

論文・報告

橋梁用伸縮装置 KMA ジョイントの材料特性

～道路橋示方書に適合した強度特性～

Improvement of Quality Control Methods for Aluminum Alloy Castings

長谷川 真司 ^{*1}

HASEGAWA Shinji

久保田 和徳 ^{*2}

KUBOTA Kazunori

砂土居 美治 ^{*3}

SUNADOI Yoshiharu

小笠原 照夫 ^{*4}

OGASAWARA Teruo

道路橋示方書には、道路橋における設計の前提とできる材料として、鋼材（構造用鋼材、鋼管、接合用鋼材、溶接材料、鋳錫造品、線材、棒鋼、その他）とコンクリートが規定されている。これらの材料は、これまでに様々な実験的検証を行うなどして根拠を蓄積してきたものであり、材料としての機械的特性や化学的特性などの様々な特性が明らかである。一方、道路橋示方書に規定されていない材料を適合させるには、設計に用いる材料の強度の特性値は、JIS 等の規格値との関係や設定根拠となる統計データの多寡やばらつき等を考慮するとともに、材料強度試験などから得られた材料強度、機械的性質に関する統計データに基づいて適正に定める必要がある。本稿では、道路橋示方書で規定されていない材料であるアルミニウム合金錫物（AC4CH-T6 砂型）の強度特性について検討する一環として、実測値のばらつきを小さくするための改善を実施し、その効果について過去の材料検査成績書のデータを統計調査した。その結果、実測値のばらつきが小さくなるとともに、道路橋示方書で規定された材料同様に 5% フラクタイル値が規格の下限値を超えることを確認した。

キーワード：伸縮装置、道路橋示方書、アルミニウム合金錫物、材料特性

1. はじめに

道路橋示方書（以下、道示）は、伸縮装置に対して、I 共通編¹⁾10 章で、要求性能（路面の平坦性、連続性、強さ、車両通行に対する耐久性、雨水などに対する水密性、車両通行に対する振動・騒音への配慮、すべり抵抗値）、作用する力、設計伸縮量、耐久性能に関する検討項目、施工に関する検討項目を規定している。

材料については、I 共通編 9 章で、鋼材とコンクリートを規定しているが、道示に規定されていない材料の使用に際しては、II 鋼橋・鋼部材編²⁾1 章で解説されており、材料特性（基本物性、機械的性質、化学成分等）についての検討が必要であるとしている。また、設計に用いる材料の強度の特性値について、II 鋼橋・鋼部材編 4 章で解説されているとおり、JIS 等の規格値との関係や設定根拠となる統計データの多寡やばらつき等を考慮するとともに、材料強度試験などから得られた材料強度、機械的性質に関する統計データに基づいて適切に定める必要があるとしている。

我々が販売する伸縮装置 KMA ジョイントは、輪荷重を受ける部材として、アルミニウム合金錫物製の本体を使用している。道示に規定されている鋼材を使用していないため、設計に用いる材料の強度の特性値は、アルミ

ニウム合金錫物についての JIS の規格値により設定している。

著者らは、当該伸縮装置に使用されるアルミニウム合金錫物の強度特性についての検討として、材料強度試験として行っている引張試験に対して、試験結果のばらつきを小さくするための改善を行い、その効果について、改善実施前後の試験結果に対する統計調査により、確認した。

本稿では、引張試験に対する改善とその効果とともに、当該伸縮装置に使用されるアルミニウム合金錫物の機械的性質と化学成分の安定性について、考察した結果を報告する。

2. アルミニウム合金錫物の機械的性質と化学成分

(1) アルミニウム合金錫物の特長

アルミニウム合金錫物の、他の金属材料と比較して優れた特長は、比重が鉄の 1/3 と軽い、大気中で自然にできる酸化被膜により耐食性が良い、加工性に富み様々な形に成形しやすい、合金にすることによって優れた強度を発揮することなどが挙げられる。そのことから、産業資材に使用されることが多く、JIS や ISO でも多くの材質が規定されている。その中で、当該伸縮装置に使用さ

*1 株橋梁メンテナンス技術製造部 部長

*2 株橋梁メンテナンス技術製造部開発課 課長

*3 株橋梁メンテナンス安全品質管理室 室長

*4 川田工業株橋梁事業部 顧問

れるアルミニウム合金鋳物は JIS H 5202 で規定された AC4CH-T6 (砂型) である。AC4CH は熱処理型合金で鋳造性, じん性, 耐食性が優れた合金である Al-Si-Mg 系の中で, 特に添加元素量を調整し不純物を少なくしてじん性を向上させた合金であり, 自動車ホイール用合金として定着しているほか, 自動車の足回り部品等, 多くの安全性を要求される機械構造部品に用いられる。

(2) アルミニウム合金鋳物の熱処理

アルミニウム合金鋳物の熱処理には, 鋳造したままの F, 鋳造後室温まで冷却した鋳物を, 強さの向上と寸法の安定化のために人工時効処理を施した T5, 鋳造したのち溶体化処理をし, その後焼入れ, 人工時効処理をすることで機械的性質を向上させる T6 などがあり, T6 は溶体化処理後の焼入れ時における鋳物の表面部と内部での冷却速度の違いにより表面部に圧縮の残留応力が生じることも知られている。当該伸縮装置では, 高い機械的性質を得るため熱処理条件として T6 を採用しており, 溶体化処理 ($530 \pm 5^\circ\text{C} \times 5$ 時間) 後に焼入れ ($30 \pm 20^\circ\text{C}$), その後に人工時効処理 ($160 \pm 5^\circ\text{C} \times 5$ 時間) を行っている (図 1)。

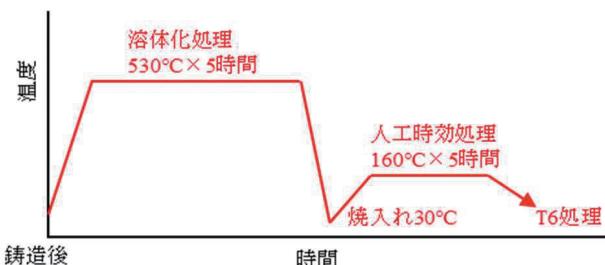


図 1 アルミニウム合金鋳物の熱処理工程

(3) アルミニウム合金鋳物の機械的性質

当該伸縮装置に使用されるアルミニウム合金鋳物については, 鋳造日毎を 1 ロットとして, 全製造ロットについて引張試験により機械的性質を確認している。引張試験には製品鋳造時に試験片用の砂型に鋳込み, 製品と同じ熱処理工程を経た鋳肌のままの試験片 (以下, 砂型試験片) を用いる。砂型試験片の形状を写真 1 に示す。形状寸法は切出し試験片の規格である JIS Z 2241 の 4 号試験片を模した形状を砂型によって作成している。

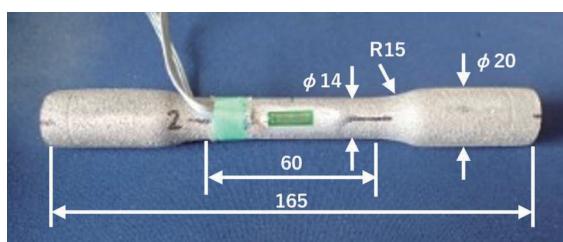


写真 1 砂型試験片

当該伸縮装置に使用されるアルミニウム合金鋳物の機械的性質の規格値を表 1 に示す。アルミニウム合金鋳

物 AC4CH-T6 の材料規格は JIS H 5202 で定められたものであるが, 0.2% 耐力については規定がない。2017 年(平成 29 年)の道路橋示方書の改定に伴う 0.2% 耐力を用いた照査を導入する際に JIS で近似規格として ISO から JIS に追加された AlSi7Mg0.3 の 0.2% 耐力の規定を引用し, 製品の規格値とした。

表 1 当該伸縮装置の機械的性質の規格値

	引張強さ N/mm ²	0.2%耐力 N/mm ²	伸び %	ブリネル硬さ HBW
KMA	≥230	≥190	≥2	75 (参考)
JIS,AC4CH	≥230	—	≥2	75 (参考)
JIS,AlSi7Mg0.3	≥230	≥190	≥2	75≥

(4) アルミニウム合金鋳物の化学的性質

当該伸縮装置に使用されるアルミニウム合金鋳物の化学成分についても機械的性質同様に, 鋳造日毎を 1 ロットとして全ロットについて成分分析を行い, その品質を確認している。化学成分の規格値を表 2 に示す。規格値は JIS H 5202 の AC4CH で規定されたものを規格値としている。また, 鋳造会社では AlSi7Mg0.3 にも適合できるよう, 両規格を満足する化学成分としている。

表 2 当該伸縮装置の化学成分の規格値

単位: %

	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn
KMA JIS,AC4CH	0.10≥	6.5	0.25	0.10≥	0.20≥	0.10≥
		~	~			
JIS,AlSi7Mg0.3	0.05≥	7.5	0.45	0.07≥	0.19≥	0.10≥
		6.5	0.25			

	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Al
KMA JIS,AC4CH	0.05≥	0.20≥	0.05≥	0.05≥	0.05≥	残部
		~	~	~	~	
JIS,AlSiMg0.3	—	0.08	—	—	—	残部
		~				

3. 引張試験方法の改善

(1) 機械的性質の集計結果 (改善前)

2019 年 3 月～2023 年 10 月の間の材料検査成績書データ (N=672) から機械的性質について集計した結果を整理した。

材料検査成績書に記載されている引張強さ, 0.2% 耐力, 伸び, ブリネル硬さについて, 最大値, 最小値, 平

均値、標準偏差、変動係数を表3に示す。あわせて表に記している -2σ は、平均値から標準偏差 σ の2倍を減じた値である。図2,3,4にそれぞれ、引張強さと0.2%耐力、伸びのヒストグラムを示す。硬さについては参考値であることから作成しなかった。

また、ヒストグラムの区間の幅や区間の数は、JIS Z 9041：データの統計的な解釈方法（第1部：データの統計的記述）により決定した。

表3 改善前の集計結果

	引張強さ N/mm ²	0.2%耐力 N/mm ²	伸び %	ブリル硬さ HBW
KMA	≥230	≥190	≥2	75 (参考)
JIS, AC4CH	≥230	—	≥2	75 (参考)
JIS, AISI7Mg0.3	≥230	≥190	≥2	75≥
最大値	296	236	6	89
最小値	232	190	2	77
平均値	257.5	208.1	3.6	86.1
標準偏差	11.5	9.5	0.9	1.8
-2σ	234.4	189.0	1.9	82.5
変動係数	4.5%	4.6%	24.0%	2.1

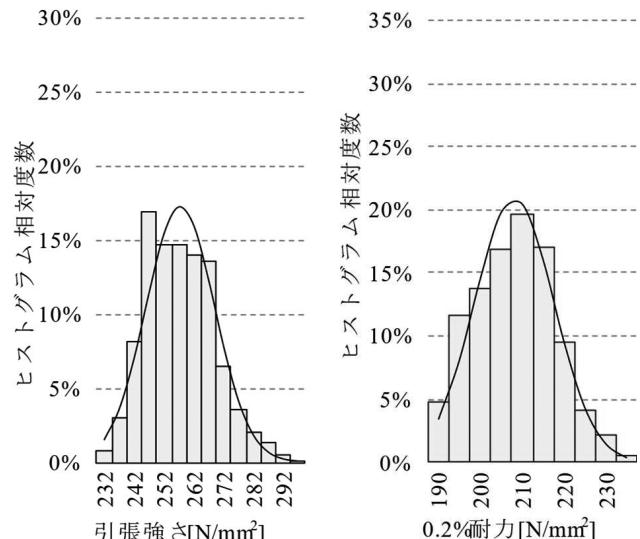


図2 引張強さのヒストグラム

図3 0.2%耐力のヒストグラム

引張強さと0.2%耐力については、正規分布に近いが、伸びは区間の数が6種類に限定されるため統計的な評価は難しい。また、 -2σ に着目すると、引張強さは規格の下限値を上回るが、0.2%耐力では僅かであるが規格の下限値を下回る。

そこで、機械的性質を精度良く測定するため、試験方法の改善を検討した。

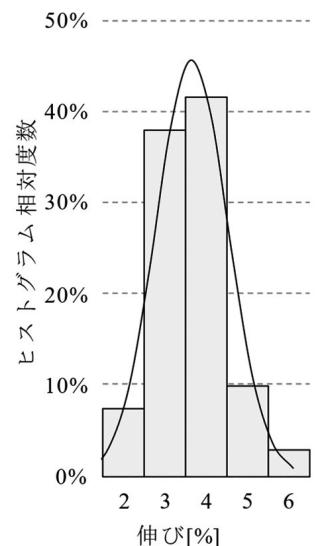


図4 伸びのヒストグラム

(2) 鑄出し文字の切削加工

引張試験に使用する砂型試験片には、铸造ロットと照合する目的で、ロット番号が鋳出し文字で表示されている（写真2）。万能試験機のチャックで掴む際に、試験片と試験機の軸がずれることで試験結果にばらつきが生じている可能性があった。そこで、試験前に鋳出し文字を電動工具により切削加工することとした。

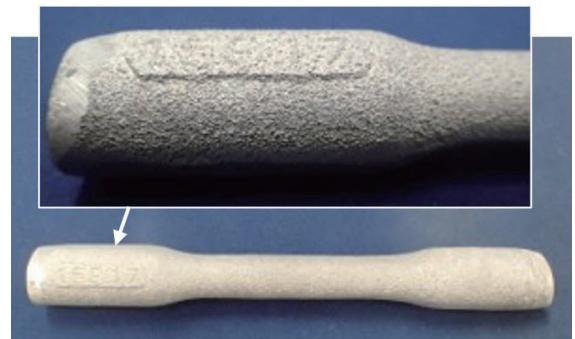


写真2 鋳出し文字

(3) ひずみ測定方法の改善

引張試験は第三者機関で実施している。試験方法の適用規格はJIS Z 2241金属材料引張試験方法で、試験装置は（株）島津製作所製300kN万能試験機（型式AGX-300kNV）を使用している。引張強さは最大試験力を断面積で除して求めている。0.2%耐力は砂型試験片の平行部中央に貼り付けた1枚のひずみゲージの測定値より得られる応力-ひずみ線図の弾性範囲の傾きよりオフセット法により求めているが、弾性範囲の傾きにばらつきが生じることから、0.2%耐力のばらつきを改善する目的で、測定方法について検討した。

引張試験に使用する試験機のつかみ装置は試験開始時には手締め程度で固定したのち、軸方向に試験力が加わ

ると共に、クロスヘッドとの間の斜め部材がスライドすることで横方向につかみ力が生じる機構（以下、スライド式）である。そのため、試験片に曲がりなどの初期不整がある場合には、軸方向に試験力が加わる過程で初期不整が矯正され、ひずみゲージ貼付け部の変形が試験片毎に異なることが想定された（写真3、図5）。そこで、写真5のようにひずみゲージを裏表2枚貼り付けた試験片を用いた引張試験を、当該試験機と、これとは異なり疲労試験などに用いる、写真4と図6に示すような試験片固定時に油圧で試験片をつかむ機構（以下、油圧式）の引張試験機の両者で実施し、応力-ひずみ線図を比較した。



写真3 スライド式の試験機

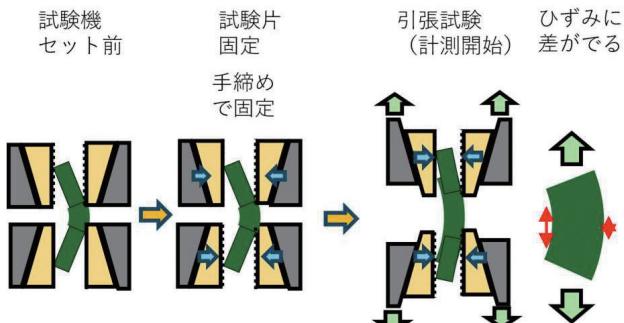


図5 スライド式のつかみ機構



写真4 油圧式の試験機

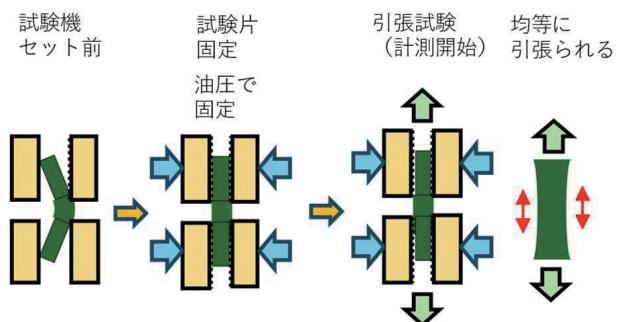


図6 油圧式のつかみ機構

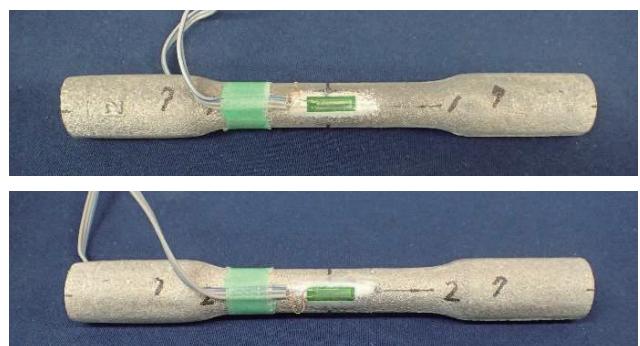


写真5 ひずみゲージ貼付け状況

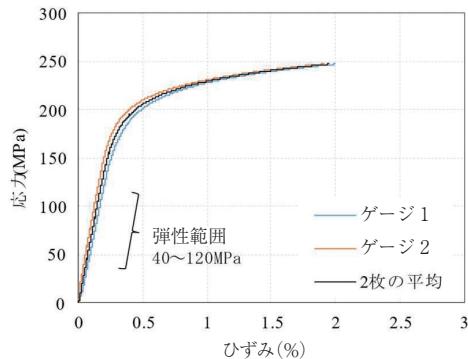


図7 スライド式の応力-ひずみ線図

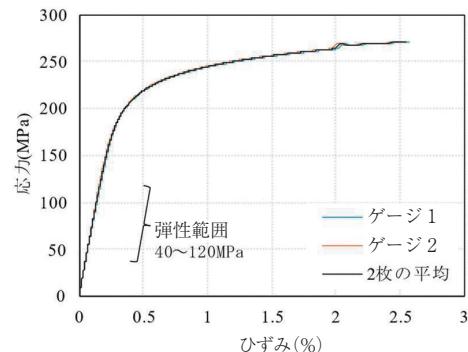


図8 油圧式の応力-ひずみ線図

図7にスライド式、図8に油圧式で実施したひずみゲージを2枚貼り付けた引張試験で得られた応力-ひずみ

み線図を示す。裏表に貼り付けたひずみゲージのそれぞれの値と、両者の平均値をプロットした結果を比較すると、油圧式では両者に大きな違いがないのに対して、スライド式では2枚のゲージの応力-ひずみ線図は明らかに乖離する。これは、当初想定したつかみ機構の違いから推定したひずみの傾向と同じであり、特に弾性範囲を超えた辺りの乖離が大きいことは、0.2%耐力のばらつきに影響しているものと考えられる。

また、平均値を採用することで、ばらつきを小さくすることに有効であると考え、これ以降のスライド式を使用する本引張試験はひずみゲージを2枚貼ることとした。

4. 改善の効果

(1) 概要

改善の効果を確認するため、ひずみゲージ2枚貼りなど改善後の2023年11月～2025年4月の間の材料検査成績書データ(N=200)から機械的性質について集計した結果を整理した。鋳出し文字の切削加工は、ゲージ2枚貼りに移行する際に適用を開始した。また、化学成分についても同様に材料検査成績書データ(N=872)を集計してその製造工程の安定性を確認した。

(2) 機械的性質の集計結果(改善後)

材料検査成績書に記載されている引張強さ、0.2%耐力、伸び、ブリネル硬さについて、最大値、最小値、平均値、標準偏差、 -2σ 、変動係数を表4に示す。図9と図10に引張強さと0.2%耐力のヒストグラムを示す。

表4 改善後の集計結果

	N=200			
	引張強さ N/mm ²	0.2%耐力 N/mm ²	伸び %	ブリネル硬さ HBW
KMA	≥230	≥190	≥2	75(参考)
JIS,AC4CH	≥230	—	≥2	75(参考)
JIS,AlSi7Mg0.3	≥230	≥190	≥2	75≥
最大値	295	236	6	86
最小値	242	196	2	80
平均値	266.7	212.8	3.7	84.8
標準偏差	8.2	6.9	0.8	1.9
-2σ	250.3	199.0	2.0	81.1
変動係数	3.1%	3.2%	23.0%	2.2%

引張強さと0.2%耐力の標準偏差の値は、各々11.5 N/mm²から8.2 N/mm²、9.5 N/mm²から6.9 N/mm²へと小さくなった。

また、0.2%耐力の -2σ の値についても199.0 N/mm²となり、規格の下限値を上回る結果となった。この結果より、改善前の結果がばらついたことは、改善の際に着目した、試験片と試験機拘み装置との軸ずれや、試験片の初期不整による影響によるものであったと考えられる。

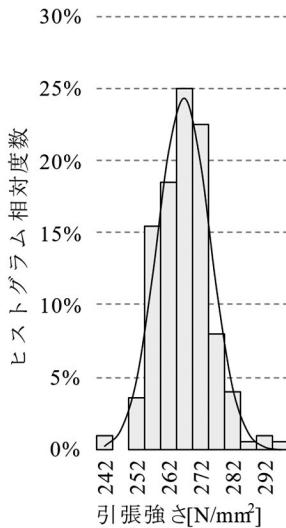


図9 引張強さのヒストグラム

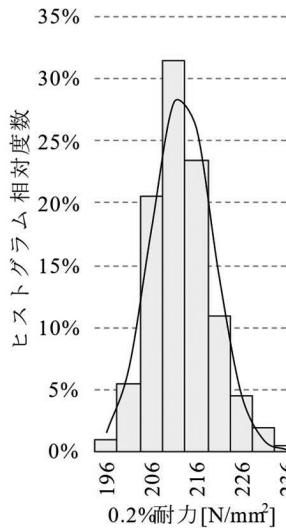
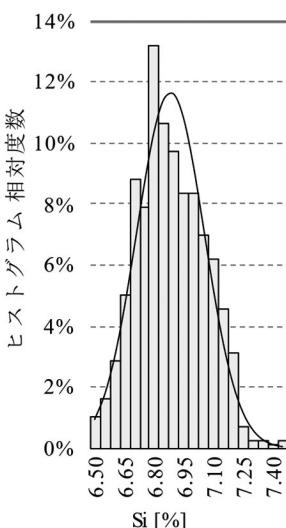


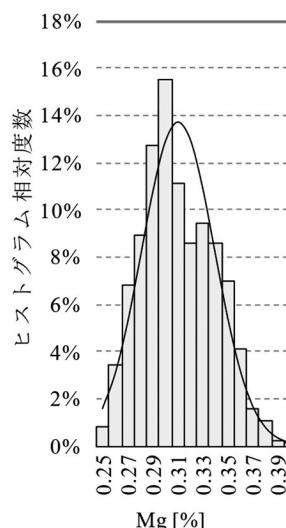
図10 0.2%耐力のヒストグラム

(3) 化学成分の集計結果

表5に材料検査成績書の化学成分について、機械的性質と同様に、最大値、最小値、平均値などの統計値を示す。図11は、化学成分のうち含有率の大きなSiシリコンとMgマグネシウムのヒストグラムを示す。ヒストグラムの区間の幅や区間の数は、JIS Z 9041:データの統計的解釈方法(第1部:データの統計的記述)により決定した。



Siシリコン



Mgマグネシウム

図11 化学成分のヒストグラム

表 5 化学成分の集計結果

N=872 単位 : %

	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Al
KMA JIS,AC4CH	0.10≥	6.5 ~7.5	0.25 ~0.45	0.10≥	0.20≥	0.10≥	0.05≥	0.20≥	0.05≥	0.05≥	0.05≥	残部
JIS,AlSi7Mg0.3	0.05≥	6.5 ~7.5	0.25 ~0.45	0.07≥	0.19≥	0.10≥	—	0.08 ~0.25	—	—	—	残部
最大値	0.02	7.44	0.40	0.04	0.12	0.03	0.01	0.20	0.01	0.01	0.01	93.04
最小値	0.00	6.50	0.25	0.00	0.06	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	91.99
平均値	0.00	6.88	0.31	0.00	0.09	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	92.60
標準偏差	0.0018	0.171	0.029	0.006	0.009	0.004	0.002	0.009	0.002	0.002	0.002	
+2σ	0.00	7.23	0.37	0.01	0.10	0.01	0.00	0.14	0.01	0.00	0.00	
-2σ	0.00	6.54	0.25	-0.01	0.07	-0.01	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	
変動係数	930.6%	2.5%	9.3%	507.9%	9.9%	486.8%	559.8%	7.8%	385.6%	504.5%	462.4%	

-2 σ は規格値の下限を超えており、+2 σ は規格値の上限を下回る。これは鋳造時に複数のインゴットを混合させることで化学成分の安定化を図っている鋳造会社の工夫の成果と考えられ、これらの製造工程で製造されるアルミニウム合金鋳物の品質は安定している。

5. 材料強度の特性値の検討

伸縮装置に使用されるアルミニウム合金鋳物の材料強度試験として行っている引張試験について、ひずみ測定方法や試験片掴み部に対する改善を実施し、その効果として、0.2% 耐力と引張強さのばらつきが小さくなることを、試験成績値に対する統計調査により確認した。

道示は、設計に用いる材料の強度の特性値について、道示Ⅱ鋼橋・鋼部材編 4 章において、適切に定められた材料強度試験法による試験値のばらつきを考慮したうえで、試験値がその強度を下回る確率がある一定の値以下となることが保証された値³⁾と規定されているが、道示Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編⁴⁾では、下回る確率が 5%，すなわち、5% フラクタイル値と規定されている。

表 6 改善後の 5% フラクタイル値

N=200

	引張強さ N/mm ²	0.2%耐力 N/mm ²	伸び %	アリカル硬さ HBW
KMA 規格値	≥230	≥190	≥2	75 (参考)
平均値	266.7	212.8	3.7	84.8
標準偏差	8.2	6.9	0.8	1.9
5%フラクタイル値	253.2	201.4	2.4	81.7

前述の材料強度試験の統計調査結果から、5% フラクタイル値を算出式「平均値 - 1.645 × 標準偏差」⁵⁾により求めた(表 6)。その結果、0.2% 耐力については 201.4

N/mm²、引張強さについては 253.2 N/mm² となり、材料強度試験の規格の下限値を超えるものとなった。これにより、規格の下限値を、設計に用いる材料の強度の特性値としても問題ないと考えられる。

6. おわりに

本稿では、道路橋示方書で規定されていない材料であるアルミニウム合金鋳物(AC4CH-T6 砂型)の強度特性について検討する一環として、実測値のばらつきを小さくするための改善を実施し、その効果について過去の材料検査成績書のデータを統計調査した。その結果、実測値のばらつきが小さくなるとともに、道路橋示方書で規定された材料同様に 5% フラクタイル値が規格の下限値を超えることが確認できた。

7. 参考文献

- 1) 公益社団法人日本道路協会:道路橋示方書・同解説(Ⅰ共通編), 2017.11
- 2) 公益社団法人日本道路協会:道路橋示方書・同解説(Ⅱ鋼橋・鋼部材編), 2017.11
- 3) 独立行政法人土木研究所:鋼材料・鋼部材の強度等に関する統計データの調査, 土木研究所資料第 4090 号, 2008.3
- 4) 公益社団法人日本道路協会:道路橋示方書・同解説(Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編), 2017.11
- 5) 公益社団法人土木学会:コンクリート標準示方書(設計編), 2017