國立台灣大學土木工程學系碩士班

民國108年 (碩士) 學位論文摘要

梁鋼筋配置最佳化實務應用之可行性評估

研 究 生：乃宥然

指導教授：張國鎮

# 介紹

隨著輔助施工管理軟體與自動機械化方法日趨進步，未來建築結構可在自動化工程輔助下達成愈趨複雜的施工要求。因此，在可保證施工品質前提下，若可將材料於建築結構需求上進行合理分配，使材料分配於結構強度實際需求處，於需求較低處減少材料用量，妥善發揮材料之強度貢獻，將可有效降低整體材料用量，進而減少材料浪費達成永續發展與降低成本之目的。

而現行工程實務上，對於鋼筋混凝土梁之配筋方法，是以降低施工複雜度為導向，因此可能於需求較低之位置，仍配置和需求較高處相同甚至更多鋼筋量，造成現行配筋方法較容易產生浪費材料的問題。而若可以將鋼筋用量進行合理分配，使鋼筋配置於實際需求處，於較低需求處減少鋼筋用量，將可有效降低材料成本。

本研究目標為降低鋼筋混凝土梁之鋼筋用量。故根據混凝土結構設計規範(內政部, 2019)設置梁之撓曲以及剪力鋼筋，並作梁鋼筋配置之最佳化，使梁鋼筋合理配置於結構實際需求處，由降低施工複雜度轉為以結構強度需求為主，以期相較於現行配筋可使用較少的鋼筋用量。

# 梁鋼筋配置最佳化方法

本研究依據混凝土結構設計規範，提出兩種撓曲鋼筋配置最佳化的方法，第一種作法(Method A)為符合混凝土結構設計規範要求的最佳切斷點，但其計算較為密集耗時較久；第二種作法(Method B)為計算速度較快之作法，其相較規範的規定更為保守，但可降低之鋼筋用量相較於第一種作法低。

## Method A

此方法符合規範要求，僅考慮最大應力與截斷點之伸展長度。

1. 決定鋼筋截斷點數量。
2. 將初始鋼筋截斷點分佈於梁之需求鋼筋量截斷允許處進行截斷。
3. 將截斷點之間鋼筋量之最大值作為其配筋量，並且此配筋量需由最大應力處考慮其伸展長度得理論切斷點，並且於不需承受撓曲應力處向外延伸至少一個有效深度且不小於。
4. 重複步驟3可得每一截斷點之伸展長度與鋼筋用量，最終得該梁之鋼筋配置，並計算此配置之鋼筋用量。
5. 於所有可能的初始截斷點，重複步驟2-4，取最小用鋼量之鋼筋配置作為該梁之最佳化配筋。

## Method B

此方法較規範更為保守，不僅僅考慮最大應力與截斷點之伸展長度。此方法考慮所有位置鋼筋之伸展長度，因此於任一截面皆符合規範要求之伸展長度。

1. 於梁之需求鋼筋量所有截斷允許處進行截斷(Figure 1)。
2. 計算所有鋼筋需求量之伸展長度。
3. 將所有截斷處之終止鋼筋，於不需承受撓曲應力處向外延伸至少一個有效深度且不小於。
4. 考慮步驟2與步驟3鋼筋量之大值，得考慮所有可截斷點之理論斷筋點(Figure 2)。
5. 決定鋼筋截斷點數量。
6. 將鋼筋截斷點分佈於考慮所有可截斷點之理論斷筋點截斷允許處進行截斷，並計算此配置之鋼筋用量。
7. 於所有可能的理論斷筋點，重複步驟6，取最小鋼筋用量之配置作為該梁之最佳化配筋(如Figure 3以2個截斷點之最佳化配筋為例)。

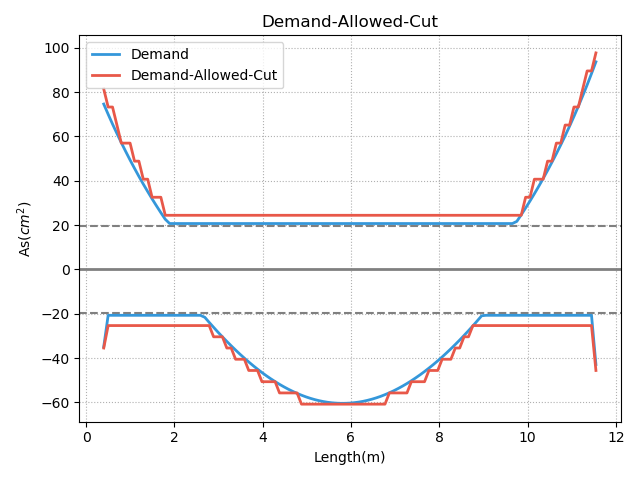


Figure 1 於梁之需求鋼筋量所有截斷允許處進行截斷。

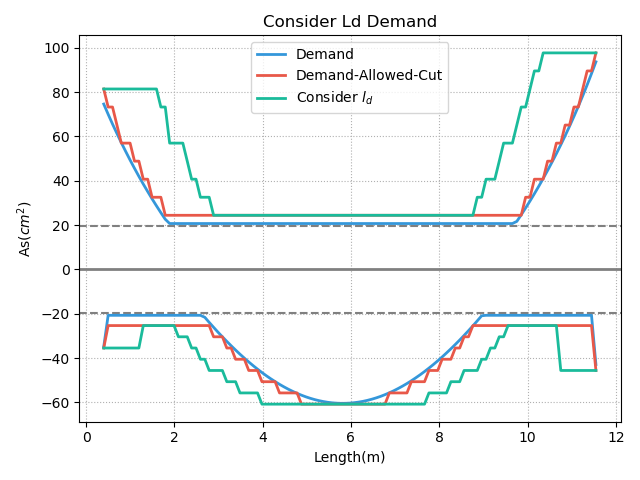


Figure 2 考慮所有位置受拉伸展長度，與截斷處之終止鋼筋於不需承受撓曲應力處向外延伸至少一個有效深度且不小於後之理論斷筋點。

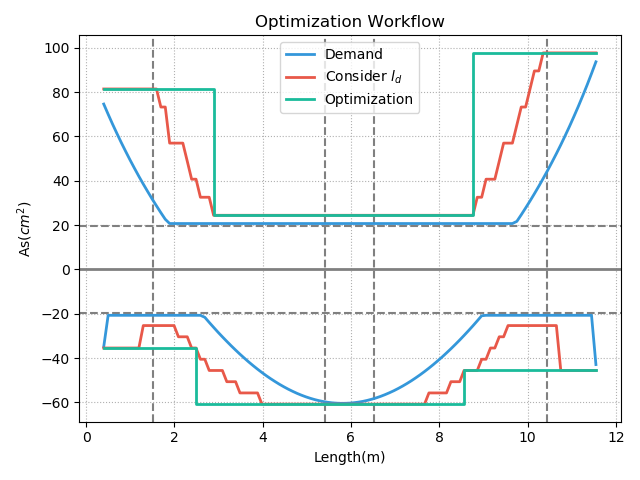


Figure 3 2個截斷點之最佳化配筋。

# 梁鋼筋配置最佳化之量化研究

本研究以影響最佳化配筋效益的多種因素進行結構數值模型設計，量化不同因素在實務應用上對於最佳化配筋與現行配筋之鋼筋用量的影響。並初步討論最佳化配筋可降低之材料成本與可能增加之施工成本的平衡。

## 影響最佳化配筋之因素

現行配筋之切斷點基本固定在梁淨長之處；最佳化配筋則由撓曲需求轉換為需求鋼筋量，並考慮伸展長度後作最佳化得最佳斷筋點。以下就作最佳化配筋的過程，討論影響最佳化配筋結果之因素。

考慮大梁撓曲需求鋼筋量，上層鋼筋左右兩端需求鋼筋量為側向力與重力造成之彎矩需求疊加而成，中央較少甚至無需求鋼筋量，且中央上層鋼筋通常為受壓鋼筋。由此可推斷需求鋼筋量從兩端遞減至中央，但因遞減之需求鋼筋量曲線非為線性遞減，所以若需求鋼筋量曲線向中央遞減之斜率愈大，可作最佳化配筋區域愈大，可降低用鋼量可能性愈高。

由於受均佈載重與側向力之梁，重力造成之彎矩需求為二次曲線(圖 4.2)，且其中央彎矩需求不須由上層鋼筋提供，而側向力造成之彎矩需求為向中央遞減之線性曲線。因此重力愈大代表與側向力疊加而成之彎矩需求，向中央遞減之斜率愈大(線性曲線加上二次曲線之值，二次曲線為凹向上且其頂點為負)，可降低鋼筋用量可能性愈高。因此影響需求鋼筋量曲線向中央遞減斜率大小之因素可簡化為側向力與重力造成之彎矩比值(以下簡稱側向力與重力比值)，比值愈小需求鋼筋量向中央遞減之斜率愈大。

側向力與重力比值除了受工址設計地震力影響外，由於梁長影響重力所造成之彎矩大小，因此梁長愈長重力相對於側向力造成彎矩愈大，因此側向力與重力比值愈小。另外，以各樓層梁之角度檢視側向力與重力比值，梁所處之樓層高度亦影響側向力與重力比值，縱使整體結構所受之基底剪力相同，但因側向力由高樓層累積至低樓層，故低樓層梁須承受較多側向力，側向力與重力比值較高樓層梁大。

另一影響上層鋼筋最佳化結果的因素為鋼筋伸展長度，伸展長度愈短可作最佳化區域愈大，降低鋼筋用量可能性愈高(圖 4.3)。而影響伸展長度的因素除混凝土結構設計規範(內政部, 2019)式(5-1)參數外，有效深度亦會影響(影響)，且因伸展長度以主筋直徑為單位，與梁長無關，造成伸展長度因梁長較長而相對較短。因此梁長愈長，伸展長度相對愈短，可作最佳化區域愈大。



Figure 4 大梁之撓曲需求鋼筋量由側向力與重力造成之彎矩需求疊加而成，此圖零以下為正彎矩需求，由下層鋼筋提供抗拉強度，零以上為負彎矩需求，由上層鋼筋提供抗拉強度。

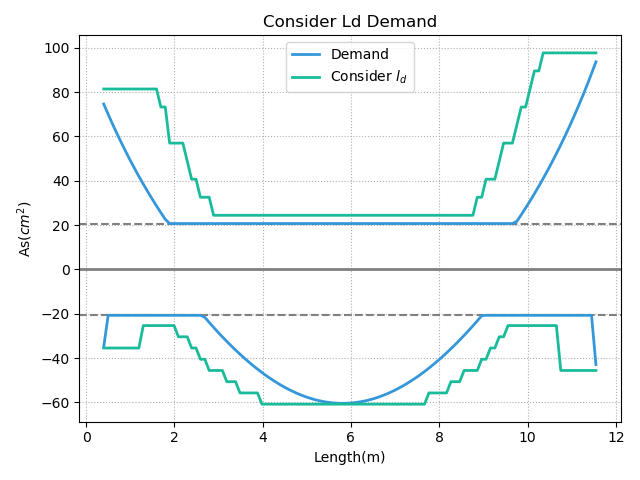


Figure 5 考慮所有鋼筋需求量之伸展長度，伸展長度愈短可作最佳化區域愈大。

## 最佳化配筋效益

若以包含上層鋼筋與下層鋼筋之整體最佳化配筋結果來檢視(表 4.8)，可發現由於上層鋼筋作最佳化配筋降低之用鋼量較多，因此會控制整體結果。梁長最短且位於地震力最大之工址其最佳化配筋效益最差，僅可降低3.1% 之鋼筋用量，而梁長最長且位於地震力最小之工址其最佳化配筋效益最好，可降低11.6% 之鋼筋用量。此九種案例最佳化配筋可降低之鋼筋量之平均值與中位數分別為8.5% 與9.1%。並且梁長愈長或設計地震力工址愈小，皆可降低愈多鋼筋用量。

Table 1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 工址\梁長(m) | 6 | 9 | 12 |
| 宜蘭縣蘇澳鎮(地震力較大之工址) | 96.9% | 90.9% | 92.0% |
| 桃園縣平鎮市(地震力介於中間之工址) | 92.2% | 90.5% | 91.6% |
| 桃園縣蘆竹鄉(地震力較小之工址) | 90.6% | 90.3% | 88.4% |

若以3.2.3.2節最佳化配筋方法之Method B進行配筋可得表 4.12之結果，將其與Method A之結果(表 4.8)相互比較可發現，由於Method B考慮每一截面需求鋼筋量之伸展長度，因此對梁長較為敏感，且其最佳化效益相較於Method A差，Method A可降低鋼筋用量之平均值與中位數分別為8.5% 與9.1%，而Method B分別為5.1% 與5.6%。

Table 2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 工址\梁長(m) | 6 | 9 | 12 |
| 宜蘭縣蘇澳鎮(地震力較大之工址) | 99.6% | 94.0% | 92.0% |
| 桃園縣平鎮市(地震力介於中間之工址) | 99.6% | 95.2% | 90.9% |
| 桃園縣蘆竹鄉(地震力較小之工址) | 98.1% | 94.4% | 90.2% |

以上表格皆為兩點斷筋之最佳化配筋與現行配筋之比較，而最佳化配筋可降低最多鋼筋用量的情況為無限制斷筋點數量。此節將設計地震力介於中間之工址且梁長9米之案例，進行多點斷筋，以判別多點斷筋相較於現行配筋之配筋，其最多可降低多少鋼筋用量。

表 4.13為兩種最佳化方法於不同斷筋點數量，可降低鋼筋用量之比例，若無限制斷筋點數量，至多可降低18.3% 之用鋼量。將斷筋點數量從2點斷筋提升至4點斷筋，可進一步分別降低4.7% 與3.4% 之鋼筋用量。且由於已接近無限制斷筋數量之結果，因此4點斷筋為效果較2點斷筋增加幅度大且施工複雜度較無限制斷筋數量低之斷筋點數。

因此實務應用中可先作無限制斷筋數量，得最佳化配筋至多可降低之鋼筋用量，再決定合適之斷筋點數量，如此不僅相較於無限制斷筋數量可降低施工複雜度，同時相較於兩點斷筋可降低更多鋼筋用量。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Method A | | | Method B |
| 切斷點數 | 上層鋼筋(%) | 下層鋼筋(%) | 整體鋼筋(%) | 整體鋼筋(%) |
| 2 | 88.30% | 93.90% | 90.50% | 95.20% |
| 3 | 82.70% | 90.90% | 85.80% | 91.30% |
| 4 | 77.20% | 90.90% | 82.40% | 88.10% |
| 無限制 | 79.10% | 86.10% | 81.70% | 81.70% |

## 初步成本評估

由前述之量化研究分析可知最佳化配筋可有效降低鋼筋用量，但若是作多個切斷點相較於現行配筋方法會使施工複雜度上升，因此須討論材料成本與施工成本之平衡。

依據公共工程價格資料庫預算金額從2018年05月累計至2019年05月的資料。現行鋼筋SD420W之材料平均價格為每公噸19076元，標準差為2334元，樣本數量244。而鋼筋SD420W連工帶料每公噸平均價格為23396元，標準差為2048元，樣本數量12。兩者價格相減即可得每公噸鋼筋綁紮工資為4320元。

由於現行工程實務上尚未於施工環境下有超過兩個斷筋點的案例，因此無法精確評估作最佳化配筋使施工複雜度增加所造成的影響，所以亦無法得知關於每公噸鋼筋綁紮工資會因最佳化配筋提升多少價格，故本研究僅計算降低鋼筋用量與鋼筋綁紮工資之平衡。

以4.5.1.8節多點斷筋的結果討論，由於以4點斷筋就可接近無限制斷筋數量產生的效益，因此以4點斷筋作為最終之斷筋點數量。而4點斷筋可降低17.6% 鋼筋用量，故相較於現行配筋每公噸鋼筋用量可節省3357元，所以施工成本須由4320元提升至9318元現行配筋與最佳化配筋之總體成本才為一致(表 4.18)。因此若施工成本在9318元以下進行最佳化配筋即可降低總體成本。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 現行配筋 | 最佳化配筋 |
| 材料成本 |  |  |
| 施工成本 |  |  |
| 總體成本 |  | |

# 梁鋼筋配置最佳化非線性分析結果

梁塑鉸點通常僅須設定在兩端，以檢視梁是否先於柱產生塑鉸。但因最佳化配筋所減少之鋼筋用量通常位於梁中央，因此若僅於兩端設定塑鉸點，不足以反應作最佳化配筋後鋼筋用量之變化。故須於梁中央設定多個塑鉸點，以真實反應梁鋼筋用量之變化。

而若僅將塑鉸設定於鋼筋之切斷點，由於鋼筋切斷點處尚無法發展出該鋼筋量之降伏強度，因此會產生不保守的問題，故須將塑鉸設定於鋼筋切斷點處往回延伸該鋼筋量所需之伸展長度，以確保該塑鉸點可發展出應有之降伏強度。因此由僅須設定於兩端之塑鉸點，增加至最多10個塑鉸點(包含上下層鋼筋之兩點斷筋)。

而塑鉸骨架曲線採用CSI-ETABS 2016中依據ASCE41-13(ASCE, 2014) Table10-7與Table10-8產生之梁柱塑鉸。其中，梁之彎矩塑鉸性質使用塑鉸，柱之軸力彎矩塑鉸性質使用塑鉸。

ASCE. (2014). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings.

內政部. (2019). *混凝土結構設計規範*.