유공 합성보의 극한강도식의 제안

Ultimate Strength of Composite Beams with Unreinforced Web Opening

김 창 호* 박 종 원** 김 희 구***
Kim, Chang Ho Park, Jong Won Kim, Hee Gu

ABSTRACT

A practical approach of calculating the ultimate strength of composite beams with unreinforced web opening is proposed. In this method, the slab shear contribution at the opening is calculated as the smaller of the shear strength of the slab and the pullout capacity of the shear connectors at the high moment end. A simple interaction equation is used to predict the ultimate strength under simultaneous bending moment and shear force. Strength prediction by the proposed method is compared with previous test results and the predictions by other analytical methods. The comparison shows that the proposed method predicts the ultimate capacity with resonable accuracy.

1. 서론

철골보의 웨브에 덕트나 배관의 관통을 위한 개구부를 설치하는 방법은 건물의 층고를 줄이는 효과가 있어 결과적으로 건물의 전체높이를 줄이게 된다. 하지만 전단력이 큰 부분의 웨브에 개구부를 설치하는 것은 보의 심대한 극한 내력저하를 가져오게 되고 결과적으로 개구부 주변을 보강하여야 하는 상황에 이르게 된다. 그러나 개구부 주위를 보강하는 것은 높은 비용이 소요되어 결과적으로 건축비를 상승시키게 된다.

따라서 보다 바람직한 방법은 보 개구부 주위를 보강하지 않고서도 개구부가 없는 상태의 보와 동등의 내력을 갖도록 유도하는 것이다. 이러한 것은 콘크리트 슬래브와 철골보 사이의 합성작용을 고려함으로써 가능하게 되고 이러한 고려사항은 유공 합성보와 관련된 다양한 연구의 시발점이 되게 된다. 실제로 슬래브는 합성단면에서 전단내력의 많은 부분을 감당하고 있으며 슬래브의 전단저항 내력이 적절하게 고려될 때 철골보 개구부 주위의 보강을 생략할 수 있게 된다.

* 정회원, 홍익대학교 대학원 건축학과 박사과정
** 정회원, 홍익대학교 건축공학과 조교수, 공학박사
*** 정회원, 홍익대학교 건축공학과 교수, 공학박사

본 연구의 목적은 유공 합성보의 웨브 개구부 위치에 있어서 슬래브와 쉬어코넥터의 거동으로 부터 슬래브의 전단강도를 구하고 이를 근거로 하여 웨브 개구부를 갖는 합성보의 실용적이고 합리적인 극한강도식을 제안하는 데 그 목적이 있다.

2. 기존의 강도식

2.1 Darwin 과 Donahey의 강도식

Darwin 등은 순수 휨만이 작용할 때의 최대 휨 내력과 순수 전단만이 작용할 때의 최대 전단 내력을 구한 후 이 두 값을 사용하여 휨 모멘트와 전단력이 동시에 작용하는 유공 합성보의 내력을 구하는 상관관계식을 제안하였다. 그림 1은 순수 휨만이 작용할 때의 극한상태의 응력분포를 중립축이 슬래브 내에 있는 경우에 대해 나타낸 것이다. 여기서 콘크리트에 작용하는 힘 Pc는 콘크리트 단면의 내력, 개구부 High Moment 단에서 지점까지의 쉬어코넥터의 내력, 개구부 부분을 뺀 보 단면의 인장 내력에 의하여 제한 된다. 이러한 응력분포로부터 순수 모멘트가 작용하는 경우의 최대 휨 내력을 구할 수 있다.

순수 전단만이 작용할 때의 최대 전단 내력은 그림 2와 같은 극한 응력분포로부터 구한다. 즉 콘크리트 슬래브와 개구부 상부의 T형 단면의 합성단면과 하부 T형 단면으로 나눈 후 각각의 단면에 대해 비렌딜거동를 고려하여 극한 응력상태를 일으키는 전단력을 구함으로써 순수 전단에 대한 최대 전단 내력을 구할 수 있다.

그림 3은 Darwin 등이 전단력과 모멘트를 동시에 받는 유공 합성보의 최대 내력을 구하기 위해 제안한 상관관계곡선을 나타낸다. 여기서 Vm은 모멘트가 전혀 작용하지 않은 경우의 순수 전단내력을 나타내며 Mm은 전단력이 전혀 작용하지 않은 경우의 순수 모멘트 내력을 나타낸다.

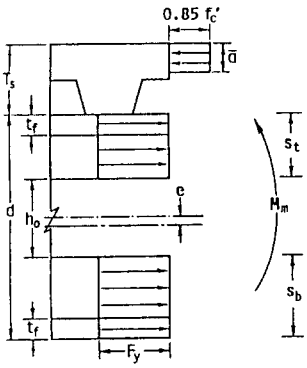

그림 1 최대 모멘트(Mm)에서의 응력분포(슬래브내에 중립축이 있는 경우)

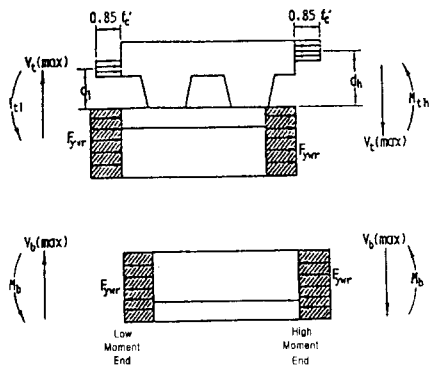

그림 2 최대 전단력(Vm)에서의 응력분포 (Darwin)

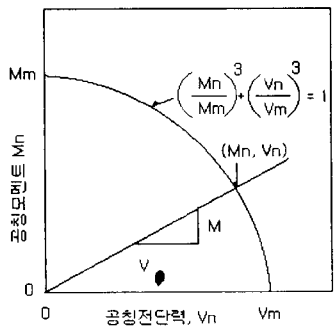

그림 3 모멘트 전단력 상관관계 곡선 (Darwin)

2.2 Cho의 강도식

Cho는 전단력과 모멘트를 동시에 받는 유공 합성보의 최대 내력을 구하기 위해 그림 4와 같은 형

태의 상관관계도를 채택하였다. 이 상관관계도는 O 점과 1 점 사이가 타원형이고 1 점과 1' 점 사이가 직선으로 연결되어 있다. O 점은 순수 휨만이 작용할 때의 최대 휨 내력을 나타낸 것으로 Moh값은 완전합성의 가정하에 그림 1의 응력분포로부터 구해진다. O'점의 모멘트 Moh'는 부분합성의 효과를 고려한 최대 휨 내력값이다. 1 점은 파괴의 모드가 휨에서 전단으로 바뀌는 것을 나타내는 점이며 1' 점은 1 점에서 수직선을 내렸을 때 수평축과 만나는 점으로 모멘트가 작용하지 않는 순수 전단하에서의 최대 전단내력을 나타내는 점이다. Cho는 1점에 해당하는 V_1과 M_1의 값을 그림 5와 같은 트러스 모델을 사용하여 구하였다. Cho는 극한 상태에 도달했을 때의 콘크리트 슬래브와 스터드에 작용하는 힘을 콘크리트의 단면은 사방향 및 수평방향 압축응력을 부담하고 STUD는 수직 인장응력에 저항하는 STRUT-TIE 모델을 이용하여 나타내었다.

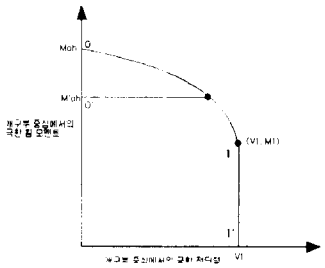

그림 4 모멘트 전단력 상관관계도
(조순호)

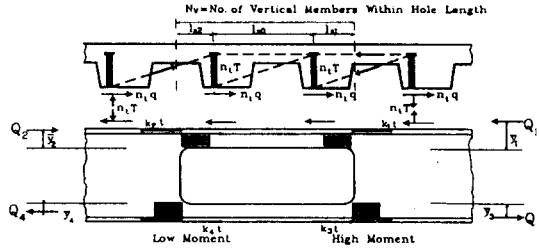

그림 5 조순호의 트러스 해석 모델

3. 제안식

Darwin과 Donahey는 상관 관계식은 비교적 간단하나 실제 콘크리트 슬래브의 전단내력에 영향을 미치는 쉬어코넥터의 역할을 고려하지 못하고 있다. 이에 비해 Cho의 강도식은 슬래브의 실제적 거동에 기초한 제안식으로서 극한상태에서 개구부 위치의 콘크리트 슬래브와 쉬어코넥터의 역학적 거동을 합리적으로 결정할 수 있다. 그러나 상관관계 곡선의 적용에 불편함이 있으며 트러스 모델의 이상적인 사용을 위해서는 절점의 모델링에 대한 보다 정확한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 슬래브의 실제적 거동을 어느 정도 고려함과 동시에 단순한 상호관계곡선을 통해 비교적 쉽게 내력을 구할 수 있는 방법을 제안한다. 이를 위해 Darwin의 경우와 같이 최대 전단 내력과 최대 모멘트 내력을 따로 구한 후 전단력과 모멘트가 동시에 작용할 경우에 대한 상호관계식을 제안한다. 최대 모멘트 내력은 기존의 방식들과 동일하게 그림 1로부터 구한다. 그러나 최대 전단내력을 구하는데 있어 본 연구에서는 그림 6과 같이 콘크리트 부재와 철골부재의 전단내력을 분리하여 따로 산정한 후 합하여 합성단면의 전단내력을 구하는 방식을 제안한다.

H형보의 개구부 상하 T형 단면에는 각각 Vst, Vsb의 전단력에 의해 Mt, Mb의 이차 모멘트가 발생하며 이를 식으로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$V_{sb}(2a) = M_{bl} + M_{bh} \quad (1), \qquad V_{st}(2a) = M_{tl} + M_{th} \quad (2)$$

전단과 휨응력을 동시에 받는 웨브재에는 Von Mies 항복 조건에 따라 다음과 같은 식을 적용한다.

$$F_{yr} = \sqrt{F_y^2 - 3\tau^2} \quad (3)$$

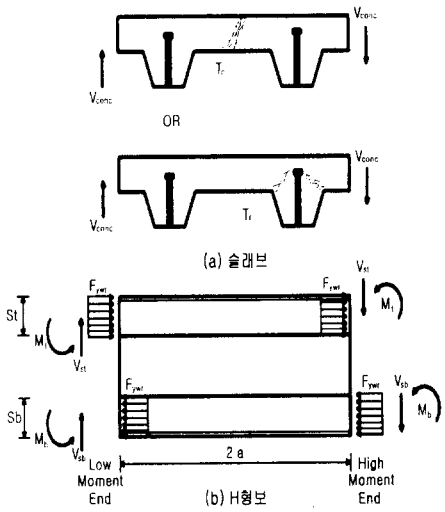

그림 6 최대전단력(Vm)에서의 응력분포 (제안식)

이들 식으로부터 다음과 같은 전단내력식을 얻을 수 있다.

$$V_{sb} = V_{pb}\left(\frac{\alpha}{1+\alpha}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4),$$

$$V_{st} = V_{pt}\left(\frac{\beta}{1+\beta}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

여기서, $V_{pb} = \frac{F_y\, t_w\, S_b}{\sqrt{3}}$, $V_{pt} = \frac{F_y\, t_w\, S_t}{\sqrt{3}}$

$$\alpha = 3\left(\frac{S_b}{2a}\right)^2,\ \beta = 3\left(\frac{S_t}{2a}\right)^2$$

여기서, $2a$는 개구부의 길이, t_w는 웨브의 두께, S_b , S_t는 각각 상부와 하부 T형 단면의 웨브의 춤을 나타낸다. 결국 철골 단면이 받는 전단력은 다음과 같이 구해진다.

$$V_{steel} = V_{sb} + V_{st} \quad (6)$$

콘크리트가 부담하는 전단 내력은 다음과 같이 개구부 High Moment 단 부근 쉬어코넥터의 Pullout Capacity와 유효폭의 1면 전단내력중 작은 값으로 한다.

$$T_{\max} = N_t T_r = 2\times 0.53\sqrt{f_c}\ A_c \quad (7)$$

여기서, $T_{\max}$ = STUD의 최대 Pullout Capacity, T_r = STUD 1개의 최대 Pullout Capacity

N_t = No of STUD /rib (1 or 2), f_c = 콘크리트의 압축강도 (kg/cm^2)

A_c = Pullout 표면적(cm^2)

$$V_c = 0.53\sqrt{f_c}\times b_e \times h_r \quad (8)$$

여기서 V_c = 콘크리트 슬래브의 1방향 전단 내력, b_e = 콘크리트 슬래브의 유효춤(cm)

h_r = 콘크리트 슬래브의 최소두께(cm)

$V_{conc} = \min\{T_{\max}, V_c\}$ (9), 전단내력 합계 $V_{capacity} = V_{steel} + V_{conc}$ (10)

여기서, V_{conc}= 콘크리트에 의해 저항되는 전단력,

$V_{capacity}$= 철골보와 콘크리트에 의해 저항되는 전단력

상관관계식은 다음과 같은 3차식을 적용하였을 때 기존의 실험결과들과 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다.

$$\left(\frac{M_n}{M_m}\right)^3 + \left(\frac{V_n}{V_m}\right)^3 = 1.0 \quad (11)$$

4. 실험 결과와의 비교

<Ribbed slab>

V_{max} of (5) = {(1)+(2)} + min {(3),(4)}

INV.	HOLE NO.	Moh (t.m)	실험치 M (t.m)	실험치 V (t)	조순호 V_{TEST}/V_{THEO}	RED-WOOD V_{TEST}/V_{THEO}	DAR-WIN V_{TEST}/V_{THEO}	(5) 제안식 V_{max} (t)	(5) 제안식 V_{THEO} (t)	(5) 제안식 V_{TEST}/V_{THEO}	(1) V_{st} (t)	(2) V_{sb} (t)	(3) $N_t.T_t$ (t)	(4) V_c (t)
Redwood 1982	R_0	17.2	8.3	8.3	1.061	0.83	0.955	9.6	9.0	0.918	2.0	2.0	7.5	5.7
	R_1	38.4	11.1	11.8	1.227	1.128	1.163	10.6	10.5	1.123	2.7	2.7	7.3	5.2
	R_2	41.0	32.6	13.0	1.247	1.14	1.384	11.9	10.6	1.23	3.0	3.0	9.4	5.8
	R_3	43.3	44.8	7.4	1.129	1.086	1.084	13.31	7.1	1.057	3.1	3.1	11.8	7.2
	R_4	44.3	35.8	6.0	1.061	1.061	1.118	13.1	7.0	0.856	3.1	3.1	8.1	6.9
	R_5	40.2	11.8	12.5	1.235	1.059	1.081	12.5	12.5	1.000	1.5	5.8	7.3	5.2
	R_6	37.4	9.1	9.6	1.27	1.116	1.191	11.0	10.9	0.888	3.0	3.0	9.1	4.9
	R_7	37.4	13.1	13.8	1.172	1.017	1.191	11.01	11.0	1.26	3.0	3.0	7.0	4.9
	R_8	36.6	12.4	13.1	1.215	1.063	1.098	9.8	9.8	1.34	2.6	2.6	8.8	4.6
				평균	1.18	1.06	1.12			1.07				
				표준편차	0.075	0.088	0.112			0.165				
Donahey & Darwin 1986-1987	D_1	67.2	18.5	17.2	1.068	0.946	0.967	17.0	17.0	1.01	5.6	5.6	11.2	5.83
	D_2	67.3	35.7	17.7	1.151	1.125	1.080	16.9	16.9	1.044	5.4	5.4	10.8	6.1
	D_3	68.9	70.0	5.1	1.073	1.073	1.028	17.2	5.1	1.01	5.4	5.4	11.4	6.4
	D_{5A}	67.2	31.9	15.7	1.214	1.03	1.009	15.5	15.2	1.036	5.4	5.4	4.7	6.0
	D_{5B}	65.9	29.62	14.8	0.917	0.846	1.074	17.3	16.6	0.903	8.2	3.1	11.1	6.0
	D_{6A}	65.1	0.0	16.6	1.210	1.074	0.104	16.3	16.3	1.14	5.4	5.4	9.8	5.6
	D_{4A}	16.0	8.9	8.8	0.97	0.938	0.99	8.7	8.6	1.021	1.8	1.8	11.3	5.2
	D_{4B}	15.5	4.9	6.5	0.797	0.945	0.928	7.7	7.5	0.86	1.1	0.8	12.6	5.8
	D_{9A}	54.9	17.0	15.7	1.272	1.03	0.973	15.7	15.7	1.1	2.2	2.2	12.6	11.3
	D_{9B}	54.8	20.5	21.5	1.399	0.851	1.018	18.7	18.7	1.146	3.8	3.3	12.1	11.6
				평균	1.11	0.99	1.01			1.02				
				표준편차	0.170	0.091	0.053			0.091				
cho 1990	CHO_1	38.9	0	9.7	1.364	1.556	1.21	8.0	8.0	1.21	1.9		11.5	4.2
	CHO_2	38.0	0	7.4	1.039	0.780	0.925	8.0	8.0	0.925	1.8		7.7	4.3
	CHO_3	32.1	0	7.2	1.007	0.818	1.193	6.1	6.1	1.193	1.9		7.8	2.2
	CHO_4	41.2	8.9	9.4	1.267	0.952	1.098	9.0	9.0	1.098	1.8		7.4	5.5
	CHO_7	41.3	11.3	10.7	1.177	1.082	1.199	9.0	9.0	1.199	1.8		5.6	5.5
				평균	1.17	1.04	0.99			1.11				
				표준편차	0.135	0.280	0.324			0.111				
전체				평균	1.15	1.02	1.05			1.06				
				표준편차	0.138	0.154	0.178			0.132				

<Solid slab>

V_{max} of (5) = {(1)+(2)} + min {(3),(4)}

INV.	HOLE NO.	Moh (t.m)	실험치 M (t.m)	실험치 V (t)	조순호 V_{TEST}/V_{THEO}	RED-WOOD V_{TEST}/V_{THEO}	DARWIN V_{TEST}/V_{THEO}	(5) 제안식 V_{MAX} (t)	(5) 제안식 V_{THEO} (t)	(5) 제안식 V_{TEST}/V_{THEO}	(1) V_{st} (t)	(2) V_{sb} (t)	(3) $N_t.T_t$ (t)	(4) V_c (t)
Clawson & Darwin 1980-1982	C_1	32.6	33.3	15.2	1.424	1.143	1.192	16.9	12.7	1.193	2.5	2.5	12.0	14.7
	C_2	50.0	47.3	16.7	1.358	1.207	1.128	16.9	13.9	1.205	3.6	3.6	9.6	11.0
	C_3	50.7	62.9	6.4	1.289	1.268	1.139	17.7	5.3	1.196	3.6	3.6	10.4	12.3
	C_4	56.2	19.8	21.6	1.281	1.054	1.056	18.4	18.2	1.188	4.2	4.2	10.0	11.7
	C_5	55.5	40.6	21.8	1.385	1.147	1.134	17.5	20.0	1.094	3.9	4.0	9.4	12.0
	C_6	36.6	16.8	18.3	1.233	0.834	1.128	15.3	14.9	1.231	3.1	3.1	9.1	11.1
				평균	1.33	1.11	1.13			1.18				
				표준편차	0.066	0.139	0.040			0.043				
cho 1990	CHO_8	31.7	8.1	8.5	1.306	0.866	0.845	8.0	8.0	1.07	1.8	1.8	4.7	4.4
	CHO_9	31.7	8.1	9.8	1.311	0.948	0.968	8.0	8.0	1.227	1.8	1.8	4.7	4.4
				평균	1.31	0.91	0.91			1.15				
				표준편차	0.003	0.041	0.062			0.079				
전체				평균	1.32	1.06	1.07			1.18				
				표준편차	0.003	0.041	0.062			0.079				
RIBBED +SOLID TOTAL				평균	1.19	1.03	1.06			1.89				
				표준편차	0.145	0.154	0.162			0.127				

표 1 실험결과와 이론식의 비교

표 1 및 그림 7에 리브형 시험체 24개 [Redwood(1982)의 시험체, Donahey & Darwin (1987)의 시험체, 조순호(1990)의 시험체] 및 중실형(solid) 시험체 8개[Clawson & Darwin(1980-1982)의 시험체, 조순호(1990)의 시험체] 총 32개 시험체를 이용하여 제안식을 비롯한 기존의 이론식을 비교분석하였다.

비교 연구식은 조순호의 'Truss Model 식' Redwood의 '전단 모델식', Darwin의 '내력식'이다. 표1의 (2),(3),(4) 항은 조순호의 논문(1990)에서 인용하였다.

표1에서 (5) 제안식 중 Vmax는 모멘트가 없는 경우의 단면의 최대 전단 내력을 나타내고 V_{THEO}는 모멘트가 작용할 경우 그림 3의 상관 관계도(Interaction Diagram)에 의한 단면의 전단내력을 나타낸다.

비교 시험체중 STUD가 철근에 용접되어 있는 경우는 비교에서 제외시켰으며 Granade(1962)와 조순호(1982)의 시험체는 STUD 배치에 관한 상세가 없어 비교에서 제외시켰다.

또한 그림 7에 이론식과 실험결과를 비교 분석 하였다.

기존 실험 결과와 본 연구의 이론식을 비교 분석한 결과 기존의 연구인 조순호의 Truss Model식, Redwood의 전단모델식, Darwin의 내력식과 커다란 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

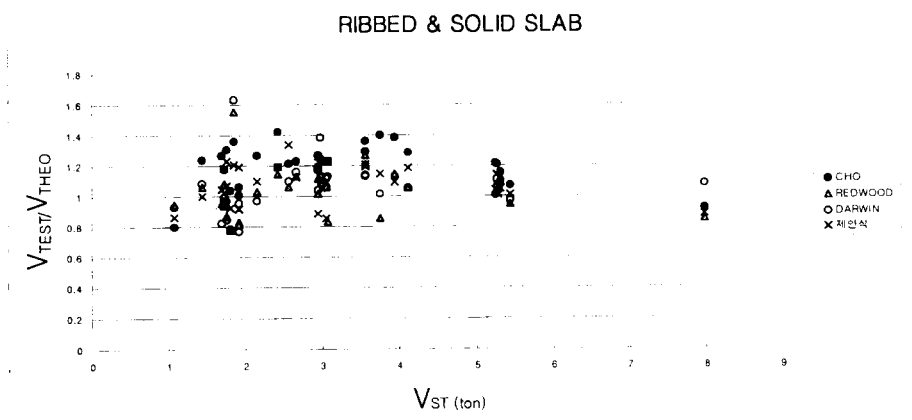

그림 7 실험결과와 이론식의 비교

5. 결론

본 연구에서는 보강하지 않은 유공 합성보에 대한 실용적인 최대 내력식을 제안하였다. 이를 위해 개구부에 순수 모멘트와 순수 전단력만이 작용하는 경우의 각각의 내력을 구한 후 임의의 상관관계 곡선을 활용하여 전단력과 휨모멘트가 동시에 작용하는 경우의 극한내력을 제시하였다. 전단내력을 구하는데 있어서는 콘크리트와 철골부재의 전단내력을 분리하여 따로 산정한 후 합하여 합성단면의 전단내력을 구하는 방식을 사용하며 콘크리트의 전단 내력은 슬래브의 전단 강도와 쉬어스터드의 pull-out capacity 중 작은 값으로 결정한다.

제안식에 의한 최대 내력값을 32개 시험체에 대한 기존의 실험결과와 비교하였다. 그 결과와 본 연구의 제안식은 최대 내력을 비교적 잘 나타낼 수 있음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Cho, S.H (1990) 「SLAB BEHABIOUR IN COMPOSITE BEAMS AT WEB OPENINGS」
   : A thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in partial fullfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy
2. Redwood & Poumbouras (1984) 「Analysis of Composite Beams with Web Opening」
   : ASCE Sep. 1984 (pp.1949~1958)
3. D.Darwin & C.Donahey (1988) 「LRFD for Composite Beams with Unreinforced Web Opening」
   : ASCE March 1988 (pp.535~552)
4. D.Darwin & C.Donahey (1988) 「Web Opening Composite Beams with Ribbed Slabs」
   : ASCE March 1988 (pp.518~533)
5. Redwood & Poumbouras (1983) 「Tests of Composite Beams with Web holes」
   : Canadian Journal of civil Engineering 10 (pp.713~721)
6. D.Darwin & C.Donahey (1986) 「Performance and design of Composite Beams with Web Opening」 : AISC Research Report (SM18)