

In-class Exercise – Week #8: Assessment models for steel members

The steel moment-resisting frame (MRF) shown in Figure 1 has been designed in a high seismicity zone for gravity and earthquake loading. The cross-sections represent the final design of the steel MRF in the North-South loading direction. Steel beams and columns have been designed with S355J2 profile (i.e., $E = 210\text{GPa}$, $f_y = 355\text{MPa}$). End plate beam-to-column connections have been utilized for the seismic design. The total floor weight due to gravity loading is $G = 5\text{kN/m}^2$ (all included). Compute the basic properties for modeling the first-floor beam and first story exterior columns with zero length elements. Assume that the steel beams are braced laterally in the middle of the span.

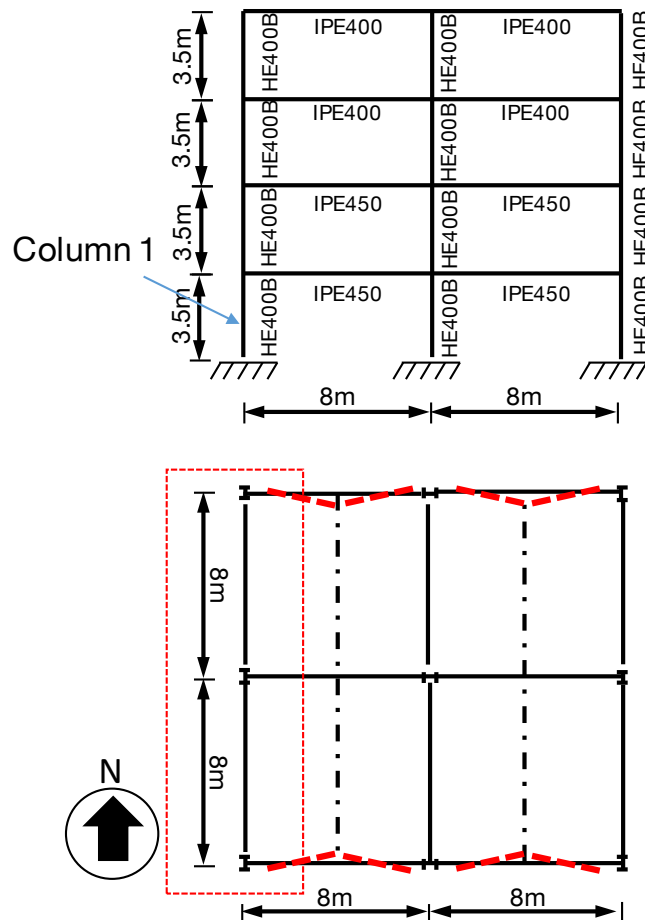
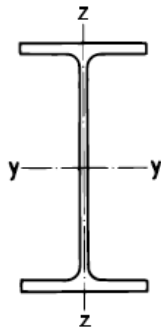


Figure 1. Steel building design



$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r) t_f$$

$$A_w = (h - t_f) \cdot t_w$$

$$S_y = \frac{1}{2} W_{ply}$$

$$S_z = \frac{1}{2} W_{plz}$$

$$W_{ely} = \frac{I_y}{h/2}$$

$$\bar{W}_y = \frac{I_y}{(h - t_f)/2}$$

$$W_{elz} = \frac{I_z}{b/2}$$

Maximale Lagerlängen /
Longueurs maximales en stock:
 $h \leq 180$ 18 m
 $h \geq 200$ 24 m
 EURONORM 19 – 57,
 DIN 1025/5, ASTM A 6,
 Werksnorm/Norme d'usine

○ Das Verfahren PP nach SIA 263 ist für dieses Profil aus S355 bei reiner Biegung ($n = 0$) nicht anwendbar!

* Auch in S355J0 oder S355J2 ab Schweizer Lager erhältlich.

○ La méthode PP selon SIA 263 n'est pas applicable pour ce profilé en acier S355 en flexion simple ($n = 0$)!

* Livrable en S355J0 ou S355J2 du stock suisse.

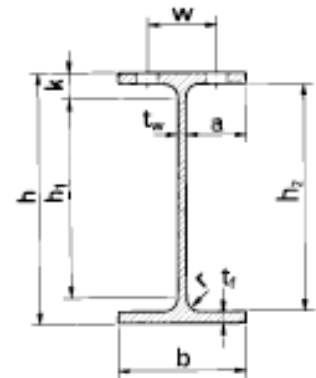
IPE	m kg/m	Statische Werte / Valeurs statiques												
		A mm ²	A _v mm ²	A _w mm ²	I _y mm ⁴	W _{ely} mm ³	$\overline{W}_y$ mm ³	W _{ply} mm ³	i _y mm	I _z mm ⁴	W _{elz} mm ³	W _{plz} mm ³	i _z mm	K = I _x mm ⁴
					x 10 ⁶	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³		x 10 ⁶	x 10 ³	x 10 ³		x 10 ⁶
80* 100*	6,0 8,1	764 1030	358 508	284 387	0,801 1,71	20,0 34,2	21,4 36,3	23,2 39,4	32,4 40,7	0,085 0,159	3,69 5,79	5,82 9,15	10,5 12,4	0,0067 0,0115
120* 140* 160* 180*	10,4 12,9 15,8 18,8	1320 1640 2010 2390	631 764 966 1125	500 626 763 912	3,18 5,41 8,69 13,2	53,0 77,3 109 146	55,9 81,3 114 154	60,7 88,3 124 166	49,0 57,4 65,8 74,2	0,277 0,449 0,683 1,01	8,65 12,3 16,7 22,2	13,6 19,2 26,1 34,6	14,5 16,5 18,4 20,5	0,0169 0,0240 0,0353 0,0472
200* 220* 240* 270*	22,4 26,2 30,7 36,1	2850 3340 3910 4590	1400 1588 1914 2214	1070 1240 1430 1710	19,4 27,7 38,9 57,9	194 252 324 429	203 263 338 446	221 285 367 484	82,6 91,1 99,7 112	1,42 2,05 2,84 4,20	28,5 37,3 47,3 62,2	44,6 58,1 73,9 97,0	22,4 24,8 26,9 30,2	0,0685 0,0898 0,127 0,157
300* 330* 360* 400*	42,2 49,1 57,1 66,3	5380 6260 7270 8450	2568 3081 3514 4269	2050 2390 2780 3320	83,6 117,7 162,7 231,3	557 713 904 1160	578 739 937 1200	628 804 1020 1310	125 137 150 165	6,04 7,88 10,4 13,2	80,5 98,5 123 146	125 154 191 229	33,5 35,5 37,9 39,5	0,198 0,276 0,371 0,504
450* 500* 550 600	77,6 90,7 106 122	9880 11600 13400 15600	5085 5987 7234 8378	4090 4940 5910 6970	337,4 482,0 671,2 920,8	1500 1930 2440 3070	1550 1990 2520 3170	1700 2190 2790 3510	185 204 223 243	16,8 21,4 26,7 33,9	176 214 254 308	276 336 401 486	41,2 43,1 44,5 46,6	0,661 0,886 1,22 1,65
750 x 137 750 x 147 750 x 173 750 x 196		17500 18700 22100 25100	9290 10540 11640 12730	8460 9720 10700 11600	1599 1661 2058 2403	4250 4410 5400 6240	4340 4510 5560 6450	4860 5110 6220 7170	303 298 305 310	51,7 52,9 68,7 81,8	393 399 515 610	614 631 810 959	54,4 53,1 55,7 57,1	1,36 1,57 2,71 4,06

Die Profile PER, IPEo und IPEv sind im Walzprogramm einzelner Werke aufgeführt. PEA 80 und PEA 100 sind ebenfalls normiert, aber kaum wirtschaftlich.

Im allgemeinen nur ab Werk lieferbar. Mindestmengen und Termine beachten.

Les profilés PER, IPEo et IPEv figurent dans le programme de laminage de quelques aciéries. Les PEA 80 et PEA 100, également normalisés, sont peu économiques.

En général livrable d'usine uniquement. Tenir compte des quantités minimales et des délais.



Waltztoleranzen siehe Seite 116

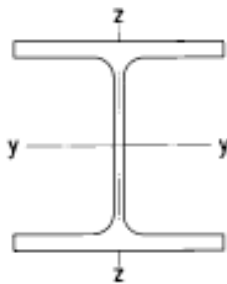
Tolérances de laminage voir p. 116

IPE	m kg/m	Profilmasse Dimensions de la section					Konstruktionsmasse Dimensions de construction						Oberfläche Surface		IPE
		h mm	b mm	t _w mm	t _f mm	r mm	h ₁ mm	k mm	a mm	h ₂ mm	w mm	Ø _{max}	U _m m ² /m	U _t m ² /t	
80	6,0	80	46	3,8	5,2	5	60	10	21	70			0,328	54,8	80
100	8,1	100	55	4,1	5,7	7	74	13	25	89			0,400	49,5	100
120	10,4	120	64	4,4	6,3	7	92	14	29	107	36	M10	0,475	45,6	120
140	12,9	140	73	4,7	6,9	7	112	14	34	126	38	M10	0,551	42,6	140
160	15,8	160	82	5,0	7,4	9	126	17	38	145	44	M12	0,623	39,4	160
180	18,8	180	91	5,3	8,0	9	146	17	42	164	50	M12	0,698	37,1	180
200	22,4	200	100	5,6	8,5	12	158	21	47	183	56	M12	0,768	34,3	200
220	26,2	220	110	5,9	9,2	12	178	21	52	202	60	M16	0,848	32,4	220
240	30,7	240	120	6,2	9,8	15	190	25	56	220	68	M16	0,922	30,0	240
270	36,1	270	135	6,6	10,2	15	220	25	64	250	72	M20	1,04	28,8	270
300	42,2	300	150	7,1	10,7	15	248	26	71	279	80	M20	1,16	27,5	300
330	49,1	330	160	7,5	11,5	18	270	30	76	307	86	M24	1,25	25,5	330
360	57,1	360	170	8,0	12,7	18	298	31	81	335	90	M24	1,35	23,6	360
400	66,3	400	180	8,6	13,5	21	330	35	85	373	96	M27	1,47	22,2	400
450	77,6	450	190	9,4	14,6	21	378	36	90	421	106	M27	1,61	20,7	450
500	90,7	500	200	10,2	16,0	21	426	37	94	468	110	M27	1,74	19,2	500
550	106	550	210	11,1	17,2	24	468	41	99	516	120	M27	1,88	17,7	550
600	122	600	220	12,0	19,0	24	514	43	104	562	120	M27	2,02	16,6	600
750 x 137		753	263	11,5	17,0	17	685	34	126	719	120	M27	2,51	18,3	750x137
750 x 147		753	265	13,2	17,0	17	685	34	126	719	120	M27	2,51	17,1	750x147
750 x 173		762	267	14,4	21,6	17	685	39	126	719	120	M27	2,53	14,6	750x173
750 x 196		770	268	15,6	25,4	17	685	42	126	719	120	M27	2,55	13,0	750x196

HEB

Breitflanschträger HEB

Profils à larges ailes HEB



$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r) t_f$$

$$A_w = (h - t_f) \cdot t_w$$

$$S_y = \frac{1}{2} W_{ply}$$

$$S_z = \frac{1}{2} W_{plz}$$

$$W_{ely} = \frac{I_y}{h/2}$$

$$\bar{W}_y = \frac{I_y}{(h - t_f)/2}$$

$$W_{elz} = \frac{I_z}{b/2}$$

Maximale Lagerlängen /
Longueurs maximales en stock:

$h \leq 180$ 18 m

$h \geq 200$ 24 m

EURONORM 53 – 62, DIN 1025/2

Andere Bezeichnungen } DIN, IPB
Autres désignations }

* Auch in S355J0 oder S355J2
ab Schweizer Lager erhältlich

* Livrable en S355J0 ou S355J2
du stock suisse

HEB	m kg/m	Statische Werte / Valeurs statiques												
		A mm ²	A _v mm ²	A _w mm ²	I _y mm ⁴	W _{ely} mm ³	$\bar{W}_y$ mm ³	W _{ply} mm ³	i _y mm	I _z mm ⁴	W _{elz} mm ³	W _{plz} mm ³	i _z mm	K = I _x mm ⁴
					x 10 ⁶	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³		x 10 ⁶	x 10 ³	x 10 ³		x 10 ⁶
100*	20,4	2600	904	540	4,50	89,9	100	104	41,6	1,67	33,5	51,4	25,3	0,0931
120*	26,7	3400	1096	708	8,64	144	158	165	50,4	3,18	52,9	81,0	30,6	0,139
140*	33,7	4300	1308	896	15,1	216	236	245	59,3	5,50	78,5	120	35,8	0,202
160*	42,6	5430	1759	1180	24,9	311	339	354	67,8	8,89	111	170	40,5	0,312
180*	51,2	6530	2024	1410	38,3	426	461	481	76,6	13,6	151	231	45,7	0,422
200*	61,3	7810	2483	1660	57,0	570	616	643	85,4	20,0	200	306	50,7	0,596
220*	71,5	9100	2792	1940	80,9	736	793	827	94,3	28,4	258	394	55,9	0,770
240*	83,2	10600	3323	2230	112,6	938	1010	1050	103	39,2	327	498	60,8	1,04
260*	93,0	11800	3759	2420	149,2	1150	1230	1280	112	51,3	395	602	65,8	1,26
280*	103	13100	4109	2750	192,7	1380	1470	1530	121	65,9	471	718	70,9	1,45
300*	117	14900	4743	3090	251,7	1680	1790	1870	130	85,6	571	870	75,8	1,87
320*	127	16100	5177	3440	308,2	1930	2060	2150	138	92,4	616	939	75,7	2,29
340*	134	17100	5609	3820	366,6	2160	2300	2410	146	96,9	646	986	75,3	2,62
360*	142	18100	6060	4220	431,9	2400	2560	2680	155	101	676	1030	74,9	2,98
400*	155	19800	6998	5080	576,8	2880	3070	3230	171	108	721	1100	74,0	3,61
450*	171	21800	7966	5940	798,9	3550	3770	3980	191	117	781	1200	73,3	4,49
500	187	23900	8982	6840	1072	4290	4540	4820	212	126	842	1290	72,7	5,50
550	199	25400	10010	7820	1367	4970	5250	5590	232	131	872	1340	71,7	6,12
600	212	27000	11080	8840	1710	5700	6000	6420	252	135	902	1390	70,8	6,80
650	225	28600	12200	9900	2106	6480	6800	7320	271	140	932	1440	69,9	7,52
700	241	30600	13710	11400	2569	7340	7690	8330	290	144	963	1490	68,7	8,42
800	262	33400	16180	13400	3591	8980	9360	10230	328	149	994	1550	66,8	9,62
900	291	37100	18880	16000	4941	10980	11400	12580	365	158	1050	1660	65,3	11,5
1000	314	40000	21250	18300	6447	12890	13400	14860	401	163	1090	1720	63,8	12,7

Anstelle des nicht mehr gewalzten Profils HEB 1100 können HL-Profile verwendet werden, siehe Seiten 40/41.

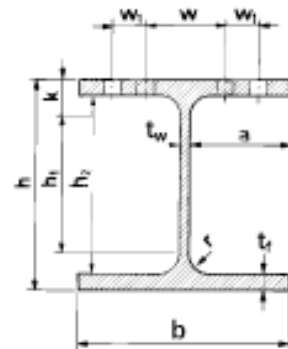
w_1 mit $\varnothing_{\max}$ nur für versetzte Schrauben.

Walttoleranzen siehe Seite 116

Au lieu du profilé HEB 1100 qui n'est plus laminé, on utilisera des profilés HL (voir pages 40/41).

w_1 avec $\varnothing_{\max}$ seulement pour boulons décalés.

Tolérances de laminage voir page 116



HEB	m kg/m	Profilmasse Dimensions de la section					Konstruktionsmasse Dimensions de construction							Oberfläche Surface		HEB
		h mm	b mm	t _w mm	t _f mm	r mm	h ₁ mm	k mm	a mm	h ₂ mm	w mm	w ₁ mm	Ø _{max}	U _m m ² /m	U _t m ² /t	
100	20,4	100	100	6	10	12	56	22	47	80	56		M12	0,567	27,8	100
120	26,7	120	120	6,5	11	12	74	23	56	98	66		M16	0,686	25,7	120
140	33,7	140	140	7	12	12	92	24	66	116	76		M20	0,805	23,9	140
160	42,6	160	160	8	13	15	104	28	76	134	86		M20	0,918	21,5	160
180	51,2	180	180	8,5	14	15	122	29	85	152	100		M24	1,04	20,3	180
200	61,3	200	200	9	15	18	134	33	95	170	110		M24	1,15	18,8	200
220	71,5	220	220	9,5	16	18	152	34	105	188	120		M24	1,27	17,8	220
240	83,2	240	240	10	17	21	164	38	115	206	96	35	M24	1,38	16,6	240
260	93,0	260	260	10	17,5	24	176	42	125	225	106	40	M24	1,50	16,1	260
280	103	280	280	10,5	18	24	196	42	134	244	110	45	M24	1,62	15,7	280
300	117	300	300	11	19	27	208	46	144	262	120	45	M27	1,73	14,8	300
320	127	320	300	11,5	20,5	27	224	48	144	279	120	45	M27	1,77	13,9	320
340	134	340	300	12	21,5	27	242	49	144	297	120	45	M27	1,81	13,5	340
360	142	360	300	12,5	22,5	27	260	50	143	315	120	45	M27	1,85	13,0	360
400	155	400	300	13,5	24	27	298	51	143	352	120	45	M27	1,93	12,4	400
450	171	450	300	14	26	27	344	53	143	398	120	45	M27	2,03	11,9	450
500	187	500	300	14,5	28	27	390	55	142	444	120	45	M27	2,12	11,3	500
550	199	550	300	15	29	27	438	56	142	492	120	45	M27	2,22	11,2	550
600	212	600	300	15,5	30	27	486	57	142	540	120	45	M27	2,32	11,0	600
650	225	650	300	16	31	27	534	58	142	588	120	45	M27	2,42	10,8	650
700	241	700	300	17	32	27	582	59	141	636	126	45	M27	2,52	10,5	700
800	262	800	300	17,5	33	30	674	63	141	734	130	40	M27	2,71	10,4	800
900	291	900	300	18,5	35	30	770	65	140	830	130	40	M27	2,91	10,0	900
1000	314	1000	300	19	36	30	868	66	140	928	130	40	M27	3,11	9,9	1000

Solution

Exterior columns

The column unbraced length is $L_b = 3500mm$; the member is in double curvature:

$$k_e = \frac{6EI_y}{L} = \frac{3 \cdot 210000 \cdot 576.8 \cdot 10^6}{3500} = 2.0765 \cdot 10^8 \frac{Nmm}{rad} \quad (1)$$

Using the influence area, the gravity load acting on the exterior columns at floor i is

$$P_g^i = 5 \cdot \frac{8}{2} \cdot \frac{8}{2} = 80kN \quad (2)$$

Hence, the axial force due to the gravity load applied to the exterior first story column is as follows:

$$N_g = P_g^1 = 4 \cdot 80 = 320kN \quad (3)$$

The axial resistance of the member at yield is as follows (assume expected material properties):

$$N_{pl,e} = A \cdot \gamma_{rm} \cdot f_y = 19800 \cdot 1.25 \cdot 355 = 8786.25kN \quad (4)$$

Hence

$$\frac{N_g}{N_{pl,e}} = 0.036 < 0.2 \quad (5)$$

The following quantities corresponding to the monotonic backbone curve are computed using the equations provided Week #8 for steel members.

The effective yield strength M_y^* is computed using

$$\begin{aligned} M_y^* &= 1.15 \cdot W_{pl,y} \cdot \gamma_{rm} \cdot f_y \cdot \left(1 - \frac{N_g}{2N_{pl,e}}\right) = 1.15 \cdot 3230 \cdot 10^3 \cdot 1.25 \cdot 355 \cdot \left(1 - \frac{0.046}{2}\right) \\ &= 1.6183 \cdot 10^6 Nmm \end{aligned}$$

The following ratios are computed since they are needed for the next computations

$$\frac{h}{t_w} = \frac{298}{13.5} = 22.07$$

$$\frac{L_b}{i_z} = \frac{3500}{74} = 47.3$$

$$1 - \frac{N_g}{N_{pl,e}} = 0.964$$

The hardening ratio a for monotonic loading is computed as follows:

$$a = 12.5 \cdot \left(\frac{h_1}{t_w}\right)^{-0.2} \cdot \left(\frac{L_b}{i_z}\right)^{-0.4} \cdot \left(1 - \frac{N_g}{N_{pl,e}}\right)^{0.4} = 1.42 > 1.3 \quad (6)$$

Hence the value $a = 1.3$ is used.

The capping moment is therefore computed using

$$M_u = a \cdot M_y^* = 1.3 \cdot 1.6183 \cdot 10^6 = 2.2952 \cdot 10^6 Nmm \quad (7)$$

The column's residual flexural strength M_r is given by

$$M_r = \left(0.5 - 0.4 \cdot \frac{N_g}{N_{pl,e}}\right) \cdot M_y^* = 7.8557 \cdot 10^5 Nmm \quad (8)$$

The column's pre-peak plastic rotation θ_p is obtained from

$$\theta_p = 294 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-1.7} \cdot \left(\frac{L_b}{i_z}\right)^{-0.7} \cdot \left(1 - \frac{N_g}{N_{pl,e}}\right)^{1.6} = 0.097 \text{ rad} < 0.2 \text{ rad} \quad (9)$$

Similarly, the column's post-peak plastic rotation θ_{pc} is obtained from

$$\theta_{pc} = 90 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.8} \cdot \left(\frac{L_b}{i_z}\right)^{-0.8} \cdot \left(1 - \frac{N_g}{N_{pl,e}}\right)^{2.5} = 0.315 \text{ rad} > 0.3 \text{ rad} \quad (10)$$

Therefore, $\theta_{pc} = 0.30 \text{ rad}$

The ultimate rotation θ_u which represents the total chord rotation at which the steel column loses its axial load carrying capacity is given by

$$\theta_u = 0.15 \text{ rad} \quad (11)$$

First-floor beam

The beam unbraced length, $L_b = 4000 \text{ mm}$ and a span, $L = 8000 \text{ mm}$ ((assuming centreline dimensions)). The member is in double curvature; therefore, the elastic rotational stiffness is,

$$k_e = \frac{6EI_y}{L - 2 \cdot h} = \frac{6 \cdot 210000 \cdot 337.4 \cdot 10^6}{8000 - 2 \cdot 400} = 5.904 \cdot 10^7 \frac{Nmm}{rad} \quad (12)$$

The following ratios are computed since they are needed for the next computations

$$\begin{aligned} \frac{h_1}{t_w} &= \frac{378}{9.4} = 40.2 \\ \frac{b}{2t_f} &= \frac{190}{2 \cdot 14.6} = 6.51 \\ \frac{L_o}{d} &= \frac{4000}{450} = 8.89 \\ \frac{d}{533} &= \frac{400}{533} = 0.844 \\ \frac{1.25f_y}{355} &= \frac{1.25 \cdot 355}{355} = 1.25 \end{aligned}$$

The following quantities are computed based on the presented assessment models for steel beams:

The effective yield strength M_y^* is computed using

$$M_y^* = 1.17 \cdot M_{pl} = 1.15 \cdot W_{pl,y} \cdot \gamma_{rm} \cdot f_y = 1.15 \cdot 1700 \cdot 10^3 \cdot 1.25 \cdot 355 \\ = 8.8262 \cdot 10^5 Nmm$$

The capping moment is,

$$M_u = 1.11 \cdot M_y^* = 1.11 \cdot 8.8262 \cdot 10^5 = 9.7971 \cdot 10^5 Nmm \quad (13)$$

The beam's residual flexural strength M_r is given by

$$M_r = 0.4 \cdot M_y^* = 3.5305 \cdot 10^6 Nmm \quad (14)$$

The beam's pre-peak plastic rotation θ_p is obtained as follows,

$$\theta_p = 0.0885 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.365} \cdot \left(\frac{b}{2t_f}\right)^{-0.140} \cdot \left(\frac{L_o}{d}\right)^{0.340} \cdot \left(\frac{d}{533}\right)^{-0.721} \cdot \left(\frac{f_y}{355}\right)^{-0.23} = 0.039 \text{ rad} \quad (15)$$

Similarly, the post-peak plastic rotation θ_{pc} is obtained as follows,

$$\theta_{pc} = 5.63 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.565} \cdot \left(\frac{b}{2t_f}\right)^{-0.800} \cdot \left(\frac{d}{533}\right)^{-0.280} \cdot \left(\frac{f_y}{355}\right)^{-0.430} = 0.149 \text{ rad} \quad (16)$$

The ultimate rotation capacity θ_u is given by

$$\theta_u = 0.20 \text{ rad} \quad (17)$$