

サルバティーコ橋の構造特性を生かした 設計手法と活用方法

丸山 大貴¹・関 文夫²・大川 千裕³

¹正会員 日本大学理工学研究科土木工学専攻
(〒101-8303 東京都千代田区神田駿河台1-8-14, E-mail:csda18012@g.nihon-u.ac.jp)

²正会員 工博 日本大学理工学部土木工学科
(〒101-8303 東京都千代田区神田駿河台1-8-14, E-mail:seki.fumio@nihon-u.ac.jp)

³非会員 静岡県庁
(〒415-0016 静岡県下田市中531-1, E-mail:chihiro1_okawa@pref.shizuoka.lg.jp)

土木工学を学んでいく中での魅力の一つにスケールの大きい構造物の製作がある。そこで、大きい構造物製作を様々な被験者に体験してもらうため簡易的に製作できるサルバティーコ橋に着目した。サルバティーコ橋は人力のみで製作し、木材の組み合わせで自立している橋である。本研究はサルバティーコ橋を製作するために使用木材の部材寸法選定から橋のスケールを決定するまでの設計手法並びに活用方法を紹介するものである。

キーワード:組積構造, サルバティーコ橋, 木橋, 部材寸法

1. はじめに

サルバティーコ橋はLeonardo da Vinci (1452-1519)が考案したとされる木製組積構造橋である。サルバティーコ橋は釘やボルトなどは一切使わず、木材の組み合わせのみで自立している。さらに、大人から子供まで様々なスケールで簡易的に製作を行えるのが特徴といえる。また、加工・製作が短時間で行えることから、他の構造物と違い、幅広く活用方法が見いだせる題材であることが考えられる。

本研究ではサルバティーコ橋の製作プロセスや使用木材の部材寸法、橋のスケールを決定するための設計手法、並びにサルバティーコ橋の活用方法について紹介する。



写真-1 組み立てられたサルバティーコ橋(2017.8.2)

2. 構造原理

サルバティーコ橋は主材2本、横材1本の計3本で1ユニットが形成されており、これらを人力によって増やしていくことで大きいスケールの橋となっていく(図-1)。また、主材の断面幅 $b_1(\text{mm})$ 、高さ $h_1(\text{mm})$ 、部材長 $\ell_1(\text{mm})$ 、横材の断面幅 $b_2(\text{mm})$ 、高さ $h_2(\text{mm})$ 、部材長 $\ell_2(\text{mm})$ 、新たにサルバティーコ橋を組み立てる際に主材を横材に立てかける際のかかりしろ $t(\text{mm})$ 、ユニット数を決定することで大まかなスパン長 $L(\text{mm})$ 、アーチライズ長 $H(\text{mm})$ が決定する(図-2)。

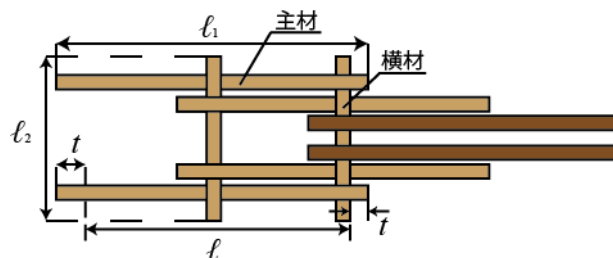


図-1 3ユニット平面図

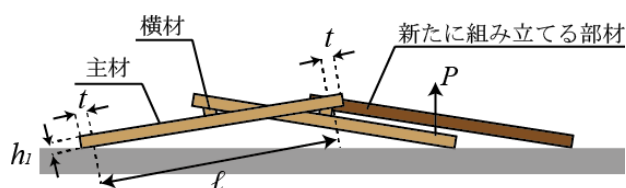


図-2 3ユニット側面図

構造特性上、サルバティーコ橋を形成する主材断面高さ h_l (mm)、部材長 ℓ_l (mm)、横材断面高さ h_2 (mm)、かかりしろ t (mm) を決定すると主材交差角 θ (rad) が決定する (図-3) (式-1)。この主材交差角はユニット数が増えなくても変化することなく、一定であることから、サルバティーコ橋を線形で表すと、支間長 ℓ (mm) が1辺の正多角形となる (図-4)。また、支間長は (図-2) で示した部材長の両端から、かかりしろを除いたものとする。支間長の算出式を (式-2) に示す。

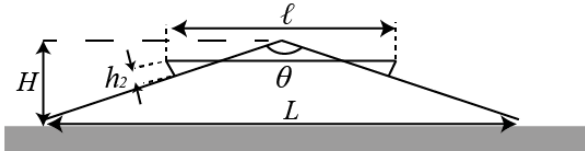


図-3 線形で表した3ユニット

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\left(\frac{\ell}{h_2} + 1 \right)^2}{2 \left(\left(\frac{\ell}{h_2} \right)^2 + 1 \right)} \right) \quad (1)$$

ここに、

θ : 主材交差角 (rad) ℓ : 部材長 (mm) h_2 : 横材幅 (mm)

$$\ell = \ell_l - 2t \quad (2)$$

ここに、

ℓ : 支間長 (mm) ℓ_l : 部材長 (mm) t : かかりしろ (mm)

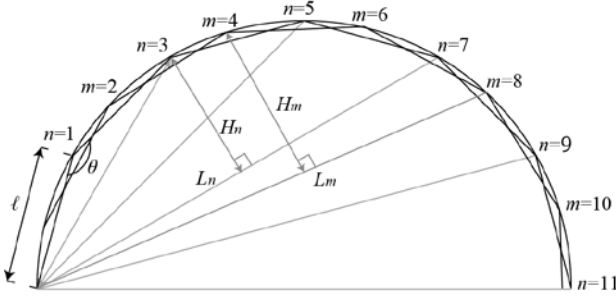


図-4 円に内接したサルバティーコ橋

(図-4) から正多角形を利用し、サルバティーコ橋を表すと、奇数ユニット n で表される線形と偶数ユニット m で表される線形の合成した図形である。また、これらの正多角形を円に内接すると (図-4) のようになり、サルバティーコ橋はユニット数が増え続けると円形に収束していく構造である。さらに、支間長の長さが長くなればなるほど円の半径も大きくなることから、スパン長も長くなる。しかし、釘やボルトなどを使用しないサルバティーコ橋を自立させるために製作限界は半円形までであり、横材との摩擦力の関係も考慮しなければならない。

次に奇数、偶数それぞれのユニット数からわかるスパン長、アーチライズ長の算定式を示す。スパン長は (図-4) に示した半円の半径の左側の点から求めたいユニット数までの弦の長さとなっている。また、スパン長から垂直に引いた線と最大高さの点と交わる長さをアーチライズとしている。

奇数ユニットの場合のスパン長 L_n (mm) の算定式を (式-3)、アーチライズ H_n (mm) の算定式を (式-4)、ユニット数から決定される部材との水平角度 α の算定式を (式-5) に示す。

$$L_n = \sum_{n=1}^{i=1} 2\ell \cos \alpha_{\frac{n-1}{2}} + \ell \quad (3)$$

$$H_n = \sum_{n=1}^{i=1} \ell \sin \alpha_{\frac{n-1}{2}} + h_2 \quad (4)$$

$$\alpha_{\frac{n-1}{2}} = \frac{(n-2)(\pi - \theta)}{2} \quad (5)$$

ここに、

L_n : スパン長 (mm) H_n : アーチライズ長 (mm)

$\alpha_{\frac{n-1}{2}}$: 奇数ユニットの場合の部材との水平角度 (rad)

同様に偶数ユニットの場合を (式-6, 7, 8) に示す。

$$L_m = \sum_{m=1}^{i=1} 2\ell \cos \alpha_{\frac{m}{2}} \quad (6)$$

$$H_m = \sum_{m=1}^{i=1} \ell \sin \alpha_{\frac{m}{2}} \quad (7)$$

$$\alpha_{\frac{m}{2}} = \frac{m}{2} (\pi - \theta) \quad (8)$$

ここに、

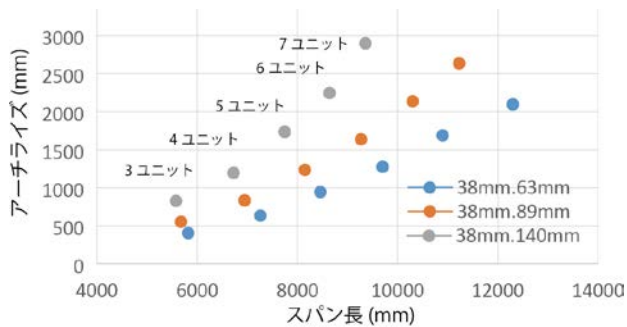
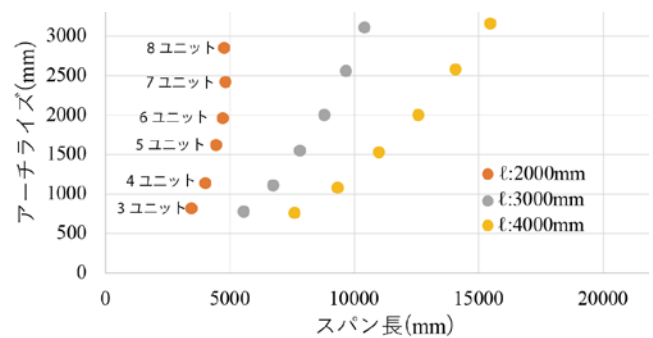
L_m : スパン長 (mm) H_m : アーチライズ長 (mm)

$\alpha_{\frac{m}{2}}$: 偶数ユニットの場合の部材との水平角度 (rad)

(式-3, 4, 6, 7) から算出されるサルバティーコ橋のスパン長、アーチライズは、主材断面高さ、部材長、横材断面幅、かかりしろの組み合わせに応じて多種多様なスパン長、アーチライズに変更が可能になる。これより、この橋は製作者、製作時間、目的に合わせて、製作が可能となる橋である。そこで、一般的に購入可能な市販木材を、一例としてサルバティーコ橋の組み合わせ表を (表-1) に示す。この表から、スパン長、アーチライズ長が選出される。また、表の中から $\ell_l = 3000$ mm の統一図を (図-5)、 $b_l = 90$ mm $\times$ $h_l = 90$ mm 統一図を (図-6) に示す。

表-1 木材組み合わせ表

主材			横材		かかりしろ	角度	ユニット数	主材1本重量	最大作業荷重	スパン長	アーチライズ
b1 (mm)	h1 (mm)	ℓ1 (mm)	b2 (mm)	h2 (mm)	t (mm)	θ	u	W(N)	W(N)	Ln (mm)	Hn (mm)
38	89	1800	38	63	150	141	5	3	40	4581	1181
38	89	1800	38	63	150	141	6	3	48	5236	2152
38	89	1800	38	63	150	141	7	3	56	5277	2947
38	89	1800	38	63	200	138	5	3	40	4465	1248
38	89	1800	38	63	200	138	6	3	48	4971	2258
38	89	1800	38	63	200	138	7	3	56	4809	3040
38	89	2400	38	63	150	152	5	4	51	6635	1168
38	89	2400	38	63	150	152	6	4	61	8216	2193
38	89	2400	38	63	150	152	7	4	71	9306	3162
38	89	2400	38	63	200	150	5	4	51	6577	1220
38	89	2400	38	63	200	150	6	4	61	8079	2286
38	89	2400	38	63	200	150	7	4	71	9049	3277
38	140	2400	38	89	150	141	5	7	78	6121	1554
38	140	2400	38	89	150	141	6	7	94	7011	2857
38	140	2400	38	89	150	141	7	7	109	7089	3905
38	140	2400	38	89	200	139	5	7	78	6015	1617
38	140	2400	38	89	200	139	6	7	94	6769	2956
38	140	2400	38	89	200	139	7	7	109	6660	3995
38	140	3000	38	89	150	150	5	8	94	8171	1559
38	140	3000	38	89	150	150	6	8	113	9979	2936
38	140	3000	38	89	150	150	7	8	132	11086	4181
38	140	3000	38	89	200	148	5	8	94	8108	1612
38	140	3000	38	89	200	148	6	8	113	9829	3029
38	140	3000	38	89	200	148	7	8	132	10805	4292
90	90	2500	38	89	150	153	5	10	116	6955	1173
90	90	2500	38	89	150	153	6	10	139	8663	2208
90	90	2500	38	89	150	153	7	10	163	9892	3197
90	90	2500	38	89	200	152	5	10	116	6902	1224
90	90	2500	38	89	200	152	6	10	139	8537	2299
90	90	2500	38	89	200	152	7	10	163	9653	3311
90	90	3000	38	89	150	158	5	12	137	8564	1160
90	90	3000	38	89	150	158	6	12	164	10924	2204
90	90	3000	38	89	150	158	7	12	192	12884	3242
90	90	3000	38	89	200	157	5	12	137	8530	1202
90	90	3000	38	89	200	157	6	12	164	10842	2281
90	90	3000	38	89	200	157	7	12	192	12724	3347
90	90	4000	38	89	150	164	5	17	178	11690	1140
90	90	4000	38	89	150	164	6	17	214	15231	2183
90	90	4000	38	89	150	164	7	17	249	18475	3259
90	90	4000	38	89	200	164	5	17	178	11673	1170
90	90	4000	38	89	200	164	6	17	214	15188	2241
90	90	4000	38	89	200	164	7	17	249	18391	3342
105	105	3000	90	90	150	146	5	17	200	7975	1767
105	105	3000	90	90	150	146	6	17	240	9515	3208
105	105	3000	90	90	150	146	7	17	280	10223	4549
105	105	3000	90	90	200	145	5	17	200	7895	1825
105	105	3000	90	90	200	145	6	17	240	9329	3306
105	105	3000	90	90	200	145	7	17	280	9883	4655
105	105	4000	90	90	150	155	5	22	256	11270	1759
105	105	4000	90	90	150	155	6	22	307	14205	3261
105	105	4000	90	90	150	155	7	22	358	16484	4793
105	105	4000	90	90	200	155	5	22	256	11229	1803
105	105	4000	90	90	200	155	6	22	307	14105	3343
105	105	4000	90	90	200	155	7	22	358	16294	4900
140	140	3000	90	90	150	140	5	30	331	7597	2018
140	140	3000	90	90	150	140	6	30	397	8641	3623
140	140	3000	90	90	150	140	7	30	463	8643	4972
140	140	3000	90	90	200	138	5	30	331	7491	2079
140	140	3000	90	90	200	138	6	30	397	8398	3720
140	140	3000	90	90	200	138	7	30	463	8214	5058
140	140	4000	90	90	150	151	5	40	431	10994	2032
140	140	4000	90	90	150	151	6	40	517	13541	3760
140	140	4000	90	90	150	151	7	40	603	15222	5428
140	140	4000	90	90	200	150	5	40	431	10938	2082
140	140	4000	90	90	200	150	6	40	517	13407	3849
140	140	4000	90	90	200	150	7	40	603	14970	5536

図-5 $\ell_1=3000\text{mm}$ 統一図図-6 $b_1=90\text{mm} \times h_1=90\text{mm}$ 統一図

3. 設計照査

(1) 材料物性

設計するにあたって一般的に購入可能な市販木材の中から一例として SPF 材(2×4, 2×6), スギ材の物性をまとめたものを表-2に記す。

表-2 材料物性表¹⁾

木材種類	単位体積重量	曲げ引張終局強度
SPF 材(2×4)	4.0kN/m ³	35.3 N/mm ²
SPF 材(2×6)	4.0kN/m ³	38.0 N/mm ²
スギ材	4.0kN/m ³	37.9N/mm ²

(2) 構造解析

(図-7)の主材3に着目すると、横材の支点A、支点Bの単純梁となる。主材3の自重は等分布荷重として载荷され、隣接する主材の自重の支点反力が単純梁の中央に横材Cを介して、支点反力P1(N), P2(N)として作用する構造である。さらに、梁の中央に人が載るとすると、その荷重P1を集中荷重で载荷することになる。このことから、単純張りの計算を行い、表-2の曲げ引張終局強度以内であれば破壊しない。

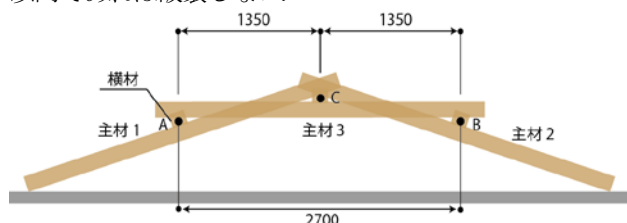


図-7 3ユニット構造モデル

(3) 摩擦力の限界値

木材の組み合わせによる摩擦力で自立していることから、製作するにあたって主材と横材にかかる摩擦力を考慮する必要がある。自重の力が一番加わり、滑りが生じると考えられる n-1 ユニットの着目すると(図-8)のようになる。n-1 ユニットの自重の半分の値が W(N)として、n-1 ユニットの横材に载荷される(図-8)。このことから、滑る可能性が考えられる u-1 ユニットの着目し、静止摩擦係数の値を調べる必要がある。

(図-8)より、自重と最大静止摩擦力 F(N)のつり合い式(9)、最大静止摩擦力と垂直抗力 N のつり合い式(10)から、静止摩擦係数の算定式(11)を示す。

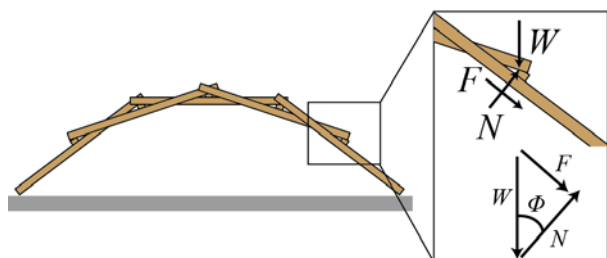


図-8 静止摩擦係数考え方

$$F = W \sin \phi \quad (9)$$

$$N = W \cos \phi \quad (10)$$

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (11)$$

ここに

ϕ : 摩擦角 (rad), N : 垂直抗力 (N)

μ : 静止摩擦係数²⁾ W : 重量 (N)

算出された μ の値が大きくなればなるほど滑り始める危険性が高くなる。実験(90mm×90mm×3000 mm,横材 38mm×89mm×1500mm)を行った際に 8 ユニットの滑りが生じた。8 ユニットの製作時に生じた静止摩擦係数が $\mu=0.22$ であった。そこで、最大静止摩擦力対策として溝有りサルバティエーコ橋を提案する。滑り始める危険性が高い主材端部に溝を掘り、滑りを抑えている(写真-2)、(写真-3)。断面欠損させているためせん断破壊に気を付けながら溝の位置、深さを決める必要がある。



写真-2 主材端部溝



写真-3 主材端部組み方

(4) 安全管理

文部科学省が規定する年少者労働基準第 7 条より 15 歳未満の男女は平均体重の約 25%までの重量しか持つことができない³⁾。よって、15 歳未満の男女が持ち上げる際に必要な力である最大作業荷重 P (N)が平均体重の約 25%を超えないように気を付ける必要がある。また、この橋は左右対称となっているため自重は左右均等にかかる。このことから n ユニットの製作する際、最大作業荷重は n-1 ユニットの自重の半分の値となる。

また、労働安全衛生法より、高さ 1.5m を越えると高所作業となるため、安全対策が必要となる。さらに、高さが 2m 以上の箇所(作業床の端、開口部等を除く)で作業を行なう場合において墜落により労働者に危険を及ぼすおそれのあるときは、足場を組み立てる等の方法により作業床を設けなければならない⁵⁾。このような規定があるため製作する際には注意が必要である。

4. 活用方法

(1) 小学生によるサルバティーコ橋製作

2017年8月に土木学会木橋委員会が主催のもと青森県にて小学生に向けたサルバティーコ橋製作が行われた。スギ主材 45mm×90mm×1800mm，SPF横材 38mm×89mm×3000mm を使用し，5ユニットを製作した。体験者は小学校6年生60名ほどで，6チームに分かれて製作を行った。体験者が小学生ということや，所要時間が全体で1時間程度しかなかったことから，主材中央に溝を入れておき，横材の置き場所が見て分かるように工夫をした。その結果1班当たりの所要時間は20分程度と迅速な作業時間となった。また，アーチライズ長が身長を越えなかったため，製作時にヘルメットを着用していない。製作サイズの側面図を(図-9)，製作風景，集合写真を(写真-4，5)に示す。

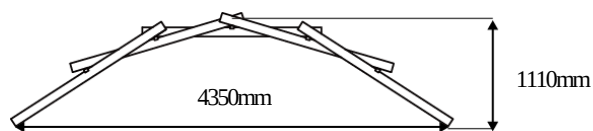


図-9 側面図



写真-4 製作風景



写真-5 集合写真

(2) 高校生によるサルバティーコ橋製作

2017年8月に行われたオープンキャンパスで高校生によるサルバティーコ橋の製作が行われた。ここではSPF主材38mm×140mm×3600mm，SPF横材38mm×89mm×1500mmを使用し，溝無しサルバティーコ橋を7ユニット製作した。体験者は高校生10名で製作時間は30分要した。また，アーチライズが身長を越えたため安全管理上ヘルメットを着用する。製作サイズの側面図を(図-10)，製作風景，集合写真を(写真-6)に示す。

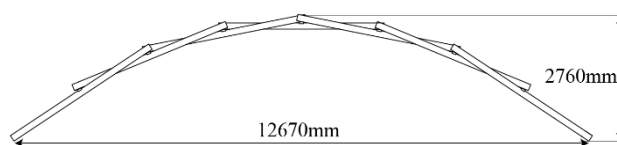


図-10 側面図



写真-6 製作風景

(3) 成人男性1名載荷

2017年5月に行われたTV撮影で成人男性1名を載荷した。ここではスギ主材90mm×90mm×3000mm，SPF横材38mm×89mm×1500mmを使用し，溝無しサルバティーコ橋を8ユニット製作した。しかし，8ユニット製作時に，7ユニット目で滑りが確認されたため，当初の設計したスパン長，アーチライズ長に誤差が生じてしまった。また，滑りが生じたことによって橋軸方向に生じたねじれの誤差調整を行ったため，大学生10名で製作時間は3時間要した。また，アーチライズ長が身長を越えたため安全管理上ヘルメットを着用する。製作サイズの側面図を(図-11)，製作風景，完成写真を(写真-7，8)に示す。

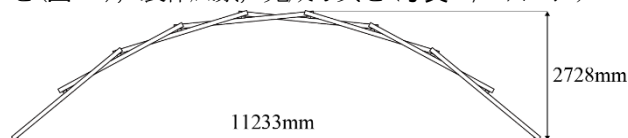


図-11 側面図

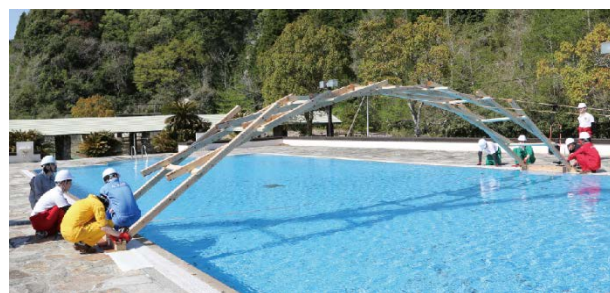


写真-7 製作風景



写真-8 完成写真

(4) ベトナム大学生との国際交流

2017年8月にベトナムの大学生との国際交流を目的としたベトナムワークショップをサルバティーコ橋を用いて行った。ベトナムワークショップではピーチ主材90mm×90mm×3000mm, ピーチ横材38mm×89mm×3000mmを使用し, 8ユニットを製作した。体験者が日本大学の学生4名, ハノイ土木大学の学生40名の計44名で製作し, 所要時間は3時間となった。また, TV撮影の際に, 同じサイズで8ユニット製作時に滑りが生じたことからベトナムワークショップでは, 紙やすりを滑りが生じた部分に添付し, 摩擦抵抗力を上げる工夫を行った。安全管理上, アーチライズが身長を越えたためヘルメットを着用する。製作サイズの側面図を(図-12), 製作風景, 集合写真を(写真-9, 10)に示す。

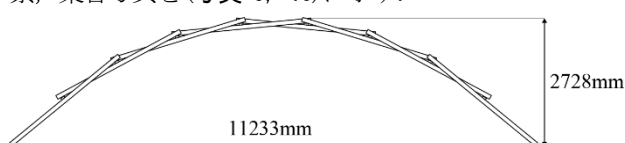


図-12 側面図



写真-9 製作風景



写真-10 集合写真

(5) 車を通すためのサルバティーコ橋製作

2018年1月に車を通すためのサルバティーコ橋の製作を行った。本橋は駿河台校舎で加工, 船橋校舎で組立てを行うことからユニット化を考慮して設計を行った。この橋は従来のサルバティーコ橋と違い1ユニットに主材を4本, 横材を2本入れている。また, 自動車を通すために相対勾配, 自動車のトレッドやホイールベースについても考慮した⁶⁾。スギ主材105mm×105mm×3700mm, スギ横材90mm×90mm×3000mmを使用し, 溝有サルバティーコ橋を5ユニットを製作した。体験者は構造デザイン研究室に在籍する大学生25名で本体1班とアプローチ2班の計3班に分かれ製作を行った。従来のサルバ

ティーコ橋よりも自重が重く, たわみが発生することから, 設計通りに溝がはまらないなど修正点が多く, 所要時間は6時間を要した。この橋の側面図を(図-13), 載荷風景, 集合写真を(写真-11, 12)に示す。

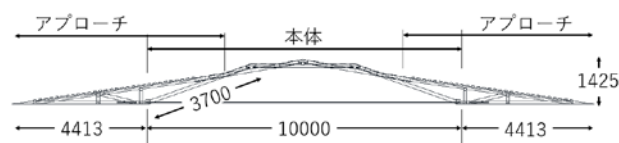


図-13 側面図



写真-11 載荷風景



写真-12 集合写真

5. まとめ

サルバティーコ橋はそれぞれ体験者, 場所, 時間, 目的が違う環境でも目的に応じて橋を作れることが大きな特徴であることが分かった。また, ベトナムワークショップに参加した際に海外でも同じ橋をつくれたという経験から構造の技術に対する考え方は世界共通であることを確認できた。そして, この研究を一助に土木構造物の新たな可能性が広がっていくことを節に願う。

参考文献

- 1) 国土交通省告示第910号
<https://www.icba.or.jp> (閲覧日 2018.8.25)
- 2) 年少者労働基準第7条 年少者労働基準規則
www.geocities.jp (閲覧日 2017.10.25)
- 3) 平均体重 文部科学省 HP
www.mext.go.jp (閲覧日 2017.10.25)
- 4) 労働安全衛生法例
<https://www.mhlw.go.jp> (閲覧日: 2018.8.22)
- 5) CARS JAPAN
<http://cars-japan.net/> (閲覧日: 2017.8.22)