

# 地震地区高速铁路桩基础设计考量

## Design considerations of pile foundations of high speed rail project in seismic area

陈明山,段绍纬,黄永和,秦中天  
(亚新工程顾问股份有限公司,台北 105)

**摘要:** 主要说明台湾高速铁路工程南部段自里程 TK188 至 TK343 长约 155km 松软冲积层中桩基础设计几项特别详加考量的因素包括特殊地盘效应、群桩效应、桩帽侧向阻抗以及土壤液化地层滑移等。同时亦藉由前期桩载重试验结果探讨桩身向上之土壤抗拉拔力与桩身向下之土壤正摩擦力的比例。基本上桩基础分析属土壤与基桩互制之行为分析, 本文亦说明由试验结果所得到之土壤  $p-y$ ,  $t-z$  及  $q-w$  曲线如何应用于桩基础设计, 以及分析土壤弹簧对桩基础及桥柱设计之敏感度, 期能将设计分析经验供尔后类似工程参考。

**关键词:** 特殊地盘; 群桩效应; 液化滑移; 土壤弹簧

**作者简介:** 陈明山(1952-), 男, 台湾彰化人, 亚新工程顾问股份有限公司高速铁路项目计划经理, 注册大地工程技师, 主要从事深开挖, 地质改良及桩基础之设计工作。

CHEN Ming-shan, DUANN Shaw-wei, WHANG Yuang-her, CHIN Chung-tien  
(Moh and Associates, Inc. Taipei)

**Abstract:** The area of this study is in the southern part of THSR alignment from TK188 to TK343 with an approximate 155 km length. The geological condition in the region consists of compressible alluvial deposits in the upper soil strata. This paper focuses on some of the special technical features which have to be considered in the design of pile foundations, including effects of particular site conditions, pile group effects, lateral resistance of pile cap and flow slide of liquefiable soil etc. For foundation design, significant efforts have been placed on soil-pile interaction ( $p-y$ ,  $t-z$  and  $q-w$  relationships) through verification and calibration of models from pile load tests. The pullout resistance of piles was studied to a great extent based on full-scale pullout testing. Sensitivity of soil spring to the design of piles foundation and piers was also analyzed.

**Key words:** particular site; group effect; flow slide; soil spring.

## 0 前言

台湾高速铁路计画路线全长约 345km, 估计总工程费为 150 亿美元, 咸认为世界上最大之 BOT(Build-Operate-Transfer) 案例之一。路线经过台湾西南部高人口密度之海岸平原区, 且连接许多主要城市。设计车行最大速率为 350km/hr, 旅客可以 90 分钟从台北抵达高雄, 代替普通的铁路或高速公路需时 4.5 小时。预期每日载客量为 300000 人次, 高速铁路将成为台湾岛内主要的运输动脉。而一旦正式营运, 预期以往之塞车情况将显著改善。因为运输效率改善及人口资源重分配, 预期亦将提升台湾之经济发展<sup>[1]</sup>。

台湾位于环太平洋地震带上, 事实上, 台湾岛系由菲律宾海板块下冲欧亚大陆板块所形成, 观测得每年向北位移约 7cm, 因此造成复杂的地质构造与急剧变化的地层状况。沿线支承上部结构的基础形式亦随地区而变化。在北部山区路段, 大都为路堤路堑与过河段之桥梁及山岳隧道, 约占全线五分之一路线。而其余南部路段经过海岸平原区为避免阻隔区域之发展及专用路权之考量, 大部分结构为高架桥由桩基础支承。由于不同的地质状况与不同的施工方法, 因此在大地工程需考虑的

项目亦因地区而不同。在北部路段主要考虑的为边坡稳定与地质灾害的防范, 而在南部路段基桩经济的设计为主要的考量因素<sup>[1]</sup>。自八卦山南麓(里程 TK188+170) 至工程尾端(里程 TK343+120), 路线所经为台湾西南部海岸平原区, 其表层地层俱为松软具高压缩性低承载力之冲积层, 因此高架桥均采用桩基础。依台湾高速铁路公司之统计资料, 高铁全线基桩数量超过 30000 支, 而南部路段估计基桩数量超过两万支, 设计桩径在 1.5m 至 2.5m 之间, 属大口径之钻掘桩, 平均桩长约为 50 至 60m 左右, 最大桩长达 72m。

高速铁路为重大交通建设, 设计年限采用 100 年, 由于设计速率高达 350km/hr, 故在设计时对安全性及旅客舒适度之要求较一般铁路及公路为高。

本文之目的在探讨软弱之冲积地层中高速铁路桥梁桩基础设计几项特别详加考量的规定包括(1)特殊地盘效应(Particular Site Effect), (2)群桩效应, (3)桩帽侧向阻抗及(4)土壤液化地层滑移(Flow Slide)等, 及其对桩基础设计结果的影响等。另在高速铁路计画设计进行初期曾进行大量的基桩前期载重试验, 其目的在验证设计假设的合理性以及求得最佳化之设计。项目包括压力载重试验、拉力载重试验及侧向载重试验等。本文亦探讨由实际试验量测桩身向上位移之土壤抗拉拔力与桩身

向下位移之土壤正摩擦力之比例大小。同时亦说明由试验所得到之土壤弹簧包括水平向 P-y 曲线及垂直向 t-z 曲线与 q-w 曲线如何应用于桩基础设计中,以及就土壤弹簧对桩基础及桥柱设计之敏感度进行分析。

### 1 特殊地盘效应

在地震作用下,桩基础设计模式常考虑为拟静力状态,即仅考虑地震时由上部结构传至桥柱底的惯性力由基础来承担,使得基础产生变位及内应力(弯矩、剪力及轴力),依此来设计桩基础。惟在台湾高铁设计规范中,若土层分类为特殊地盘时,必需额外考虑土壤动态(Kinematic)地盘震动放大效应的影响<sup>[2]</sup>,亦即需额外考虑因表层地盘大量变位与基桩互制作用之影响所造成基桩额外增加的变位及应力。

有关特殊地盘的定义如下:

基盘面(Base layer)定义为其下之土层符合粘土层之标准贯入试验 N 值均大于 25,且其下之砂质土层之 N 值均大于 50,或其下土层剪力波速均大于 300m/s 之最高土层面。

基盘面以上之地盘称为表层地盘(Surface layer),表层地盘区分为特殊地盘与普通地盘,符合下列条件之一者为特殊地盘。

- (1) 表层地盘之 N 值与层厚符合表 1。
- (2) 表层地盘之 N 值在粘性土小于 8 在砂质土小于 15,且表层地盘之设计固有周期(First mode period, Tg),大于或等于 1.0 秒时。其中 Tg 系定义为表层地盘依一维土壤剪力柱模式计算求得之设计固有周期(秒)。而特殊地盘除外之地盘是为普通地盘。

表 1 N 值与层厚符合特殊地盘之条件

Table 1 SPT-N value and soil stratum thickness requirement for particular sites

粘性土		砂质土	
N 值	层厚	N 值	层厚
N=0	2m 以上	N≤5	5m 以上
N≤2	5m 以上	N≤10	10m 以上
N≤4	10m 以上		

如上所述,若地盘分类为特殊地盘,必须考虑地盘震动放大效应。此时在第二类地震(中小地震)时,设计必须使得桥梁的变位能让车辆在速率 350km/hr 之运行时能安全煞车至完全停止,尚须符合结构变位之检核要求。

地震作用时,基础除受到桥梁结构振动传下来之惯性力所造成的变位外,还受到表层地盘变位与基础互制后产生之变位,因此基础顶部水平变位量要包括此二部份。

此外在第一类地震(大地震)时,亦同时检核基础同

时考量上部结构所传下来的惯性力及土壤动态地盘震动放大效应两者因素时基础所承受之应力是否超过结构所能提供之容许之应力。目前在分析基础同时考量上部结构所传下来的惯性力及土壤动态地盘震动放大效应两者因素的方法,大致上可分为直接法及间接法两种。

直接法系建构整体结构(含梁、柱及基础)模式及土壤网格资料,利用有限元素法进行土壤及结构互制的动态分析。所需输入资料包括桥梁(含基础)各构件之断面性质、断面系数及土壤参数动态剪力模数 G、土壤单位重、土层分布、土壤弹簧(p-y 曲线、t-z 曲线、q-w 曲线)以及基盘的地震加速度历时记录等。由于系在考虑时间域的状态下进行之动态分析。因此需要较庞大的计算机程序来执行运算工作,而目前在工址基盘的地震加速度历时记录取得不易,直接法分析工作显得较为复杂与困难。

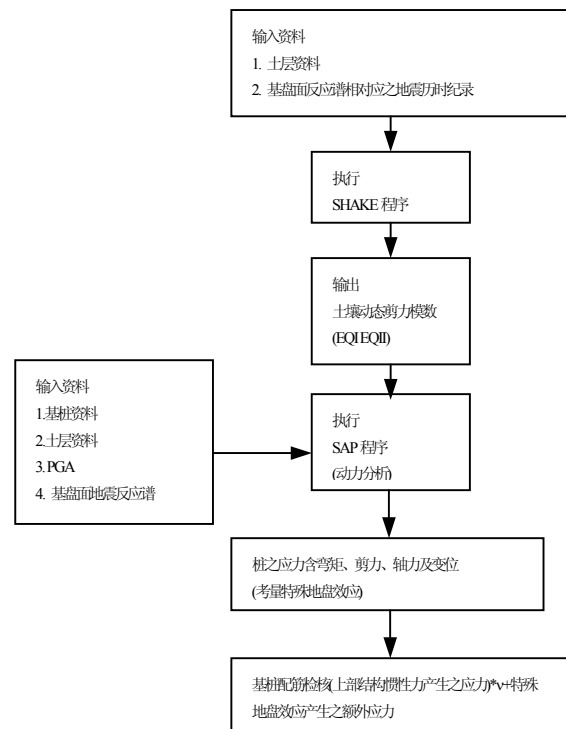


图 1 考量特殊地盘效应检核基桩配筋流程图

Fig. 1 Flow chart of checking reinforcement of piles as considering particular sites effect

另一种分析方法为间接法,系叠加上部结构惯性力所产生桩之应力与考量特殊地盘效应产生之额外应力。如前所述,上部结构惯性力所产生桩之应力,可由拟静力状态分析求得。而考量特殊地盘效应之额外应力基本上即为土壤与结构(桩)互制行为的分析。整个的分析检核流程如图 1 所示。其中因考虑土壤之非线性行为,土壤之动态剪力模数随着应变的增大而降低,因此需执行 SHAKE 程序来求得不同应变状态之下之 G/Gmax。由于表层地盘变位与桥梁结构因地震惯性力产生的变位有相

位差存在，其最大值不会同时发生，因此在叠加两种变位量或应力时，应将桥梁结构因地震惯性力所造成的变位量或应力乘以一修正系数 $\nu$ ，此修正系数 $\nu$ 为结构物基本振动周期与表层地盘基本振动周期之函数。其数值可参考高铁设计规范之规定，在此不再赘述。

## 2 群桩效应

当间距较窄的群桩承受水平力时，各桩间的土壤因桩顶的水平作用力导致各桩间土壤的应力有重叠现象。当作用力沿桩排列方向时，即平行桩排列方向时，后排桩的侧向土壤抵抗力较前排桩的侧向土壤抵抗力低，此现象仍归因于群桩间土壤应力的重叠效应，亦可称为“阴影效应(Shadow-Effect)”。相同的，当作用力系垂直于桩排列方向时，于群桩间两侧之桩亦会产生土壤应力重叠效应，此时亦可称为“边缘效应(Edge-Effect)”<sup>[31]</sup>。

图2为依塑性理论推估桩受水平作用力时之影响区域之示意图，其为土壤内摩擦角的函数。

高铁设计规范规定群桩基础设计时须适当考量群桩效应。群桩于承受水平力时，其各桩之行为受桩间之互制作用影响极大。受群桩互制效应的影响，群桩周围土壤的侧向极限抵抗力较单桩周围土壤的侧向极限抵抗力为低。因此桩群的侧向抵抗力低于其中各单桩的侧向抵抗力之和，即群桩效率(Group efficiency)小于1.0。在相同荷重情况下，桩-土壤-桩的互制效应使承受水平力之群桩较单桩有较大的桩顶侧向变位及桩身最大弯矩，同时群桩之最大弯矩发生的位置亦较单桩为深<sup>[41]</sup>。群桩侧向抵抗力与地层种类、桩之施工方式、桩数、荷重方向、桩之间距排列方式等有关，其中桩之间距及荷重方向为影响群桩效应的主要因素<sup>[31]</sup>。

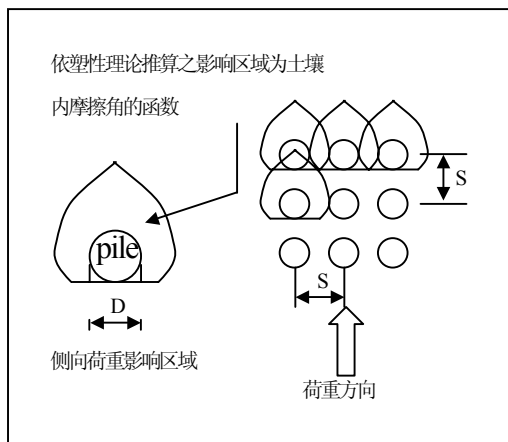


图2 群桩承受侧向荷重影响区域示意图

Fig. 2 Sketch of influence zone for lateral load group piles

台湾一般之工程在进行基桩设计时，大部份系参考日本道路协会(1996)道路桥示方书、同解说(简称JRA,1996)<sup>[51]</sup>的规定。只要群桩的桩中心距大于2.5D(D

为桩径)，均可不考虑群桩效应，唯有在桩中心距小于2.5D时，才需考虑群桩效应，而对土壤劲度即水平地盘反力系数作折减。依(JRA,1996)之解说，一般在桩的中心距小于5D时，其群桩效应才会显现出来。而考虑群桩效应对于水平地盘反力系数之些微折减并不会严重影响桩的弯曲应力，且因设计时已考量安全系数应已足够涵盖此因素，除非桩的间距非常的窄。

加拿大基础工程手册(1978)<sup>[61]</sup>及AASHTO(1996)公路桥梁标准规范<sup>[71]</sup>中均规定，水平力沿桩排列方向，桩中心距为8D时其群桩效应为1.0即土壤劲度不予折减，而桩中心距为3D时其群桩效应为0.25即土壤劲度折减为原来的0.25倍。水平力沿垂直桩排列方向时，桩中心距为2.5D时可不考虑群桩效应。日本铁道总合技术研究所(2000)，铁道构造物等设计标准，同解说(基础构造物、抗土压构造物)(简称JNR,2000)<sup>[81]</sup>中规定，考虑群桩效应，群桩之水平地盘反力系数折减系数如图3所示。

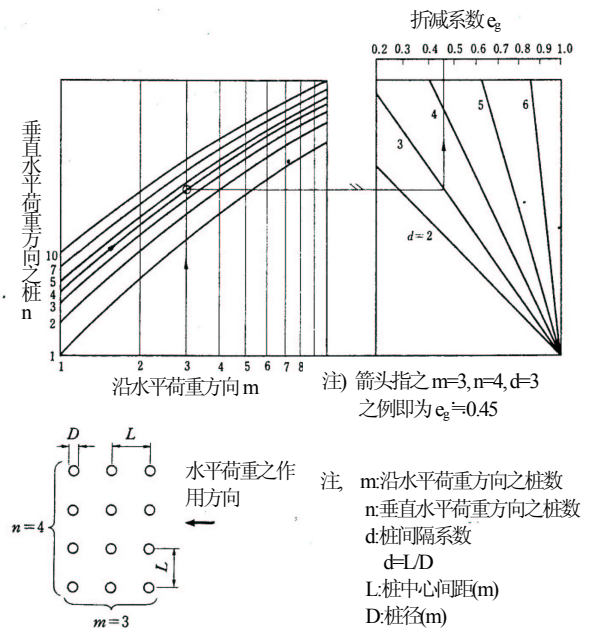


图3 群桩效应之折减系数(JNR,2000)

Fig. 3 Reduction factor of pile group effects (JNR,2000)

以3排x3排之群桩为例，在桩中心距为3D时，加拿大基础工程手册规定之折减系数最小为0.25，依(JNR,2000)规定之折减系数次低为0.44，而依(JRA,1996)规定之折减系数为1.0。显示加拿大基础工程手册的规定最为保守，(JNR,2000)的规定次保守，而(JRA,1996)属偏较不保守侧。

## 3 桩帽侧向阻抗

台湾高铁设计规范规定扩展基脚或桩帽因周围土壤被动土压产生的侧向抵抗力于设计时必须加以考虑。

早期一般工程于设计桩基础时,均仅考虑上部结构所传递下来的惯性力直接由群桩来承担,而未考虑桩帽之惯性作用力及桩帽周围土壤所提供之侧向抵抗力。由于高铁桥梁基础之桩帽尺寸相当大,且深埋于地层中,于承受水平力时,其桩帽前缘将推挤土壤,使土壤产生被动阻抗,于此同时,桩帽后缘将有土壤推挤桩帽,此推挤力是为主动土压力。因此考虑桩帽因土壤被动土压产生的侧向阻抗之机制显得较为合理,台湾高铁设计规范规定其侧向抵抗力为 $(P_p - P_a)/1.7$ ,其中 $P_p$ 为土壤被动土压产生的抵抗力,而 $P_a$ 为土壤主动土压产生的作用力,系数1.7系考虑水平力作用时可能无法产生足够位移使得被动土压及主动土压完全发挥之修正系数。考虑桩帽的侧向阻抗的同时,亦需考虑桩帽的惯性作用力以及桩帽上覆土的呆重,且在地震力作用状况时,宜采用动态被动土压及动态主动土压。

另一考量桩帽侧向阻抗的作法为于桩帽前缘垂直面上提供一侧面刚度即设置水平土壤弹簧(类似p-y曲线),此水平土壤弹簧之决定可依下列步骤<sup>[9]</sup>:

- (1) 估计桩帽前缘垂直面上的极限被动土压力。
- (2) 建构一弹塑性的荷重变位曲线来代表桩帽的刚度特征,如图4所示,经验的数据指出弹性的极限发生于大约0.02倍桩帽埋置深度(Z)的位移时,因此,此弹簧的斜率定义为极限被动土压力与0.02倍桩帽埋置深度的比值。

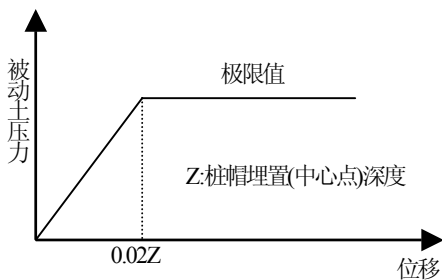


图4 桩帽前缘水平土壤弹簧

Fig. 4 Horizontal soil spring on the front face of pile cap

#### 4 土壤液化地层滑移

桩基础抗震设计常仅考虑承受由上部结构所传递下来之惯性力,依照日本阪神地震的经验,(JRA,1996)<sup>[5]</sup>对于同时符合下列两个条件方视为可能发生液化滑移地盘:

- (1) 临海区,护岸背面地盘及前面水底高差在5m以上且距水位线100m范围内之地盘。
- (2) 依判定会产生液化之砂土层厚度在5m以上,且该土层在水位线的水平方向连续存在。

由上述条件加上诸如曾文溪等河川既有地表高程与河床高程起伏高差超过5m,且地层具有高液化潜能,因此在设计河川桥基础时需考量地层液化滑移的因素。

依规范规定,考量土壤液化滑移时,应将液化滑移之影响视为水平力,并据此检讨基础之抗震性能。截至目前为止,有关液化滑移的发生机制不确定因素仍然甚多。故若经判定可能产生滑移时,桥梁在进行抗震设计时,应按下列三种情况分别考虑之,并取最严格者作为抗震设计之依据。

- (1) 考虑液化及滑移均不发生时之状况(此时仅考虑上部结构所传递下来之惯性力)。
- (2) 考虑液化发生时之状况(包括上构传递下来之惯性力)。
- (3) 仅考虑液化滑移发生时之状况(不考虑上构传下来之惯性力)。

有关液化滑移之水平力计算模式,可参照(JRA,1996)规定,在此不再赘述。依高铁南部段几条重要河川进行河岸土壤液化滑移的分析。由于液化滑移所引致的水平作用力相较于大地震的地震力为小。因此桩基础设计结果均由第(2)项所控制,考虑第(3)项液化滑移之因素并不会影响到设计结果。

#### 5 基桩抗拉拔力

台湾高铁设计规范规定,基桩承受拉拔力时之桩身摩擦阻力(不含桩重)不得大于受垂直压力时桩身摩擦力的40%。由于高铁桥梁基础所承受的地震力极大,以致大部份的设计桩长系由大地震荷重时基桩承受拉拔力状况所控制。高铁计画在设计工作进行初期曾进行大量的基桩前期载重试验,项目包括静力的垂直压力载重试验、拉力载重试验、侧向载重试验、Osterberg Load Cell试验,以及动力载重试验等。根据统计分析静力垂直压力载重试验、拉力载重试验并参考Osterberg Load Cell试验结果,在冲积地层大口径的钻掘桩,其拉拔之桩身摩擦力与受压时桩身摩擦力的比值约介于0.62至1.05(62%至105%)之间,平均值为81%及一个标准偏差为16%,远大于规范规定的40%。在大地震荷重下,此40%之限制实在值得好好去重新考虑。假若40%之限制能提高为50%或60%,则桩长可缩短而节省可观的经费,而桩基础设计将由拉拔力控制转变为压力控制。

#### 6 土壤弹簧对桩基础及桥柱设计之敏感度

基本上,桩基础分析属于土壤与结构互制(土壤-桩-土壤)之行为分析。为仿真桩基础在外力作用下之载重-变形行为,吾人可引进如p-y, t-z及q-w曲线作为桩和土层间的连结接口,即结构分析上所称的土壤弹簧<sup>[3]</sup>,

如图 5 所示。

其中  $p-y$  曲线(图中之  $K_h$ )为仿真桩身与土壤间水平向受力变位行为。 $t-z$  曲线(图中之  $K_{sv}$ )为仿真桩身与土壤间垂直受力变位行为,而  $q-w$  曲线(图中之  $K_v$ )则仿真桩底土壤垂直向受力变位行为。

依考虑模式之不同,桩和土层间连接接口的土壤弹簧,大致可分为三种,一为线弹性模式弹簧,即受力与变位成线性关系。二为日本铁道总合技术研究所(1999),铁道构造物等设计标准、同解说—耐震设计(简称 JNR,1999)中规定之双直线模式弹簧<sup>[10]</sup>,即考虑土壤在某一变位后达到极限强度上限值。第三种为依据 Reese(1994)等人所发展的非线性土壤反力曲线(即  $p-y$ ,  $t-z$ ,  $q-w$  曲线)<sup>[3]</sup>。其中第二种及第三种均考虑土壤具弹塑性行为的观念较符合土壤实际的行为。基本上,上述三曲线之值的大小与土壤性质、桩的劲度以及作用力的大小有关,并非为定值。基桩垂直载重试验除可验证有关所采用之桩承载力(摩擦力及端点支承力)公式之合理性外,另一目的亦可求得单桩分析曲线中之  $t-z$  与  $q-w$  曲线及验证其合理性。而桩侧向载重试验则可求得单桩分析曲线中之  $p-y$  曲线及验证其合理性。

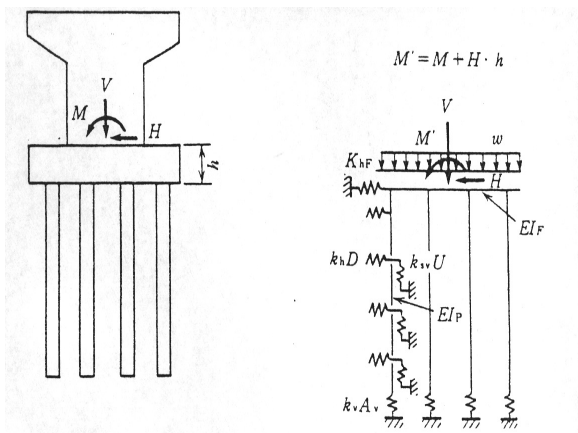


图 5 桩与土层连接接口土壤弹簧示意图(JNR, 1999)

Fig. 5 Sketch of soil spring at interface between piles and soil (JNR,1999)

高铁工程一般制式桥之基础设计步骤如下:

- (1) 建立约 9 跨距之结构模式(含大梁及桥柱、支承等)。
- (2) 假设一组基础等值弹簧  $K1$ (包括等值垂直弹簧  $K_v$ , 两个等值水平弹簧  $K_{hx}$ 、 $K_{hy}$ , 两个等值旋转弹簧  $K_{\theta_x}$ ,  $K_{\theta_y}$  及一个等值扭转弹簧  $K_t$ ), 输入连结于结构模式进行结构分析, 可得到一组柱底力(含轴力、弯矩、剪力及扭矩)供基础设计用。
- (3) 建立基础模式(含桩帽及基桩)及连结桩与土层接口的土壤弹簧( $p-y, t-z, q-w$  曲线)。
- (4) 输入柱底力于基础模式中, 求得基础之应力(含轴

- 力、弯矩、剪力及扭矩)及基础变位量(位移及转角)。
- (5) 由柱底力除以基础变位量可得基础之等值弹簧  $K2$ 。
- (6) 若  $K2 \neq K1$ , 则重新输入  $K2$  于结构模式中, 重复步骤(2)至(5), 经数次迭代至收敛即可得到一组最后的基础等值弹簧及基础之应力及变位, 以为基桩及桩帽之配筋设计。

基础等值弹簧为桥梁进行整体结构分析非常重要的参数, 它会影响到结构的周期, 桥柱的配筋量, 柱底力的大小, 及上构的变位与转角等。而由上述之步骤可知基础等值弹簧之值与土壤弹簧( $p-y, t-z, q-w$  曲线)之值有密切的关联性。因此土壤弹簧之正确合理性会影响到整体结构分析的结果。

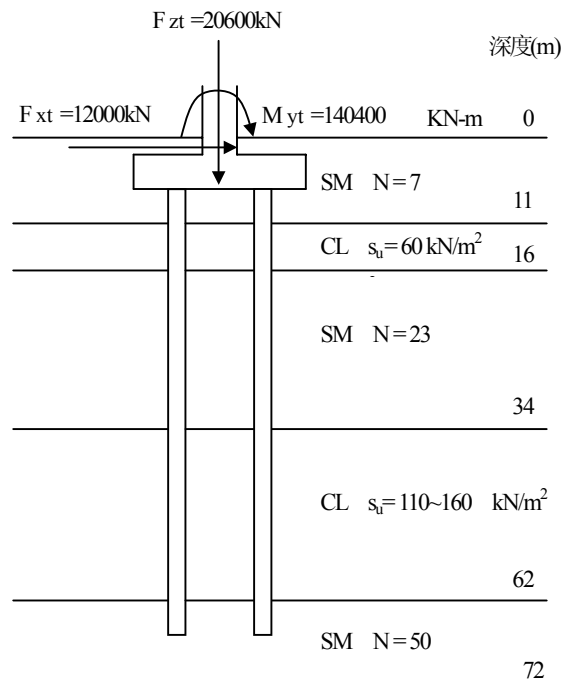


图 6 土壤参数对桩基础设计敏感度分析案例

Fig. 6 Case study on sensitivity of soil spring to the design of piles foundation

今以一案例说明土壤弹簧对桩基础设计之敏感度<sup>[11]</sup>, 如图 6 所示为一包含 4 支桩径为 2.0m, 桩长 59m 之桩群, 承受大地震的 12000kN 水平作用力。桩帽大小为 10×10m, 桩的中心距为 8.5m, 而群桩效应为 0.78。桩与桩帽假设为固接且不容许旋转。地层状况包含交互出现之砂土与粘土层如图所示。假若土壤之强度与弹簧劲度以 SPT N 值表示, 在地表下深度 10m 减小为原有之三分之一, 此意味着表层砂土层因土壤液化, 其土壤之强度与侧向劲度(即水平地盘反力系数)折减为原来之三分之一, 则桩长需增加 4m 及桩头配筋量需增加 50% 才能符合设计规范之要求。另一方面, 若土壤之强度不变, 惟沿基桩全长之土壤侧向劲度折减为原来之三分之一, 则桩长需增加 2m 及桩头配筋量需增加 40% 才

能符合设计规范之要求。其结果如表 2 所示。

表 2 土壤弹簧改变对桩基础设计之敏感度

Table 2 Sensitivity on change of soil spring to pile foundation design

土壤弹簧改变	桩长	桩头配筋量
表层 10m 砂土层之强度与侧向弹簧劲度均折减为原来之 1/3	+4m	+50%
土壤强度不变, 惟沿基桩全长之土壤侧向弹簧劲度折减为原来之 1/3	+2m	+40%

如前所述, 反应一完全的结构-基础-土壤互制系统经常以基础等值弹簧代替土壤来进行分析, 包括等值垂直弹簧  $K_v$ , 等值水平弹簧  $K_h$ , 等值旋转弹簧  $K_\theta$  以及等值扭转弹簧  $K_t$ 。以图 6 相同的桩群为例来显示土壤参数(基础等值弹簧)对上部结构设计的敏感度。对于制式桥桥柱高度 8m, 12m 与 16m 所需之桥柱配筋比分别为 2.05%, 2.40% 与 2.74%。若等值垂直弹簧与等值旋转弹簧不变而将等值水平弹簧劲度减小为原来之 1/4, 则桥柱的配筋量将分别减少 21%, 3% 与 0%。若等值水平弹簧不变而将等值垂直弹簧与等值旋转弹簧劲度减小为原来之 1/4, 则桥柱的配筋量将分别减少 17%, 14% 与 3%。其结果示于表 3, 表中亦显示结构基本周期随着基础等值弹簧改变而改变。

表 3 基础等值弹簧改变对桥柱配筋量的影响

Table 3 reinforcement required in bridge piers as affected by change in equivalent soil springs

制式桥 桥柱为矩形断面 长×宽=2.4m×2.8m  
 $K_v=8 \times 10^6 \text{ kN/m}$ ,  $K_h=4 \times 10^5 \text{ kN/m}$ ,  $K_\theta=1 \times 10^8 \text{ kN-m/rad}$

柱高, m	基础等值弹簧 $K_v, K_h, K_\theta$	结构基本周期, 秒	桥柱配筋量, 配筋比, %
8	$K_v, K_h, K_\theta$ 不变	0.87	2.05
	$K_v, K_\theta$ 不变 $K_h$ 为原来之 1/4	1.13	1.63(-21%)
	$K_h$ 不变 $K_v, K_\theta$ 为原来之 1/4	1.05	1.71(-17%)
12	$K_v, K_h, K_\theta$ 不变	1.29	2.40
	$K_v, K_\theta$ 不变 $K_h$ 为原来之 1/4	1.48	2.32(-3%)
	$K_h$ 不变 $K_v, K_\theta$ 为原来之 1/4	1.51	2.05(-14%)
16	$K_v, K_h, K_\theta$ 不变	1.78	2.74
	$K_v, K_\theta$ 不变 $K_h$ 为原来之 1/4	1.93	2.74(0%)
	$K_h$ 不变 $K_v, K_\theta$ 为原来之 1/4	2.03	2.65(-3%)

而对于桥柱高 8m 进行等值扭转弹簧  $K_t$  之敏感度分析发现改变  $K_t$  对桥柱配筋影响不大。

以上之分析显示减小土壤劲度将增加基桩的配筋量但减少桥柱的配筋量。采用保守的土壤参数并不全然趋向保守。因此, 设计用的土壤参数必须取自代表性土层与可靠的现地与试验室试验结果。当地的经验与由全尺寸的载重试验与量测结果及回馈分析扮演基础设计重要的角色<sup>[1]</sup>。

## 7 结 论

(1) 台湾高速铁路桥梁基础设计时详加考量特殊地盘效

应、群桩效应、桩帽侧向阻抗及土壤液化地层滑移等因素。

- (2) 在特殊地盘分析基础变位及应力时, 除需考虑上构的惯性力外, 尚需额外考虑土壤动态地盘震动放大效应所引致的作用力。由于两者外力所产生的变位有相位差, 其最大值不会同时发生, 因此在叠加两者的变位及应力时, 应将惯性力所引致的变位量或应力乘以一修正系数。
- (3) 基础设计考虑群桩效应时, 经评估加拿大基础工程手册规范较为保守, 日本国铁规范次之, 而日本道路协会规范相对则较不保守。
- (4) 在同时考虑桩帽的惯性力及上覆土的荷重下, 桩基础设计考量桩帽侧向阻抗应属合理, 唯尚需做好桩帽四周回填土壤之品质管控。
- (5) 在倾斜地盘地震情况下, 土壤液化地层滑移时有案例发生, 目前有关其发生机制不确定之因素仍然甚多。依分析, 高铁工程土壤液化地层滑移之水平力相较于地震力为小, 并不会控制基础设计的结果。
- (6) 依高铁前期基桩载重试验结果, 基桩受拉拔时之桩身摩擦力与垂直受压时桩身摩擦力之比值介于 0.62 至 1.05 之间远大于规范规定之 0.4。
- (7) 土壤弹簧  $p-y$ 、 $t-z$  及  $q-w$  曲线与基础等值弹簧有密切关连。因此土壤弹簧之正确合理性会影响到桥梁整体结构分析的结果。采用保守的土壤参数并不全然趋向保守。设计用的土壤参数必须取自代表性土层与可靠的现地与试验室试验结果。当地的经验与由全尺寸的载重试验与量测结果及回馈分析扮演基础设计重要的角色。

## 志谢

本文承蒙台湾高铁公司 C291 标联合承揽及驻地工程司同意发表, 特此感谢。另亚新公司莫若楫总经理、黄南辉副总经理及焦中和协理于本文撰写过程中给予宝贵建议及指正, 以及钟贤庆计画经理提供相关参考资料等, 亦致上诚挚谢意。

## 参考文献:

- [1] Moh Z C. Geotechnical issues in design and construction of viaducts of the Taiwan High Speed Rail[A]. Proc of the 12th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering[C]. Singapore. 2003, Keynote speech.

- [2] Taiwan High Speed Rail Corporation (THSRC). Volume 9, Design Specification〔S〕. Taipei. 2000.
- [3] Reese L C. Analysis of Groups of Piles〔J〕.深基础承受轴向力与侧向力之设计与计算机分析研讨会. 台北, 1994. 10-1~10-67.
- [4] 范嘉程. 承受横向力之群桩分析〔J〕. 地工技术第 66 期, 1997,85-96.
- [5] 日本道路协会,道路桥示方书、同解说,IV下部构造编.〔S〕.日本东京,1996.
- [6] Canadian Geotechnical Society. Canadian Foundation Engineering Manual, Part 3, Deep Foundation,〔S〕. 1978. 108 pages.
- [7] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Standard Specifications for Highway Bridges, 16th Edition〔S〕. 1996. 78-91.
- [8] 铁道总合技术研究所. 铁道构造物等设计标准、同解说—基础构造物/抗土压构造物〔S〕.丸善株式会社,日本东京, 2000. 213-214.
- [9] Hashash Y M A, Hook J J, Schmidt B and Yao J I -C. Seismic design and analysis of underground structures, Tunneling and Underground Space Technology 16〔M〕. 2001. 247-293.
- [10] 铁道总合技术研究所. 铁道构造物等设计标准、同解说—耐震设计〔S〕丸善株式会社,日本东京,1999. 275-277.