

Esercitazione 4

Lezione 02.11.2017

Costruzioni in acciaio: collegamenti bullonati

Esercizio 4.1

Progettare l'asta di parete diagonale utilizzando due profilati accoppiati a L di acciaio classe S 275 ($f_{yk} = 275 \text{ MPa}$, $f_{tk} = 430 \text{ MPa}$) ed il collegamento al fazzoletto con tre bulloni classe 5.6 ($f_{yb} = 300 \text{ MPa}$, $f_{tb} = 500 \text{ MPa}$) come indicato in Figura 23.

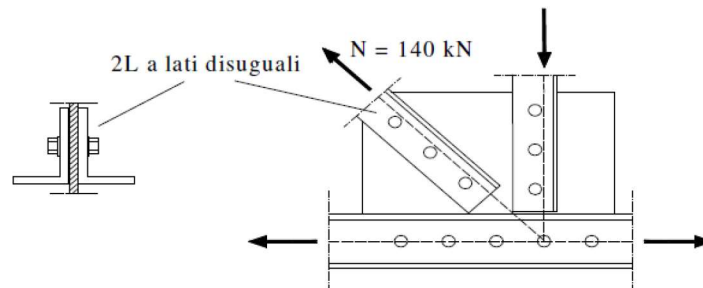


FIGURA 23: Collegamento a fazzoletto

Dimensionamento dei bulloni

La resistenza di calcolo a taglio dei bulloni per bulloni di classe 5.6 è:

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}}$$

Poiché l'azione di taglio agente su ciascun bullone per effetto della trazione nel profilato

$$\text{è: } F_{v,Ed} = \frac{N}{n_s \cdot n_b} = \frac{140}{2 \cdot 3} = 23.4 \text{ kN}$$

dove n_s è il numero di sezioni di contatto e n_b è il numero dei bulloni.

Verificare che $F_{v,Rd} \geq F_{v,Ed}$

Quindi l'area minima necessaria per la verifica a taglio nei bulloni dovuta alla sola componente N_{Ed} sarà:

$$A_{res} \geq \frac{F_{v,Ed}}{0.6 \cdot f_{tb} / \gamma_{M2}} = \frac{23400}{0.6 \cdot 500 / 1.25} = 97.5 \text{ mm}^2$$

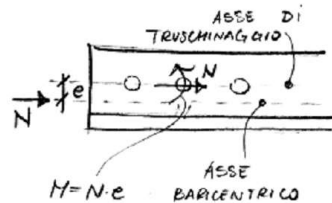
Nei bulloni oltre alla sollecitazione di taglio dovuta allo sforzo normale sarà presente anche una sollecitazione di taglio dovuta alla presenza di un momento parassita; dimensiono quindi i bulloni maggiorando l'area minima resistente di circa il 20%.

$$\Phi 12 \Rightarrow A_{res} = 84 \text{ mm}^2$$

$$\Phi 14 \Rightarrow A_{res} = 115 \text{ mm}^2$$

$$\Phi 16 \Rightarrow A_{res} = 157 \text{ mm}^2$$

Scelgo 3 bulloni $d = 14 \text{ mm}$ e $A_{res} = 115 \text{ mm}^2$.

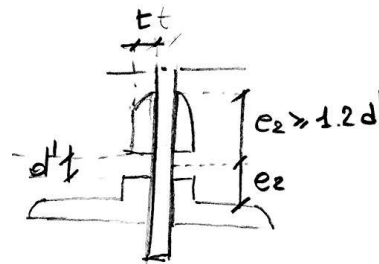


Dimensionamento dell'asta

L'asta deve essere dimensionata affinché sia soddisfatta la seguente verifica di sicurezza:

$$N_{t,Ed} \geq N_{t,Rd}$$

In cui la resistenza di calcolo a trazione $N_{t,Rd}$, di membrature con sezioni indebolite da fori per collegamenti bullonati deve essere assunta pari al minore dei seguenti valori:



$$N_{pl,Rd} = \frac{A_{sez} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0.9 \cdot A_{net} \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}}$$

Quindi l'area strettamente necessaria sarà:

$$A_{sez} = A_{fori} + A_{netta}$$

in cui:

$$A_{sez} \geq \frac{N_{t,Ed}}{f_{yk} \gamma_{M0}} = \frac{140000}{275/1.05} = 534.6 \text{ mm}^2$$

$$A_{net} \geq \frac{N_{t,Ed}}{0.9 f_{tk} \gamma_{M2}} = \frac{1400}{0.9 \cdot 430/1.25} = 452.2 \text{ mm}^2$$

quindi

$$A_{sez} = 2 \cdot 6 \cdot 15 + 452.2 = 632.2 \text{ mm}^2$$

(Avendo scelto i profilati con spessore $t = 6 \text{ mm}$)

$$A_{sez} \geq \max(534.6 \text{ mm}^2; 632.2 \text{ mm}^2)$$

Essendo la sezione soggetta anche ad una sollecitazione di flessione per effetto del momento parassita dimensiono l'area maggiorando di circa il 20% quella trovata.

Il profilato deve poter essere collegato con bulloni $d = 14 \text{ mm}$, quindi deve poter essere forato sulle ali almeno per $d_0 = 15 \text{ mm}$.

Il profilato dovrà anche rispettare le limitazioni date dalla posizione della bullonatura:

$$e_{2,min} = 1.2d_0 = 1.2 \cdot 15 = 18 \text{ mm}$$

$$e_{2,max} = 4t + 40 \text{ mm} = 4 \cdot 6 + 40 = 64 \text{ mm}$$

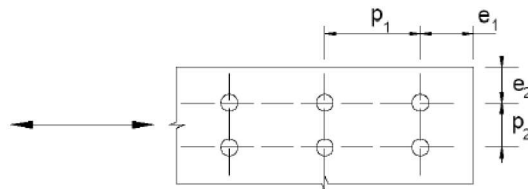


FIGURA 24: Identificazione delle limitazioni geometriche per posizionare i fori

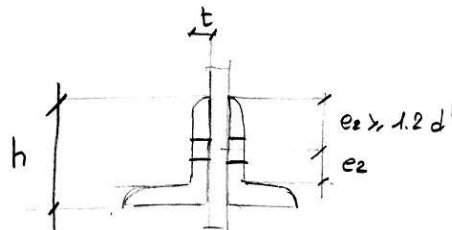
scelgo quindi di accoppiare due profilati di dimensioni 30x50x6 per cui:

$$A_{sez} = 447 \cdot 2 = 894 \text{ mm}^2, \quad A_{netta} = 447 \cdot 2 - 2 \cdot 6 \cdot 15 = 714 \text{ mm}^2$$

$$d_0 = 15 \text{ mm}$$

$$e_2 = 50 - 25 = 25 \text{ mm}$$

Rispetta tutte le limitazioni imposte per soddisfare le verifiche di sicurezza.



Limitazioni delle posizioni dei fori

$$p_{1,min} = 2.2 \cdot d_0 = 2.2 \cdot 15 = 33 \text{ mm} \quad \text{e} \quad p_{2,max} = \min(14t, 200 \text{ mm}) = 84 \text{ mm}$$

Scelgo un passo di 40 mm

$$e_{1,min} = 1.2 \cdot d_0 = 1.2 \cdot 15 = 18 \text{ mm} \quad \text{e} \quad e_{1,max} = 4t + 40 \text{ mm} = 4 \cdot 6 + 40 = 64 \text{ mm}$$

Posiziono l'ultimo bullone ad una distanza dal bordo pari a 25 mm.

Calcolo del momento parassita e verifica a tranciamento dei bulloni

Il momento parassita è dovuto all'eccentricità tra l'asse di trascinaggio e l'asse di applicazione del carico N:

$$e = f - e_x = 25 - 17.7 = 7.3 \quad M_p = \frac{N}{2}e = \frac{140}{2} \cdot 0.73 = 51.1 kNcm$$

Consideriamo le tensioni tangenziali dovuto allo sforzo di trazione ed al momento parassita: τ_N e τ_{M_p} .

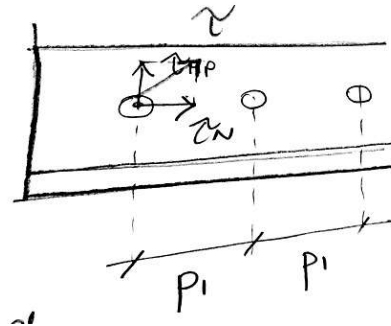
$$\tau_N = \frac{N}{A_{res} \cdot n_s \cdot n_b} = \frac{140000}{115 \cdot 2 \cdot 3} = 202.9 MPa \quad e$$

$$\tau_{M_p} = \frac{M_p}{braccio \cdot A_b} = \frac{511000}{2 \cdot 40 \cdot 115} = 55.6 MPa$$

$$\tau = \sqrt{\tau_N^2 + \tau_{M_p}^2} = 210.4 MPa$$

La forza di taglio totale agente su ciascun bullone deve essere minore o uguale alla resistenza di calcolo a taglio:

$$F_{v,Ed} = \tau \cdot A_{res} = 24.2 kN \leq F_{v,Rd} = \frac{0.6 f_{tb} A_{res}}{\gamma_{M2}} = 27.6 kN \quad \text{Verificato}$$

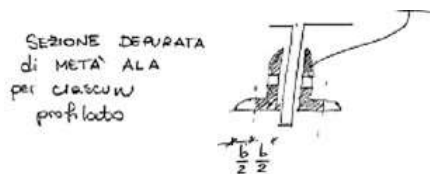


Verifica di resistenza dell'asta

L'asta è sollecitata a presso flessione per effetto della trazione N eccentrica rispetto all'asse di trascinaggio.

Nel caso specifico per semplicità di calcolo è possibile verificare l'asta a trazione semplice considerando la sezione depurata di metà dell'ala di ciascun profilato.

$$A_{sez} = 2 \cdot A_{prof} - 2 \cdot \frac{t \cdot l}{2} = 714 mm^2 \quad e \quad A_{net} = 2 \cdot A_{prof} - 2 \cdot \frac{t \cdot l}{2} - 2 \cdot t \cdot d = 534 mm^2$$



$$N_{t,Rd} = \min \left(\frac{714 \cdot 275}{1.05}, \frac{0.9 \cdot 534 \cdot 430}{1.25} \right) = 165.3 kN \geq 140 kN \quad \text{Verificato}$$

Verifica a rifollamento del profilato

La resistenza di calcolo a rifollamento è:

$$F_{b,Rd} = \frac{k \cdot \alpha \cdot f_{t,k} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

in cui per i bulloni di bordo in entrambe le direzioni ortogonale e parallela al carico (condizione più gravosa):

$$\alpha = \min \left(\frac{e_1}{3d_0}, \frac{f_{tb}}{f_t}, 1 \right) = \min \left(\frac{25}{3 \cdot 15}, \frac{500}{430}, 1 \right) = 0.55$$

$$k = \min \left(2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7; 2.5 \right) = \min \left(2.8 \cdot \frac{25}{15} - 1.7; 2.5 \right) = 2.5$$

La compressione esercitata dal bullone sul foro deve essere minore o uguale alla resistenza di calcolo a rifollamento nel profilato:

$$F_{b,Ed_{profilato}} = \tau \cdot A_{res} = 24.2 kN \leq F_{b,Rd} = \frac{2.5 \cdot 0.55 \cdot 430 \cdot 14 \cdot 6}{1.25} = 39.8 kN \quad \text{Verificato}$$

Progetto del fazzoletto con verifica a rifollamento

La compressione esercitata dal bullone sul foro deve essere minore o uguale alla resistenza di calcolo a rifollamento nel fazzoletto:

$$F_{b,Ed_{fazzoletto}} = 2 \cdot \tau \cdot A_{res} = 48.4 kN \leq F_{b,Rd} = \frac{k \cdot \alpha \cdot f_{tk} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

Lo spessore minimo che deve avere il fazzoletto è quindi (avendo preso il caso peggiore che si ha per un bullone doppiamente di bordo):

$$t \geq \frac{F_{b,Ed_{fazzoletto}} \cdot \gamma_{M2}}{k \cdot \alpha \cdot f_{tk} \cdot d} = \frac{48600 \cdot 1.25}{2.5 \cdot 0.55 \cdot 430 \cdot 14} = 7.34 mm$$

Scelgo quindi uno spessore di $t = 8 mm$.

$$F_{b,Ed_{fazzoletto}} = 2 \cdot \tau \cdot A_{res} = 48.4 kN \leq F_{b,Rd} = \frac{2.5 \cdot 0.55 \cdot 430 \cdot 14 \cdot 8}{1.25} = 52.9 kN$$

Verificato

Esercizio 4.2

Si verifichi il nodo trave colonna considerando un'unione flangiata realizzata mediante 8 bulloni classe 6.8 di diametro $d=27 mm$ ed una flangia di acciaio S 355 di dimensioni $600 * 200 * 12 mm$ (vedi figura lato destro). La flangia è unita alla trave con saldature aventi sezione trasversale di raggio 8 mm. Il nodo è sollecitato da un momento $M_d = 179.9 kNm$ e da un taglio $T_d = 107.9 kN$. Il pilastro è costituito da un profilato HEA 240 e la trave da un profilato IPE 300, ambedue di acciaio S 355.



FIGURA 25: L'immagine 3D è solo indicativa della collocazione degli elementi in una unione flangiata

$$M = 179.9 kNm$$

$$T = 107.25 kN$$

$$d = 27 mm \Rightarrow A_b = 459 mm^2$$

Verifica delle limitazioni sulle posizioni dei fori

In direzione parallela al carico:

$$d_0 = 27 + 1.5 = 28.5 \text{ mm}$$

$$e_{1,min} = 1.2 \cdot d_0 = 1.2 \cdot 28.5 = 34.2 \text{ mm} \quad \text{e} \quad e_{1,max} = 4t + 40 \text{ mm} = 4 \cdot 12 + 40 = 88 \text{ mm}$$

$$e_1 = \frac{600-300}{4} = 75 \text{ mm} \quad \text{verificato}$$

$$p_{1,min} = 2.2 \cdot d_0 = 2.2 \cdot 28.5 = 62.7 \text{ mm} \quad \text{e} \quad p_{1,max} = \min(14t, 200 \text{ mm}) = 168 \text{ mm}$$

$$p_1 = 2 \cdot 75 = 150 \text{ mm} \quad \text{verificato}$$

In direzione ortogonale al carico:

$$e_{2,min} = 1.2 \cdot d_0 = 1.2 \cdot 28.5 = 34.2 \text{ mm} \quad \text{e} \quad e_{2,max} = 4t + 40 \text{ mm} = 4 \cdot 12 + 40 = 88 \text{ mm}$$

$$e_2 = \frac{200-115}{2} = 42.5 \text{ mm} \quad \text{verificato}$$

$$p_{2,min} = 2.4 \cdot d_0 = 2.4 \cdot 28.5 = 68.4 \text{ mm} \quad \text{e} \quad p_{2,max} = \min(14t; 200\text{mm}) = 168 \text{ mm}$$

$$p_2 = 115 \text{ mm} \quad \text{verificato}$$

Verifica della bullonatura

I bulloni dell'unione flangiata sono sollecitati sia a trazione, per effetto del momento, sia a taglio.

$$F_{v,Ed} = \frac{T}{n_b \cdot n_s} = \frac{107.95}{8 \cdot 1} = 13.5 \text{ kN}$$

$$F_{t,Ed} = \frac{M}{\sum y_i^2} y_{max} = \frac{179900}{2 \cdot (75^2 + 225^2 + 375^2 + 525^2)} \cdot 525 = 100 \text{ kN}$$

La resistenza di calcolo a taglio dei bulloni (classe 6.8) è:

$$F_{v,Rd} = \frac{0.5 f_{tb} A_{res}}{\gamma_{M2}} = \frac{0.5 \cdot 600 \cdot 459}{1.25} = 198.3 \text{ kN}$$

Nel caso di presenza combinata di trazione e taglio la seguente verifica deve essere soddisfatta.

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1, \quad \frac{13.5}{110.2} + \frac{100}{1.4 \cdot 198.3} = 0.12 + 0.36 \leq 1 \quad \text{verificata}$$

Con la limitazione che:

$$\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1 \quad \text{verificata}$$

Verifica a rifollamento della flangia

Considero la condizione più gravosa che si ha nella flangia per effetto dell'azione di un bullone di bordo nelle due direzioni, ortogonale e parallela all'azione di taglio esercitata dalla trave:

$$\alpha = \min \left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{tb}}{f_t}; 1 \right) = \min \left(\frac{75}{3 \cdot 28.5}; \frac{600}{510}; 1 \right) = 0.87$$

$$k = \min \left(2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7; 2.5 \right) = \min \left(2.8 \cdot \frac{42.5}{28.5} - 1.7; 2.5 \right) = 2.5$$

$$F_{v,Ed} = 13.5 \text{ kN} \leq F_{b,Rd} = \frac{k \cdot \alpha \cdot f_{tk} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2.5 \cdot 0.87 \cdot 510 \cdot 27 \cdot 12}{1.25} = 287.5 \text{ kN} \quad \text{verificato}$$

Verifica a punzonamento della flangia

La sollecitazione di compressione che esercita la testa del bullone sulla flangia deve essere inferiore alla resistenza a punzonamento di questa:

$$F_{t,Ed} = 100 \text{ kN} \leq F_{p,Rd} = \frac{0.6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}} = \frac{0.6 \cdot \pi \cdot 41 \cdot 12 \cdot 510}{1.25} = 378.2 \text{ kN} \quad \text{verificato}$$

Verifica della saldatura

Si ipotizza che la sollecitazione flettente sia completamente assorbita dalle saldature sulle ali e quella tagliante da quelle sull'anima del profilato. Sulle saldature delle ali avremmo delle sollecitazioni normali alla sezione di gola la cui altezza è pari a:

$$a_g = \frac{r \cdot \sqrt{2}}{2} = \frac{8 \cdot \sqrt{2}}{2} = 5.6 \text{ mm}$$

$$\sigma_I = \frac{M/h}{a_g \cdot l + a_g \cdot (l - a - 2 \cdot r)} = \frac{179900000/300}{5.6 \cdot 150 + 5.6 \cdot (150 - 7.1 - 2 \cdot 15)} = 407.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_I = 407.3 \text{ MPa} \leq \frac{f_{tk}}{\beta \cdot \gamma_{M2}} = \frac{510}{0.9 \cdot 1.25} = 453 \text{ MPa} \quad \text{verificato}$$

Nella saldatura sull'anima avremo invece delle sollecitazioni di taglio parallele alla lunghezza della saldatura:

$$\tau_{II} = \frac{T}{2 \cdot a_g \cdot h_1} = \frac{107950}{5.6 \cdot 248.6} = 38.8 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{3\tau_{II}^2} = \sqrt{3 \cdot 77.6^2} = 67.2 \text{ MPa} \leq 589.9 \text{ MPa} \quad \text{verificato}$$