

# 考虑徐变效应的斜拉桥钢—混结合段受力分析

揣宏磊

(中铁十九局集团第一工程有限公司, 辽宁 辽阳 111000)

**摘要:**为研究徐变效应对空间受力结构的影响,以某斜拉桥钢—混结合段为工程背景,从应力—应变相关性出发,选取指数形徐变度函数,构建混凝土在徐变作用下的应力—应变关系式,将新构建的本构方程嵌入 Ansys APDL 参数化模型中,对比分析徐变效应对钢—混结合段受力的影响。结果表明:徐变效应可显著改变结合段传力机理,削减承压板的直接传力效果,改变剪力块的传力方式,在徐变影响下,结合段顶板正应力值剧烈增长,剪力块边角区域出现应力集中,高应力区域面积扩大,同时徐变效应会改变剪力块传力比,考虑徐变效应下钢—混结合段同一截面上混凝土分配到的总荷载更高。

**关键词:**斜拉桥;钢—混结合段;徐变效应;混凝土本构关系;传力机理;顶板正应力

**中图分类号:** U448.27

**文献标志码:** A

目前中国修建的大跨径斜拉桥主梁一般采用钢混组合体系的结构形式。组合体系的结构形式充分利用钢结构材料特性优点,自重轻,有效减小了桥梁恒载,其跨越能力也得到显著提升,同时混凝土部分能有效加强截面抗压强度,并提升局部稳定性。钢—混结合段区域受力复杂,应力传递不流畅,应力集中现象无法避免,国内外学者对此开展了大量的理论与试验研究。如韩建秋等<sup>[1]</sup>通过开展局部模型加载试验,对钢格室顶板影响钢混段受力情况进行了研究,分析钢格室应力传递规律及其极限破坏形态;黄侨等<sup>[2]</sup>使用 Abaqus 有限元软件建立了某斜拉桥钢—混结合段有限元模型,计算分析了正常使用阶段最不利工况下各板件的应力分布情况;刘凯等<sup>[3]</sup>以石首长江大桥为背景,通过有限元模型计算获取了钢—混结合段典型截面的内力,编制非线性分析计算程序得到了关心截面的抗弯刚度及极限承载力;周立兵等<sup>[4]</sup>对比了不同钢—混连接形式,提出采用“承压+传剪”的复合传力模式以提升斜拉桥钢—混结合段的技术性能。目前研究主要集中在钢混区域受力机理分析及构造优化方面,对于徐变效应的影响考虑较少<sup>[5-7]</sup>。徐变效应作为长期时变效应,能显著改变钢混局部段应力分布及传力特点,对结构强度及刚度均有直接影响,因此有必要开展相关方面的研究。该文以某大跨径斜拉桥为研究对象,探究徐变效应对钢—混结合段受力的影响规律,以期为

钢—混组合体系斜拉桥徐变效应分析提供借鉴。

## 1 基于应力—应变时程相关性的徐变效应本构模型

目前徐变计算中先天理论、老化理论作为有限元软件中主要计算依据,其实际应用过程中存在较大局限性,不适用于对空间受力结构进行徐变效应分析。该文从应变与应力时程相关性出发,建立应力—应变时程计算公式<sup>[8]</sup>,见式(1):

$$\epsilon(t) = \sigma(t_0) \left[ \frac{1}{E(t_0)} + C(t, t_0) + \int_{t_0}^t \frac{1}{E(t_i)} + C(t, t_i) \right] d\sigma(t_i) \quad (1)$$

式中: $\epsilon(t)$ 为任意 $t$ 时刻混凝土总应变; $\sigma(t_0)$ 为 $t_0$ 时刻混凝土应力; $E(t_0)$ 为混凝土 $t_0$ 时刻弹性模量; $C(t, t_0)$ 为加载龄期为 $t_0$ 的混凝土在任意时刻的徐变度。

由式(1)可以看出:徐变效应下混凝土应变主要由两部分组成:一部分为线弹性应变 $\epsilon_e(t)$ ;另一部分为非线性徐变应变 $\epsilon_c(t)$ 。可分别表示为:

$$\epsilon_e(t) = \frac{\sigma_{t_0}}{E_{t_0}} + \int_{t_0}^t \frac{1}{E_{t_i}} d\sigma(t_i); \epsilon_c(t) = \sigma(t_0) C(t, t_0) + \int_{t_0}^t C(t, t_i) d\sigma(t_i) \quad (2)$$

徐变是一种随时间连续作用的效应,在任意时间

范围 $[t_1, t_2]$ 内可分为 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_n$ 等若干个时间段<sup>[9]</sup>,当 $\Delta t_n$ 无限小时,由积分中值定理有:

$$\Delta \epsilon_e(t_n) = \frac{\Delta \sigma_n}{E t_{n-0.5}}; \Delta \epsilon_c(t_n) = C(t, t_{n-0.5}) \Delta \sigma_n \quad (3)$$

式中: $\Delta \epsilon_e(t_n)$ 、 $\Delta \epsilon_c(t_n)$ 分别为 $t_n$ 时间段内混凝土弹性应变增量、徐变应变增量; $\Delta \sigma_n$ 为 $t_n$ 时间内应力增量; $E$ 为弹性模量。

徐变发生过程中任意时刻 $t$ 混凝土应力可以看成该时刻之前应力增量叠加值,结合式(3),则 $t_n, t_{n+1}$ 时刻混凝土徐变应变可表示为:

$$\epsilon_c(t_n) = C(t_n, t_0) \Delta \sigma_0 + C(t_n, t_{1-0.5}) \Delta \sigma_1 + \dots + C(t_n, t_{n-0.5}) \Delta \sigma_n \quad (4)$$

$$\epsilon_c(t_{n+1}) = C(t_{n+1}, t_0) \Delta \sigma_0 + C(t_{n+1}, t_{1-0.5}) \Delta \sigma_1 + \dots + C(t_{n+1}, t_{n+1-0.5}) \Delta \sigma_{n+1} \quad (5)$$

式(5)与式(4)相减可得:

$$\Delta \epsilon_{c(n+1)} = C(t_{n+1}, t_0) \Delta \sigma_0 + C(t_{n+1}, t_{1-0.5}) \Delta \sigma_1 + \dots + C(t_{n+1}, t_{n+1-0.5}) \Delta \sigma_{n+1} - C(t_n, t_0) \Delta \sigma_0 - C(t_n, t_{1-0.5}) \Delta \sigma_1 - \dots - C(t_n, t_{n-0.5}) \Delta \sigma_n \quad (6)$$

引入朱氏徐变度拟合公式,见式(7):

$$C(t, t_0) = \sum \varphi_j(t_0) [1 - e^{-r_j(t-t_0)}] \quad (7)$$

式中: $\sum \varphi_j(t_0)$ 、 $r_j$ 为与加载龄期相关的参数,可根据不同情况取值。

联立式(6)~(7)可得:

$$\Delta \epsilon_{c(n+1)} = \sum (1 - e^{-r_j \Delta t_{n+1}}) w_{j,n+1} + C(t_{n+1}, t_{n+1-0.5}) \Delta \sigma_{n+1} \quad (8)$$

令: $w_{j,n+1} = \Delta \sigma_0 \varphi_j(t_0) e^{-r_j(t_n - t_0)} + \Delta \sigma_1 \varphi_j(t_{1-0.5}) \cdot e^{-r_j(t_n - t_{1-0.5})} + \dots + \Delta \sigma_n \varphi_j(t_{n-0.5}) e^{-r_j(t_n - t_{n-0.5})}$ ;  $\eta_n = \sum (1 - e^{-r_j \Delta t_n}) w_{j,n}$ ;  $q_n = C(t_n - t_{n-0.5})$ ,将式(8)推广至空间应力状态下,则式(8)可改写为:

$$\Delta \epsilon_{c(n)} = \eta_n + q_n A \Delta \sigma_n \quad (9)$$

式中: $\Delta \epsilon_{c(n)}$ 为空间应变增量; $A$ 为泊松比影响矩阵; $\Delta \sigma_n$ 为空间应力矩阵。

式(9)即为混凝土在徐变效应下的应力—应变关系表达式,在进行徐变效应分析时,将该式输入至混凝土本构关系中即可计算徐变效应。

## 2 工程概况及有限元建模

以某长江大桥钢—混结合段为研究对象,钢—混结合段选用开孔板作为连接剪应力块的格室前后耐压

板。制作工艺为在支撑架上的各自工程中,在钢格室内添加混凝土以及制作邻近 PC 箱梁段,再挑选适合的温度将二者组装。钢格室为封闭式箱形构造,长 2.0 m,高 0.8 m。将钢箱梁加强段与标准钢箱梁段相互连接,并灌入混凝土。钢箱梁加强段选用在 U 肋正中间增设 T 形加劲的方法,长 2.8 m。为确保钢箱梁与混凝土预制箱梁紧密联系,在结合部设有预应力钢束;为确保混凝土浇注的密实性,在钢格室顶板上设立浇注孔,隔板上设定连通孔,格室顶、底面角点还各自设定了出气孔和压浆孔。钢—混结合段结构纵断面如图 1 所示,钢—混结合段细部构造如图 2 所示。

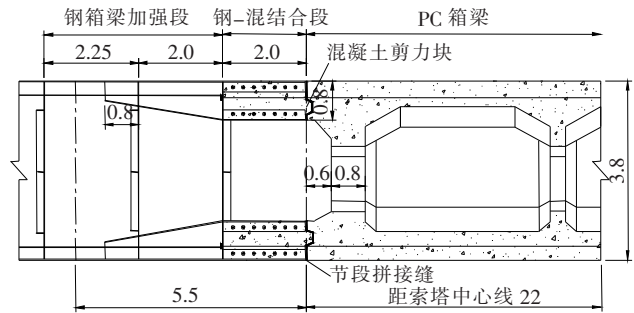


图 1 钢—混结合段纵断面(单位:m)

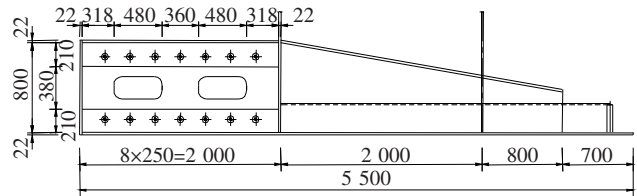


图 2 钢—混结合段细部构造(单位:mm)

钢—混结合段的位置,其受力显示出典型的空间承力状态。结构中板件之间连接较多,力传递比较复杂。因此,需要创建一个精细化的空间有限实体模型进行分析。混凝土这一部分选用 Solid65 单元进行模拟,并选择 Link8 杆单元作为预应力钢束分析单元。通过建立约束方程将两类单元节点自由度进行相应约束。箱梁由 Shell63 壳单元模拟。MPC 刚性单元实现壳单元与实体单元之间自由度过渡。实体模型约束其纵桥向与竖向位移,同时也将箱梁格室和结合段在纵桥向的自由度进行耦合。通过剪力块与齿槽之间的联系保证了竖向变形协调。将竖向面荷载施加在格室的顶板上,借用此种方式模拟由剪应力块传递的剪力。在格室断面处施加桥梁轴向荷载,模拟箱梁格室传递的轴力。

参考文献[10],对式(7)选取以下参数,并将其代入混凝土徐变应力—应变关系式中,为便于编程,建模

全部采用 APDL 参数化形式,混凝土本构关系采用该文中新模型,钢筋及钢箱梁部分采用理想的双折线弹塑性模型。建模时分为两个荷载步:第一个荷载步设置外力荷载,根据整体模型计算结果,轴力取 3 295 kN,剪力取 1 022 kN;第二个荷载步设置为徐变荷载,作用时间取 3 650 d,每 10 d 设置一荷载子步,共有 365 个荷载子步。

$$C(t,t_0)=C_1(1+9.2t_0^{-0.45})[1-e^{-0.3(t-t_0)}]+C_2(1+1.7t_0^{-0.45})[1-e^{-0.005(t-t_0)}]$$

(10)

式中: $C_1$ 、 $C_2$  为与加载龄期相关的参数。

利用有限元软件计算徐变效应的主要流程如图 3 所示。计算过程如下:

- (1) 建立参数化有限元模型,施加荷载与边界条件,拟定徐变荷载以及相应的荷载子步。
- (2) 求解初始弹性应力—应变,将式(8)中的值存储在对应的子荷载步中,并求解各子步中的应力—应变增量。
- (3) 进行迭代循环求解,当迭代步数小于计算龄期时,计算结束,进入后处理,否则重复(2)。

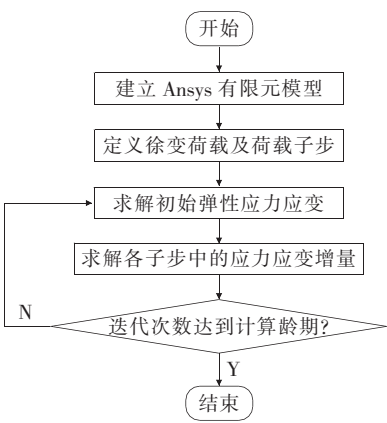


图 3 考虑徐变效应的有限元求解流程

3 徐变效应对结合段受力的影响

由文献[11]可知:徐变效应的变形前期快,后期趋于稳定,徐变 90 d 时基本能达到总变形的 85% 以上,3 年时基本趋于稳定。该文取 3 年徐变效应作为研究对象,求解该工况下顶板位置钢结构部分及混凝土部分的正应力结果。

以混凝土箱梁与钢—混结合段的节段拼接缝为起点,钢箱梁加强段为正方向建立应力变化曲线的横坐标轴,表 1 为考虑徐变效应和不考虑徐变效应下钢—混结合段的正应力有限元计算结果。

表 1 徐变效应对钢—混结合段正应力的影响

与拼接缝 距离/m	考虑徐变效应		不考虑徐变效应	
	钢结构应 力/MPa	混凝土应 力/MPa	钢结构应 力/MPa	混凝土应 力/MPa
0.25	-36.53	-4.63	-17.32	-2.33
0.50	-56.12	-4.43	-24.62	-1.80
0.75	-61.54	-4.21	-26.81	-1.62
1.00	-67.66	-4.09	-28.54	-1.54
1.25	-71.31	-3.84	-29.67	-1.47
1.50	-75.64	-3.69	-32.18	-1.41
1.75	-81.15	-3.58	-38.96	-1.35
2.00	-84.39	-3.12	-43.85	-1.22

由表 1 可知:考虑徐变效应后,顶板位置钢结构和混凝土应力大幅增长,钢结构正应力分布范围由 17.32~43.85 MPa 增长至 36.53~84.39 MPa,其中,考虑徐变效应后的最大正应力增长范围出现在距离钢—混结合段与混凝土箱梁节段拼接缝的 1.5 m 处;混凝土正应力分布范围由 2.33~1.22 MPa 增长至 4.63~3.12 MPa,其中最大正应力增长范围出现在距离钢—混结合段与混凝土箱梁节段拼接缝的 0.5 m 处。两者应力变化规律大体相同。在钢—混结合段区域,无论是钢结构还是混凝土正应力都出现了较大的波动,而其他部位应力变化较为稳定,说明徐变效应对剪力连接件的传力效果有明显影响。

钢—混结合段的传力机理为钢箱梁通过承压板将不同比例的应力传递到钢—混结合段中,由钢格室中的剪力块将应力传递至钢—混结合段混凝土,最终钢—混结合段混凝土再将不同比例的应力传递至混凝土箱梁。为了探明徐变效应对于剪力连接件影响的具体表现形式,根据有限元计算模型,并结合钢—混结合段的主要传力路径,分别提取顶板、腹底板以及斜底板 3 处位置的剪力块 Von Mises 应力计算结果(图 4)。

由图 4 可知:考虑徐变效应后,应力在各位置剪力块上的分布均发生了明显变化,徐变效应使得剪力块边角区域出现应力集中,应力波动现象加剧,高应力区域面积扩大;特别是腹底板剪力块,高应力区域从板件中间向边角扩散的现象尤为明显,剪力件整体处于受力更不利状态。

剪力块作为大跨径斜拉桥钢—混结合段传力的重要构件,承受着钢板与混凝土之间由剪切变形产生的剪切应力,其刚度大小决定了承受剪切力的能力,也影响了钢—混结合段的传力效果,为深入研究徐变效应

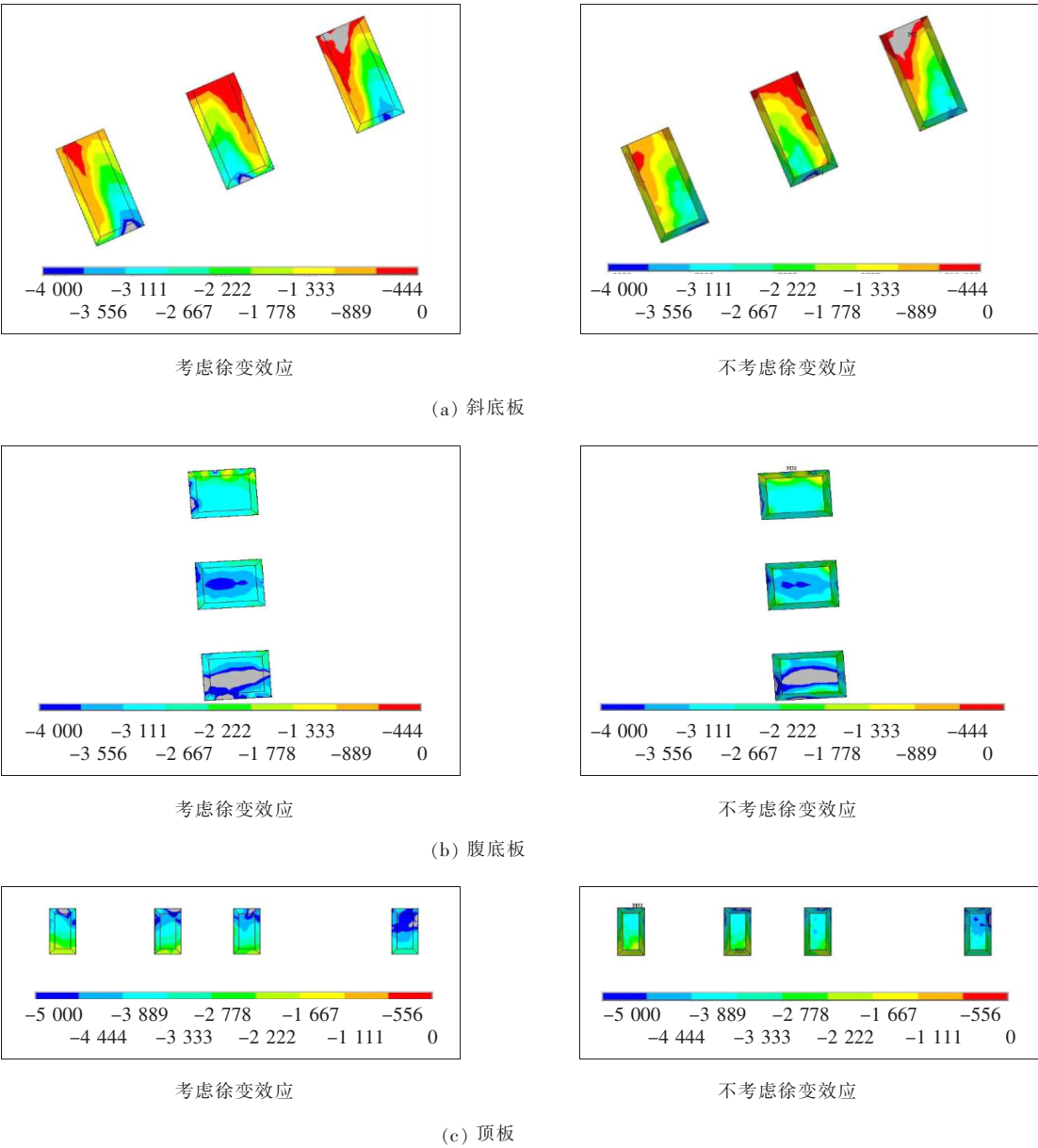


图 4 不同位置剪力块应力对比结果(单位:kPa)

下剪力块刚度对钢—混结合段传力效果的影响,将原有限元模型 1 中的剪力块刚度提升为原来的 2 倍建立模型 2,并定义剪力块的传力比为  $\delta$ ,即钢—混结合段中某截面处混凝土上分配的总荷载与钢板上分配的总荷载的比值。

图 5 为模型 1 与模型 2 分别在考虑徐变作用与不考虑徐变作用下的剪力块传力比曲线。由图 5 可知:刚度较大的剪力块传给混凝土的总荷载会稍高一些,但刚度对剪力块传力比的影响较小;对比同一刚度模型分别在不考虑徐变效应和考虑徐变效应下的传力比曲线可知,徐变效应可以显著影响剪力块的传力比,考虑徐变效应作用下,混凝土分配到的总荷载会较高一

些,但总体传力比仍小于 1。

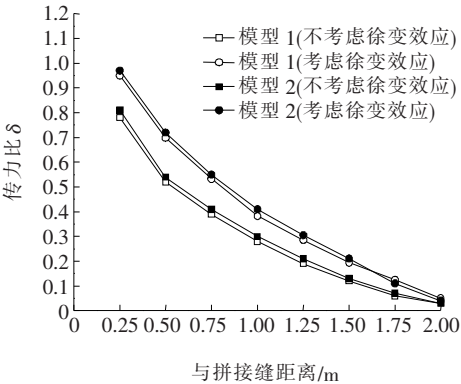


图 5 不同刚度剪力块传力比



综上所述,徐变效应对剪力块受力影响较大,其不利因素需要在实际工程中着重关注,不可忽视。

## 4 结论

基于应力—应变时程相关性,给出了基于时程的混凝土徐变本构关系式,并将其应用于某斜拉桥钢—混结合段,对比分析了徐变效应的影响,得到以下结论:

(1) 基于应力—应变相关性关系,选择指数形徐变度函数,利用应变叠加原理,可以构建混凝土徐变效应的本构关系式,该本构方程能与 Ansys 二次开发平台实现无缝对接,可较为精确地计算空间受力结构的徐变效应。

(2) 徐变效应可显著改变钢—混结合段传力机理,以该桥钢—混结合段为例,在徐变影响下,承压板的直接传力效果大幅降低,部分荷载通过剪力连接件传递至混凝土区域。

(3) 徐变效应对钢—混结合段受力影响剧烈,以该桥钢—混结合段为例,钢结构部分和混凝土部分顶板位置正应力均有大幅增长,同时剪力块边角位置出现应力集中,高应力区域面积扩大。

(4) 钢—混结合段中剪力块的刚度对传力比的影响较小,而徐变效应可以显著影响剪力块在钢—混结合段中的传力比,考虑徐变效应作用下混凝土分配到的总荷载会更高,但总体传力比仍小于1。

## 参考文献:

[1] 韩建秋,顾奕伟,商程宇,等. 钢格室顶板对斜拉桥结合段

受力性能的影响研究[J]. 桥梁建设,2020,50(4):61—65.

[2] 黄侨,李俊方,李文贤,等. 斜拉桥钢桥塔承压式钢—混结合段有限元分析[J]. 公路交通科技,2020,37(1):50—57.

[3] 刘凯,裴炳志,张门哲,等. 混合梁斜拉桥钢—混结合段附近区域梁段刚度和承载能力的合理分布研究[J]. 中外公路,2019,39(6):75—81.

[4] 周立兵,丁望星,张家元. 斜拉桥主梁钢—混结合段技术性能提升关键技术[J]. 桥梁建设,2019,49(2):30—35.

[5] 赵金霞,白凯,廖原. 嘉鱼长江公路大桥钢箱梁设计[J]. 中外公路,2020,40(5):172—176.

[6] 陈君,黄国红,徐天,等. 混合连续梁桥钢混结合段局部应力分布及传力机理分析[J]. 山东交通学院学报,2020,28(2):24—32.

[7] 姚亚东,杨永清,刘振标,等. 大跨度铁路钢箱梁混合斜拉桥钢混结合段模型试验研究[J]. 铁道学报,2015,37(3):79—84.

[8] 姚亚东,么超逸,杨永清. 铁路斜拉桥钢混结合段的收缩徐变行为分析[J]. 铁道学报,2020,42(7):148—154.

[9] 孙雨,吴婧姝,泮忠元. 某核电站安全壳预应力混凝土收缩和徐变分析[C]. 第六届全国预应力结构理论与工程应用学术会议,2010.

[10] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997.

[11] 姚亚东. 有格室前后承压板式钢混结合段静力行为研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.

[12] 倪健. 钢混结合段局部受力性能研究[J]. 城市道桥与防洪,2020(2):54—57,74,9—10.

[13] 吴斌,王亚飞. 自锚式悬索桥桥塔钢—混结合段局部受力分析[J]. 桥梁建设,2013,43(3):54—59.