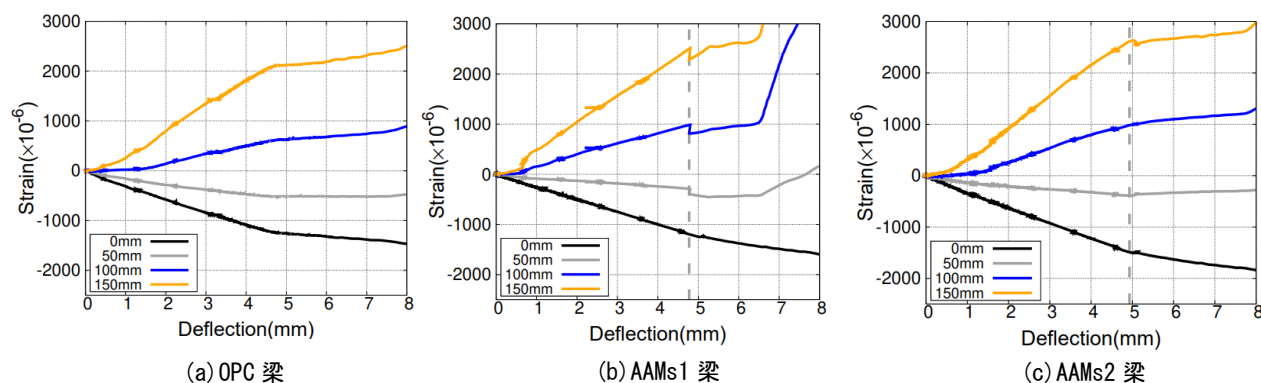


図-8 たわみーコンクリートひずみ関係

また、Atiş et al⁹⁾はスラグを原材料とした AAMs モルタルの乾燥収縮に及ぼすアルカリ活性化剤の影響を評価した。その結果、ケイ酸ナトリウムを用いた場合の乾燥収縮率が最も高く、最大で OPC の 6 倍であったと報告した。よって、本実験の SS を用いた AAMs においても、乾燥収縮は OPC と比較して非常に大きく、それに起因するひび割れの影響は大きい可能性がある。以上から、本実験の AAMs 梁の曲げ剛性の低さは、乾燥収縮ひび割れが大きな原因であると推察できる。

また前述のように、本解析では AAMs コンクリートの材料モデルは、OPC コンクリートの応力ーひずみモデルに AAMs コンクリートの圧縮強度及び初期静弾性係数の実験値を適用したものとした。それによって AAMs 梁の解析値と実験値との間に差異が生じた可能性もある。よって、AAMs コンクリートに適した応力ーひずみモデルを作成することは今後の課題であるといえる。

梁の終局点に着目すると、AAMs2 梁はたわみ 12mm 付近における荷重低下が原因で終局荷重が小さくなっているものの、AAMs1 梁と OPC 梁の終局荷重は概ね等しいことがわかる。一方で、AAMs 梁の終局ひずみは約 37.0mm、OPC 梁は 25.7mm であり、AAMs 梁の方が 1.48 倍程度大きくなっている。このことから、本実験で作製した AAMs 梁は、OPC 梁より靱性に富んだ性質を有する可能性がある。ただし、一般的な AAMs 梁と OPC 梁の終局たわみの大小関係は、配合や構造によって異なる⁸⁾⁹⁾

ことから、終局時のたわみが大きくなる今回の結果は本実験の AAMs 梁に特有の性質であるとは断定できない。

なお、本実験では AAMs1 梁と AAMs2 梁で荷重ーたわみ関係が大きく異なる結果となった。具体的には、AAMs1 梁では OPC 梁同様、終局まで荷重が増加し続けたのに対し、AAMs2 梁ではたわみ 12mm 程度を境に荷重が減少に転じた。これは、3.4 にて後述するように、AAMs2 梁では竹ひご周辺部のコンクリート充填が不十分であり、たわみ 12mm 程度の早い段階で圧縮縁コンクリートが圧壊に到ったためであると考えられる。

3.4 ひび割れ性状

図-9 に梁のひび割れ性状（ひび割れ発生時、荷重 10kN 時、荷重 20kN 時、終局時）を示す。ひび割れ発生時に着目すると AAMs 梁、OPC 梁には明らかな差異はないことがわかる。また、荷重 10kN 時に着目すると、AAMs2 梁には他の梁にはない部材軸方向のひび割れが発生していることがわかる。この原因として、せん断補強鉄筋の固定のために配置した竹ひご周辺部のコンクリート充填が不十分だった可能性が考えられる。一方、AAMs1 梁と OPC 梁にはこの時点では明確な差異は見られない。荷重 20kN 時から終局時にかけては、OPC 梁より AAMs 梁の方が広範囲にひび割れが発生しており、ひび割れ本数も多くなっていることが確認できる。以上のことから、本実験で使用した AAMs 梁は OPC 梁より優れたひび割れ分散性を有することがわかり、この性質が前述した

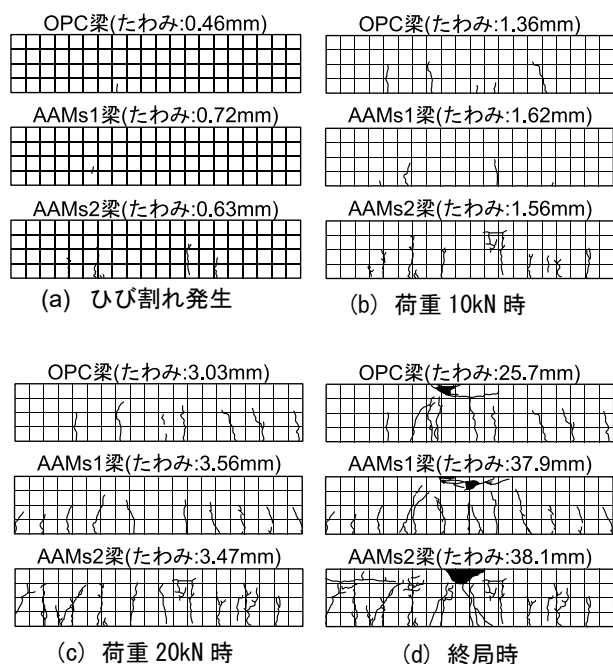


図-9 ひび割れ性状

AAMs 梁の靱性の高さに影響していると考えられる。佐川ら³⁾は、一般的な GPC 梁と OPC 梁を比較し、GPC 梁の方がひび割れ本数は多く、ひび割れ幅が小さくなることから、GPC 梁の方がひび割れ分散性に優れていることを報告している。よって、ひび割れ性状に関して、本実験の AAMs 梁は一般的な GPC 梁と同様の性質を有すると考えられる。

4. まとめ

本研究では、アルカリ活性化剤にメタケイ酸ナトリウム九水和物を用いた AAMs コンクリートによって作製した RC 梁供試体に対して曲げ載荷試験を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 本実験で用いた AAMs コンクリートは OPC コンクリートと比較して、圧縮強度が小さい一方で、割裂引張強度は大きく、静弾性係数は同程度であった。
- (2) 本実験で作製した AAMs 梁のひび割れ発生荷重、主鉄筋降伏時荷重及び中立軸位置、最大荷重は現行の RC 部材の設計式で概ね評価可能であった。
- (3) 主鉄筋降伏以前の荷重—たわみ関係において、曲げ剛性は OPC 梁よりも AAMs 梁の方が小さいことがわかった。また、主鉄筋降伏付近で AAMs 梁のみに一時的な荷重低下が確認された。
- (4) 主鉄筋降伏以後の荷重—たわみ関係において、AAMs 梁は数値解析及び OPC 梁と比較して、荷重増加が緩やかになった。また、終局ひずみは AAMs

梁の方が約 1.48 倍大きくなり、靱性に富む曲げ性能を有することが示唆された。

- (5) 本実験の AAMs 梁は、OPC 梁よりも広範囲に多くのひび割れが発生し、ひび割れ分散性に優れていた。

謝辞

本実験及び検討の主動者である長谷川樹氏に深謝する。また、本研究の一部は JSCE361 委員会からの提供材料を用い、科学研究費補助金基盤研究(A)21H04574 の助成のもと実施した。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) Joseph Davidovits : Geopolymers:Inorganic Polymeric New Materials, Journal of Thermal Analysis, Vol.37, pp.1633-1656, 1991
- 2) 柴山淳, 西山峰広 : フライアッシュをベースとしたジオポリマーコンクリート梁の曲げ終局耐力と復元力特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 87 巻, 第 798 号, pp.799-810, 2022.8
- 3) 佐川康貴, 太田周, 合田寛基, 大西俊輔 : ジオポリマーコンクリートはりの曲げ耐荷性状に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.2095-2100, 2017
- 4) Cong Ma, Bin Zhao, Luming Wang, Guangcheng Long, Youjun Xie : Clean and low-alkalinity one-part geopolymeric cement:Effects of sodium sulfate on microstructure and properties, Journal of Cleaner Production, Vol.252, No.119279, 2020
- 5) 篠原弘充, 安琳, 高橋良和 : メタケイ酸ナトリウム九水和物を用いた GP コンクリートの材料力学的性質に関する研究, 2022 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 口頭 V-4, 2022
- 6) 篠原弘充, 長谷川樹, 安琳 : メタケイ酸ナトリウム九水和物を使用したジオポリマーコンクリートの力学的特性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, 2023
- 7) Tung T. Tran , Thong M. Pham , Hong Hao : Experimental and analytical investigation on flexural behaviour of ambient cured geopolymer concrete beams reinforced with steel fibers, Engineering Structures, Volume 200, 1 December 2019, 109707
- 8) Thakkar Sonal, Dave Urmil, Bhatol Darshan : Behaviour of ambient cured prestressed and non-prestressed geopolymer concrete beams , Case Studies in Construction Materials, Volume 16, June 2022, e0079